

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών Και Μηχανικών Υπολογιστών τομέας σύστηματών μεταδόσης πληροφορίας και τεχνολογίας υλικών

Εξομοίωση Αμιγώς Οπτικής Λογικής Πύλης ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟΥ Ή με Χρήση του Συμβολόμετρου Mach-Zehnder

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Χρήστου Π. Τσεκρέκου

Επιβλέπων: Ηρακλής Αβραμόπουλος Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2003



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Εξομοίωση Αμιγώς Οπτικής Λογικής Πύλης ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟΥ Ή με Χρήση του Συμβολόμετρου Mach-Zehnder

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Χρήστου Π. Τσεκρέκου

Επιβλέπων: Ηρακλής Αβραμόπουλος Αναπληρωτής Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 17^{η} Ιουλίου 2003.

..... Ιάκωβος Βενιέρης Αναπληρωτής Καθηγητής Νικόλαος Ουζούνογλου Καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2003

.....

ΧΡΗΣΤΟΣ Π. ΤΣΕΚΡΕΚΟΣ

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

© 2003 – All rights reserved

Στους γονείς μου Παναγιώτη και Ζωή

Ευχαριστίες

Η διπλωματική αυτή εργασία σηματοδοτεί το τέλος των σπουδών μου ως προπτυχιακού φοιτητή στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Πραγματοποιήθηκε κατά το 10° εξάμηνο φοίτησης και απετέλεσε ίσως τον καλύτερο τρόπο λήξης της περιόδου αυτής της ζωής μου τόσο λόγω του μεγάλου επιστημονικού της ενδιαφέροντος όσο και του περιβάλλοντος στο οποίο διεξήχθηκε, δηλαδή το εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών.

Με την ευκαιρία αυτή θα ήθελα να εκφράσω και γραπτώς τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ηρακλή Αβραμόπουλο, υπεύθυνο του εργαστηρίου Φωτονικών Επικοινωνιών, για την ευκαιρία που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα της σύγχρονης τεχνολογίας καθώς και για τη σημαντική επιστημονική βοήθειά του στη διεκπεραίωση της εργασίας αυτής. Οι παρατηρήσεις του αποδείχθηκαν σε όλες τις περιπτώσεις θεμελιώδους σημασίας προς την κατεύθυνση του κύριου βασικού επιστημονικού στόχου της εργασίας.

Επίσης σημαντική ήταν η συνεργασία μου με το Λέκτορα του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης Κυριάκο Ζωηρό. Οι προτάσεις του για τη θεωρητική αντιμετώπιση του προβλήματος και η συμβολή του στην κατανόηση των αποτελεσμάτων συνέβαλαν καθοριστικά στη σωστή αντιμετώπισή του. Τον ευχαριστώ πολύ.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες του εργαστηρίου Φωτονικών Επικοινωνιών Κωνσταντίνο Γιαννόπουλο, Νίκο Πλέρο και Λεόντη Σταμπουλίδη για τη συνεχή προθυμία και διάθεσή τους να βοηθήσουν. Σε πολλές περιπτώσεις η συμβολή τους ήταν σημαντική. Επιπλέον θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω και τους υποψήφιους διδάκτορες Κωνσταντίνο Βυρσωκινό, Ευστράτιο Κεχαγιά και Δημήτρη Τσιώκο. Η παρουσία τους στο εργαστήριο συμβάλλει στη δημιουργία ενός ιδανικού περιβάλλοντος εργασίας που προάγει τη συνεργασία και τη φιλία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ και να εκφράσω την εκτίμηση μου προς τον υποψήφιο διδάκτορα Γιώργο Θ. Κανέλλο, μέλος του εργαστηρίου Φωτονικών Επικοινωνιών. Η συνεχής συνεργασία μας με βοήθησε ουσιαστικά τόσο στην επίλυση πρακτικών προβλημάτων που αντιμετώπισα κατά τη διεκπεραίωση της εργασίας όσο και στην καλύτερη κατανόηση της Φωτονικής Τεχνολογίας.

Χρήστος Π. Τσεκρέκος

Αθήνα, 14 Ιουλίου 2003

Περιεχόμενα

Περίληψη				
Al	bstract			
Eı	σαγωγή13			
1	Αμιγώς οπτικές συμβολομετρικές διατάξεις με ημιαγώγιμο οπτικό			
	ενισχυτή16			
	1.1 Συμβολόμετρο Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Interferometer-MZI)18			
	 1.2 Μη Γραμμικό Συμβολόμετρο Υπερύψηλων Ταχυτήτων (Ultrafast Nonlinear 			
	Interferometer-UNI)			
	 1.3 Ενισχυτής Laser Ημιαγωγού σε Καθρέφτη Βρόχου (Semiconductor Laser 			
	Amplifier in a Loop Mirror-SLALOM)25			
	1.4 Υλοποίηση αμιγώς οπτικών λογικών πυλών με χρήση των			
	1.5 συμβολόμετρων27			
	1.5.1 Λογική πύλη ΚΑΙ (AND)28			
	1.5.2 Λογική πύλη ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟΥ Ή (XOR)			
	1.6 Χαρακτηρισμός των θυρών εξόδου των αμιγώς οπτικών διακοπτών 30			
2	Ημιαγώγιμος Οπτικός Ενισχυτής (Semiconductor Optical Amplifier-			
	SOA)			
	2.1 Μαθηματικό μοντέλο για τον ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή34			
	2.2 Αριθμητική επίλυση του μαθηματικού μοντέλου42			
	2.3 Εξομοίωση της λειτουργίας του ημιαγώγιμου οπτικού ενισχυτή και			
	αποτελέσματα48			
3	Εξομοίωση της λειτουργίας του συμβολόμετρου Mach-Zehnder56			
	3.1 Περιγραφή του προγράμματος εξομοίωσης56			
	3.2 Εξομοίωση της λειτουργίας της αμιγώς οπτικής λογικής πύλης			
	ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟΥ Ή (XOR) 58			
	3.2.1 Λειτουργία της πύλης με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στα 10 Gbps60			

3.	.2.2	Λειτουργία της πύλης με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στα 40 Gbps	.69
3.	.2.3	Συμπεράσματα	76
3.3 П	Ιαραμ	όρφωση των παλμών κατά τη διάδοσή τους στην αμιγώς οπτική πύλη	
Ν	/lach-Z	Zehnder	.79
Παράρτι	ημα		.87
Βιβλιογρ	οαφία	1	.09

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται εξομοίωση της λειτουργίας του συμβολόμετρου Mach-Zehnder ως αμιγώς οπτικής λογικής πύλης ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟΥ Ή (XOR). Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε το πρόγραμμα optical_gate.cpp σε γλώσσα προγραμματισμού C, στο βασικό μέρος του οποίου επιλύεται αριθμητικά το σύστημα των εξισώσεων που περιγράφουν τη διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος στους δύο ημιαγώγιμους οπτικούς ενισχυτές του συμβολόμετρου όπως και τη μεταβολή των κερδών τους.

Στόχος της εξομοίωσης είναι η διερεύνηση της λειτουργίας της οπτικής λογικής πύλης και ο εντοπισμός κάποιων συγκεκριμένων τρόπων με τους οποίους επιτυγχάνεται η βελτιστοποίησή της. Επιχειρείται δηλαδή η διατύπωση κάποιων απλών κανόνων που οδηγούν στην καλύτερη λειτουργία της πύλης, κάτι το οποίο δεν καλύπτεται επαρκώς από την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Επιπλέον, το πρόγραμμα optical_gate.cpp αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο εξομοίωσης, αφού τα εμπορικά προγράμματα εξομοίωσης δεν καλύπτουν επαρκώς τις ανάγκες τέτοιων φωτονικών διατάξεων.

Εκτός από την εξομοίωση της λογικής πύλης ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟΥ Ή (XOR) με χρήση του συμβολόμετρου Mach-Zehnder, περιγράφονται το μη γραμμικό συμβολόμετρο υπερύψηλων ταχυτήτων (UNI) και ο ενισχυτής laser ημιαγωγού σε καθρέφτη βρόχου (SLALOM). Επίσης, το πρόγραμμα optical_gate.cpp χρησιμοποιείται για την εξαγωγή αποτελεσμάτων που βοηθούν στην κατανόηση της λειτουργίας του ημιαγώγιμου οπτικού ενισχυτή και εξηγούν τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζεται από ορισμένες παραμέτρους.

Abstract

In this diploma thesis the simulation of an all-optical XOR gate in a Mach-Zehnder Interferometer (MZI) configuration is performed. For this purpose, the program optical_gate.cpp was developed using C programming language. The most basic part of this program concerns the numerical solution of the set of the equations that describe the propagation of the electromagnetic power through the two semiconductor optical amplifiers (SOAs) of the interferometer as well as the variation of their gains.

The main objective of the simulation is the probing of the optical gate's operation and the pinpointing of some specific actions that lead to its optimization. In other words the statement of some simple rules, which improve the gate's performance, is attempted. This kind of probing is not adequately covered by the existing bibliography. In addition, optical_gate.cpp constitutes an important simulation tool, since the commercially available ones are not sufficient for such photonic configurations.

Besides the simulation of the XOR Mach-Zehnder gate, the Ultrafast Nonlinear Interferometer (UNI) and the Semiconductor Laser Amplifier in a Loop Mirror (SLALOM) are described. Furthermore, optical_gate.cpp is used for the extraction of some results with respect to the semiconductor optical amplifier's operation, aiming to its better understanding and depicting the way it is affected by certain parameters.

Εισαγωγή

Τα τελευταία δέκα χρόνια παρατηρείται μια συνεχής εξάπλωση των δικτύων δεδομένων, που σηματοδοτείται από την πολύ μεγάλη ανάπτυξη του διαδικτύου (Internet) και του παγκόσμιου ιστού (www). Έχει παρατηρηθεί ότι η τηλεπικοινωνιακή κίνηση στο διαδίκτυο διπλασιάζεται κάθε τέσσερις με έξι μήνες. Όσο ο αριθμός των χρηστών των δικτύων δεδομένων μεγαλώνει και όσο περισσότερες υπηρεσίες παρέχονται μέσω των δικτύων, τόσο η απαίτηση για μεγαλύτερο διαθέσιμο εύρος ζώνης γίνεται επιτακτική [2], [4].

Οι οπτικές ίνες, που άρχισαν να χρησιμοποιούνται ήδη από τη δεκαετία του 1960, αποτελούν σήμερα το κυρίαρχο μέσω ενσύρματης μετάδοσης της πληροφορίας. Οι βασικότεροι λόγοι για τους οποίους επικράτησαν είναι το πολύ μεγάλο εύρος ζώνης της τάξης των δεκάδων THz που προσφέρουν και οι πολύ μικρές απώλειες που παρουσιάζουν [1], [3], [4]. Φυσικά τα χάλκινα καλώδια χρησιμοποιούνται ακόμη αφού η πλήρης αντικατάστασή τους από οπτικές ίνες είναι πάρα πολύ δαπανηρή διαδικασία. Ο δεύτερος βασικός τρόπος μετάδοσης της πληροφορίας στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα είναι ο ασύρματος του οποίου η ανάπτυξη είναι επίσης σημαντική. Βέβαια ο ασύρματος δίαυλος δεν προσφέρει τόσο μεγάλο εύρος ζώνης όσο η οπτική ίνα.

Το πραγματικά τεράστιο εύρος ζώνης της οπτικής ίνας δεν είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό από συστήματα στα οποία η επεξεργασία των σημάτων που διαδίδονται στην ίνα επιτελείται και με ηλεκτρονικά μέσα αφού η ταχύτητα μετάδοσης περιορίζεται από την ταχύτητα επεξεργασίας που στις ηλεκτρονικές διατάξεις δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 80 Gbps. Ένα τυπικό ηλεκτρονικό σύστημα, όπως ένας δέκτης, έχει ταχύτητα επεξεργασίας δεδομένων ίση με 40 Gbps. Οι φωτονικές διατάξεις αποτελούν μία απάντηση στο πρόβλημα αυτό.

Στις διατάξεις αυτές η επεξεργασία του σήματος γίνεται με αμιγώς οπτικό τρόπο. Αυτό σημαίνει ότι καθώς το σήμα φτάνει από την οπτική ίνα σε κάποιο δικτυακό κόμβο δεν απαιτείται η μετατροπή του σε ηλεκτρικό ώστε να πραγματοποιηθεί η επεξεργασία του. Η ταχύτητα των φωτονικών διατάξεων που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα σε ορισμένες εφαρμογές ξεπερνά τα 100 Gbps [13] συμβάλλοντας έτσι στην καλύτερη αξιοποίηση του εύρους ζώνης της οπτικής ίνας και

καθιστώντας τη φωτονική τεχνολογία μία αναπτυσσόμενη και πολλά υποσχόμενη εφαρμοσμένη επιστημονική περιοχή.

Όπως προαναφέρθηκε οι φωτονικές διατάξεις χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία των οπτικών σημάτων. Συγκεκριμένα, μπορούν να υλοποιήσουν λογικές πύλες καθώς και λειτουργίες όπως η μεταγωγή (switching), η δρομολόγηση (routing), η μετατροπή μήκους κύματος (wavelength conversion), η πολυπλεξία (multiplexing), η αποπολυπλεξία (demultiplexing), η αναγέννηση οπτικών παλμών (pulse regeneration), η ανάκτηση ρολογιού (clock recovery) κ.ά., οι οποίες πραγματοποιούνται σε δικτυακούς κόμβους [7], [8], [9], [13]. Κύριο συστατικό στοιχείο των φωτονικών διατάξεων είναι τα συμβολόμετρα τα οποία βρίσκουν εφαρμογή ως αμιγώς οπτικοί διακόπτες [7], [8], [13]. Η λειτουργία τους είναι απλή και βασίζεται στο φαινόμενο της συμβολής κυμάτων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξομοιώνεται η λειτουργία μιας αμιγώς οπτικής λογικής πύλης ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟΥ Ή η οποία βασίζεται στο συμβολόμετρο Mach-Zehnder. Η επιλογή της συγκεκριμένης λογικής πράξης έγινε επειδή η υλοποίησή της απαιτεί δύο σήματα ελέγχου και έτσι μπορεί να θεωρηθεί η πιο δύσκολη από τις λογικές πράξεις. Έχοντας εξομοιώσει την πράξη του ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟΥ Ή μπορούν πολύ εύκολα να εξομοιωθούν και οι υπόλοιπες λογικές πράξεις.

Για την εξομοίωση της λογικής πύλης αναπτύχθηκε το πρόγραμμα optical_gate.cpp σε γλώσσα προγραμματισμού C. Το συμβολόμετρο Mach-Zehnder αποτελείται από δύο βραχίονες με έναν ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή ο καθένας [1], [4], [7], [8] και έτσι στο βασικό μέρος του προγράμματος optical_gate.cpp επιλύεται αριθμητικά το σύστημα των μερικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τη διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος στους ενισχυτές και τη μεταβολή των κερδών τους. Για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων χρησιμοποιείται η μέθοδος Euler [5], [6]. Στη συνέχεια εξάγονται τα απαραίτητα εκείνα αποτελέσματα που οδηγούν στην ανάλυση και κατανόηση της λειτουργίας της πύλης. Το πρόγραμμα optical_gate.cpp μπορεί να αποτελέσει αφετηρία για την ανάπτυξη προγραμμάτων εξομοίωσης και άλλων εφαρμογών που υλοποιούνται με τη βοήθεια συμβολομετρικών διατάξεων των οποίων το μη γραμμικό στοιχείο είναι ο ημιαγώγιμος οπτικός ενισχυτής.

Ο κύριος στόχος της εξομοίωσης είναι να βρεθούν κάποιοι απλοί και σαφείς κανόνες, η τήρηση των οποίων θα οδηγεί στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας της

πύλης. Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία δεν υπάρχει κάποια συστηματική μελέτη για τη λειτουργία αμιγώς οπτικών πυλών βασισμένων σε συμβολομετρικές διατάξεις με ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή οπότε τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής έχουν ως στόχο να καλύψουν το κενό αυτό.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας αυτής περιγράφονται τρεις συμβολομετρικές διατάξεις. Πρόκειται για το συμβολόμετρο Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Interferometer-MZI), για το μη γραμμικό συμβολόμετρο υπερύψηλων ταχυτήτων (Ultrafast Nonlinear Interferometer-UNI) και για τον ενισχυτή laser ημιαγωγού σε καθρέφτη βρόχου (Semiconductor Laser Amplifier in a Loop Mirror-SLALOM). Και τα τρία αυτά συμβολόμετρα αποτελούνται από τουλάχιστον έναν ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή. Επιπλέον περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να υλοποιηθούν οι λογικές πύλες ΚΑΙ (AND) και ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟΥ Ή (XOR) με τη βοήθεια των συμβολομετρικών διατάξεων και ορίζονται ορισμένα μεγέθη με βάση τα οποία μπορεί να διαπιστωθεί η σωστή λειτουργία των οπτικών διακοπτών.

Το δεύτερο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στον ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή που αποτελεί βασικό συστατικό στοιχείο τόσο του συμβολόμετρου Mach-Zehnder όσο και των άλλων δύο συμβολόμετρων. Αρχικά περιγράφεται το σύστημα των εξισώσεων το οποίο περιγράφει τη διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος από τον ενισχυτή καθώς και τη μεταβολή του κέρδους του. Στη συνέχεια προτείνεται μια αριθμητική διαδικασία για την επίλυση του συστήματος αυτού. Η αριθμητική αυτή διαδικασία χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα optical_gate.cpp. Στο τελευταίο μέρος του κεφαλαίου αυτού με τη βοήθεια του προγράμματος optical_gate.cpp εξάγονται ορισμένα χρήσιμα αποτελέσματα με στόχο την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του ενισχυτή καθώς και του τρόπου με τον οποίο επιδρούν σε αυτή ορισμένες παράμετροι.

Τα αποτελέσματα της εξομοίωσης της λειτουργίας του συμβολόμετρου Mach-Zehnder ως λογικής πύλης ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟΥ Ή (XOR) παρατίθενται, σχολιάζονται και αναλύονται στο τρίτο κεφάλαιο. Τα συμπεράσματα του κεφαλαίου αυτού αποτελούν ένα σύνολο συγκεκριμένων προτάσεων για την καλύτερη λειτουργία της πύλης. Η πιθανή μελλοντική και συστηματική αξιοποίησή τους σε εργαστηριακό επίπεδο θα αποτελέσει σίγουρα σημαντικό κίνητρο για τη συνέχιση της έρευνας σε αντίστοιχα θέματα.

Κεφάλαιο 1

Αμιγώς οπτικές συμβολομετρικές διατάξεις με ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή

Τα συμβολόμετρα [7], [8], [13] είναι διατάξεις στις οποίες μέσω μιας διαφοράς φάσης επιτυγχάνεται διαφοροποίηση του πλάτους του σήματος εξόδου. Βασίζονται στο φαινόμενο της συμβολής κυμάτων. Συγκεκριμένα όταν η διαφορά φάσης μεταξύ των συμβαλλόμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι μηδέν ή ακέραιο πολλαπλάσιο του 2π (ενισχυτική συμβολή) παρουσιάζεται μεγιστοποίηση του πλάτους του συνολικού κύματος ενώ όταν η διαφορά φάσης είναι περιττό πολλαπλάσιο του π (αναιρετική συμβολή) παρατηρείται μηδενισμός του συνολικού πλάτους.

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει περιγραφή των εξής τριών συμβολόμετρων:

- Συμβολόμετρο Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Interferometer-MZI)
- Μη Γραμμικό Συμβολόμετρο Υπερύψηλων Ταχυτήτων (Ultrafast Nonlinear Interferometer-UNI)
- Ενισχυτής Laser Ημιαγωγού σε Καθρέφτη Βρόχου (Semiconductor Laser Amplifier in a Loop Mirror-SLALOM)

Αναλυτικότερη περιγραφή γίνεται για το συμβολόμετρο Mach-Zehnder αφού στην εξομοίωση που παρουσιάζεται στο τρίτο κεφάλαιο λαμβάνεται υπόψη χρήση αυτού του συμβολόμετρου. Επιπλέον και τα τρία συμβολόμετρα βασίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας οπότε η αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας του ενός καλύπτει σε μεγάλο βαθμό και τη λειτουργία των άλλων δύο.

Το κοινό χαρακτηριστικό των παραπάνω συμβολομετρικών διατάξεων είναι ότι αποτελούνται από δύο οπτικούς δρόμους. Τα δύο σήματα (ένα σε κάθε οπτικό δρόμο) συμβάλλουν στην έξοδο του συμβολόμετρου και επομένως η ισχύς εξόδου εξαρτάται από τη διαφορά φάσης μεταξύ των δύο αυτών οπτικών σημάτων.

Το σήμα σε κάθε οπτικό δρόμο δέχεται μια μη γραμμική επίδραση από ένα μη γραμμικό στοιχείο. Το μη γραμμικό στοιχείο είναι ένας ημιαγώγιμος οπτικός ενισχυτής (Semiconductor Optical Amplifier-SOA) [1], [4], [7], [8] ο οποίος περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο. Στη θέση του ενισχυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε μη γραμμικό στοιχείο όπως μία οπτική ίνα. Στην τελευταία περίπτωση θα χρειαζόταν πολύ μεγάλο μήκος ίνας (~km) καθώς και σήμα ελέγχου πολύ μεγάλης ισχύος (~W) ώστε να επιτευχθεί το απαιτούμενο αποτέλεσμα [10].

Η μη γραμμική επίδραση βασίζεται στο φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης [1], [4]. Με βάση το φαινόμενο αυτό ένα ισχυρό σήμα, που κυματοδηγείται μαζί με ένα ασθενές, επηρεάζει τη στροφή στη φάση του ασθενούς σήματος λόγω της εξάρτησης του δείκτη διάθλασης του υλικού του κυματοδηγού από τη συνολική ισχύ που κυματοδηγείται. Το υλικό του κυματοδηγού μπορεί να είναι είτε διηλεκτρικό όπως στην περίπτωση μιας οπτικής ίνας, είτε ημιαγωγός όπως στην περίπτωση του ημιαγώγιμου οπτικού ενισχυτή. Καθώς λοιπόν μεταβάλλεται ο δείκτης διάθλασης συναρτήσει της συνολικής κυματοδηγούμενης ισχύος, μεταβάλλεται η σταθερά διάδοσης κι επομένως και η φάση του κυματοδηγούμενου ασθενούς σήματος.

Το ισχυρό σήμα αναφέρεται ως σήμα ελέγχου επειδή μέσω της ισχύος του ελέγχεται η στροφή της φάσης του ασθενούς σήματος, το οποίο αναφέρεται ως σήμα εισόδου. Μέσω λοιπόν της μη γραμμικής επίδρασης του ενισχυτή στα σήματα των δύο οπτικών δρόμων, επιτυγχάνεται κάποια επιθυμητή διαφορά στις φάσεις τους, από την οποία εξαρτάται η συμβολή τους στην έξοδο του συμβολόμετρου.

Στις διατάξεις του συμβολόμετρου Mach-Zehnder και του μη γραμμικού συμβολόμετρου υπερύψηλων ταχυτήτων, που περιγράφονται στις παραγράφους 1.1 και 1.2 αντίστοιχα, θεωρείται ότι η κατεύθυνση διάδοσης του σήματος ελέγχου είναι ίδια με αυτή του σήματος εισόδου. Αυτό δημιουργεί την ανάγκη να υπάρχει ένα φίλτρο στην έξοδο των συμβολόμετρων ώστε να διαχωρίζονται τα δύο σήματα. Για την αποφυγή χρήσης φίλτρου στην έξοδο, οι διατάξεις μπορούν να μετατραπούν έτσι ώστε η κατεύθυνση των δύο σημάτων (εισόδου και ελέγχου) να είναι αντίθετη, κάτι το οποίο επιτρέπει και το ενδεχόμενο τα σήματα να έχουν το ίδιο μήκος κύματος [14].

Μετά την παρουσίαση των τριών συμβολόμετρων στις τρεις πρώτες παραγράφους του κεφαλαίου, στην παράγραφο 1.4 περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα συμβολόμετρα αυτά ώστε να υλοποιήσουν οπτικές λογικές πύλες. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στις πύλες KAI (AND) και ΑΠΟΚΛΕΙΣΙΚΟΥ Ή (XOR).

Τέλος στην παράγραφο 1.5 παρατίθενται δύο κριτήρια με τα οποία μπορεί να ελεγχθεί η ποιότητα μεταγωγής των συμβολόμετρων στη λειτουργία τους ως αμιγώς οπτικοί διακόπτες.

1.1 Συμβολόμετρο Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Interferometer-MZI)

Η διάταξη του συμβολόμετρου Mach-Zehnder εικονίζεται στο σχήμα 1.1.1. Αποτελείται από τέσσερις συζεύκτες και δύο ημιαγώγιμους οπτικούς ενισχυτές. Θεωρώντας συζεύκτες 3dB το σήμα εισόδου (\mathbf{E}_{in}) χωρίζεται σε δύο ίσης ισχύος σήματα. Ο συζεύκτης προκαλεί μια διαφορική στροφή φάσης $\frac{\pi}{2}$ ακτινίων ανάμεσα στα σήματα των δύο βραχιόνων του συμβολόμετρου. Με τον όρο διαφορική στροφή φάσης εννοείται η διαφορά στη στροφή της φάσης των δύο σημάτων.



Σχήμα 1.1.1 Διάταξη συμβολόμετρου Mach-Zehnder.

Στην περίπτωση που τα σήματα ελέγχου ($\mathbf{E}_{control}$) είναι ίδια (στην περίπτωση αυτή εμπίπτει και το ενδεχόμενο να μην υπάρχουν σήματα ελέγχου) και δοθέντος ότι οι δύο ενισχυτές έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά, τα οπτικά σήματα στους δύο βραχίονες υφίστανται την ίδια επίδραση από τους ενισχυτές δηλαδή την ίδια μη γραμμική ενίσχυση και στροφή φάσης. Στο συζεύκτη εξόδου προκαλείται ξανά μια διαφορική στροφή φάσης $\frac{\pi}{2}$, έτσι ώστε η συνολική διαφορική στροφή φάσης στη θύρα μεταγωγής (switched ή transmission port) να είναι ίση με π ακτίνια, ενώ στη θύρα μεταγωγής (unswitched ή reflection port) ίση με μηδέν ακτίνια. Συνεπώς στη θύρα μεταγωγής παρουσιάζεται αναιρετική συμβολή ενώ στη θύρα ανάκλασης ενισχυτική συμβολή με αποτέλεσμα η ισχύς εισόδου να εξέρχεται από τη θύρα ανάκλασης. Αν όμως χρησιμοποιηθούν διαφορετικά σήματα ελέγχου είναι δυνατόν οι ενισχυτές να προκαλέσουν διαφορετική στροφή φάσης σε κάθε σήμα. Στην περίπτωση που αυτή η διαφορική στροφή φάσης γίνει ίση με π ακτίνια (ιδανικά) η ισχύς εισόδου τελικά εξέρχεται από την θύρα μεταγωγής. Φυσικά υπό την παρουσία θορύβου και δοθέντος ότι η διαφορική στροφή φάσης που οφείλεται στους ενισχυτές δεν είναι στην πράξη ακριβώς ίση με π ακτίνια, θα υπάρχει και κάποια μικρή ποσότητα ισχύος στην θύρα ανάκλασης. Στην πράξη διαφορετικά σήματα ελέγχου σημαίνει ότι χρησιμοποιείται μόνο ένα σήμα ελέγχου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι δύο βραχίονες θεωρούνται ίσου μήκους. Αν δεν ισχύει κάτι τέτοιο, στη συνολική διαφορική στροφή φάσης προστίθεται κι η φάση που οφείλεται στη διαφορά των δύο οπτικών δρόμων. Αν δηλαδή L_1 και L_2 είναι τα μήκη των δύο βραχιόνων και β η σταθερά διάδοσης, τότε προκύπτει μια διαφορά φάσης ίση με $\beta(L_1 - L_2)$.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά όσα προαναφέρθηκαν, λαμβάνοντας υπόψη βραχίονες ίσου μήκους και αγνοώντας τις απώλειες στις ίνες και τους συζεύκτες. Έστω το σήμα εισόδου

$$\mathbf{E}_{in}(t) = \mathbf{E}_{in} \mathbf{e}^{-j\omega t}$$

Ακριβώς μετά το συζεύκτη εισόδου το σήμα αυτό διαιρείται σε δύο ίσης ισχύος σήματα. Στον επάνω βραχίονα διαδίδεται το σήμα $\mathbf{E}_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{E}_{in} e^{-j\omega t}$ και στον κάτω

βραχίονα το σήμα $\mathbf{E}_{2}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{in} e^{-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)}$. Αφού τα σήματα αυτά περάσουν από τους

ενισχυτές γίνονται $\mathbf{E}_{1}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{G_{1}}E_{in}e^{-j(\omega t+\phi_{1})}$ και $\mathbf{E}_{2}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{G_{2}}E_{in}e^{-j(\omega t+\frac{\pi}{2}+\phi_{2})}$ όπου

 $G_1 = G_1(t), G_2 = G_2(t)$ τα αντίστοιχα κέρδη ισχύος και $\varphi_1 = \varphi_1(t), \varphi_2 = \varphi_2(t)$ οι αντίστοιχες στροφές φάσης είναι συναρτήσεις του χρόνου. Μετά το συζεύκτη εξόδου, τα δύο σήματα στις θύρες εξόδου του συμβολόμετρου Mach-Zehnder είναι τα

$$\mathbf{E}_{\text{tran}}(t) = \frac{1}{2}\sqrt{G_1}E_{\text{in}}e^{-j(\omega t + \phi_1)} + \frac{1}{2}\sqrt{G_2}E_{\text{in}}e^{-j(\omega t + \pi + \phi_2)}$$
$$\mathbf{E}_{\text{refl}}(t) = \frac{1}{2}\sqrt{G_1}E_{\text{in}}e^{-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \phi_1\right)} + \frac{1}{2}\sqrt{G_2}E_{\text{in}}e^{-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \phi_2\right)}$$

Η ισχύς στη θύρα μεταγωγής είναι [10]

$$\begin{split} & P_{tran}\left(t\right) = E_{tran}\left(t\right)E_{tran}^{*}\left(t\right) = \\ &= \left(\frac{1}{2}\sqrt{G_{1}}E_{in}e^{j(\omega t + \phi_{1})} + \frac{1}{2}\sqrt{G_{2}}E_{in}e^{j(\omega t + \pi + \phi_{2})}\right) \left(\frac{1}{2}\sqrt{G_{1}}E_{in}e^{j(\omega t + \phi_{1})} + \frac{1}{2}\sqrt{G_{2}}E_{in}e^{j(\omega t + \pi + \phi_{2})}\right) = \\ &= \frac{1}{4}E_{in}^{2}\left(\sqrt{G_{1}}e^{-j\phi_{1}} + \sqrt{G_{2}}e^{-j(\pi + \phi_{2})}\right) \left(\sqrt{G_{1}}e^{j\phi_{1}} + \sqrt{G_{2}}e^{j(\pi + \phi_{2})}\right) = \\ &= \frac{1}{4}P_{in}\left(G_{1} + \sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}}e^{-j\phi_{1}}e^{j\phi_{2}}e^{j\pi} + \sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}}e^{j\phi_{1}}e^{-j\phi_{2}}e^{-j\pi} + G_{2}\right) = \\ &= \frac{1}{4}P_{in}\left(G_{1} + G_{2} - \sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}}e^{i(\phi_{2} - \phi_{1})} - \sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}}e^{-j(\phi_{2} - \phi_{1})}\right) = \\ &= \frac{1}{4}P_{in}\left(G_{1} + G_{2} - 2\sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}}\cos(\Delta\phi)\right) \end{split}$$

Ομοίως η ισχύς στη θύρα ανάκλασης είναι

$$\begin{split} & P_{\text{refl}}\left(t\right) = \mathbf{E}_{\text{refl}}\left(t\right) \mathbf{E}_{\text{refl}}^{*}\left(t\right) = \\ &= \left(\frac{1}{2}\sqrt{G_{1}}E_{\text{in}}e^{-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \phi_{1}\right)} + \frac{1}{2}\sqrt{G_{2}}E_{\text{in}}e^{-j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \phi_{2}\right)}\right) \left(\frac{1}{2}\sqrt{G_{1}}E_{\text{in}}e^{j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \phi_{1}\right)} + \frac{1}{2}\sqrt{G_{2}}E_{\text{in}}e^{j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \phi_{2}\right)}\right) = \\ &= \frac{1}{4}E_{\text{in}}^{2}\left(\sqrt{G_{1}}e^{-j\left(\frac{\pi}{2} + \phi_{1}\right)} + \sqrt{G_{2}}e^{-j\left(\frac{\pi}{2} + \phi_{2}\right)}\right) \left(\sqrt{G_{1}}e^{j\left(\frac{\pi}{2} + \phi_{1}\right)} + \sqrt{G_{2}}e^{j\left(\frac{\pi}{2} + \phi_{2}\right)}\right) = \\ &= \frac{1}{4}P_{\text{in}}\left(G_{1} + \sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}}e^{-j\phi_{1}}e^{j\phi_{2}} + \sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}}e^{j\phi_{1}}e^{-j\phi_{2}} + G_{2}\right) = \\ &= \frac{1}{4}P_{\text{in}}\left(G_{1} + G_{2} + \sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}}e^{j\left(\phi_{2} - \phi_{1}\right)} + \sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}}e^{-j\left(\phi_{2} - \phi_{1}\right)}\right) = \\ &= \frac{1}{4}P_{\text{in}}\left(G_{1} + G_{2} + 2\sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}}\cos\left(\Delta\phi\right)\right) \end{split}$$

όπου $P_{in} = E_{in}^2$, $\Delta \phi = \phi_2 - \phi_1$ και όπως προαναφέρθηκε $G_1 = G_1(t)$, $G_2 = G_2(t)$, $\phi_1 = \phi_1(t)$ και $\phi_2 = \phi_2(t)$ είναι συναρτήσεις του χρόνου.

Συνεπώς, η ισχύς στις θύρες εξόδου του Mach-Zehnder είναι

$$P_{tran}(t) = \frac{1}{4} E_{in}^{2} \left(G_{1} + G_{2} - 2\sqrt{G_{1}}\sqrt{G_{2}} \cos(\Delta \varphi) \right)$$
(1.1.1)

και

$$P_{\text{refl}}(t) = \frac{1}{4} E_{\text{in}}^{2} \left(G_{1} + G_{2} + 2\sqrt{G_{1}} \sqrt{G_{2}} \cos(\Delta \phi) \right)$$
(1.1.2)

Από τις δύο τελευταίες σχέσεις φαίνεται ότι η ισχύς στις εξόδους εξαρτάται από τη διαφορά φάσης των δύο συμβαλλόμενων σημάτων καθώς κι από τα κέρδη ισχύος. Στην αρχή της παραγράφου αυτής έγινε λόγος για την εξάρτηση από τη διαφορά φάσης. Όσον αφορά τα κέρδη ισχύος, πρέπει να γίνει η ακόλουθη παρατήρηση.

Αναφέρθηκε ότι αν τα δύο σήματα ελέγχου είναι ίδια, τότε το σήμα εισόδου μετάγεται στη θύρα ανάκλασης. Πράγματι από τις σχέσεις (1.1.1) και (1.1.2), για Δφ=0 έπεται ότι $P_{tran}(t) = \frac{1}{4}E_{in}^2\left(G_1 + G_2 - 2\sqrt{G_1}\sqrt{G_2}\right)$ και $P_{refl}(t) = \frac{1}{4}E_{in}^2\left(G_1 + G_2 + 2\sqrt{G_1}\sqrt{G_2}\right)$. Στην περίπτωση που τα δύο κέρδη ισχύος είναι ίσα δηλαδή $G_1 = G_2 = G$ έπεται ότι $P_{tran}(t) = 0$ και $P_{refl}(t) = E_{in}^2G$. Επομένως τη *χρονική στιγμή* που Δφ=0 το σήμα εξέρχεται αποκλειστικά από τη θύρα ανάκλασης ενισχυμένο κατά το κοινό κέρδος ισχύος G. Στην περίπτωση όμως που $G_1 \neq G_2$, τότε η εξερχόμενη ισχύς μοιράζεται και στις δύο θύρες εξόδου. Το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος εξέρχεται από τη θύρα ανάκλασης και το μικρότερο από τη θύρα μεταγωγής. Αντίστοιχα και για την περίπτωση που Δφ=π.

Η καλή λειτουργία ενός συμβολόμετρου ως οπτικού διακόπτη εστιάζεται κυρίως στην επίτευξη διαφοράς φάσης ίσης με π ακτίνια. Στο σχήμα 1.1.2 παρουσιάζονται τα συνολικά κέρδη για τις δύο θύρες εξόδου του συμβολόμετρου Mach-Zehnder, όπως προκύπτουν από τις σχέσεις (1.1.1) και (1.1.2). Στην ουσία αναπαριστώνται οι λόγοι $\frac{P_{refl}}{P_{in}}$ και $\frac{P_{tran}}{P_{in}}$ συναρτήσει της διαφοράς φάσης Δφ. Η συνεχής καμπύλη αφορά τη θύρα μεταγωγής κι η καμπύλη με τις κουκίδες αναφέρεται στη θύρα ανάκλασης. Όσον αφορά τα κέρδη ισχύος έχει υποτεθεί ότι $G_1 = G_2 = G = 100$ κάτι που εν γένει δεν ισχύει (όχι αναφορικά με τη τιμή 100) αφού τα κέρδη είναι συναρτήσεις του χρόνου και η μεταβολή τους εξαρτάται από τη συνολική ισχύ που διέρχεται από τον ενισχυτή. Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται λεπτομερέστερη αναφορά στο συγκεκριμένο ζήτημα. Από το παρακάτω σχήμα πάντως γίνεται φανερή η έντονη εξάρτηση της εξόδου του συμβολόμετρου από τη διαφορά φάσης.

Αξίζει να αναφερθεί ότι ένα βασικό, θετικό χαρακτηριστικό του συμβολόμετρου Mach-Zehnder είναι το γεγονός ότι μπορεί να ολοκληρωθεί. Το κύριο μειονέκτημά του είναι η ασυμμετρία που μπορεί να προκύψει από τα διαφορετικά μήκη των δύο οπτικών μονοπατιών και κυρίως από την πιθανή διαφορά στα χαρακτηριστικά των δυο οπτικών ενισχυτών.



Σχήμα 1.1.2 Συνολικά κέρδη ισχύος για τις δύο θύρες εξόδου του συμβολόμετρου Mach-Zehnder. Η συνεχής καμπύλη αφορά τη θύρα μεταγωγής κι η καμπύλη με τις κουκίδες τη θύρα ανάκλασης.

1.2 Μη Γραμμικό Συμβολόμετρο Υπερύψηλων Ταχυτήτων (Ultrafast Nonlinear Interferometer-UNI)

Η λειτουργία του μη γραμμικού συμβολόμετρου υπερύψηλων ταχυτήτων είναι παρόμοια με αυτή του Mach-Zehnder. Η κύρια διαφορά τους και ταυτόχρονα το βασικό χαρακτηριστικό του συμβολόμετρου αυτού είναι πως οι δύο οπτικοί δρόμοι δεν αποτελούν διακριτά φυσικά μονοπάτια αλλά συνιστούν δύο διαφορετικές και κάθετες μεταξύ τους πολώσεις. Η διάταξή του παρουσιάζεται στα σχήματα 1.2.1α και 1.2.1β.



Σχήμα 1.2.1α Διάταξη μη γραμμικού συμβολόμετρου υπερύψηλων ταχυτήτων (UNI) χωρίς την επίδραση σήματος ελέγχου.



Σχήμα 1.2.1β Διάταξη μη γραμμικού συμβολόμετρου υπερύψηλων ταχυτήτων (UNI) υπό την επίδραση σήματος ελέγχου στο προπορευόμενο τμήμα του σήματος εισόδου.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω σχήματα το μη γραμμικό συμβολόμετρο υπερύψηλων ταχυτήτων αποτελείται από δύο πολωτικούς διαχωριστές δέσμης (Polarization Beam Splitter-PBS), δύο οπτικές ίνες που έχουν την ιδιότητα να διατηρούν την πόλωση (Polarization Maintaining Fiber- PMF) και έναν ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή [1], [4], [7], [8].

Μέχρι και την είσοδο του ενισχυτή τα δύο σχήματα είναι πανομοιότυπα. Το σήμα εισόδου (E_{in}) είναι πολωμένο έτσι ώστε το ηλεκτρικό του πεδίο να σχηματίζει γωνία 45° με τον άξονα y (προφανώς και με τον άξονα x). Το σήμα αυτό διέρχεται από τον πρώτο πολωτικό διαχωριστή δέσμης και διαχωρίζεται σε δύο ίσες, κάθετες μεταξύ τους, συνιστώσες παράλληλες στους άξονες x και y. Στη συνέχεια οι δύο συνιστώσες του σήματος διέρχονται από την ίνα PM, η οποία παρουσιάζει διπλοθλαστικότητα [1], [4] δηλαδή οι σταθερές διάδοσης στους άξονες x και y είναι διαφορετικές. Αυτό έχει ως συνέπεια οι δύο συνιστώσες να διαδίδονται με διαφορετική ταχύτητα κατά μήκος της ίνας κι έτσι όταν εξέρχονται από την ίνα να παρουσιάζουν μια σχετική χρονική καθυστέρηση μεταξύ τους. Οι άξονες αναφορικά με τη διπλοθλαστικότητα χαρακτηρίζονται ως γρήγορος (fast-f) και αργός (slow-s) με βάση τη σταθερά διάδοσης.

Στην περίπτωση που δεν υπάρχει σήμα ελέγχου (σχήμα 1.2.1α) οι δύο, καθυστερημένες πλέον, συνιστώσες δέχονται την ίδια επίδραση από τον ενισχυτή με αποτέλεσμα στην έξοδο του ενισχυτή να έχουν μεταβληθεί ως προς το πλάτος και τη φάση τους ομοίως. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και στην περίπτωση που υπάρχουν δύο ίδια σήματα ελέγχου κάθε ένα συγχρονισμένο με μία από τις συνιστώσες του σήματος εισόδου. Μετά τη διέλευση από τον ενισχυτή οι δύο συνιστώσες διέρχονται πάλι από μία ίνα PM της οποίας όμως οι άξονες f, s ταυτίζονται με τους s, f της πρώτης PM ίνας αντίστοιχα. Συνέπεια αυτού είναι στην έξοδο της δεύτερης ίνας PM οι δύο συνιστώσες να είναι συγχρονισμένες. Στην τελική φάση εξόδου υπάρχει ο δεύτερος πολωτικός διαχωριστής δέσμης, στον οποίο οι δύο συνιστώσες επανενώνονται δίνοντας σήμα εξόδου με πόλωση ίδια με αυτή του σήματος εισόδου.

Αντιθέτως αν υπάρχει ένα σήμα ελέγχου ($\mathbf{E}_{control}$) συγχρονισμένο με μία από τις δύο συνιστώσες (έστω την προπορευόμενη, κατά το σχήμα 1.2.1β), η πόλωση του σήματος εξόδου σχηματίζει γωνία 90° με την πόλωση του σήματος εισόδου. Συγκεκριμένα καθώς η συγχρονισμένη με τον παλμό ελέγχου συνιστώσα διέρχεται από τον ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή, μεταβάλλει διαφορετικά τη φάση της (και το πλάτος της) από την άλλη συνιστώσα. Στην περίπτωση που αυτή η διαφορά στη μεταβολή της φάσης είναι ίση με π ακτίνια, το σήμα εξόδου θα έχει διαφορετική πόλωση από το σήμα εισόδου, όπως πολύ χαρακτηριστικά εικονίζεται στο σχήμα 1.2.1β. Επομένως με κατάλληλη διαφορική στροφή φάσης μπορεί να προκληθεί μεταβολή της πόλωσης του σήματος που διέρχεται από το μη γραμμικό συμβολόμετρο υπερύψηλων ταχυτήτων.

Συνεπώς και με το συμβολόμετρο αυτό μπορούμε να πετύχουμε μεταγωγή του σήματος εισόδου στην επιθυμητή θύρα εξόδου. Όπως έγινε φανερό οι δύο θύρες εξόδου είναι δύο διαφορετικές και κάθετες μεταξύ τους πολώσεις.

Το μη γραμμικό συμβολόμετρο υπερύψηλων ταχυτήτων αποτελείται από ένα μόνο ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή κι επιπλέον οι δύο οπτικοί δρόμοι υλοποιούνται στο ίδιο φυσικό μονοπάτι. Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά απλοποιούν τη λειτουργία του σε σχέση με το συμβολόμετρο Mach-Zehnder, αφού δεν υπάρχει το πρόβλημα της ασυμμετρίας (ενισχυτές με διαφορετικά χαρακτηριστικά, διαφορά στα μήκη των οπτικών μονοπατιών). Αντίθετα παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι η λειτουργία του βασίζεται στην πόλωση η οποία είναι ευαίσθητη σε διάφορους παράγοντες όπως η θερμοκρασία. Επιπλέον η ολοκλήρωσή του δεν είναι εφικτή μέχρι σήμερα.

Για την περιγραφή του μη γραμμικού συμβολόμετρου υπερύψηλων ταχυτήτων θεωρήθηκε ότι τη στιγμή που η καθυστερημένη συνιστώσα του σήματος εισόδου εισέρχεται στον ενισχυτή το κέρδος του έχει προλάβει να ανακάμψει. Η λειτουργία του ημιαγώγιμου οπτικού ενισχυτή περιγράφεται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο όπου και γίνεται κατανοητή η ανάγκη αυτής της θεώρησης.

- 24 -

Ενισχυτής Laser Ημιαγωγού σε Καθρέφτη Βρόχου (Semiconductor Laser Amplifier in a Loop Mirror-SLALOM)

Η διάταξη του ενισχυτή laser ημιαγωγού σε καθρέφτη βρόχου (συναντάται και με το όνομα TOAD-THz Optical Asymmetric Demultiplexer) [10], [12] παρουσιάζεται στο σχήμα 1.3.1. Αποτελείται από ένα συζεύκτη του οποίου οι δύο θύρες εξόδου συνδέονται μέσω ενός ημιαγώγιμου οπτικού ενισχυτή, σχηματίζοντας έτσι ένα βρόχο. Θεωρώντας συζεύκτη 3dB, το σήμα εισόδου (\mathbf{E}_{in}) χωρίζεται στο συζεύκτη σε δύο ίσης ισχύος σήματα από τα οποία το ένα διαδίδεται ωρολογιακά (\mathbf{E}_{cw}) και το άλλο ανθωρολογιακά (\mathbf{E}_{ccw}). Έτσι, οι δύο φορές διάδοσης συνιστούν τους δύο οπτικούς δρόμους του συμβολόμετρου. Στη διάταξη του σχήματος 1.3.1, κατά μήκος του βρόχου, το σήμα \mathbf{E}_{ccw} έχει αντίθεται κατά την ίδια κατεύθυνση με τον παλμό ελέγχου, ενώ το σήμα \mathbf{E}_{ccw} έχει αντίθετη κατεύθυνση διάδοσης με το σήμα ελέγχου. Η ασύμμετρη τοποθέτηση του ενισχυτή στο βρόχο έχει ως αποτέλεσμα η επίδρασή του στα δύο σήματα να είναι διαφορετική αναφορικά με το κέρδος και τη στροφή φάσης που προκαλείται.



Σχήμα 1.3.1 Διάταξη συμβολόμετρου SLALOM.

Έστω ότι στη θύρα ελέγχου δεν οδηγείται κάποιο σήμα και ότι ο χρόνος ανάκαμψης του κέρδους του ενισχυτή είναι αρκετά μικρότερος του χρόνου Τ δηλαδή της χρονικής διαφοράς με την οποία φτάνουν στον ενισχυτή τα δύο σήματα. Η ανάγκη για την παραδοχή αυτή είναι η ίδια όπως και στην περίπτωση του μη γραμμικού συμβολόμετρου υπερύψηλων ταχυτήτων και γίνεται απόλυτα κατανοητή στο δεύτερο κεφάλαιο όπου περιγράφεται η λειτουργία του ημιαγώγιμου οπτικού ενισχυτή. Στην περίπτωση αυτή τα δύο σήματα υφίστανται την ίδια επίδραση από τον ενισχυτή. Συνεπώς δεν παρατηρείται διαφορά στη στροφή της φάσης τους και έτσι το σήμα εισόδου εξέρχεται εξολοκλήρου (ιδανικά) από την θύρα από την οποίο εισήλθε δηλαδή τη θύρα ανάκλασης.

Με χρήση ενός ή δύο σημάτων ελέγχου υπάρχει η δυνατότητα μεταγωγής του σήματος εισόδου σε οποιαδήποτε από τις δύο θύρες εισόδου όπως ακριβώς και στην περίπτωση των δύο προαναφερθέντων συμβολόμετρων. Η τεχνική είναι η ίδια. Αν χρησιμοποιηθούν δύο παλμοί ελέγχου συγχρονισμένοι με τις δύο συνιστώσες του σήματος, τότε το σήμα εξέρχεται από τη θύρα ανάκλασης ενώ στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί μόνο ένας παλμός ελέγχου συγχρονισμένος μόνο με τη μία συνιστώσα το σήμα εισόδου οδηγείται στην θύρα μεταγωγής.

Το κοινό χαρακτηριστικό του συμβολόμετρου αυτού με το μη γραμμικό συμβολόμετρο υπερύψηλων ταχυτήτων είναι ότι αποτελείται από ένα μόνο ενισχυτή. Είναι όμως το μοναδικό από τις τρεις συμβολομετρικές διατάξεις που μόνο μία από τις δύο συνιστώσες του σήματος εισόδου διαδίδεται με τη ίδια φορά με το σήμα ελέγχου. Όπως και το συμβολόμετρο Mach-Zehnder έτσι κι ο ενισχυτής laser ημιαγωγού σε καθρέφτη βρόχου μπορεί να ολοκληρωθεί.

Υλοποίηση αμιγώς οπτικών πυλών με τη χρήση συμβολόμετρων

Όπως προαναφέρθηκε, τα συμβολόμετρα βρίσκουν εφαρμογή και στην υλοποίηση λογικών πυλών [7]. Οι λογικές πύλες είναι βασικά στοιχεία για την ανάπτυξη κυκλωμάτων επεξεργασίας σήματος και για το λόγο αυτό η σημασία τους είναι μεγάλη. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στις λογικές πύλες KAI (AND) και ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟΥ Ή (XOR). Η υλοποίηση των λογικών πυλών γίνεται με τον ίδιο τρόπο και στα τρία συμβολόμετρα που περιγράφηκαν.

Πριν την περιγραφή των οπτικών πυλών πρέπει να γίνει μια μικρή αναφορά στο είδος των σημάτων που χρησιμοποιούνται. Τόσο ως σήμα εισόδου όσο κι ως σήμα ελέγχου χρησιμοποιείται μια παλμοσειρά Gauss με σηματοδότηση επιστροφής στο μηδέν της οποίας οι παλμοί έχουν μικρό χρονικό εύρος (short Return to ZerosRZ). Στο σχήμα 1.4.1 παρουσιάζεται μια τέτοια ακολουθία από τέσσερις παλμούς Gauss, που αντιστοιχεί σε ρυθμό δεδομένων (bit rate) ίσο με 100 Gbits/sec, αφού η χρονική διάρκεια μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών είναι 100 psec. Ο κατακόρυφος άξονας αφορά την κανονικοποιημένη ισχύ της περιβάλλουσας των παλμών. Στη θέση του τρίτου παλμού (t=220 psec) αντιστοιχεί λογικό 0. Στην πράξη, στην περίπτωση του λογικού 0, η ισχύς δεν είναι μηδενική αλλά πάρα πολύ μικρή.



Σχήμα 1.4.1 Ακολουθία τεσσάρων παλμών Gauss σηματοδότησης επιστροφής στο μηδέν. Στη θέση του τρίτου παλμού (t=220 psec) αντιστοιχεί λογικό 0.

1.4.1 Λογική πύλη ΚΑΙ (AND)

Στην περίπτωση αυτή στο συμβολόμετρο υπάρχει μόνο ένα σήμα ελέγχου και η παλμοσειρά εισόδου. Συνεπώς το φαινόμενο της ετεροδιαμόρφωσης φάσης παρουσιάζεται μόνο στον ένα οπτικό δρόμο και συγκεκριμένα σε αυτόν που τροφοδοτείται με το σήμα ελέγχου. Η λογική πράξη ΚΑΙ πραγματοποιείται μεταξύ της παλμοσειράς ελέγχου και της παλμοσειράς εισόδου.

Έστω ότι η ισχύς του παλμού εισόδου αντιστοιχεί σε λογικό 1. Αν και ο παλμός του σήματος ελέγχου αντιστοιχεί σε λογικό 1, τότε οι δύο συνιστώσες του παλμού εισόδου δέχονται διαφορετική μη γραμμική επίδραση από τους αντίστοιχους ενισχυτές, οπότε ιδανικά πραγματοποιείται διαφορική στροφή φάσης π και το σήμα εισόδου μετάγεται στη θύρα μεταγωγής. Συνεπώς στη θύρα μεταγωγής παρουσιάζεται λογικό 1, ενώ στη θύρα ανάκλασης λογικό 0. Αν ο παλμός του σήματος ελέγχου αντιστοιχεί σε λογικό 0, τότε οι δύο συνιστώσες του σήματος εισόδου βέχονται την ίδια μη γραμμική επίδραση από τους ενισχυτές και έτσι το σήμα εισόδου μετάγεται στη θύρα ανάκλασης. Εμφανίζεται δηλαδή λογικό 0 στη θύρα μεταγωγής και λογικό 1 στη θύρα ανάκλασης. Στην περίπτωση βέβαια που ο παλμός εισόδου αντιστοιχεί σε λογικό 0, τότε δεν υπάρχει σήμα για να μεταχθεί σε κάποια από τις δύο εξόδους του συμβολόμετρου και έτσι εμφανίζεται τόσο στη θύρα μεταγωγής όσο και στη θύρα ανάκλασης λογικό 0. Τα παραπάνω συνοψίζονται στον πίνακα 1.4.1.1.

Παλμός εισόδου	Παλμός ελέγχου	Θύρα μεταγωγής	Θύρα ανάκλασης
0	0	0	0
0	1	0	0
1	0	0	1
1	1	1	0

Πίνακας 1.4.1.1 Πίνακας αληθείας συμβολόμετρου με ένα σήμα ελέγχου.

Συνεπώς, γίνεται φανερό ότι στη θύρα μεταγωγής του συμβολόμετρου εμφανίζεται το αποτέλεσμα της λογικής πράξης ΚΑΙ μεταξύ της παλμοσειράς εισόδου και της παλμοσειράς ελέγχου.

1.4.2 Λογική πύλη ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟΥ Ή (XOR)

Στην περίπτωση της λογικής πύλης ΚΑΙ (AND) χρησιμοποιήθηκε μόνο ένα σήμα ελέγχου. Αντίθετα για την υλοποίηση της λογικής πύλης ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟΥ Ή (XOR) γίνεται χρήση δύο σημάτων ελέγχου. Η πράξη ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟ Ή (XOR) πραγματοποιείται μεταξύ των δύο σημάτων ελέγχου και με βάση το αποτέλεσμα αυτό μετάγεται το σήμα εισόδου σε κάποια από τις δύο εξόδους του συμβολόμετρου. Θεωρείται ότι η παλμοσειρά εισόδου αποτελείται μόνο από συνεχόμενους άσσους, πρόκειται δηλαδή για ένα σήμα ρολογιού. Αν ο παλμός εισόδου αντιστοιχούσε σε λογικό 0 δεν θα υπήρχε σήμα για να μεταχθεί σε κάποια έξοδο του συμβολόμετρου. Προφανώς, η περίπτωση αυτή δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον.

Έστω λοιπόν ότι ο παλμός του σήματος εισόδου αντιστοιχεί σε λογικό 1. Αν οι δύο παλμοί ελέγχου είναι ίδιοι, αντιστοιχούν δηλαδή είτε σε λογικό 0 είτε σε λογικό 1, τότε οι δύο συνιστώσες του σήματος εισόδου δέχονται την ίδια μη γραμμική επίδραση από τους ενισχυτές. Συνεπώς πραγματοποιείται μηδενική διαφορική στροφή φάσης και ο παλμός εισόδου μετάγεται στη θύρα ανάκλασης. Εμφανίζεται δηλαδή λογικό 1 στη θύρα ανάκλασης και λογικό 0 στη θύρα μεταγωγής. Αν οι δύο παλμοί ελέγχου είναι διαφορετικοί οι δύο συνιστώσες του παλμού εισόδου δέχονται διαφορετική μη γραμμική επίδραση από τους ενισχυτές και έτσι παρουσιάζεται διαφορική στροφή φάσης π (ιδανικά), οπότε το σήμα εισόδου μετάγεται στη θύρα μεταγωγής. Στην περίπτωση αυτή λογικό 1 παρουσιάζεται στη θύρα μεταγωγής και λογικό 0 στη θύρα ανάκλασης. Στον πίνακα 1.4.2.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτά.

Παλμός εισόδου	Παλμός ελέγχου 1	Παλμός ελέγχου 2	Θύρα μεταγωγής	Θύρα ανάκλασης
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	0	1

Πίνακας 1.4.2.1 Πίνακας αληθείας συμβολόμετρου με δύο σήματα ελέγχου και σήμα ρολογιού στην είσοδο.

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται φανερό ότι το αποτέλεσμα των δύο θυρών

εξόδου καθορίζεται από την πράξη ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟ Ή (XOR) μεταξύ των δύο παλμών ελέγχου. Επιπλέον η θύρα ανάκλασης είναι η συμπληρωματική της θύρας μεταγωγής.

Πρέπει να τονιστεί ότι σε πρακτικές εφαρμογές, στις εξόδους του συμβολόμετρου μετάγεται πάντα κάποια στάθμη ισχύος ακόμη κι όταν αναμένεται λογικό 0. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι η διαφορική στροφή φάσης – η οποία είναι συνάρτηση του χρόνου – δεν είναι πάντοτε ίση με π ακτίνια όπως επίσης και ότι οι δύο συνιστώσες του παλμού εισόδου «βλέπουν» διαφορετικό κέρδος ανάλογα με τον κορεσμό του ενισχυτή, κάτι που θα αναφερθεί διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Χαρακτηρισμός των θυρών εξόδου των αμιγώς οπτικών διακοπτών

Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται ορισμένα κριτήρια αναφορικά με την ποιότητα μεταγωγής των αμιγώς οπτικών διακοπτών.

Λόγος Αντίθεσης (Contrast Ratio)

Ο λόγος αντίθεσης (Λ.Αντ.) ορίζεται ως εξής:

$$\Lambda.A\nu\tau. = \frac{\overline{P_{tran}^{1}}}{\overline{P_{refl}^{0}}}$$

όπου $\overline{P_{tran}^1}$ είναι η μέση τιμή των μέγιστων τιμών (peak value) ισχύος στη θύρα μεταγωγής στις χρονικές περιόδους που αναμένεται λογικό 1 και $\overline{P_{refl}^0}$ η μέση τιμή των μέγιστων τιμών (peak value) ισχύος στη θύρα ανάκλασης στις χρονικές περιόδους που αναμένεται λογικό 0.

Μεγαλύτερες τιμές του λόγου αντίθεσης εκφράζουν το γεγονός ότι μεγαλύτερο ποσοστό της ενισχυμένης ενέργειας εισόδου εξέρχεται από την θύρα μεταγωγής και μικρότερο από τη θύρα ανάκλασης.

Ο ορισμός του λόγου αντίθεσης δείχνει ότι το ενδιαφέρον εστιάζεται στη μεταγωγή της ενέργειας στη θύρα μεταγωγής. Πράγματι, όπως φάνηκε στην παράγραφο 1.4, τόσο το αποτέλεσμα της λογικής πράξης ΚΑΙ (AND) όσο και αυτό της πράξης ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟ Ή (XOR) παρατηρούνται στη θύρα μεταγωγής.

Διαμόρφωση Πλάτους (Amplitude Modulation)

Το κριτήριο της διαμόρφωσης πλάτους (Δ.Π.) εκφράζεται από τον λόγο

$$\Delta.\Pi. = \frac{P_{max}^1}{P_{min}^1}$$

όπου P_{max}^1 και P_{min}^1 είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή από τις μέγιστες τιμές (peak value) της ισχύος στις χρονικές περιόδους που αναμένεται λογικό 1, παρατηρούμενες στην ίδια θύρα εξόδου. Το ενδιαφέρον συνήθως εστιάζεται στη θύρα μεταγωγής.

Όσο μικρότερος είναι ο λόγος της διαμόρφωσης πλάτους τόσο πιο ισοϋψείς είναι οι παλμοί στις χρονικές περιόδους που αναμένονται λογικά 1, κάτι που γενικά είναι επιθυμητό στην επεξεργασία των οπτικών σημάτων.

Λόγος Απόσβεσης (Extinction Ratio)

Ο λόγος απόσβεσης (Λ.Απ.) ορίζεται ως εξής:

$$\Lambda.A\pi.=\frac{P_{\min}^1}{P_{\max}^0}$$

όπου P_{max}^0 είναι η μέγιστη τιμή από τις μέγιστες τιμές (peak value) της ισχύος στις χρονικές περιόδους που αναμένεται λογικό 0 και το P_{min}^1 ορίζεται όπως προηγουμένως. Και οι δύο αυτές τιμές της ισχύος παρατηρούνται στην ίδια θύρα εξόδου του συμβολόμετρου. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, ο λόγος απόσβεσης συνήθως υπολογίζεται για τη θύρα μεταγωγής.

Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του λόγου απόσβεσης τόσο πιο διακριτά είναι τα λογικά 1 από τα λογικά 0 και συνεπώς τόσο καλύτερη είναι η λειτουργία του οπτικού διακόπτη.

Οι τρεις παραπάνω λόγοι συνήθως εκφράζονται σε dB, δηλαδή

$$\Lambda.Av\tau. = 10\log_{10}\frac{\overline{P_{tran}^1}}{\overline{P_{refl}^0}}$$
(1.5.1)

$$\Delta.\Pi. = 10\log_{10} \frac{P_{\text{max}}^1}{P_{\text{min}}^1}$$
(1.5.2)

$$\Lambda.A\pi. = 10\log_{10}\frac{P_{\min}^{1}}{P_{\max}^{0}}$$
(1.5.3)

και

Κεφάλαιο 2

Ημιαγώγιμος Οπτικός Ενισχυτής (Semiconductor Optical Amplifier-SOA)

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο ημιαγώγιμος οπτικός ενισχυτής [1], [4], [7], [8]. Όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο στις συμβολομετρικές διατάξεις χρησιμοποιείται τουλάχιστον ένα μη γραμμικό στοιχείο. Το μη γραμμικό αυτό στοιχείο μπορεί να είναι ένας ημιαγώγιμος οπτικός ενισχυτής. Στην περίπτωση των συμβολόμετρων ο ενισχυτής χρησιμοποιείται κυρίως επειδή παρέχει στο κύκλωμα την απαιτούμενη μη γραμμικότητα και όχι για την ενίσχυση της ισχύος των σημάτων που επεξεργάζεται.

Η κατασκευή και η λειτουργία του βασίζεται στην ίδια τεχνολογία με αυτή ενός ημιαγώγιμου laser Fabry-Perot. Η διαφορά στη λειτουργία του σε σχέση με τη δίοδο laser είναι πως στην περίπτωση του ενισχυτή εμποδίζονται οι ταλαντώσεις της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας μέσα στην κοιλότητα Fabry-Perot. Επιπλέον πρόκειται για μία δίοδο laser που λειτουργεί κάτω από το επίπεδο κατωφλίου.

Στην πρώτη παράγραφο του κεφαλαίου αυτού παρουσιάζεται ένα μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη λειτουργία του ημιαγώγιμου οπτικού ενισχυτή. Το μοντέλο αυτό συνίσταται σε ένα σύστημα μη γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης το οποίο δεν έχει αναλυτική λύση (λύση κλειστής μορφής) και έτσι στη δεύτερη παράγραφο του κεφαλαίου προτείνεται μια αριθμητική διαδικασία για την επίλυσή του. Αποτελέσματα με βάση αυτή την αριθμητική διαδικασία – η υλοποίηση της οποίας αποτελεί βασικό τμήμα του προγράμματος optical_gate.cpp – δίδονται στην τρίτη και τελευταία παράγραφο του κεφαλαίου.

2.1 Μαθηματικό μοντέλο για τον ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή

Το μοντέλο που ακολουθεί υποθέτει ότι ο ημιαγώγιμος οπτικός ενισχυτής είναι ένας ιδανικός ενισχυτής οδεύοντος κύματος δηλαδή δεν πραγματοποιείται καμία ταλάντωση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στην κοιλότητα Fabry-Perot. Κύριο χαρακτηριστικό του μοντέλου είναι ότι η ισχύς του σήματος ελέγχου κι αυτή του σήματος εισόδου λαμβάνονται ισότιμα υπόψη ως προς την επίδραση που έχουν. Ξεκινώντας λοιπόν από την εξίσωση κυματοδήγησης στον ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή και την εξίσωση ροής των φορέων στην ενεργό του περιοχή, προκύπτει το ακόλουθο σύστημα μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης [11].

$$\frac{\partial P_{c}(z,t)}{\partial z} = \frac{g_{c}(z,t)}{1 + \varepsilon \left[P_{c}(z,t) + P_{s}(z,t)\right]} P_{c}(z,t) - \alpha_{int}P_{c}(z,t)$$
(2.1.1a)

$$\frac{\partial \varphi_{c}(z,t)}{\partial z} = -\frac{1}{2} \alpha_{N} g_{c}(z,t)$$
(2.1.1β)

$$\frac{\partial g_{c}(z,t)}{\partial t} = \frac{g_{sc} - g_{c}(z,t)}{\tau_{s}} - \frac{1}{E_{satc}} \frac{g_{c}(z,t) \left[P_{c}(z,t) + P_{s}(z,t)\right]}{1 + \varepsilon \left[P_{c}(z,t) + P_{s}(z,t)\right]}$$
(2.1.1 γ)

$$\frac{\partial P_{s}(z,t)}{\partial z} = \frac{g_{s}(z,t)}{1 + \varepsilon \left[P_{c}(z,t) + P_{s}(z,t)\right]} P_{s}(z,t) - \alpha_{int}P_{s}(z,t)$$
(2.1.18)

$$\frac{\partial \varphi_{s}(z,t)}{\partial z} = -\frac{1}{2} \alpha_{N} g_{s}(z,t)$$
(2.1.1 ε)

$$\frac{\partial g_{s}(z,t)}{\partial t} = \frac{g_{ss} - g_{s}(z,t)}{\tau_{s}} - \frac{1}{E_{sats}} \frac{g_{s} \left[P_{c}(z,t) + P_{s}(z,t) \right]}{1 + \varepsilon \left[P_{c}(z,t) + P_{s}(z,t) \right]}$$
(2.1.1 σ t)

Στις παραπάνω εξισώσεις τα μεγέθη που αφορούν το σήμα ελέγχου προσδιορίζονται με το δείκτη 'c' και τα μεγέθη που αναφέρονται στο σήμα εισόδου με το δείκτη 's'. Οι εξισώσεις (2.1.1α), (2.1.1β), (2.1.1δ) και (2.1.1ε) προκύπτουν από την εξίσωση κυματοδήγησης ενώ οι εξισώσεις (2.1.1γ) και (2.1.1στ) από την εξίσωση ροής των φορέων. Η χωρική ανεξάρτητη μεταβλητή z μεταβάλλεται στο διάστημα [0,L] όπου L το μήκος του ενισχυτή και η χρονική ανεξάρτητη μεταβλητή t μεταβάλλεται στο [0,T] όπου T η χρονική διάρκεια των σημάτων ελέγχου και εισόδου. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μεταβλητή t δεν εκφράζει κάποια χρονική εξέλιξη, δηλαδή το χρονικό διάστημα από κάποιο συγκεκριμένο χρονικό σημείο t=0, αλλά κάποιο χρονικό σημείο στη διάρκεια των σημάτων. Στην περίπτωση της εφαρμογής της λογικής πύλης ως σήματα χρησιμοποιούνται παλμοσειρές Gauss. Έτσι $T = N \cdot T_{per}$ όπου T_{per} το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών (περίοδος παλμού) και N ο αριθμός των παλμών που συνιστούν κάθε παλμοσειρά.

Οι μεταβλητές και οι παράμετροι που εμφανίζονται στο σύστημα (2.1.1) είναι οι εξής:

- P(z,t) η διαδιδόμενη οπτική ισχύς
- φ(z,t) η μη γραμμική στροφή φάσης που προκαλείται στο σήμα από τον ενισχυτή
- \blacktriangleright g(z,t) ο συντελεστής κέρδους
- τ_s ο χρόνος επανασύνδεσης των φορέων (carrier lifetime)
- α_{int} οι εσωτερικές γραμμικές απώλειες κυματοδήγησης (internal linear losses)
- > α_N ο συντελεστής επαύξησης γραμμής λόγω αναστροφής των φορέων (traditional linewidth enhancement factor)
- ε ο παράγοντας μη γραμμικής συμπίεσης του κέρδους. Ισχύει ε = ε_{CH} + ε_{SHB}, όπου ε_{CH} ο παράγοντας μη γραμμικής συμπίεσης του κέρδους λόγω του μηχανισμού της θέρμανσης φορέων (Carrier Heating-CH) και ε_{SHB} ο αντίστοιχος παράγοντας λόγω του μηχανισμού της δημιουργίας φασματικής οπής (Spectral-Hole Burning-SHB)
- E_{sate}, E_{sats} οι ενέργειες κορεσμού κέρδους (gain saturation energy) για το σήμα ελέγχου και εισόδου. Οι ενέργειες κορεσμού του κέρδους ορίζονται ως εξής:

$$E_{satc} = \frac{hf_c\sigma}{\alpha_c}$$

και

$$E_{sats} = \frac{hf_s\sigma}{\alpha_s}$$

όπου

- f είναι η συχνότητα του σήματος
- α είναι ένας παράγοντας που εξαρτάται από το μήκος κύματος, με συνέπεια το κέρδος να εξαρτάται από το μήκος κύματος. Αναφέρεται κι ως διαφορικό κέρδος (differential gain).
- σ η ενεργός διατομή τρόπου. Ισχύει σ = $\frac{A}{\Gamma}$ όπου

- Α το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής της ενεργού περιοχής
- Γ ο παράγοντας σύμπτυξης. Ο παράγοντας αυτός εκφράζει το ποσοστό της οπτικής ισχύος που δεν διαχέεται εκτός της ενεργού περιοχής του ενισχυτή.
- h είναι η σταθερά του Planck, δηλαδή $h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}$
- > g_{sc} , g_{ss} οι συντελεστές κέρδους ασθενούς σήματος (small signal gain coefficients). Οι τιμές αυτές δίδονται από τις παρακάτω σχέσεις

$$g_{ss} = \Gamma \alpha_s N_0 \left(\frac{I\tau_s}{eVN_0} - 1 \right)$$

και

$$g_{sc} = \Gamma \alpha_c N_0 \left(\frac{I\tau_s}{eVN_0} - 1 \right)$$

όπου

- Ν₀ η πυκνότητα των φορέων στην περιοχή διαφάνειας, δηλαδή εκεί που το κέρδος του ενισχυτή ισούται με τη μονάδα. Πρέπει να αναφερθεί ότι ο παράγοντας αυτός παρουσιάζει, εν γένει, εξάρτηση από το μήκος κύματος (λ). Επειδή όμως η εξάρτηση αυτή δεν είναι πολύ ισχυρή, χρησιμοποιείται η προσέγγιση Ν_{0s}(λ) = Ν₀(λ) = Ν₀.
- Ι το ρεύμα έκχυσης
- e το φορτίο του ηλεκτρονίου, δηλαδή $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{Cb}$
- V ο όγκος της ενεργού περιοχής του ενισχυτή

Οι εξισώσεις (2.1.1α) και (2.1.1δ) του παραπάνω συστήματος περιγράφουν τη διάδοση της οπτικής ισχύος των σημάτων ελέγχου και εισόδου κατά μήκος του διαμήκη άξονα του ενισχυτή (z-άξονας). Ο πρώτος όρος του δεξιού μέλους των εξισώσεων αυτών εκφράζει την αύξηση της οπτικής ισχύος λόγω ενίσχυσης. Η ενισχυτική διαδικασία εκφράζεται από το συντελεστή κέρδους g. Αντίθετα ο δεύτερος όρος του δεξιού μέλους των εξισώσεων εκφράζει τη μείωση της οπτικής ισχύος λόγω των απωλειών κυματοδήγησης (α_{int}). Στην περίπτωση που οι απώλειες υπερισχύουν της ενίσχυσης του σήματος ο ενισχυτής λειτουργεί ως εξασθενητής. Τότε το συνολικό κέρδος του «ενισχυτή» είναι μικρότερο της μονάδας. Αν ο
συντελεστής απωλειών ισούται με μηδέν, $\alpha_{int} = 0$, η ελάχιστη τιμή που μπορεί να πάρει το κέρδος είναι η μονάδα δηλαδή ο ενισχυτής θα λειτουργεί ως διαφανές μέσο.

Από την εξίσωση (2.1.1δ) μπορεί να υπολογιστεί το κέρδος ισχύος που «βλέπει» το σήμα εισόδου ως εξής:

$$\begin{split} \frac{\partial P_{s}}{\partial z} &= \frac{g_{s}}{1 + \epsilon (P_{c} + P_{s})} P_{s} - \alpha_{int} P_{s} \Longrightarrow \\ \frac{\partial P_{s}}{\partial z} &= \frac{g_{s}}{1 + \epsilon (P_{c} + P_{s})} - \alpha_{int} \Longrightarrow \\ \int_{z_{1}}^{z_{2}} \frac{\partial P_{s}}{P_{s}} dz &= \int_{z_{1}}^{z_{2}} \left[\frac{g_{s}}{1 + \epsilon (P_{c} + P_{s})} - \alpha_{int} \right] dz \Longrightarrow \\ \ln \left[\frac{P_{s}(z_{2}, t)}{P_{s}(z_{1}, t)} \right] &= \int_{z_{1}}^{z_{2}} \left[\frac{g_{s}}{1 + \epsilon (P_{c} + P_{s})} - \alpha_{int} \right] dz \Longrightarrow \\ \ln \left[G_{12}(t) \right] &= \int_{z_{1}}^{z_{2}} \left[\frac{g_{s}}{1 + \epsilon (P_{c} + P_{s})} - \alpha_{int} \left[dz \right] \right] dz \Longrightarrow \\ G_{12}(t) &= e^{\int_{z_{1}}^{z_{2}} \left[\frac{g_{s}}{1 + \epsilon (P_{c} + P_{s})} \right] dz} \cdot e^{-\alpha_{int}(z_{2} - z_{1})} \end{split}$$

Η τελευταία σχέση δίνει το κέρδος του ενισχυτή αναφορικά με το σήμα εισόδου μεταξύ των σημείων z_1 , z_2 του ενισχυτή. Αν $z_1 = 0$ και $z_2 = L$, προκύπτει το συνολικό κέρδος ισχύος του ενισχυτή που είναι

$$G(t) = e^{\int_{0}^{t} \left[\frac{g_{s}}{1+\varepsilon(P_{c}+P_{s})}\right] dz} \cdot e^{-\alpha_{int}L}$$
(2.1.2)

O όρος $\int_{0}^{L} \left[\frac{g_s}{1 + \epsilon (P_c + P_s)} \right] dz$ είναι πάντοτε θετικός (P_c > 0, P_s > 0 και g_s > 0 με βάση τα αποτελέσματα της παραγράφου 2.3), οπότε γίνεται φανερό πως αν α_{int} = 0, τότε G(t) ≥ 1.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο ημιαγώγιμος οπτικός ενισχυτής χρησιμοποιείται λόγω της μη γραμμικής στροφής φάσης που προκαλεί στα σήματα που διαδίδονται σε αυτόν. Η ιδιότητα αυτή εκφράζεται από της σχέσεις (2.1.1β) και (2.1.1ε). Άμεσου ενδιαφέροντος είναι η σχέση (2.1.1ε) και όχι η (2.1.1β) αφού η διαφορά φάσης που υπεισέρχεται στις εξισώσεις (1.1.1) και (1.1.2) αναφέρεται στις φάσεις των συνιστωσών του σήματος εισόδου στους δύο βραχίονες και όχι στων παλμών ελέγχου.

Με τη διαδικασία που ακολουθεί εξάγεται μια σχέση που συνδέει τη διαφορική στροφή φάσης που υπεισέρχεται στις σχέσεις (1.1.1) και (1.1.2) με τα αντίστοιχα κέρδη ισχύος G₁ και G₂ [10].

Έστω \mathbf{E}_{in} η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ενός σήματος που εισέρχεται στον ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή και \mathbf{E}_{out} η ένταση του ηλεκτρικού του πεδίου όταν εξέρχεται από τον ενισχυτή. Αν $\mathbf{n} = \mathbf{n'}$ - jn" είναι ο μιγαδικός δείκτης διάθλασης του ημιαγώγιμου υλικού του ενισχυτή, ισχύει

$$\frac{\frac{\mathbf{E}_{out}}{\mathbf{E}_{in}} = e^{-j\frac{2\pi nL}{\lambda}} \Longrightarrow$$
$$\frac{\frac{\mathbf{E}_{out}}{\mathbf{E}_{in}} = e^{-j\frac{2\pi nL}{\lambda}} \cdot e^{-\frac{2\pi nL}{\lambda}} \Longrightarrow$$
$$\frac{\frac{\mathbf{E}_{out}}{\mathbf{E}_{in}} = e^{-j\phi} \cdot \sqrt{G}$$

Στην τελευταία σχέση $\varphi = \frac{2\pi n'L}{\lambda}$ είναι η μη γραμμική στροφή φάσης και $G = e^{-\frac{4\pi n'L}{\lambda}}$ το κέρδος ισχύος.

Το πραγματικό (n') και το φανταστικό (n") μέρος του δείκτη διάθλασης εξαρτώνται από την πυκνότητα N των φορέων στην ενεργό περιοχή. Συνήθως συνδέονται μέσω του συντελεστή επαύξησης γραμμής λόγω αναστροφής (α_N) των φορέων ως εξής:

$$\frac{dn'}{dN} = \alpha_{\rm N} \, \frac{dn''}{dN}$$

Όπως όμως φάνηκε από τα παραπάνω η στροφή φάσης φ συνδέεται με το πραγματικό μέρος του δείκτη διάθλασης και το κέρδος ισχύος με το φανταστικό. Συγκεκριμένα ισχύουν οι σχέσεις

$$n' = \frac{\lambda \phi}{2\pi L} \kappa \alpha n'' = -\frac{\lambda \ln G}{4\pi L}$$

Από τις τρεις τελευταίες σχέσεις προκύπτει η σχέση με την οποία συνδέονται η στροφή φάσης και το κέρδος ισχύος.

$$\frac{d(n'-\alpha_{N}n'')}{dN} = 0 \Longrightarrow$$

$$n' - \alpha_{N} n'' = C \Longrightarrow$$
$$\phi + \frac{\alpha_{N}}{2} \ln G = \frac{C\pi L}{\lambda} \Longrightarrow$$
$$\phi = -\frac{\alpha_{N}}{2} \ln G + K$$

όπου $K = \frac{C\pi L}{\lambda}$ η φάση του σήματος στην αρχή του ενισχυτή και C η αντίστοιχη

σταθερά.

Αν λοιπόν G_1 , G_2 είναι τα κέρδη που «βλέπουν» τα δύο σήματα στους δύο οπτικούς δρόμους ενός συμβολόμετρου, η διαφορά φάσης $φ_2 - φ_1$ δίδεται από τη σχέση

$$\varphi_2 - \varphi_1 = -\frac{\alpha_N}{2} \ln\left(\frac{G_2}{G_1}\right)$$
(2.1.3)

Για την εξαγωγή της τελευταίας σχέσης θεωρήθηκε ότι οι αρχικές φάσεις των δύο σημάτων είναι ίσες, δηλαδή $\frac{C_1\pi L}{\lambda} = \frac{C_2\pi L}{\lambda}$. Πράγματι τα δύο σήματα αποτελούν τις δύο συνιστώσες του αρχικού σήματος εισόδου του συμβολόμετρου και έτσι έχουν την ίδια αρχική φάση – η διαφορά φάσης από το συζεύκτη εισόδου που μπορεί να υπάρχει αναιρείται από το συζεύκτη εξόδου κι έτσι δε λαμβάνεται υπόψη.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρθηκε ότι για ποιοτικότερη μεταγωγή απαιτείται διαφορική στροφή φάσης ίση με π ακτίνια. Έχει ενδιαφέρον να προσδιοριστεί ο λόγος των κερδών ισχύος που αντιστοιχεί στη διαφορική αυτή στροφή φάσης.

$$\phi_2 - \phi_1 = -\frac{\alpha_N}{2} \ln\left(\frac{G_2}{G_1}\right) = \pi \Longrightarrow$$
$$\frac{G_2}{G_1} = e^{-\frac{2\pi}{\alpha_N}}$$

Για $\alpha_N = 6$, μια συνηθισμένη τιμή που θα χρησιμοποιηθεί και στην εξομοίωση του συμβολομέτρου Mach-Zehnder, έπεται ότι $\frac{G_2}{G_1} = 0.351$, δηλαδή τα δύο κέρδη ισχύος έχουν μια σχέση 1:3 περίπου.

Ο λόγος που τα δύο σήματα βλέπουν διαφορετικό κέρδος είναι ο διαφορετικός κορεσμός του ενισχυτή. Με τον όρο κορεσμός του ενισχυτή εννοείται η μείωση του

κέρδους ισχύος από μια αρχική τιμή G_s , η οποία ονομάζεται κέρδος ισχύος ασθενούς σήματος και αντιστοιχεί στην τιμή ασθενούς σήματος του συντελεστή ισχύος. Η μείωση αυτή του κέρδους γίνεται εντονότερη καθώς αυξάνει η ισχύς που κυματοδηγείται στον ενισχυτή. Όπως φαίνεται από τη σχέση (2.1.2) η ελάχιστη τιμή που μπορεί να έχει το κέρδος ισχύος καθορίζεται από τις απώλειες και είναι $e^{-\alpha_{int}L}$. Αυτό θα συμβεί όταν η συνολική ισχύς στον ενισχυτή $(P_c + P_s)$ είναι πάρα πολύ

$$\mu \epsilon \gamma \acute{\alpha} \lambda \eta \text{ optice } \int_{0}^{L} \left[\frac{g_s}{1 + \epsilon \left(P_c + P_s\right)} \right] dz \rightarrow 0 \quad \text{ki epsilon} \quad \epsilon \pi \circ \mu \acute{\epsilon} \vee \omega \varsigma \quad e_0^{L} \left[\frac{g_s}{1 + \epsilon \left(P_c + P_s\right)} \right] dz \rightarrow 1. \ \Delta \circ \theta \acute{\epsilon} \vee \tau \circ \varsigma \quad \acute{\circ} \tau \circ \eta$$

σε ένα συμβολόμετρο οι δύο συνιστώσες του σήματος εισόδου έχουν την ίδια ισχύ, ο διαφορετικός κορεσμός του ενισχυτή στους δύο οπτικούς δρόμους εξαρτάται από τα δύο σήματα ελέγχου. Γίνεται συνεπώς φανερός ο ρόλος του σήματος ελέγχου με τη βοήθεια του οποίου, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, επιτυγχάνεται η λειτουργία των συμβολόμετρων ως οπτικών διακοπτών.

Μέχρι τώρα δεν έγινε αναφορά στις εξισώσεις (2.1.1γ) και (2.1.1στ). Οι εξισώσεις αυτές, σε αντίθεση με τις (2.1.1α), (2.1.1β), (2.1.1δ) και (2.1.1ε), εκφράζουν μια χρονική μεταβολή και συγκεκριμένα αυτή του συντελεστή κέρδους. Όπως φαίνεται ο συντελεστής κέρδους εξαρτάται από τη συνολική ισχύ που κυματοδηγείται καθώς και από τα μεγέθη τ_s και E_{sat} . Από τη σχέση (2.1.2) προκύπτει ότι ο συντελεστής κέρδους είναι καθοριστικός παράγοντας για τη διαμόρφωση του κέρδους ισχύος. Είναι αξιοσημείωτο ότι οι εξισώσεις (2.1.1γ) και (2.1.1στ) διαφέρουν μόνο ως προς τον συντελεστή κέρδους ασθενούς σήματος. Επιπλέον οι ισχύες P_e και P_s εμφανίζονται μόνο ως άθροισμα. Επομένως το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος (2.1.1) χειρίζεται ισότιμα τα σήματα ελέγχου και εισόδου ως προς τον κορεσμό του κέρδους που προκαλούν. Συνεπώς δεν ακολουθείται η αρκετά συνηθισμένη προσέγγιση ότι το σήμα ελέγχου είναι πάρα πολύ πιο ισχυρό από το σήμα εισόδου με αποτέλεσμα ο κορεσμός του κέρδους να οφείλεται αποκλειστικά στο πρώτο [12].

Το παραπάνω μοντέλο περιγράφει αρκετά αναλυτικά τη λειτουργία του ημιαγώγιμου οπτικού ενισχυτή. Ωστόσο έχουν παραληφθεί ορισμένα φαινόμενα και μηχανισμοί που θα αύξαναν την πολυπλοκότητά του. Συγκεκριμένα έχουν αμεληθεί η απορρόφηση δύο φωτονίων (Two Photon Absorption-TPA), η απορρόφηση ελεύθερων φορέων (Free Carrier Absorption-FCA) καθώς και η μη γραμμική διάθλαση υπερύψηλης ταχύτητας (Ultrafast Nonlinear Refraction-UNR), επειδή το χρονικό εύρος των παλμών του σήματος ελέγχου όπως και των παλμών του σήματος εισόδου είναι της τάξεως των psec (10⁻¹²). Η επίδραση των μηχανισμών αυτών γίνεται έντονη για αρκετά στενότερους παλμούς κι έτσι η παράληψή τους δεν προκαλεί κάποιο σημαντικό σφάλμα. Μία ακόμη απλοποίηση γίνεται θεωρώντας ότι η διαφορά μεταξύ των φερουσών συχνοτήτων του σήματος ελέγχου και του σήματος εισόδου είναι μεγαλύτερη από 1THz. Η θεώρηση αυτή δίνει τη δυνατότητα στο μαθηματικό μοντέλο να μη συμπεριλαμβάνει το χρονικό φράγμα μεταγωγής (temporal gratings). Επιπλέον δε λαμβάνεται υπόψη η ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή (Amplified Spontaneous Emission-ASE). Το φαινόμενο αυτό έχει ως συνέπεια την ύπαρξη ενός θορύβου ευρέως φάσματος, που σίγουρα δυσχεραίνει τη λειτουργία του ενισχυτή. Παρόλα αυτά μια αναφορά στην ASE δεν εμπίπτει στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Το σύστημα (2.1.1) όπως αναφέρθηκε μέχρι το σημείο αυτό δεν αποτελεί ένα πλήρες πρόβλημα ώστε να αναζητηθεί η λύση του. Συγκεκριμένα δεν έχουν δοθεί οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος. Οι συνθήκες αυτές είναι οι ακόλουθες:

(i) $g_c(z,0) = g_{sc}$ kat $g_s(z,0) = g_{ss}$, $\forall z \in [0,L]$ (2.1.4a)

(ii)
$$P_{c}(0,t) = \operatorname{Seq}\left[t(\operatorname{div})T_{\operatorname{per}}\right]C_{c}e^{-\left(\frac{t-\left[t(\operatorname{div})T_{\operatorname{per}}\right]T_{\operatorname{per}}-n_{t}}{t_{0c}}\right)^{2}}$$

$$\kappa\alpha\iota P_{s}(0,t) = C_{s}e^{-\left(\frac{t-\left[t(\operatorname{div})T_{\operatorname{per}}\right]T_{\operatorname{per}}-n_{t}}{t_{0s}}\right)^{2}}, \forall t \in [0, N \cdot T_{\operatorname{per}}]$$
(2.1.4β)

Η πρώτη συνοριακή συνθήκη δηλώνει ότι η αρχή του πρώτου παλμού της κάθε παλμοσειράς (t=0) καθώς διέρχεται από τον ενισχυτή «βλέπει» σε κάθε σημείο του ενισχυτή συντελεστή κέρδους ίσο με την τιμή ασθενούς σήματος και επομένως κέρδος ισχύος ίσο με το κέρδος ισχύος ασθενούς σήματος. Πράγματι στην περίπτωση αυτή το κέρδος του ενισχυτή δεν έχει κορεστεί κι έτσι έχει την αρχική του τιμή.

Η δεύτερη συνοριακή συνθήκη εκφράζει το γεγονός ότι το σήμα που φτάνει στην αρχή του ενισχυτή (z=0) αποτελεί μία σειρά από παλμούς Gauss. Το χρονικό εύρος των παλμών για την περίπτωση του σήματος ελέγχου είναι t_{0c} και για την περίπτωση του σήματος εισόδου t_{0s} . Το εύρος t_0 ενός παλμού Gauss και το εύρος ημίσειας ισχύος T_{FWHM} συνδέονται με τη σχέση $T_{FWHM} = 2t_0 \sqrt{\ln 2}$ [1]. Οι σταθερές C_c , C_s είναι οι μέγιστες τιμές (peak values) των ισχύων των παλμών ελέγχου και εισόδου αντίστοιχα. Ο πίνακας Seq είναι ένας μονοδιάστατος πίνακας που περιέχει N στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά έχουν τιμή είτε 0 είτε 1, πρόκειται δηλαδή για τα δυαδικά ψηφία που εκφράζουν οι παλμοί ελέγχου. Για την παλμοσειρά του σήματος εισόδου δεν χρησιμοποιείται αντίστοιχος όρος αφού πρόκειται για μια ακολουθία διαδοχικών 1. Ο συμβολισμός t(div)T_{per} δηλώνει το ακέραιο μέρος του πηλίκου $\frac{t}{T_{per}}$ και η σταθερά n_t χρησιμοποιείται έτσι ώστε η ενέργεια του πρώτου παλμού της παλμοσειράς να βρίσκεται ολόκληρη στο διάστημα [0, N · T_{per}].

Μετά την παρουσίαση του συστήματος (2.1.1) και των συνοριακών συνθηκών (2.1.4) στην παράγραφο που ακολουθεί προτείνεται μία μέθοδος για την επίλυσή του στην οποία βασίζεται και η εξομοίωση του συμβολόμετρου Mach-Zehnder.

2.2 Αριθμητική επίλυση του μαθηματικού μοντέλου

Οι εξισώσεις (2.1.1) συνιστούν ένα μη γραμμικό σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης και μαζί με τις συνθήκες (2.1.4) αποτελούν ένα πρόβλημα συνοριακών τιμών. Για τον υπολογισμό των ισχύων εξόδου του συμβολόμετρου Mach-Zehnder απαιτείται η γνώση των συναρτήσεων P_s και φ_s σε κάθε βραχίονα. Το κέρδος ισχύος G που εμφανίζεται στις εξισώσεις (1.1.1) και (1.1.2) ισούται με το λόγο $\frac{P_s(L,t)}{P_s(0,t)}$. Για τον υπολογισμό όμως των συναρτήσεων P_s και φ_s απαιτείται η λύση του συστήματος των εξισώσεων (2.1.1α), (2.1.1γ), (2.1.1δ), (2.1.1ε) και (2.1.1στ). Η συνάρτηση φ_c - εξίσωση (2.1.1β) - δεν παρουσιάζει άμεσο ενδιαφέρον αφού η διαφορά φάσης που υπεισέρχεται στις εξισώσεις (1.1.1) και (1.1.2) αναφέρεται στις φάσεις των συνιστωσών του σήματος εισόδου στους δύο βραχίονες κι όχι στων παλμών ελέγχου.

Το σύστημα αυτό δεν μπορεί να λυθεί αναλυτικά (λύση κλειστής μορφής), αλλά μπορεί να αντιμετωπιστεί αριθμητικά. Για την αριθμητική επίλυση επιλέχθηκε η μέθοδος Euler [5], [6], λόγω της απλότητάς της. Πρόκειται για τη μέθοδο Taylor τάξης q=1. Αντί της μεθόδου Euler θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν άλλες μέθοδοι, όπως η μέθοδος Runge-Kutta. Η χωρική μεταβλητή z μεταβάλλεται στο διάστημα [0,L], όπου L το μήκος του ημιαγώγιμου οπτικού ενισχυτή, και η χρονική μεταβλητή t μεταβάλλεται στο [0, N · T_{per}], όπου T_{per} το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών (περίοδος παλμού) και N ο αριθμός των παλμών που θεωρείται για την εξομοίωση. Για παράδειγμα αν το σύστημα επεξεργάζεται παλμούς με ρυθμό 10 Gbits/sec το χρονικό διάστημα T_{per} =100 psec, ενώ σε ρυθμό των 40 Gbits/sec αντιστοιχεί T_{per} =25 psec.

Με βάση τη μέθοδο Euler, επιλέγονται m+1 ισαπέχοντα σημεία του διας τηματος [0,L] και N·per+1 ισαπέχοντα σημεία του [0, N·T_{per}] με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\begin{split} \left\{ z_{k} \right\}_{k=0}^{m} \ \mu\epsilon \ z_{k} &= k\Delta z \text{, ópin } \Delta z = \frac{L}{m} \\ \left\{ t_{n} \right\}_{n=0}^{N \cdot per} \ \mu\epsilon \ t_{n} &= n\Delta t \text{, ópin } \Delta t = \frac{T_{per}}{per} \end{split}$$

Η παραπάνω διακριτοποίηση των ανεξάρτητων μεταβλητών z και t έχει την εξής φυσική σημασία. Στην ουσία ο ενισχυτής και οι παλμοί διαιρούνται σε μικρά χωρικά και χρονικά τμήματα αντίστοιχα. Έτσι το σημείο (z_k, t_n) αναφέρεται στο χωρικό σημείο z_k του ενισχυτή και στο χρονικό σημείο t_n της παλμοσειράς.

Στη συνέχεια κατασκευάζεται επαναληπτικά μια ακολουθία προσεγγιστικών τιμών των συναρτήσεων. Αν για παράδειγμα $g(z_k, t_n)$ είναι η ακριβής λύση της συναρτήσεως του συντελεστή κέρδους στο σημείο (z_k, t_n) , αυτή προσεγγίζεται από την τιμή $g_{k,n}$. Η τιμή $g(z_k, t_n)$, και επομένως προσεγγιστικά κι η τιμή $g_{k,n}$, εκφράζει το συντελεστή κέρδους που «βλέπει» στη θέση z_k του ενισχυτή το χρονικό σημείο t_n της παλμοσειράς. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι, ομοίως με τη συνεχή ανεξάρτητη μεταβλητή t, η ακολουθία $\{t_n\}_{n=0}^{N\text{-per}}$ δεν εκφράζει κάποια χρονική εξέλιξη, αλλά τον χρονικό τεμαχισμό της παλμοσειράς εισόδου. Για παράδειγμα το $g(z_m, t_0)$ εκφράζει το συντελεστή κέρδους που «βλέπει» το πρώτο χρονικό σημείο της παλμοσειράς στην έξοδο του ενισχυτή κι όχι το συντελεστή κέρδους στην έξοδο του ενισχυτή τη στιγμή t=0. Το σύνολο των επαναληπτικών εξισώσεων από τις οποίες προκύπτουν οι ακολουθίες των προσεγγιστικών τιμών των συναρτήσεων είναι το ακόλουθο:

$$P_{c_{j,i+1}} = P_{c_{j,i}} + \Delta z \left(\frac{g_{c_{j,i}} P_{c_{j,i}}}{1 + \varepsilon (P_{c_{j,i}} + P_{s_{j,i}})} - \alpha_{int} P_{c_{j,i}} \right)$$
(2.2.1a)

$$g_{c_{j+i,i}} = g_{c_{j,i}} + \Delta t \left[\frac{g_{sc} - g_{c_{j,i}}}{\tau_s} - \frac{1}{E_{satc}} \frac{g_{c_{j,i}} \left(P_{c_{j,i}} + P_{s_{j,i}}\right)}{1 + \epsilon \left(P_{c_{j,i}} + P_{s_{j,i}}\right)} \right]$$
(2.2.1β)

$$P_{s_{j,i+1}} = P_{s_{j,i}} + \Delta z \left(\frac{g_{s_{j,i}} P_{s_{j,i}}}{1 + \varepsilon (P_{c_{j,i}} + P_{s_{j,i}})} - \alpha_{int} P_{s_{j,i}} \right)$$
(2.2.16)

$$g_{s_{j+i,i}} = g_{s_{j,i}} + \Delta t \left[\frac{g_{ss} - g_{s_{j,i}}}{\tau_s} - \frac{1}{E_{sats}} \frac{g_{s_{j,i}} \left(P_{s_{j,i}} + P_{c_{j,i}}\right)}{1 + \epsilon \left(P_{s_{j,i}} + P_{c_{j,i}}\right)} \right]$$
(2.2.1 ϵ)

$$\varphi_{s_{j+i,i}} = \varphi_{s_{j,i}} + \Delta z \left(-\frac{1}{2} \alpha_N g_{s_{j,i}} \right)$$
(2.2.1st)

Οι δείκτες j και i αναφέρονται στα χρονικά και χωρικά σημεία αντίστοιχα. Η αρίθμηση των επαναληπτικών εξισώσεων έγινε σε αντιστοιχία με τις εξισώσεις του συστήματος (2.1.1).

Με τη βοήθεια του προγράμματος εξομοίωσης μπορεί να υλοποιηθεί η παραπάνω επαναληπτική διαδικασία. Τα αποτελέσματα εμπεριέχονται σε πίνακες της ακόλουθης μορφής,

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} P_{00} & K & P_{0m} \\ M & O & M \\ P_{p0} & L & P_{pm} \end{pmatrix}, \ \mathbf{\phi} = \begin{pmatrix} \phi_{00} & K & \phi_{0m} \\ M & O & M \\ \phi_{p0} & L & \phi_{pm} \end{pmatrix} \text{ kat } \mathbf{g} = \begin{pmatrix} g_{00} & K & g_{0m} \\ M & O & M \\ g_{p0} & L & g_{pm} \end{pmatrix}$$

για την ισχύ, τη στροφή φάσης και το συντελεστή κέρδους αντίστοιχα. Οι γραμμές των παραπάνω πινάκων αναφέρονται στα χρονικά σημεία της παλμοσειράς και οι στήλες στα χωρικά σημεία του ενισχυτή. Με βάση τις συνοριακές συνθήκες, είναι γνωστή η πρώτη στήλη των πινάκων **P** και **φ** καθώς κι η πρώτη γραμμή του πίνακα **g**. Συγκεκριμένα στην περίπτωση των παλμών ελέγχου, η πρώτη στήλη του πίνακα **P** καθορίζεται δειγματοληπτώντας την παλμοσειρά ελέγχου, τα στοιχεία της πρώτης στήλη του πίνακα **φ** είναι ίσα με μηδέν και τα στοιχεία της πρώτης γραμμής του πίνακα **g** ισούνται με g_{sc} . Ομοίως για τους παλμούς του σήματος εισόδου η πρώτη στήλη του πίνακα **φ** είναι δειγματοληπτώντας την παλμούς του σήματος εισόδου, τα αντίστοιχα στοιχεία του πίνακα **φ** είναι ίσα με μηδέν και τα στοιχεία της πρώτη

στήλης του πίνακα **g** ισούνται με g_{ss}. Από τις επαναληπτικές εξισώσεις φαίνεται ότι ο πίνακας **φ** μπορεί να υπολογιστεί μετά των υπολογισμό των πινάκων **P** και **g**, αφού ο υπολογισμός των δύο τελευταίων δεν προϋποθέτει τη γνώση στοιχείων του πίνακα **φ**. Οι πίνακες **P**, **g** μπορούν να πάρουν και τη μορφή ενός «διπλού» πίνακα, όπως φαίνεται παρακάτω



για τους παλμού εισόδου και ελέγχου αντίστοιχα.

Έστω ότι η επαναληπτική διαδικασία πραγματοποιείται με τον ακόλουθο τρόπο όπου p=N·per.

```
για j=0 έως και p
για i=0 έως και m {
  αν i+1≤m υπολογισμός του P_{c_{j,i+1}}
  αν i+1≤m υπολογισμός του P_{s_{j,i+1}}
  αν j+1≤p υπολογισμός του G_{c_{i+1,j}}
  αν j+1≤p υπολογισμός του G_{s_{i+1,j}}
  αύξηση του i κατά 1
}
```

Οι δύο προϋποθέσεις (i+1≤m) και (j+1≤p) χρησιμοποιούνται αφού σε αντίθετη περίπτωση θα δημιουργούταν μία επιπλέον στήλη και μία επιπλέον γραμμή στους πίνακες **P** και **g** αντίστοιχα. Αυτός ο τρόπος υλοποίησης της επαναληπτικής διαδικασίας αντιστοιχεί στην εξής εποπτική διαδικασία υπολογισμού των στοιχείων των πινάκων **P** και **g**. Γνωρίζοντας ένα «διπλό» στοιχείο του πίνακα **Pg** μπορεί να υπολογιστεί το στοιχείο του πίνακα **P** που ανήκει στην ίδια στήλη και στην επόμενη στήλη, καθώς και το στοιχείο του πίνακα **g** που ανήκει στην ίδια στήλη και στην επόμενη γραμμή. Ο υπολογισμός των στοιχείων γίνεται ανά γραμμές. Για κάθε j

δηλαδή υπολογίζονται τα στοιχεία της γραμμής j του πίνακα **P** και τα στοιχεία της γραμμής j+1 του πίνακα **g**.

Έχοντας υπολογίσει τους πίνακες P και g, μπορεί να υπολογιστεί κι ο πίνακας $\boldsymbol{\varphi}_{s}$ με την ακόλουθη διαδικασία.

```
για j=0 έως και p
για i=0 έως και m-1 {
υπολογισμός του φ<sub>s,i+1</sub>
αύξηση του i κατά 1
}
αύξηση του j κατά 1
}
```

Η μέγιστη τιμή του i είναι m-1 ώστε να αποφευχθεί, όπως και προηγουμένως, ο υπολογισμός μιας επιπλέον στήλης. Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο γίνεται κι ο υπολογισμός του πίνακα **φ**_c, ο οποίος, όπως προαναφέρθηκε, δεν παρουσιάζει άμεσο ενδιαφέρον.

Ο αρχικός στόχος για την επίλυση του συστήματος (2.1.1) είναι ο υπολογισμός των δύο εξόδων του συμβολόμετρου Mach-Zehnder από τις σχέσεις (1.1.1) και (1.1.2). Με βάση τα παραπάνω μπορεί να υπολογιστεί η διαφορική στροφή φάσης Δφ. Επιπλέον όμως απαιτείται κι ο υπολογισμός των κερδών G. Τα κέρδη G υπολογίζονται ως εξής:

για j=0 έως και p { $G_{s_{j}} = \frac{P_{s_{j,m}}}{P_{s_{j,0}}}$ αύξηση του j κατά 1 $}$

δηλαδή το κέρδος προκύπτει από το λόγο των στοιχείων της τελευταίας στήλης προς τα στοιχεία της πρώτης στήλης του πίνακα $\mathbf{P}_{\!\rm s}$.

Με τη διαδικασία που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό μπορούν να προκύψουν ορισμένα χρήσιμα αποτελέσματα που αφορούν τη λειτουργία του ημιαγώγιμου οπτικού ενισχυτή. Τα αποτελέσματα αυτά παρατίθενται στην επόμενη παράγραφο.

2.3 Εξομοίωση της λειτουργίας του ημιαγώγιμου οπτικού ενισχυτή και αποτελέσματα

Η αριθμητική διαδικασία που παρουσιάστηκε για την επίλυση του συστήματος (2.1.1) με τις συνοριακές συνθήκες (2.1.4) υλοποιείται στον κώδικα εξομοίωσης. Συγκεκριμένα αποτελεί το βασικό μέρος της συνάρτησης MachZehnder του προγράμματος optical_gate.cpp (βλ. Παράρτημα Α). Στην παρούσα παράγραφο εξομοιώνεται η λειτουργία του ημιαγώγιμου οπτικού ενισχυτή για την περίπτωση που διέρχεται ένας παλμός Gauss από αυτόν, οπότε προκύπτουν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα για τη λειτουργία του και τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους.

Ο παλμός που εισέρχεται στον ενισχυτή εικονίζεται στο σχήμα 2.3.1. Συγκεκριμένα, στον οριζόντιο άξονα παριστάνεται η χρονική μεταβλητή t και στον κατακόρυφο άξονα η κανονικοποιημένη τιμή της ισχύος του παλμού.



Σχήμα 2.3.1 Παλμός εισόδου Gauss με χρονικό εύρος $T_{FWHM} = 7psec$

Οι τιμές που χρησιμοποιούνται στην παράγραφο αυτή για τις παραμέτρους που αφορούν τον παλμό και τον ενισχυτή συνοψίζονται στον πίνακα 2.3.1. Στην περίπτωση που για κάποια παράμετρο χρησιμοποιηθεί και μια διαφορετική τιμή θα γίνεται ειδική αναφορά στο κείμενο ή σε κάποια γραφική παράσταση.

Παλμός Gauss	
Χρονικό εύρος ημίσειας ισχύος (Τ _{FWHM})	7 psec
Ενέργεια του παλμού	10 fJ
Ημιαγώγιμος Οπτικός Ενισχυτής	
Μήκος (L)	1500 μm
Συντελεστής επαύξησης γραμμής $\left(lpha_{_{ m N}} ight)$	6
Παράγοντας μη γραμμικής συμπίεσης του κέρδους (ε)	$0.2 \ \mathrm{W}^{-1}$
Χρόνος επανασύνδεσης των φορέων (τ_s)	20 psec
Ενέργεια κορεσμού κέρδους (Ε _{sat})	1000 fJ
Συντελεστές κέρδους ασθενούς σήματος (g_s)	5900 m ⁻¹
Εσωτερικές γραμμικές απώλειες $\left(\alpha_{int} \right)$	2000 m ⁻¹

Πίνακας 2.3.1

Η χρονική μεταβολή του συντελεστή κέρδους και του κέρδους ισχύος παρουσιάζεται στα σχήματα 2.3.2 και 2.3.3 αντίστοιχα. Κάθε ένα από τα δύο σχήματα αποτελείται από δύο καμπύλες. Η συνεχής καμπύλη αντιστοιχεί σε παλμό ενέργειας 5 fJ και η καμπύλη με τις κουκίδες σε παλμό ενέργειας 10 fJ. Το χρονικό εύρος του παλμού είναι το ίδιο κι αυτό που αλλάζει είναι η μέγιστη τιμή της ισχύος του. Ο συντελεστής κέρδους και το κέρδος ισχύος ακολουθούν την ίδια, ποιοτικά, μεταβολή. Αρχικά ξεκινούν από μία μέγιστη τιμή, ίση με την αντίστοιχη τιμή ασθενούς σήματος. Καθώς ο παλμός εισέρχεται στον ενισχυτή η τιμή τους μειώνεται και γίνεται ελάχιστη τη στιγμή που όλη η ενέργεια του παλμού έχει εισέλθει στον ενισχυτή. Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια του παλμού εισόδου τόσο περισσότερο κορέννυται το κέρδος του ενισχυτή. Στη συνέχεια τόσο το κέρδος ισχύος όσο κι ο συντελεστής κέρδους αρχίζουν να ανακάμπτουν.



Σχήμα 2.3.2 Χρονική μεταβολή του συντελεστή κέρδους για δύο διαφορετικές τιμές της ενέργειας του παλμού εισόδου. Συγκεκριμένα το εύρος του παλμού είναι σταθερό και αλλάζει η μέγιστη τιμή της ισχύος του.



Σχήμα 2.3.3 Χρονική μεταβολή του κέρδους ισχύος για δύο διαφορετικές τιμές της ενέργειας του παλμού εισόδου. Συγκεκριμένα το εύρος του παλμού είναι σταθερό και αλλάζει η μέγιστη τιμή της ισχύος του.

Στην περίπτωση που οι δύο παλμοί έχουν διαφορετικό χρονικό εύρος, τότε η χρονική στιγμή στην οποία το κέρδος και ο συντελεστής κέρδους γίνονται ελάχιστα θα ήταν διαφορετική για κάθε παλμό, αφού στην περίπτωση του μεγαλύτερου χρονικά παλμού θα απαιτείτο περισσότερος χρόνος για να εισέλθει όλη η ενέργειά του στον ενισχυτή.

Από μια προσεκτικότερη παρατήρηση μεταξύ των σχημάτων 3.2.2, 3.2.3 και 3.2.1 προκύπτει ότι το κέρδος γίνεται ελάχιστο λίγο πριν εισέλθει το τελικό τμήμα του παλμού στον ενισχυτή. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το μήκος του ενισχυτή είναι L=1.5mm καθώς και ότι το ημιαγώγιμο υλικό από το οποίο αποτελείται παρουσιάζει δείκτη διάθλασης n=3.56 [11] προκύπτει ότι ο χρόνος διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος κατά μήκος του ενισχυτή είναι $\frac{1.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{\frac{3}{10^8} \cdot 10^8 \text{ m}} = 1.78 \cdot 10^{-11} \text{ sec} = 17.8 \text{ psec}.$ Με βάση το σχήμα 3.2.1 ο χρόνος που 3.56 sec

απαιτείται για να εισέλθει ολόκληρος ο παλμός στον ενισχυτή είναι περίπου 20 psec. Συνεπώς ποτέ η ενέργειά του δε θα βρίσκεται ολόκληρη μέσα στον ενισχυτή. Απλώς για κάποια χρονική περίοδο η τιμή της ενέργειάς του, που θα βρίσκεται μέσα στον ενισχυτή, θα έχει μέγιστη τιμή. Τότε θα παρουσιάζεται και η ελάχιστη τιμή του κέρδους. Το ελάχιστο αυτό εμφανίζεται λίγο πριν από τη στιγμή κατά την οποία και το τελευταίο τμήμα του παλμού θα έχει εισέλθει στον ενισχυτή. Προφανώς όσο μεγαλύτερο είναι το χρονικό εύρος του παλμού τόσο πιο έντονο θα είναι το φαινόμενο αυτό.

Επειδή όπως έγινε φανερό η μεταβολή του συντελεστή κέρδους είναι ποιοτικά η ίδια με αυτή του κέρδους ισχύος, στα διαγράμματα που ακολουθούν θα παρουσιάζεται μόνο η μεταβολή του κέρδους ισχύος.

Μία παράμετρος η οποία επιδρά στη διαμόρφωση του κέρδους και της οποίας η τιμή μεταβάλλεται εύκολα μέσω του ρεύματος έκχυσης είναι το κέρδος ασθενούς σήματος (g_s). Στο διάγραμμα 2.3.4 παρουσιάζεται η καμπύλη του κέρδους για g_s = 5900m⁻¹ και g_s = 6800m⁻¹. Η πρώτη τιμή αντιστοιχεί σε κέρδος ισχύος ασθενούς σήματος ίσο με 24.3 dB, ενώ η δεύτερη σε αντίστοιχο κέρδος 30.2 dB. Στην περίπτωση της μεγαλύτερης τιμής του κέρδους ασθενούς σήματος ο παλμός έχει πολύ πιο δραστική επίδραση στον κορεσμό του κέρδους. Με άλλα λόγια για μεγαλύτερα κέρδη ασθενούς σήματος χρησιμοποιώντας παλμό συγκεκριμένης ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί πολύ μεγαλύτερη μεταβολή στο κέρδος του ενισχυτή.



Σχήμα 2.3.4 Χρονική μεταβολή του κέρδους ισχύος για δύο διαφορετικές τιμές του κέρδους ασθενούς σήματος.



Σχήμα 2.3.5 Χρονική μεταβολή του κέρδους ισχύος για δύο διαφορετικές τιμές της ενέργειας κορεσμού.

Άλλη μία παράμετρος της οποίας η τιμή είναι καθοριστική για τον κορεσμό του κέρδους είναι η ενέργεια κορεσμού (E_{sat}). Η τιμή της βέβαια δε μπορεί να μεταβληθεί με τη ίδια ευκολία όπως στην περίπτωση του κέρδους ασθενούς σήματος. Στο διάγραμμα του σχήματος 2.3.5 παρουσιάζεται το κέρδος ισχύος για δύο διαφορετικές τιμές της ενέργειας κορεσμού. Είναι προφανές ότι όσο μικρότερη είναι η ενέργεια κορεσμού τόσο πιο εύκολα κορέννυται το κέρδος του ενισχυτή. Συνεπώς η ενέργεια κορεσμού συνιστά ένα μέτρο για την ευκολία με την οποία μπορεί να κορεστεί το κέρδος ενός συγκεκριμένου ενισχυτή.

Στις παραγράφους 1.2 και 1.3 έγινε λόγος για τη σημασία του χρόνου ανάκαμψης του κέρδους στη λειτουργία του μη γραμμικού συμβολόμετρου υπερύψηλων ταχυτήτων (UNI) και του ενισχυτή laser ημιαγωγού σε καθρέφτη βρόχου (SLALOM). Η βασική παράμετρος από την οποία εξαρτάται ο χρόνος ανάκαμψης του κέρδους είναι ο χρόνος επανασύνδεσης των φορέων (τ_s). Στο σχήμα 2.3.6 απεικονίζεται η εξάρτηση αυτή. Συγκεκριμένα όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος επανασύνδεσης των φορέων τόσο πιο αργά ανακάμπτει το κέρδος του ενισχυτή.

Με βάση το σχήμα 2.3.6 γίνονται σαφή τα όσα αναφέρθηκαν στις παραγράφους 1.2 και 1.3. Ένα κοινό χαρακτηριστικό των συμβολόμετρων που περιγράφονται στις παραγράφους αυτές είναι ότι αποτελούνται από μόνο ένα ημιαγώγιμο οπτικό ενισχυτή από τον οποίο διέρχονται τα σήματα των δύο οπτικών δρόμων με κάποια σχετική χρονική καθυστέρηση. Στην περίπτωση που το κέρδος δεν έχει ανακάμψει πλήρως μέχρι τη στιγμή που ο δεύτερος, κατά σειρά διέλευσης, παλμός φτάνει στον ενισχυτή, ο παλμός αυτός «βλέπει» αρχικό κέρδος διαφορετικό του κέρδους ασθενούς σήματος.



Σχήμα 2.3.6 Χρονική μεταβολή του κέρδους ισχύος για δύο διαφορετικές τιμές του χρόνου επανασύνδεσης των φορέων.

Μέχρι το σημείο αυτό έγινε αναφορά στην καμπύλη του κέρδους του ενισχυτή. Όπως όμως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, ο ημιαγώγιμος οπτικός ενισχυτής χρησιμοποιείται στα συμβολόμετρα κυρίως λόγω της μη γραμμικής στροφής φάσης που προκαλεί. Αυτή η μη γραμμική στροφή φάσης περιγράφεται από την εξίσωση (2.1.1ε) και εικονίζεται στο διάγραμμα του σχήματος 2.3.7 για δύο διαφορετικές τιμές του συντελεστή επαύξησης γραμμής (α_N).

Αρχικά η φάση έχει μία τιμή η οποία αντιστοιχεί στο κέρδος ασθενούς σήματος. Καθώς αυξάνει η ενέργεια του παλμού που εισέρχεται στον ενισχυτή η τιμή της φάσης μεγαλώνει και φτάνει σε κάποιο μέγιστο. Στη συνέχεια καθώς η ενέργεια του παλμού αρχίζει να εξέρχεται από τον ενισχυτή, η φάση μειώνεται και τελικά αποκτά την τιμή που αντιστοιχεί στο κέρδος ασθενούς σήματος. Συνεπώς όπως εξάλλου είναι αναμενόμενο από την εξίσωση (2.1.1ε), η χρονική μεταβολή της στροφής φάσης είναι αντίστοιχη με αυτή του συντελεστή κέρδους.

Για μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή επαύξησης γραμμής η απόλυτη τιμή της φάσης είναι μεγαλύτερη και επιπλέον αυξάνει η διαφορά μεταξύ της μέγιστης τιμής της φάσης και της τιμής που αντιστοιχεί στο κέρδος ασθενούς σήματος, κάτι το οποίο έχει ιδιαίτερη σημασία στη λειτουργία των συμβολόμετρων. Στην περίπτωση των συμβολόμετρων δεν ενδιαφέρει η απόλυτη τιμή της φάσης, αλλά η διαφορά στη στροφή της φάσης μεταξύ των σημάτων των δυο οπτικών δρόμων. Με βάση το σχήμα 2.3.7 προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή επαύξησης γραμμής τόσο λιγότερη ενέργεια παλμού ελέγχου απαιτείται για την επίτευξη κάποιας δεδομένης διαφορικής στροφής φάσης.



Σχήμα 2.3.7 Χρονική μεταβολή της στροφής στη φάση του σήματος για δύο διαφορετικές τιμές του συντελεστή επαύξησης γραμμής.

Κεφάλαιο 3

Εξομοίωση της λειτουργίας του συμβολόμετρου Mach-Zehnder

Στο τρίτο και τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας αυτής παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εξομοίωσης της λειτουργίας της αμιγώς οπτικής λογικής πύλης ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟΥ Ή (XOR) με χρήση της συμβολομετρικής διάταξης Mach-Zehnder.

Στην πρώτη παράγραφο γίνεται μια σύντομη περιγραφή του κώδικα του προγράμματος optical_gate.cpp που χρησιμοποιήθηκε για την εξομοίωση. Στη δεύτερη παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για λειτουργία της πύλης με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στα 10 Gbps και στα 40 Gbps και εξάγονται ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα. Τέλος στην τρίτη και τελευταία παράγραφο γίνεται αναφορά στην παραμόρφωση που προκαλείται στη μορφή των παλμών που διαδίδονται στην οπτική πύλη Mach-Zehnder.

3.1 Περιγραφή του προγράμματος εξομοίωσης

Για την εξομοίωση της λογικής πύλης ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟΥ Ή αναπτύχθηκε το πρόγραμμα optical_gate.cpp σε γλώσσα προγραμματισμού C το οποίο παρατίθεται στο παράρτημα Α. Η δομή του προγράμματος αυτού είναι η ακόλουθη:

συνάρτηση main()

{

για num=NUM_MIN έως NUM_MAX { εκτέλεση της συνάρτησης MachZehnder() εκτέλεση της συνάρτησης characterize()

```
αύξηση του num κατά 1
      }
      συνάρτηση printfiles()
}
συνάρτηση MachZehnder()
{
      επίλυση του προβλήματος που ορίζεται από το σύστημα (2.1.1)
      και τις συνοριακές συνθήκες (2.1.4) με τη βοήθεια της
      αριθμητικής διαδικασίας που παρουσιάστηκε στην παράγραφο
      2.2, και για τους δύο βραχίονες του συμβολόμετρου
      MachZehnder
}
συνάρτηση characterize()
{
      υπολογισμός της τιμής των κριτηρίων για την ποιότητα της
      μεταγωγής με βάση της σχέσεις (1.5.1), (1.5.2) και (1.5.3)
}
συνάρτηση printfiles()
{
      εκτύπωση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις
                     MachZehnder()
      συναρτήσεις
                                       και
                                              characterize()
                                                             σε
      συγκεκριμένα αρχεία κειμένου (.txt)
}
```

Από τη μεταβλητή num εξαρτάται η ενέργεια των παλμών. Με κατάλληλη χρήση του προγράμματος optical_gate.cpp μπορεί να μεταβάλλεται είτε η ενέργεια των παλμών του ενός σήματος ελέγχου, είτε η ενέργεια των παλμών και των δύο σημάτων ελέγχου, είτε τέλος η ενέργεια των παλμών εισόδου. Για την εξαγωγή των διαγραμμάτων που παρουσιάζονται στη συνέχεια, το πρόγραμμα optical_gate.cpp χρησιμοποιήθηκε έτσι ώστε από τη μεταβλητή num να εξαρτάται η ενέργεια των παλμών και των δύο σημάτων ελέγχου.

3.2 Εξομοίωση της λειτουργίας της αμιγώς οπτικής λογικής πύλης ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟΥ Ή (XOR)

Στόχος της εξομοίωσης είναι να βρεθεί ένας τρόπος με τον οποίο να βελτιστοποιείται η λειτουργία της πύλης. Η λογική πύλη υλοποιείται με τη βοήθεια του συμβολόμετρου Mach-Zehnder το οποίο αποτελείται από δύο ημιαγώγιμους οπτικούς ενισχυτές. Οι χαρακτηριστικές παράμετροι των ενισχυτών αυτών συνοψίζονται στον πίνακα 3.2.1.

Ημιαγώγιμοι Οπτικοί Ενισχυτές	
Μήκος (L)	1500 μm
Συντελεστής επαύξησης γραμμής $\left(lpha_{_{ m N}} ight)$	6
Παράγοντας μη γραμμικής συμπίεσης του κέρδους (ε)	$0.2 \ W^{-1}$
Χρόνος επανασύνδεσης των φορέων (τ_s)	20 psec
Ενέργεια κορεσμού κέρδους (E _{sat})	1000 fJ
Εσωτερικές γραμμικές απώλειες (α _{int})	$2000 m^{-1}$

Πίνακας 3.2.1 Χαρακτηριστικές παράμετροι των ημιαγώγιμων οπτικών ενισχυτών

Η τιμή του συντελεστή κέρδους ασθενούς σήματος (g_s) εξαρτάται από το ρεύμα έκχυσης και συνεπώς μπορεί να μεταβληθεί πολύ εύκολα. Για το λόγο αυτό θεωρείται ως «ελεύθερη» παράμετρος της οποίας η βέλτιστη περιοχή τιμών θα προσδιοριστεί με βάση τα αποτελέσματα της εξομοίωσης. Συγκεκριμένα οι γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν αποτελούνται από τρεις καμπύλες οι οποίες αντιστοιχούν σε συντελεστή κέρδους ασθενούς σήματος ίσο με 5200 m⁻¹, 5900 m⁻¹ και 6800 m⁻¹. Οι τρεις αυτές τιμές αντιστοιχούν σε κέρδος ισχύος ασθενούς σήματος ίσο με 20.4 dB, 24.7 dB και 30.2 dB αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα της εξομοίωσης της λειτουργίας της λογικής πύλης αφορούν ρυθμούς δεδομένων στα 10 Gbps και στα 40 Gbps. Ο κύκλος καθήκοντος (duty cycle) διατηρείται ίδιος και ισούται με 7/100. Έτσι το χρονικό εύρος ημίσειας ισχύος των παλμών για ρυθμό δεδομένων στα 10 Gbps είναι 7 psec και για ρυθμό δεδομένων στα 40 Gbps είναι 7/4 psec, δηλαδή 1.75 psec. Συνεπώς η μελέτη των δύο αυτών περιπτώσεων αντανακλά την επίδραση που έχουν οι δύο ίδιοι και συγκεκριμένοι ημιαγώγιμοι οπτικοί ενισχυτές στη λειτουργία της λογικής πύλης για διαφορετικό ρυθμό δεδομένων.

Για κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις ρυθμών δεδομένων παρατίθενται αρχικά τρεις ομάδες διαγραμμάτων. Κάθε ομάδα αντιπροσωπεύει διαφορετικό βαθμό κορεσμού του κέρδους των ημιαγώγιμων οπτικών ενισχυτών. Η πρώτη ομάδα αναφέρεται σε χαμηλό βαθμό κορεσμού, η δεύτερη σε ένα μέσο βαθμό κορεσμού και η τρίτη σε βαθύ κορεσμό του κέρδους των ενισχυτών. Όπως είναι αναμενόμενο η ενέργεια των παλμών εισόδου ακολουθεί αντίστοιχη μεταβολή με αυτή του βαθμού κορεσμού, δηλαδή είναι μεγαλύτερη για μεγαλύτερο βαθμό κορεσμού. Συγκεκριμένα στα διαγράμματα της πρώτης ομάδας η ενέργεια των παλμών εισόδου είναι 0.2 fJ, στα αντίστοιχα της δεύτερης ομάδας είναι 3 fJ και σε αυτά της τρίτης ομάδας είναι 40 fJ. Οι τιμές αυτές της ενέργειας αναφέρονται στο σήμα εισόδου σε κάθε ενισχυτή και επομένως η ενέργεια του αρχικού σήματος εισόδου στο συμβολόμετρο είναι η αντίστοιχη διπλάσια.

Κάθε μία από τις ομάδες αυτές αποτελείται από τέσσερα διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν ορισμένα μεγέθη συναρτήσει της ενέργειας των παλμών ελέγχου. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παλμοί ελέγχου στους δύο βραχίονες του συμβολόμετρου θεωρούνται ίσης ενέργειας. Στο πρώτο διάγραμμα απεικονίζεται ο λόγος αντίθεσης μεταξύ της θύρας μεταγωγής και της θύρας ανάκλασης και στο δεύτερο διάγραμμα η μέση τιμή των μέγιστων τιμών (peak values) ισχύος στη θύρα μεταγωγής στις χρονικές περιόδους που αναμένεται λογικό 1, δηλαδή ο αριθμητής του λόγου αντίθεσης. Για λόγους συντομίας η ισχύς αυτή θα αναφέρεται ως μέση ισχύς. Στο τρίτο και τέταρτο διάγραμμα παρουσιάζονται η διαμόρφωση πλάτους και ο λόγος απόσβεσης για τη θύρα μεταγωγής. Ο ακριβής ορισμός των μεγεθών αυτών έχει δοθεί στην παράγραφο 1.5.

Εκτός από τα διαγράμματα που αναφέρθηκαν, παρουσιάζονται κι ορισμένα ακόμη τα οποία απεικονίζουν αναλυτικά τη λειτουργία της πύλης και βοηθούν στην κατανόηση της συμπεριφοράς της.

Τέλος, στην παράγραφο 3.2.3 γίνεται λόγος για την παραμόρφωση που υφίστανται οι παλμοί που εισέρχονται στο συμβολόμετρο, κατά τη διάδοσή τους σε αυτό.

3.2.1 Λειτουργία της πύλης με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στα 10 Gbps

Χαμηλός βαθμός κορεσμού του κέρδους – Ενέργεια παλμών εισόδου στους ενισχυτές ίση με 0.2 fJ



Σχήμα 3.2.1.1 (α) Λόγος αντίθεσης, (β) μέση ισχύς παλμών εξόδου στη θύρα μεταγωγής, (γ) διαμόρφωση πλάτους στη θύρα μεταγωγής και (δ) λόγος απόσβεσης στη θύρα μεταγωγής, ως προς την ενέργεια των παλμών ελέγχου, για χαμηλό βαθμό κορεσμού του κέρδους.

Μέσος βαθμός κορεσμού του κέρδους – Ενέργεια παλμών εισόδου στους ενισχυτές ίση με 3 fJ



Σχήμα 3.2.1.2 (α) Λόγος αντίθεσης, (β) μέση ισχύς παλμών εξόδου στη θύρα μεταγωγής, (γ) διαμόρφωση πλάτους στη θύρα μεταγωγής και (δ) λόγος απόσβεσης στη θύρα μεταγωγής, ως προς την ενέργεια των παλμών ελέγχου, για μέσο βαθμό κορεσμού του κέρδους.





Σχήμα 3.2.1.3 (a) Λόγος αντίθεσης, (β) μέση ισχύς παλμών εξόδου στη θύρα μεταγωγής, (γ) διαμόρφωση πλάτους στη θύρα μεταγωγής και (δ) λόγος απόσβεσης στη θύρα μεταγωγής, ως προς την ενέργεια των παλμών ελέγχου, για βαθύ κορεσμό του κέρδους.

Τα διαγράμματα (α) που αφορούν το λόγο αντίθεσης υποδεικνύουν την περιοχή στην οποία μπορεί να μεταβάλλεται η ενέργεια των παλμών ελέγχου ώστε η πύλη να λειτουργεί ικανοποιητικά. Η περιοχή αυτή είναι γύρω από το μέγιστο των καμπυλών των διαγραμμάτων αυτών όπου ο λόγος αντίθεσης είναι θετικός δηλαδή το ποσοστό της ισχύος που εξέρχεται από τη θύρα μεταγωγής είναι μεγαλύτερο από το ποσοστό της ισχύος που εξέρχεται από τη θύρα ανάκλασης.

Οι καμπύλες των διαγραμμάτων (β) απεικονίζουν την ισχύ των παλμών εξόδου στη θύρα μεταγωγής και δεν μεγιστοποιούνται στο ίδιο σημείο με τις αντίστοιχες καμπύλες των διαγραμμάτων (α). Συγκεκριμένα όσο μεγαλώνει ο βαθμός κορεσμού τόσο περισσότερο διαφοροποιείται η τιμή της ενέργειας των παλμών ελέγχου για την οποία οι καμπύλες των διαγραμμάτων (α) και (β) παρουσιάζουν μέγιστο. Δοθέντος ότι η ισχύς των παλμών εξόδου στη θύρα μεταγωγής δεν μεταβάλλεται σημαντικά μεταξύ της ενέργειας των παλμών ελέγχου στην οποία μεγιστοποιείται και της ενέργειας των παλμών ελέγχου στην οποία ο λόγος αντίθεσης παρουσιάζει μέγιστο, έπεται ότι η μεγιστοποίηση του λόγου αντίθεσης οφείλεται στη μείωση της ισχύος στις χρονικές περιόδους που αναμένεται λογικό 0 στη θύρα ανάκλασης. Επειδή το ενδιαφέρον συνήθως εστιάζεται στη θύρα μεταγωγής, η τιμή της ενέργειας των παλμών ελέγχου επιλέγεται κυρίως με βάση τη μεγιστοποίηση των καμπυλών των διαγραμμάτων (β) κι όχι των διαγραμμάτων (α).

Για κάθε τιμή του κέρδους ασθενούς σήματος το εύρος στο οποίο μεταβάλλεται η τιμή της ενέργειας των παλμών ελέγχου είναι διαφορετικό. Συγκεκριμένα το εύρος διαφοροποιείται από τη μέγιστη τιμή της ενέργειας των παλμών ελέγχου η οποία σε κάθε περίπτωση επιλέγεται ως ένα άνω όριο πέραν του οποίου προκαλείται έντονη παραμόρφωση του παλμού εξόδου στη θύρα μεταγωγής, με την εμφάνιση περισσότερων του ενός τοπικού μεγίστου ισχύος, όπως στην περίπτωση του παλμού του σχήματος 3.2.1.4. Στο θέμα της παραμόρφωσης των παλμών γίνεται ειδική αναφορά στην παράγραφο 3.2.3. Συνεπώς το πεδίο ορισμού κάθε καμπύλης των διαγραμμάτων (α) και (β) υποδεικνύει και το εύρος της ενέργειας των παλμών ελέγχου για την οποία η πύλη λειτουργεί χωρίς να πραγματοποιείται αυτή η έντονη παραμόρφωση των παλμών εξόδου στη θύρα μεταγωγής. Το ίδιο πεδίο ορισμού διατηρείται και για τις καμπύλες των διαγραμμάτων (γ) και (δ).

Έχοντας προσδιορίσει την περιοχή τιμών της ενέργειας των παλμών ελέγχου για την οποία το ποσοστό της ισχύος που μετάγεται στη θύρα μεταγωγής είναι ικανοποιητικό, πρέπει να ελεγχθούν η διαμόρφωση πλάτους και ο λόγος απόσβεσης στη θύρα αυτή. Όσον αφορά τη διαμόρφωση πλάτους, η μέγιστη τιμής της δεν ξεπερνά τα 0.08 dB ανεξάρτητα του βαθμού κορεσμού του κέρδους των ενισχυτών και της τιμής του κέρδους ασθενούς σήματος. Η τιμή αυτή (0.08) είναι πολύ μικρή κι έτσι η διαμόρφωση πλάτους δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα στη λειτουργία της πύλης στα 10 Gbps. Το ίδιο ισχύει και για το λόγο απόσβεσης η τιμή του οποίου είναι πάντοτε μεγαλύτερη των 27 dB.



Σχήμα 3.2.1.4 Έντονα παραμορφωμένος παλμός εξόδου στη θύρα μεταγωγής

Το εύρος της ενέργειας των παλμών ελέγχου καθορίζεται, όπως προαναφέρθηκε, από τις καμπύλες των διαγραμμάτων (α) και (β). Για κάθε τιμή του κέρδους ασθενούς σήματος το εύρος αυτό διαφοροποιείται και συγκεκριμένα είναι μικρότερο για μεγαλύτερες τιμές του κέρδους ασθενούς σήματος. Η διαφοροποίηση αυτή γίνεται όλο και λιγότερο έντονη καθώς μεγαλώνει ο βαθμός κορεσμού του κέρδους των ενισχυτών. Στην τελευταία περίπτωση οι καμπύλες του σχήματος 3.2.1.3 δεν διαφέρουν πολύ και αντιστοιχούν σε αρκετά μεγάλο εύρος της ενέργειας των παλμών ελέγχου.

Η περίπτωση των καμπυλών του σχήματος 3.2.1.3 παρουσιάζει ένα ακόμη ενδιαφέρον στοιχείο. Τόσο η διαμόρφωση πλάτους όσο κι ο λόγος απόσβεσης μεταβάλλονται παρόμοια για τις διαφορετικές τιμές του κέρδους ασθενούς σήματος. Το γεγονός αυτό είναι πολύ θετικό αφού καθιστά την λειτουργία της πύλης σταθερή και προβλέψιμη.

Μία ακόμη παρατήρηση που αφορά τον βαθμό κορεσμού είναι ότι η αύξηση του βαθμού κορεσμού έχει ως συνέπεια τη μείωση του λόγου της ενέργειας των παλμών ελέγχου προς την ενέργεια των παλμών εισόδου. Δηλαδή όσο μεγαλώνει ο βαθμός κορεσμού τόσο περισσότερο συγκρίσιμες γίνονται οι ενέργειες των δύο σημάτων.

Στη συνέχεια ακολουθούν ορισμένα διαγράμματα, στα οποία φαίνεται αναλυτικά η λειτουργία της πύλης ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟΥ Ή. Το κέρδος ασθενούς σήματος ισούται με 30.2 dB και η ενέργεια των παλμών ελέγχου είναι 7.5 fJ. Οι παλμοί στην είσοδο του συμβολομέτρου έχουν ενέργεια ίση με 6 fJ, πρόκειται δηλαδή για την περίπτωση μέσου βαθμού κορεσμού.



Σχήμα 3.2.1.4 Σήμα στην είσοδο του συμβολόμετρου Mach-Zehnder.



Σχήμα 3.2.1.5 Σήματα ελέγχου στους δύο βραχίονες του συμβολόμετρου Mach-Zehnder.



Σχήμα 3.2.1.6 Χρονική μεταβολή των κερδών ισχύος στους δύο ενισχυτές του συμβολόμετρου Mach-Zehnder. Στο διάγραμμα (β) φαίνεται μία λεπτομέρεια του διαγράμματος (α) και συγκεκριμένα οι χρονικές περίοδοι που αντιστοιχούν στους έβδομο και όγδοο κατά σειρά παλμούς. Η καμπύλη με τις κουκίδες αντιστοιχεί στο σήμα που διαδίδεται στον επάνω βραχίονα του συμβολόμετρου Mach-Zehnder.



Σχήμα 3.2.1.7 Χρονική μεταβολή της στροφής στη φάση του σήματος εισόδου στις εξόδους των δύο ενισχυτών και η προκύπτουσα διαφορική στροφή φάσης συναρτήσει του χρόνου. Η καμπύλη με τις κουκίδες αντιστοιχεί στο σήμα που διαδίδεται στον επάνω βραχίονα του συμβολόμετρου Mach-Zehnder.



Σχήμα 3.2.1.8 Σήματα στις δύο θύρες εξόδου του συμβολόμετρου Mach-Zehnder.

Η πρώτη παρατήρηση αφορά την έξοδο στη θύρα μεταγωγής του συμβολόμετρου (σχ. 3.2.1.8). Όπως είναι αναμενόμενο η παλμοσειρά εξόδου είναι το αποτέλεσμα της πράξης ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟ Ή (XOR) μεταξύ των δύο παλμοσειρών ελέγχου. Επιπλέον η ισχύς των παλμών εξόδου είναι ικανοποιητική και φυσικά μεγαλύτερη από αυτή των παλμών εισόδου (σχ. 3.2.1.4) λόγω της ενίσχυσης που υφίστανται οι τελευταίοι.

Αντίθετα η παλμοσειρά εξόδου στη θύρα ανάκλασης δεν αντιστοιχεί στο συμπλήρωμα της πράξης ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟ Ή (ΧΟR). Κατ' αρχήν στις χρονικές περιόδους που αντιστοιχεί λογικό 0 εμφανίζεται μια σημαντική στάθμη ισχύος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα κέρδη των δύο ενισχυτών είναι διαφορετικά. Πράγματι λογικό 0 αναμένεται στις περιπτώσεις που τα δύο σήματα ελέγχου διαφέρουν. Όταν όμως συμβαίνει κάτι τέτοιο, τότε διαφέρει ο κορεσμός του κέρδους κάθε ενισχυτή και συνεπώς τα κέρδη δεν έχουν την ίδια τιμή. Στην περίπτωση αυτή, όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο 1.1, υπάρχει πάντοτε ένα ποσοστό ισχύος που εξέρχεται από τη θύρα ανάκλασης το οποίο είναι τουλάχιστον ίσο με $\frac{1}{4}E_{in}^2(G_1+G_2-2\sqrt{G_1}\sqrt{G_2})$,

όπου E_{in}^2 η ισχύς του παλμού εισόδου και G_1 , G_2 τα κέρδη των δύο ενισχυτών.

Επιπλέον στις χρονικές περιόδους που αναμένεται λογικό 1 η ισχύς των παλμών δεν είναι πάντοτε ίδια. Μια προσεκτικότερη παρατήρηση δείχνει ότι η μέγιστη τιμή της ισχύος των παλμών στις θέσεις αυτές μπορεί να έχει δύο τιμές. Η μεγαλύτερη από τις τιμές αυτές αφορά την περίπτωση που και τα δύο σήματα ελέγχου αντιστοιχούν σε λογικό 0, ενώ η μικρότερη τιμή εμφανίζεται όταν τα δύο σήματα ελέγχου αναπαριστούν λογικό 1. Ο λόγος για τη διαφοροποίηση της εξόδου είναι ο διαφορετικός κορεσμός των ενισχυτών. Στην πρώτη περίπτωση τα κέρδη των ενισχυτών είναι μεγαλύτερα οπότε το σήμα εισόδου ενισχύεται περισσότερο σε σχέση με τη δεύτερη περίπτωση.

Στην παράγραφο που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την περίπτωση που ο ρυθμός δεδομένων είναι 40 Gbps. Πολλές από τις παρατηρήσεις είναι ίδιες, οπότε ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων επικεντρώνεται στις διαφορές που παρουσιάζονται με την περίπτωση ρυθμού δεδομένων ίσο με 10 Gbps.

3.2.2 Λειτουργία της πύλης με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στα40 Gbps

Χαμηλός βαθμός κορεσμού του κέρδους – Ενέργεια παλμών εισόδου στους ενισχυτές ίση με 0.2 fJ



Σχήμα 3.2.2.1 (α) Λόγος αντίθεσης (β) μέση ισχύς παλμών εξόδου στη θύρα μεταγωγής, (γ) διαμόρφωση πλάτους στη θύρα μεταγωγής και (δ) λόγος απόσβεσης στη θύρα μεταγωγής, ως προς την ενέργεια των παλμών ελέγχου, για χαμηλό βαθμό κορεσμού του κέρδους.

Μέσος βαθμός κορεσμού του κέρδους – Ενέργεια παλμών εισόδου στους ενισχυτές ίση με 3 fJ



Σχήμα 3.2.2.2 (α) Λόγος αντίθεσης, (β) μέση ισχύς παλμών εξόδου στη θύρα μεταγωγής, (γ) διαμόρφωση πλάτους στη θύρα μεταγωγής και (δ) λόγος απόσβεσης στη θύρα μεταγωγής, ως προς την ενέργεια των παλμών ελέγχου, για μέσο βαθμό κορεσμού του κέρδους.



Βαθύς κορεσμός του κέρδους – Ενέργεια παλμών εισόδου στους ενισχυτές ίση με 40 fJ

Σχήμα 3.2.2.3 (a) Λόγος αντίθεσης, (β) μέση ισχύς παλμών εξόδου στη θύρα μεταγωγής, (γ) διαμόρφωση πλάτους στη θύρα μεταγωγής και (δ) λόγος απόσβεσης στη θύρα μεταγωγής, ως προς την ενέργεια των παλμών ελέγχου, για βαθύ κορεσμό του κέρδους.

Συγκρίνοντας τις καμπύλες των διαγραμμάτων (α) και (β) με τις αντίστοιχες της παραγράφου 3.2.1 γίνεται φανερό ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση. Συνεπώς η συμπεριφορά της πύλης αναφορικά με το λόγο αντίθεσης και την ισχύ των παλμών εξόδου δεν μεταβάλλεται με την αύξηση του ρυθμού δεδομένων σε 40 Gbps. Αντιθέτως τόσο η διαμόρφωση πλάτους όσο κι ο λόγος απόσβεσης αλλάζουν έντονα δυσχεραίνοντας τη λειτουργία της πύλης. Η διαμόρφωση πλάτους βελτιώνεται για μεγαλύτερες τιμές του κέρδους ασθενούς σήματος, δε συμβαίνει όμως το ίδιο και για το λόγο απόσβεσης.

Η ουσιαστική βελτίωση της λειτουργίας της πύλης παρατηρείται για την περίπτωση βαθύ κορεσμού του κέρδους των ενισχυτών. Στην περίπτωση αυτή η διαμόρφωση πλάτους μειώνεται ικανοποιητικά. Η μείωση της διαμόρφωσης πλάτους με την αύξηση του βαθμού κορεσμού είναι αναμενόμενη αφού όσο περισσότερο κορεσμένο είναι το κέρδος τόσο λιγότερο μεταβάλλεται η τιμή του σε σχέση με την ισχύ των παλμών ελέγχου και τη μορφή της παλμοσειράς ελέγχου (pattern effect), οπότε οι παλμοί της παλμοσειράς εισόδου «βλέπουν» παρόμοιο κέρδος κι έτσι η ενίσχυσή τους είναι παραπλήσια.

Δυστυχώς αν και ο λόγος απόσβεσης βελτιώνεται με την αύξηση του βαθμού κορεσμού, η τιμή του εξακολουθεί να είναι αρκετά μικρή αποτελώντας έτσι αποτρεπτικό παράγοντα για τη λειτουργία της πύλης σε ρυθμό δεδομένων 40 Gbps, με χρήση των συγκεκριμένων ημιαγώγιμων ενισχυτών τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάστηκαν στον πίνακα 3.2.1.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αντίστοιχα διαγράμματα με αυτά της παραγράφου 3.2.1 τα οποία απεικονίζουν αναλυτικά τη λειτουργία της πύλης ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟΥ Ή. Το κέρδος ασθενούς σήματος ισούται με 30.2 dB και η ενέργεια των παλμών ελέγχου είναι 90 fJ. Οι παλμοί στην είσοδο του συμβολόμετρου έχουν ενέργεια ίση με 80 fJ, πρόκειται δηλαδή για την περίπτωση βαθύ κορεσμού του κέρδους των ενισχυτών.



Σχήμα 3.2.2.4 Σήμα στην είσοδο του συμβολόμετρου Mach-Zehnder.


Σχήμα 3.2.2.5 Σήματα ελέγχου στους δύο βραχίονες του συμβολόμετρου Mach-Zehnder.



Σχήμα 3.2.2.6 Χρονική μεταβολή των κερδών ισχύος στους δύο ενισχυτές του συμβολόμετρου Mach-Zehnder. Στο διάγραμμα (β) φαίνεται μία λεπτομέρεια του διαγράμματος (α) και συγκεκριμένα οι χρονικές περίοδοι που αντιστοιχούν στους έβδομο και όγδοο κατά σειρά παλμούς. Η καμπύλη με τις κουκίδες αντιστοιχεί στο σήμα που διαδίδεται στον επάνω βραχίονα του συμβολόμετρου Mach-Zehnder.



Σχήμα 3.2.2.7 Χρονική μεταβολή της στροφής στη φάση του σήματος εισόδου στις εξόδους των δύο ενισχυτών και η προκύπτουσα διαφορική στροφή φάσης συναρτήσει του χρόνου. Η καμπύλη με τις κουκίδες αντιστοιχεί στο σήμα που διαδίδεται στον επάνω βραχίονα του συμβολόμετρου Mach-Zehnder.



Σχήμα 3.2.2.8 Σήματα στις δύο θύρες εξόδου του συμβολόμετρου Mach-Zehnder.

Ο λόγος για τον οποίο δεν προτείνεται να χρησιμοποιηθεί η πύλη για ρυθμό δεδομένων ίσο με 40 Gbps είναι η μικρή τιμή που παρουσιάζει ο λόγος απόσβεσης. Στο ρυθμό των 40 Gbps αντιστοιχεί χρονική περίοδος δυαδικού ψηφίου ίση με 25 psec. Από τις καμπύλες των σχημάτων 3.2.2.6 και 3.2.2.7 γίνεται αντιληπτό ότι η αιτία της μικρής τιμής του λόγου απόσβεσης είναι ότι ο χρόνος ανάκαμψης του κέρδους των ενισχυτών ξεπερνά τα 25 psec. Αυτό έχει ως συνέπεια η διαφορική στροφή φάσης να καθυστερεί να μηδενιστεί κι έτσι στη θύρα μεταγωγής στην πρώτη χρονική περίοδο μετά τους παλμούς που αντιστοιχούν σε λογικό 1 να εμφανίζεται κάποιος παλμός μικρότερης αλλά όχι μηδενικής ισχύος, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα 3.2.2.8. Άμεση συνέπεια της εμφάνισης των μικρών αυτών παλμών είναι η μείωση της τιμής του λόγου απόσβεσης 3.2.2.7 και το πρώτο διάγραμμα του σχήματος 3.2.2.8 για τη χρονική περίοδο από 200 psec έως 205 psec, δηλαδή τα πρώτα 5 psec της ένατης κατά σειρά χρονικής περιόδου δυαδικού ψηφίου.



Σχήμα 3.2.2.9 Λεπτομέρεια των διαγραμμάτων του σχήματος 3.2.2.7 και του πρώτου διαγράμματος του σχήματος 3.2.2.8 για το χρονικό διάστημα από 200 psec έως 205 psec. Με βάση το σχήμα αυτό γίνεται φανερή η αιτία στην οποία οφείλεται η δραστική μείωση του λόγου απόσβεσης στην περίπτωση που η πύλη λειτουργεί σε ρυθμό δεδομένων ίσο με 40 Gbps.

Ένας τρόπος να βελτιωθεί η συμπεριφορά της πύλης στο ρυθμό των 40 Gbps είναι να μειωθεί ο χρόνος ανάκαμψης του κέρδους. Κάτι τέτοιο, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της παραγράφου 2.3, μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση ημιαγώγιμων οπτικών ενισχυτών των οποίων ο χρόνος επανασύνδεσης των φορέων θα είναι αρκετά μικρότερος των 20 psec.

3.2.3 Συμπεράσματα

Στην παράγραφο αυτή συνοψίζονται οι βασικότερες διαπιστώσεις που έγιναν στις δύο προηγούμενες παραγράφους και διατυπώνονται ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα που αφορούν τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία της οπτικής πύλης Mach-Zehnder. Στους πίνακες 3.2.3.1 και 3.2.3.2 συνοψίζονται οι παρατηρήσεις που αφορούν τη λειτουργία της πύλης σε ρυθμό δεδομένων 10 Gbps και 40 Gbps αντίστοιχα.

Ρυθμός δεδομένων 10 Gbps	
	Η λειτουργία της πύλης είναι ικανοποιητική σε κάθε περίπτωση
	αρκεί η ενέργεια των παλμών ελέγχου να μην υπερβαίνει κάποια
γενικά	τιμή, η οποία υποδεικνύεται στα αντίστοιχα διαγράμματα, πέραν
	της οποίας οι παλμοί εξόδου στη θύρα μεταγωγής είναι έντονα
	παραμορφωμένοι παρουσιάζοντας στο χρονικό εύρος τους
	περισσότερα του ενός τοπικά μέγιστα ισχύος.
	Η τιμή του κέρδους ασθενούς σήματος επηρεάζει το εύρος των
	τιμών της ενέργειας των παλμών ελέγχου κυρίως στην περίπτωση
κέρδος	που ο βαθμός κορεσμού του ενισχυτή είναι χαμηλός.
ασθενού	ς Συγκεκριμένα μεγαλύτερο κέρδος ασθενούς σήματος έχει ως
σήματος	συνέπεια μικρότερο εύρος τιμών της ενέργειας των παλμών
	ελέγχου. Επιπλέον πρέπει να επισημανθεί ότι όσο μεγαλύτερο
	είναι το κέρδος ασθενούς σήματος τόσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς
	των παλμών εξόδου.
	Οι δύο ημιαγώγιμοι οπτικοί ενισχυτές του συμβολόμετρου είναι
βαθμός	προτιμότερο να λειτουργούν σε μεγάλο βαθμό κορεσμού αφού
κορεσμο	ύ έτσι μεγαλώνει το εύρος των τιμών της ενέργειας των παλμών
του κέρδο	υς ελέγχου για το οποίο η πύλη λειτουργεί ικανοποιητικά και
	επιπλέον η συμπεριφορά των λειτουργικών χαρακτηριστικών της
	πύλης γίνεται σταθερή και ανεξάρτητη του κέρδους ασθενούς
	σήματος.
τελικό	Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι η πύλη είναι
συμπέρασι	μα προτιμότερο να λειτουργεί με έντονα κορεσμένους τους δύο
	οπτικούς ενισχυτές.

Πίνακας 3.2.3.1 Σύνοψη των βασικών αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων για τη λειτουργία της λογικής πύλης Mach-Zehnder σε ρυθμό δεδομένων ίσο με 10 Gbps.

	Ρυθμός δεδομένων 40 Gbps
	Η λειτουργία της πύλης περιορίζεται από τη διαμόρφωση πλάτους
γενικά	και κυρίως από το λόγο απόσβεσης. Για το εύρος των τιμών της
	ενέργειας των παλμών ελέγχου ισχύει ό,τι και στην περίπτωση του
	ρυθμού των 10 Gbps.
	Μεγαλύτερες τιμές του κέρδους ασθενούς σήματος μειώνουν
κέρδος	σημαντικά τη διαμόρφωση πλάτους. Αντιθέτως δεν έχουν καμία
ασθενούς	επίδραση στο λόγο απόσβεσης. Όπως και στην περίπτωση των 10
σήματος	Gbps μεγαλύτερο κέρδος ασθενούς σήματος έχει ως συνέπεια την
	αύξηση της ισχύος των παλμών εξόδου.
	Και στην περίπτωση του ρυθμού των 40 Gbps οι δύο ημιαγώγιμοι
	οπτικοί ενισχυτές του συμβολόμετρου είναι προτιμότερο να
	λειτουργούν σε μεγάλο βαθμό κορεσμού. Πέρα από τα
βαθμός	πλεονεκτήματα του μεγαλύτερου εύρους της ενέργειας των
κορεσμού	παλμών ελέγχου και της σταθερότερης συμπεριφοράς της πύλης,
του κέρδοι	ς η διαμόρφωση πλάτους μειώνεται φτάνοντας σε ικανοποιητικά
	επίπεδα και παρατηρείται κάποια βελτίωση στο λόγο απόσβεσης ο
	οποίος αυξάνει, όχι όμως τόσο όσο απαιτείται για την καλή
	λειτουργία της πύλης.
	Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι η λειτουργία της
τελικό	πύλης βελτιώνεται για μεγαλύτερο βαθμό κορεσμού των
συμπέρασμ	α ενισχυτών και μεγαλύτερο κέρδος ασθενούς σήματος. Παρόλα
	αυτά η λειτουργία της στα 40 Gbps αντενδείκνυται λόγο της
	μικρής τιμής του λόγου απόσβεσης.

Πίνακας 3.2.3.2 Σύνοψη των βασικών αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων για τη λειτουργία της λογικής πύλης Mach-Zehnder σε ρυθμό δεδομένων ίσο με 40 Gbps.

Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι για την καλύτερη λειτουργία της οπτικής λογικής πύλης Mach-Zehnder συστήνεται οι δύο οπτικοί ενισχυτές να λειτουργούν όσο το δυνατόν περισσότερο κορεσμένοι. Επίσης η τιμή του κέρδους ασθενούς σήματος είναι προτιμότερο να είναι η μεγαλύτερη δυνατή ώστε οι παλμοί στην έξοδο να είναι πιο ισχυροί και επιπλέον η πύλη να μπορεί να λειτουργεί ικανοποιητικά και για ταχύτητες λίγο μεγαλύτερες των 10 Gbps, για παράδειγμα στα 20 Gbps.

3.3 Παραμόρφωση των παλμών κατά τη διάδοσή τους από την οπτική πύλη Mach-Zehnder

Στην παράγραφο αυτή αναπτύσσεται το θέμα της παραμόρφωσης των παλμών κατά τη διάδοσή τους στην οπτική πύλη Mach-Zehnder. Οι αιτίες για το φαινόμενο αυτό είναι οι εξής δύο:

- (i) η χρονική μεταβολή του κέρδους του ενισχυτή κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου ενός δυαδικού ψηφίου και
- (ii) η χρονική μεταβολή της διαφορικής στροφής φάσης κατά τη διάρκεια της ίδιας χρονικής περιόδου.

Και οι δύο αυτές χρονικές μεταβολές έχουν ως συνέπεια διαφορετικά χρονικά μέρη του παλμού να «βλέπουν» διαφορετικό κέρδος και να υφίστανται διαφορετική στροφή φάσης. Από την εξίσωση (1.1.1) έπεται πως η ισχύς εξόδου στη θύρα μεταγωγής της οπτικής πύλης εξαρτάται τόσο από το κέρδος όσο κι από τη διαφορική στροφή φάσης με αποτέλεσμα να αλλάζει ακολουθώντας τις χρονικές μεταβολές του κέρδους και της φάσης.

Το θέμα της παραμόρφωσης θα αναλυθεί αναφορικά με τις τρεις περιπτώσεις βαθμού κορεσμού του κέρδους των ενισχυτών που χρησιμοποιήθηκαν και στις δύο προηγούμενες παραγράφους. Ο ρυθμός δεδομένων θεωρείται ίσος με 10 Gbps και το κέρδος ασθενούς σήματος είναι 30.2 dB. Η περίπτωση που ο ρυθμός δεδομένων είναι 40 Gbps δεν εξετάζεται αφού τα αποτελέσματα είναι ανάλογα. Η ενέργεια των παλμών ελέγχου θα είναι περίπου ίση με την τιμή που αντιστοιχεί στο μέγιστο των αντίστοιχων καμπυλών των σχημάτων 3.2.1.1(β), 3.2.1.2(β) και 3.2.1.3(β). Για κάθε βαθμό κορεσμού παρατίθενται τέσσερα διαγράμματα. Το πρώτο αφορά την ισχύ του πέμπτου κατά σειρά παλμού εισόδου και επομένως ο χρόνος στον οριζόντιο άξονα μεταβάλλεται από 400 psec έως 500 psec. Το δεύτερο και το τρίτο διάγραμμα απεικονίζουν τη χρονική μεταβολή των κερδών των ενισχυτών και της διαφορικής στροφής φάσης αντίστοιχα για το χρονικό διάστημα από 400 psec έως 500 psec. Στο τέταρτο διάγραμμα παρουσιάζεται ο πέμπτος κατά σειρά παλμός εξόδου στη θύρα μεταγωγής του συμβολόμετρου. Οι παλμοσειρές του σήματος ελέγχου έχουν την ίδια μορφή με αυτή του σχήματος 3.2.1.5.

Ο παλμός εισόδου εμφανίζει μέγιστη τιμή ισχύος όταν ο χρόνος είναι 420 psec. Η παραμόρφωση του παλμού συνίσταται στην καταπίεση του πρώτου μέρους του και στη χρονική ολίσθηση της μέγιστης ισχύος του σε μικρότερη τιμή του χρόνου.

Όπως φαίνεται από την καμπύλη του κέρδους ισχύος των ενισχυτών στους δύο βραχίονες, στο αρχικό τμήμα του παλμού αντιστοιχεί πολύ μεγάλο κέρδος. Αυτό οφείλεται στο ότι οι ενισχυτές δεν έχουν προλάβει να κορεστούν. Άμεση συνέπεια αυτού είναι το αρχικό τμήμα του παλμού να ενισχύεται πολύ. Παρόλα αυτά, αυτό είναι και το τμήμα που καταπιέζεται. Ο λόγος είναι ότι η διαφορική στροφή φάσης που αντιστοιχεί στην αρχή του παλμού είναι μηδέν, οπότε με βάση τη σχέση (1.1.1) η ενέργεια που εξέρχεται από τη θύρα μεταγωγής είναι μηδενική. Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός κορεσμού των ενισχυτών τόσο πιο γρήγορα κορέννυται το κέρδος και μεγαλώνει η απόλυτη τιμή της διαφορικής στροφής φάσης. Συνεπώς για μεγαλύτερο βαθμό κορεσμού η καταπίεση του αρχικού τμήματος του παλμού είναι μικρότερη, κάτι το οποίο γίνεται φανερό και από τη σύγκριση των σχημάτων 3.3.1, 3.3.2 και 3.3.3.

Από τη σχέση (1.1.1) του πρώτου κεφαλαίου προκύπτει ότι η έξοδος στη θύρα μεταγωγής του συμβολόμετρου Mach-Zehnder μεγιστοποιείται όταν η διαφορική στροφή φάσης είναι ίση με ±π ακτίνια. Συνεπώς ο παλμός στη θύρα μεταγωγής αναμένεται να παρουσιάζει μέγιστο τη στιγμή που η διαφορική στροφή φάσης ισούται με ±π. Επειδή αυτό δεν συμβαίνει όταν ο χρόνος είναι ακριβώς 420 psec, προκαλείται κάποια χρονική ολίσθηση του σημείου μέγιστης ισχύος του παλμού εξόδου. Καθώς αυξάνει ο βαθμός κορεσμού των ενισχυτών η διαφορική στροφή φάσης προσεγγίζει πιο γρήγορα την τιμή ±π, λόγω του γρηγορότερου κορεσμού. Αυτός είναι και ο λόγος που στο σχήμα 3.3.3 το μέγιστο του παλμού εξόδου είναι πολύ πιο μετατοπισμένο από ότι στην περίπτωση των σχημάτων 3.3.1 και 3.3.2.

Χαμηλός βαθμός κορεσμού του κέρδους – Ενέργεια παλμών εισόδου στους ενισχυτές ίση με 0.2 fJ – Ενέργεια παλμών ελέγχου ίση με 2.4 fJ



Σχήμα 3.3.1 Παραμόρφωση του παλμού εισόδου λόγω της χρονικής μεταβολής των κερδών και της διαφορικής στροφής φάσης, στην περίπτωση χαμηλού βαθμού κορεσμού των ενισχυτών.

Μέσος βαθμός κορεσμού του κέρδους – Ενέργεια παλμών εισόδου στους ενισχυτές ίση με 3 fJ – Ενέργεια παλμών ελέγχου ίση με 7.5 fJ



Σχήμα 3.3.2 Παραμόρφωση του παλμού εισόδου λόγω της χρονικής μεταβολής των κερδών και της διαφορικής στροφής φάσης, στην περίπτωση μέσου βαθμού κορεσμού των ενισχυτών.

Βαθύς κορεσμός του κέρδους – Ενέργεια παλμών εισόδου στους ενισχυτές ίση με 40 fJ – Ενέργεια παλμών ελέγχου ίση με 70 fJ



Σχήμα 3.3.3 Παραμόρφωση του παλμού εισόδου λόγω της χρονικής μεταβολής των κερδών και της διαφορικής στροφής φάσης, στην περίπτωση βαθύ κορεσμού των ενισχυτών.

Από τη στιγμή που η ισχύς του παλμού εξόδου μεγιστοποιείται μέχρι το χρόνο των 430 psec που πρακτικά η ισχύς του μηδενίζεται, η τιμή της διαφορικής στροφής φάσης βρίσκεται κοντά στην περιοχή των –π ακτινίων. Επιπλέον στο ίδιο χρονικό διάστημα η μεταβολή των κερδών ισχύος δεν είναι πολύ έντονη. Συνεπώς η μεταβολή τόσο της φάσης όσο και των κερδών είναι αισθητά μικρότερη από την αντίστοιχη στα πρώτα 8 psec του παλμού και γι' αυτό το τελευταίο τμήμα του παλμού παραμορφώνεται πολύ λιγότερο από το αρχικό.

Στην περίπτωση που υπήρχε χρονική μεταβολή μόνο στο κέρδος, η ισχύς στα δύο άκρα του παλμού θα ενισχυόταν πολύ περισσότερο από την ισχύ στο κέντρο του. Αν αντίθετα το κέρδος ήταν σταθερό και μεταβαλλόταν χρονικά μόνο η διαφορική στροφή φάσης, στη θύρα μεταγωγής θα μεταγόταν κυρίως το ενδιάμεσο μέρος του παλμού και πολύ λιγότερο τα άκρα του. Συνεπώς η μεταβολή της διαφορικής στροφής φάσης και η μεταβολή των κερδών δρουν αντισταθμιστικά με συνέπεια ο παλμός εισόδου να παραμορφώνεται πολύ λιγότερο από ότι στην περίπτωση που θα υπήρχε μόνο η μία από τις δύο χρονικές μεταβολές.

Η παραμόρφωση των παλμών εξετάστηκε για την περίπτωση που η λογική πύλη λειτουργεί σε περιοχή καλής λειτουργίας με βάση τα αποτελέσματα της παραγράφου 3.2. Πρέπει να σημειωθεί ότι αν δεν ισχύει κάτι τέτοιο τότε ενδέχεται η παραμόρφωση του παλμού να είναι πολύ μεγαλύτερη. Η περίπτωση αυτή απεικονίζεται στο σχήμα 3.2.1.4 της προηγούμενης παραγράφου και αφορά την περίπτωση που η ενέργεια του σήματος ελέγχου έχει ξεπεράσει κάποιο άνω όριο. Ο λόγος για τον οποίο προκαλείται αυτή η ιδιαίτερα έντονη παραμόρφωση είναι ότι η μέγιστη τιμή της απόλυτης τιμής της διαφορικής στροφής φάσης αποκλίνει πάρα πολύ από τη τιμή των π ακτινίων. Για πολύ μεγάλες τιμές της ενέργειας των παλμών ελέγχου ενδέχεται μάλιστα να ξεπεράσει την τιμή των 2π ή ακόμη και των 3π.

Έστω ότι η μέγιστη τιμή της απόλυτης τιμής της διαφορικής στροφής φάσης είναι 2π. Η ισχύς εξόδου μεγιστοποιείται όταν η διαφορική στροφή φάσης βρίσκεται στην περιοχή του ±π. Με βάση την καμπύλη της χρονικής μεταβολής της διαφορικής στροφής φάσης, η διαφορική στροφή φάσης ξεκινά από την τιμή 0 όπου η ισχύς εξόδου στη θύρα μεταγωγής είναι μηδέν. Στη συνέχεια περνά από την περιοχή του ±π όπου η ισχύς εξόδου μεγιστοποιείται. Καθώς αρχίζει και αποκλίνει από την περιοχή του ±π η έξοδος μειώνεται. Κάποια στιγμή η τιμή της διαφορικής στροφής φάσης φτάνει σε κάποιο ακρότατο και αρχίζει να προσεγγίζει την τιμή 0 περνώντας φυσικά από την περιοχή του ±π. Η διαδικασία αυτή έχει ως συνέπεια ο παλμός εξόδου να εμφανίζει δύο μέγιστα.

Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται το τρίτο και τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας αυτής. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το πρόγραμμα optical_gate.cpp μπορεί να διευρυνθεί έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί για την εξομοίωση και άλλων σχετικών διατάξεων καθώς και για την εξαγωγή επιπλέον αποτελεσμάτων που θα βοηθήσουν στην βαθύτερη κατανόηση και αποτελεσματικότερη χρήση των αμιγώς οπτικών διακοπτών με ημιαγώγιμους οπτικούς ενισχυτές.

Παράρτημα

Στο παράρτημα της εργασίας αυτής παρατίθεται ο κώδικας του προγράμματος optical_gate.cpp που χρησιμοποιήθηκε για την εξομοίωση της αμιγώς οπτικής λογικής πύλης Mach-Zehnder ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟΥ Ή (XOR). Ο κώδικας είναι γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού C.

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <malloc.h>
#include <time.h>
#define NUM MIN 1
#define NUM MAX 17 //NUM MAX>NUM MIN
#define N 30
                   //number of pulses
//external variables
int m,p,per;
int num:
double *Pc1,*Gc1,*Ps1,*Gs1,*GPs1,*fs1;
double *Pc2,*Gc2,*Ps2,*Gs2,*GPs2,*fs2;
double *Dfs,*FOut1,*FOut2,*FOut,*Ampmod1,*Ampmod2,*Extratio1,*Extratio2,
*Contratio,*TranPower,*energy c,*energy s,*endif;
1,0,1\};
        //control pattern 1
//control pattern 2
1,1,1\};
void MachZehnder(void);
void characterize(void);
void printfiles(void);
main()
{
 double dif;
 time t start, end;
```

```
time(&start);
 //amplitude modulation, transmission port
   Ampmod1=(double *)malloc((NUM MAX-NUM MIN)*sizeof(double));
 //extinction ratio, transmission port
   Extratio1=(double *)malloc((NUM MAX-NUM MIN)*sizeof(double));
  //amplitude modulation, reflection port
   Ampmod2=(double *)malloc((NUM MAX-NUM MIN)*sizeof(double));
  //extinction ratio, reflection port
   Extratio2=(double *)malloc((NUM MAX-NUM MIN)*sizeof(double));
  //contrast ratio
   Contratio=(double *)malloc((NUM MAX-NUM MIN)*sizeof(double));
  //output mean peak power, transmission port
   TranPower=(double *)malloc((NUM MAX-NUM MIN)*sizeof(double));
  //control pulse energy
   energy c=(double *)malloc((NUM MAX-NUM MIN)*sizeof(double));
  //signal pulse energy
   energy s=(double *)malloc((NUM MAX-NUM MIN)*sizeof(double));
  //energy difference between the two control pluses
   endif=(double *)malloc((NUM MAX-NUM MIN)*sizeof(double));
  //matrices initialization with zero elements
  for (num=NUM MIN; num<NUM MAX; (num)++) {
    Ampmod1[num-NUM MIN]=0;
    Extratio1[num-NUM MIN]=0;
    Ampmod2[num-NUM MIN]=0;
    Extratio2[num-NUM MIN]=0;
    Contratio[num-NUM MIN]=0;
    TranPower[num-NUM MIN]=0;
    energy c[num-NUM MIN]=0;
    energy s[num-NUM MIN]=0;
    endif[num-NUM MIN]=0;
  }
  for (num=NUM MIN; num<NUM MAX; num++) {
    MachZehnder();
    characterize();
  }
 printfiles();
 time(&end);
  dif=difftime(end,start);
  printf("Executing time: %.2f secs \n",dif);
 return 0;
}
```

```
void MachZehnder(void)
{
  int i,j,k,n;
  double Cc1,Cc2,Cs,L,Esatc1,Esatc2,Esats,Dz,Dt,e shb,e ch,e,a int,Gss,Gsc,Tper,
Tol,T FWHM,t0,tc,a n,step,P peak c,P peak s,tm1,tm2;
//parameters
  //soa parameters
  e shb=0.07;
                 //non linear gain compression factor for spectral holeburning (1/W)
  e ch=0.13;
                        //non linear gain compression factor for carrier heating (1/W)
  e=e shb+e ch;
                                         //non linear gain compression factor (1/W)
  L=1500*pow(10,-6);
                                                           //length of the SOA (m)
  a n=6;
                                                    //linewidth enhancement factor
  tc=20*pow(10,-12);
                                                             //carrier lifetime (sec)
  a int=2000;
                                              //internal linear loss of the SOA (1/m)
  m=100;
                                                         //number of SOA sections
                                                              // time section length
  Dt=1*pow(10,-12);
  Dz=L/m;
                                                            //spacial section length
                                                                     //time shifting
  n=19;
  //control pulse parameters
  step=0.428571/2;
                                                                          //in mW
  P peak c=num*step*pow(10,-3);
                                                     //control pulse peak power (W)
  Cc1=P peak c;
                                                 //peak power (control pulse 1) (W)
// Cc1=1.285713*pow(10,-3);
  Cc2=P peak c;
                                                 //peak power (control pulse 2) (W)
// Cc2=1.285713*pow(10,-3);
  Esatc1=1000*pow(10,-15);
                                              //saturation energy, control pulse 1 (J)
  Esatc2=1000*pow(10,-15);
                                              //saturation energy, control pulse 2 (J)
  Gsc=6800;
                                //small signal gain coefficient for control pulse (1/m)
  //signal pulse parameters
// P peak s=(num+1)*8*pow(10,-6);
                                                     //signal pulse peak power (W)
// Cs=P peak s;
  Cs=0.428571*pow(10,-3);
  Esats=1000*pow(10,-15);
                                                 //saturation energy, signal pulse (J)
  Gss=6800;
                                           //small signal gain for signal pulse (1/m)
  //GAUSS parameters
  T FWHM=7*pow(10,-12);
                                                    //full width half maximum (sec)
```

```
t0=T FWHM/(2*sqrt(log(2)));
                                                           //pulse width (1/e) (sec)
  Tper=100*pow(10,-12);
                                                          //pulse time period (sec)
  per=(int)(Tper/Dt);
                                       //number of time points within a pulse period
  Tol=N*Tper;
                                                            //total simulation time
                                                      //total number of time points
  p=N*per;
  //time mismatch
                       //0 \le |tm1| \le per, time mismatch between control 1 and signal
  tm1=0:
                       //0 \le |tm2| \le per, time mismatch between control 2 and signal
  tm2=0:
  //control pulse energy – approximate calculation
  energy c[num-NUM MIN]=Cc1*T FWHM*pow(10,15);
                                                                            //in fJ
  //control pulse energy difference – approximate calculation
  endif[num-NUM MIN]=(Cc2-Cc1)*T FWHM*pow(10,15);
                                                                            //in fJ
  //signal pulse energy – approximate calculation
  energy s[num-NUM MIN]=P peak s*T FWHM*pow(10,15);
                                                                            //in fJ
//numerical calculation
  //control 1
  Pc1=(double *)malloc((p+1)*(m+1)*sizeof(double));
                                                                   //power matrix
  Gc1=(double *)malloc((p+1)*(m+1)*sizeof(double));
                                                          //gain coefficient matrix
  for (j=0; j<=p; j++) {
                                                                   //i:space, j:time
    for (i=0; i<=m; i++) {
                                         //matrices initialization with zero elements
       Pc1[j*(m+1)+i]=0;
      Gc1[j*(m+1)+i]=0;
    }
  }
  //initial conditions
  for (i=0; i<=m; i++) {
                                                //"first raw" elements equal to Gsc
    Gc1[i]=Gsc;
  }
  for (k=0; k \le N-1; k++)
                              //"first column" element equal to the power of the
Gauss input pulses
    for (j=0; j<=per-1; j++) {
       Pc1[(j+k*per)*(m+1)]=Seq1[k]*Cc1*exp(-pow(((j+tm1+k*per)*Dt-k*Tper-
n*Dt)/t0,2));
    }
  }
```

```
//j=per and k=N-1, a case which is not calculated by the previous for-loop
       Pc1[(per+(N-1)*per)*(m+1)]=Seq1[N-1]*Cc1*exp(-pow(((per+tm1+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq1[N-1]*Cc1*exp(-pow(((per+tm1+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq1[N-1]*Cc1*exp(-pow(((per+tm1+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq1[N-1]*Cc1*exp(-pow(((per+tm1+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq1[N-1]*Cc1*exp(-pow(((per+tm1+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq1[N-1]*Cc1*exp(-pow(((per+tm1+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq1[N-1]*Cc1*exp(-pow(((per+tm1+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq1[N-1]*Cc1*exp(-pow(((per+tm1+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq1[N-1]*Cc1*exp(-pow(((per+tm1+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq1[N-1]*Cc1*exp(-pow(((per+tm1+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq1[N-1]*Cc1*exp(-pow(((per+tm1+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq1[N-1]*Cc1*exp(-pow(((per+tm1+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq1[N-1]*Cc1*exp(-pow(((per+tm1+(N-1)*per)*(m+1))]
1)*per)*Dt-(N-1)*Tper-n*Dt)/t0,2));
      //signal 1
       GPs1=(double *)malloc((p+1)*sizeof(double));
                                                                                                                                                                                //power gain matrix
       Ps1=(double *)malloc((p+1)*(m+1)*sizeof(double));
                                                                                                                                                                                             //power matrix
       fs1=(double *)malloc((p+1)*(m+1)*sizeof(double));
                                                                                                                                                                                               //phase matrix
       Gs1=(double *)malloc((p+1)*(m+1)*sizeof(double));
                                                                                                                                                                     //gain coefficient matrix
       for (j=0; j<=p; j++) {
                                                                                                                                                                                            //i:space, j:time
              for (i=0; i<=m; i++) {
                                                                                                                    //matrices initialization with zero elements
                    Ps1[i^{(m+1)+i}]=0;
                    Gs1[i*(m+1)+i]=0;
              }
       }
       //initial conditions
       for (i=0; i<=m; i++) {
                                                                                                                                         //"first raw" elements equal to Gss
             Gs1[i]=Gss;
       }
       for (k=0; k \le N-1; k++) { //"first column" element equal to the power of the
Gauss input pulses
              for (j=0; j \le per-1; j++)
                      Ps1[(j+k*per)*(m+1)]=Cs*exp(-pow(((j+k*per)*Dt-k*Tper-n*Dt)/t0,2));
              }
       }
      //j=per and k=N-1, a case which is not calculated by the previous for-loop
       Ps1[(per+(N-1)*per)*(m+1)]=Cs*exp(-pow(((per+(N-1)*per)*Dt-(N-1)*Tper-
n*Dt)/t0,2));
//Ypologismos twn pinakwn 1
       for (j=0; j <=p; j++)
              for (i=0; i<=m; i++) {
                    if (i+1 \le m)
Pc1[j*(m+1)+i+1]=Pc1[j*(m+1)+i]+Dz*(Gc1[j*(m+1)+i]*Pc1[j*(m+1)+i]/(1+e*(Pc1)+i)+i]/(1+e*(Pc1)+i)+i)
[j^{*}(m+1)+i]+Ps1[j^{*}(m+1)+i])-a int*Pc1[j^{*}(m+1)+i];
                    if (i+1 \le m)
Ps1[j*(m+1)+i+1]=Ps1[j*(m+1)+i]+Dz*(Gs1[j*(m+1)+i]*Ps1[j*(m+1)+i]/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1+e*(Pc1[m+1)+i))/(1
j^{(m+1)+i} + Ps1[j^{(m+1)+i}]) - a int^{Ps1[j^{(m+1)+i}]};
                    if (j+1 \le p) Gc1[(j+1)*(m+1)+i]=Gc1[j*(m+1)+i]+Dt*((Gsc-
Gc1[i^{(m+1)+i}])/tc-
```

```
Ps1[j*(m+1)+i]));
                   if (j+1 \le p) Gs1[(j+1)*(m+1)+i]=Gs1[j*(m+1)+i]+Dt*((Gss-
Gs1[i*(m+1)+i])/tc-
1/Esats*Gs1[j*(m+1)+i]*(Pc1[j*(m+1)+i]+Ps1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i]+Ps1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i]+Ps1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i]+Ps1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i]+Ps1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i]+Ps1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc1[j*(m+1)+i])/
s1[i^{(m+1)+i]}));
             }
       }
      //power gain
      for (j=0; j<=p; j++) {
                                                                                                                                                                                                            //j:time
            GPs1[j]=0;
                                                                                                                     //matrix initialization with zero elements
       }
      for (j=0; j<=p; j++) {
            GPs1[j]=Ps1[j*(m+1)+m]/Ps1[j*(m+1)];
                                                                                                                                                                 //power gain calculation
       }
      //output phase 1
      for (j=0; j<=p; j++) {
                                                                                                                                                                                       //i:space, j:time
             for (i=0; i<=m; i++) {
                                                                                                                     //matrix initialization with zero elements
                   fs1[i^{(m+1)+i}]=0;
             }
      }
      for (j=0; j<=p; j++) {
                                                                                                                                                                               //phase calculation
            for (i=0; i<m; i++) {
                                                                                                                                                                                                   //not i<=m!
                   fs1[i^{(m+1)+i+1}]=fs1[i^{(m+1)+i}]+Dz^{(-0.5*a n^{(m+1)+i})};
             }
      }
//control 2
      Pc2=(double *)malloc((p+1)*(m+1)*sizeof(double));
                                                                                                                                                                                        //power matrix
      Gc2=(double *)malloc((p+1)*(m+1)*sizeof(double));
                                                                                                                                                                //gain coefficient matrix
      for (j=0; j<=p; j++) {
                                                                                                                                                                                       //i:space, j:time
             for (i=0; i<=m; i++) {
                                                                                                                 //matrices initialization with zero elements
                   Pc2[i^{(m+1)+i}]=0;
                   Gc2[j*(m+1)+i]=0;
             }
       }
      //initial conditions
      for (i=0; i<=m; i++) {
                                                                                                                                    //"first raw" elements equal to Gsc
            Gc2[i]=Gsc;
       }
```

```
for (k=0; k \le N-1; k++)
                                                                                  //"first column" element equal to the power of the
Gauss control pulses
            for (j=0; j<=per-1; j++) {
                  Pc2[(j+k*per)*(m+1)]=Seq2[k]*Cc2*exp(-pow(((j+tm2+k*per)*Dt-k*Tper-
n*Dt)/t0,2));
            }
      }
     //j=per and k=N-1, a case which is not calculated by the previous for-loop
      Pc2[(per+(N-1)*per)*(m+1)]=Seq2[N-1]*Cc2*exp(-pow(((per+tm2+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq2[N-1]*Cc2*exp(-pow(((per+tm2+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq2[N-1]*Cc2*exp(-pow(((per+tm2+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq2[N-1]*Cc2*exp(-pow(((per+tm2+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq2[N-1]*Cc2*exp(-pow(((per+tm2+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq2[N-1]*Cc2*exp(-pow(((per+tm2+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq2[N-1]*Cc2*exp(-pow(((per+tm2+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq2[N-1]*Cc2*exp(-pow(((per+tm2+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq2[N-1]*Cc2*exp(-pow(((per+tm2+(N-1)*per)*(m+1)*per)*(m+1))]=Seq2[N-1]*Cc2*exp(-pow(((per+tm2+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq2[N-1]*Cc2*exp(-pow((per+tm2+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq2[N-1]*Cc2*exp(-pow((per+tm2+(N-1)*per)*(m+1))]=Seq2[N-1]*Cc2*exp(-pow((per+tm2+(N-1)*per)*(m+1)*(m+1))]=Seq2[N-1]*Cc2*exp(-pow((per+tm2+(N-1)*per)*(m+1)*(m+1)*(m+1))]=Seq2[N-1]*Cc2*exp(-pow((per+tm2+(N-1)*per)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+1)*(m+
1)*per)*Dt-(N-1)*Tper-n*Dt)/t0,2));
//signal 2
      GPs2=(double *)malloc((p+1)*sizeof(double));
                                                                                                                                                               //power gain matrix
      Ps2=(double *)malloc((p+1)*(m+1)*sizeof(double));
                                                                                                                                                                            //power matrix
      fs2=(double *)malloc((p+1)*(m+1)*sizeof(double));
                                                                                                                                                                             //phase matrix
                                                                                                                                                     //gain coefficient matrix
      Gs2=(double *)malloc((p+1)*(m+1)*sizeof(double));
      for (j=0; j<=p; j++) {
                                                                                                                                                                          //i:space, j:time
            for (i=0; i<=m; i++) {
                                                                                                         //matrices initialization with zero elements
                  Ps2[i^{(m+1)+i}]=0;
                  Gs2[i^{(m+1)+i}]=0;
            }
       }
     //initial conditions
      for (i=0; i<=m; i++) {
                                                                                                                            //"first raw" elements equal to Gss
            Gs2[i]=Gss;
       }
      for (k=0; k \le N-1; k++)
                                                                                   //"first column" elements equal to the correspoding
power of the Gauss signal pulses
            for (j=0; j \le per-1; j++)
                  Ps2[(j+k*per)*(m+1)]=Cs*exp(-pow(((j+k*per)*Dt-k*Tper-n*Dt)/t0,2));
            }
       }
     //j=per and k=N-1, a case which is not calculated by the previous for-loop
      Ps2[(per+(N-1)*per)*(m+1)]=Cs*exp(-pow(((per+(N-1)*per)*Dt-(N-1)*Tper-
n*Dt)/t0,2));
//Ypologismos twn pinakwn 2
      for (j=0; j<=p; j++) {
```

```
for (i=0; i<=m; i++) {
                           if (i+1 \le m)
 Pc2[j*(m+1)+i+1]=Pc2[j*(m+1)+i]+Dz*(Gc2[j*(m+1)+i]*Pc2[j*(m+1)+i]/(1+e*(Pc2)))
[j^{*}(m+1)+i]+Ps2[j^{*}(m+1)+i])-a int*Pc2[j^{*}(m+1)+i];
                            if (i+1 \le m)
Ps2[j*(m+1)+i+1]=Ps2[j*(m+1)+i]+Dz*(Gs2[j*(m+1)+i]*Ps2[j*(m+1)+i]/(1+e*(Pc2))]
j^{(m+1)+i} + Ps2[j^{(m+1)+i}]) - a int^{Ps2}[j^{(m+1)+i}];
                            if (j+1 \le p) Gc2[(j+1)*(m+1)+i]=Gc2[j*(m+1)+i]+Dt*((Gsc-
 Gc2[j*(m+1)+i])/tc-
 Ps2[i^{(m+1)+i]}));
                            if (j+1 \le p) Gs2[(j+1)*(m+1)+i]=Gs2[j*(m+1)+i]+Dt*((Gss-
Gs2[i^{(m+1)+i}])/tc-
 1/Esats*Gs2[j*(m+1)+i]*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i]+Ps2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(1+e*(Pc2[j*(m+1)+i])/(
 s2[j*(m+1)+i]));
                   }
          }
```

```
//power gain
  for (j=0; j<=p; j++) {
                                                                            //j:time
    GPs2[j]=0;
                                            //matrix initialization with zero elements
  }
  for (j=0; j <=p; j++)
                                                                            //j:time
                                                            //power gain calculation
    GPs2[j]=Ps2[j*(m+1)+m]/Ps2[j*(m+1)];
  }
  for (j=0; j<=p; j++) {
                                                                     //i:space, j:time
    for (i=0; i<=m; i++) {
                                            //matrix initialization with zero elements
       fs2[i^{(m+1)+i}]=0;
     }
  }
  //output phase 2
  for (j=0; j <=p; j++)
     for (i=0; i<m; i++) {
                                                                         //not i<=m!
       fs2[j*(m+1)+i+1]=fs2[j*(m+1)+i]+Dz*(-0.5*a n*Gs2[j*(m+1)+i]);
     }
  }
//phase difference
  Dfs=(double *)malloc((p+1)*sizeof(double));
                                                           //phase difference matrix
  for (j=0; j <=p; j++) {
                                                                            //j:time
     Dfs[j]=fs2[j*(m+1)+m]-fs1[j*(m+1)+m]; //phase difference calculation
  }
//MachZehnder, transmission port
  FOut1=(double *)malloc((p+1)*sizeof(double));
                                                                 //transmission port
  for (j=0; j<=p; j++) {
     FOut1[j]=0.25*(GPs1[j]+GPs2[j]-
2*sqrt(GPs1[i]*GPs2[i])*cos(Dfs[i]))*2*Ps1[i*(m+1)];
                                                          //input power is twice the
power of the signal1 pulse's
  }
//MachZehnder, reflection port
  FOut2=(double *)malloc((p+1)*sizeof(double));
                                                                    //reflection port
```

```
for (j=0; j <=p; j++)
FOut2[j]=0.25*(GPs1[j]+GPs2[j]+2*sqrt(GPs1[j]*GPs2[j])*cos(Dfs[j]))*2*Ps1[j*(m
                             //input power is twice the power of the signal2 pulse's
+1)];
  }
//MachZehnder, total output power, transmission and reflection ports
  FOut=(double *)malloc((p+1)*sizeof(double));
                                                              //total output power
  for (j=0; j<=p; j++) {
    FOut[j]=FOut1[j]+FOut2[j];
  }
  return;
}
void characterize(void)
{
  int i,j,k,l;
  double *FOut1 peak1,*FOut1 peak0,*FOut2 peak1,*FOut2 peak0;
  double Max1 1,Min1 1,Max0 1,Min0 1,Max1 2,Min1 2,Max0 2,Min0 2;
  double add peak1 1,add peak0 1,add peak1 2,add peak0 2;
  double mean peak1 1,mean peak0 1,mean peak1 2,mean peak0 2;
//transmission port
  FOut1 peak1=(double *)malloc(N*sizeof(double));
  FOut1 peak0=(double *)malloc(N*sizeof(double));
  for (i=0; i<N; i++) {
    FOut1 peak1[i]=0;
    FOut1 peak0[i]=0;
  }
  k=0;
  1=0;
  for (i=0; i<N; i++) {
    if ((Seq1[i]^Seq2[i])==1) {
       for (j=0; j<per; j++) {
         if (FOut1[i*per+j]>FOut1_peak1[k]) {
           FOut1 peak1[k]=FOut1[i*per+j]; //peak value for the Boolean 1 pulse
         }
       }
```

```
k++;
    }
    else if ((Seq1[i]^Seq2[i])==0) {
       for (j=0; j<per; j++) {
         if (FOut1[i*per+j]>FOut1 peak0[1]) {
           FOut1 peak0[1]=FOut1[i*per+j];
                                              //peak value for the Boolean 0 pulse
         Ş
       1++:
    }
  }
  Max1 1=0;
  Min1 1=FOut1_peak1[0];
  add peak1 1=0;
  for (j=0; j < k; j++) {
    if (FOut1 peak1[j]>Max1 1) {
       Max1 1=FOut1 peak1[j];
                                                     //maximum Boolean 1 pulse
     ł
    if (FOut1 peak1[j]<Min1 1) {
       Min1 1=FOut1 peak1[j];
                                                      //minimum Boolean 1 pulse
    }
    add_peak1_1=add_peak1_1+FOut1_peak1[j];
                                                   //sum of the peak values of the
Boolean 1 pulse
  mean peak1 1=add peak1 1/k; //mean value of the peak values of the Boolean 1
pulses
  Max0 1=0;
  Min0 1=FOut1 peak0[0];
  add peak0 1=0;
  for (j=0; j<l; j++) {
    if (FOut1 peak0[j]>Max0 1) {
       Max0 1=FOut1 peak0[j];
                                                     //maximum Boolean 0 pulse
    if (FOut1 peak0[j]<Min0 1) {
       Min0 1=FOut1 peak0[j];
                                                      //minimum Boolean 0 pulse
    }
    add peak0 1=add peak0 1+FOut1 peak0[j];
                                                   //sum of the peak values of the
Boolean 0 pulses
       }
  mean peak0 1=add peak0 1/l; //mean value of the peak values of the Boolean 0
pulses
//reflection port
```

```
FOut2 peak1=(double *)malloc(N*sizeof(double));
  FOut2 peak0=(double *)malloc(N*sizeof(double));
  for (i=0; i<N; i++) {
    FOut2 peak1[i]=0;
    FOut2 peak0[i]=0;
  }
  k=0;
  1=0:
  for (i=0; i<N; i++) {
    if ((Seq1[i]^Seq2[i])==0) {
       for (j=0; j<per; j++) {
         if (FOut2[i*per+j]>FOut2 peak1[k]) {
           FOut2 peak1[k]=FOut2[i*per+j]; //peak value for the Boolean 1 pulses
         }
       k++;
     Ş
    else if ((Seq1[i]^Seq2[i])==1) {
       for (j=0; j<per; j++) {
         if (FOut2[i*per+j]>FOut2 peak0[1]) {
           FOut2 peak0[1]=FOut2[i*per+j];
                                               //peak value for the Boolean 0 pulse
         }
       1++;
     3
  }
  Max1 2=0;
  Min1 2=FOut2 peak1[0];
  add peak1 2=0;
  for (j=0; j < k; j++) {
    if (FOut2 peak1[j]>Max1 2) {
       Max1 2=FOut2 peak1[j];
                                                      //maximum Boolean 1 pulse
    if (FOut2 peak1[j]<Min1 2) {
       Min1 2=FOut2 peak1[j];
                                                       //minimum Boolean 1 pulse
    }
    add peak1 2=add peak1 2+FOut2 peak1[j];
                                                    //sum of the peak values of the
Boolean 1 pulses
  }
  mean_peak1_2=add_peak1_2/k; //mean value of the peak values of the Boolean 1
pulses
  Max0 2=0;
  Min0 2=FOut2 peak0[0];
```

```
add peak0 2=0;
  for (j=0; j<1; j++) {
    if (FOut2 peak0[j]>Max0_2) {
      Max0 2=FOut2 peak0[j];
                                                   //maximum Boolean 0 pulse
    if (FOut2_peak0[j]<Min0_2) {
      Min0 2=FOut2 peak0[j];
                                                    //minimum Boolean 0 pulse
    }
    add peak0 2=add peak0 2+FOut2 peak0[j];
                                                 // sum of the peak values of the
Boolean 0 pulses
  }
  mean peak0 2=add peak0 2/l; //mean value of the peak values of the Boolean 0
pulses
//characterization
  //port 1 (transmission)
  //amplitude Modulation
  Ampmod1[num-NUM MIN]=10*log10(Max1 1/Min1 1);
  //extinction ratio
  Extratio1[num-NUM_MIN]=10*log10(Min1_1/Max0_1);
  //port 2 (reflection)
  //amplitude Modulation
  Ampmod2[num-NUM MIN]=10*log10(Max1 2/Min1 2);
  //extinction ratio
  Extratio2[num-NUM MIN]=10*log10(Min1 2/Max0 2
  TranPower[num-NUM MIN]=10*log10(mean peak1 1);
  Contratio[num-NUM MIN]=10*log10(mean peak1 1/mean peak0 2);
  return;
}
void printfiles(void)
{
  int j;
  FILE *fp11,*fp12,*fp13,*fp14,*fp15,*fp16,*fp17;
```

```
FILE *fp21,*fp22,*fp23,*fp24,*fp25,*fp26,*fp27;
  FILE *df,*fo1,*fo2,*fo,*am1,*am2,*er1,*er2,*cr,*tp, *en c,*en s,*en d;
//branch 1
  fp11=fopen("GaincoGs1_space.txt","w");
  if (fp11==NULL) {
    return;
  }
  fp12=fopen("GaincoGs1_time.txt","w");
  if (fp12==NULL) {
    return;
  }
  fp13=fopen("Power Gain1.txt","w");
  if (fp13==NULL) {
    return;
  }
  fp14=fopen("InputControl1.txt","w");
  if (fp14==NULL) {
    return;
  }
  fp15=fopen("Output1.txt","w");
  if (fp15==NULL) {
    return;
  }
  fp16=fopen("InputClock1.txt","w");
  if (fp16==NULL) {
    return;
  }
  fp17=fopen("OutputPhase1.txt","w");
  if (fp17==NULL) {
    return;
  }
  //last "raw", Gain coefficient vs space
  for (j=0; j \le m; j++)
    fprintf(fp11,"%e\n",Gs1[p*(m+1)+j]);
  }
  fclose(fp11);
  //last "column", Gain coefficient vs time
  for (j=0; j<=p; j++) {
```

```
fprintf(fp12,"%e\n",Gs1[j*(m+1)+m]);
}
fclose(fp12);
//Power Gain
for (j=0; j<=p; j++) {
  fprintf(fp13,"%e\n",GPs1[j]);
}
fclose(fp13);
//first "column", Input control Gauss pulse
for (j=0; j<=p; j++) {
  fprintf(fp14,"%e\n",Pc1[j*(m+1)]);
}
fclose(fp14);
//last "column", Output control Gauss pulse
for (j=0; j <=p; j++)
  fprintf(fp15,"%e\n",Ps1[j*(m+1)+m]);
}
fclose(fp15);
//Input signal pulse 1
for (j=0; j \le p; j++)
  fprintf(fp16,"%e\n",Ps1[j*(m+1)]);
}
fclose(fp16);
//Output phase 1
for (j=0; j<=p; j++) {
  fprintf(fp17,"%e\n",fs1[j*(m+1)+m]);
}
fclose(fp17);
free(Gc1);
free(Pc1);
free(Ps1);
free(Gs1);
//branch 2
fp21=fopen("GaincoGs2_space.txt","w");
if (fp21==NULL) {
  return;
}
fp22=fopen("GaincoGs2_time.txt","w");
if (fp22==NULL) {
```

```
return;
}
fp23=fopen("Power Gain2.txt","w");
if (fp23==NULL) {
  return;
}
fp24=fopen("InputControl2.txt","w");
if (fp24==NULL) {
  return;
}
fp25=fopen("Output2.txt","w");
if (fp25==NULL) {
  return;
}
fp26=fopen("InputClock2.txt","w");
if (fp26==NULL) {
  return;
     }
fp27=fopen("OutputPhase2.txt","w");
if (fp27==NULL) {
  return;
}
//last "raw", Gain coefficient vs space
for (j=0; j<=m; j++) {
  fprintf(fp21,"%e\n",Gs2[p*(m+1)+j]);
}
fclose(fp21);
//last "column", Gain coefficient vs time
for (j=0; j<=p; j++) {
  fprintf(fp22,"%e\n",Gs2[j*(m+1)+m]);
fclose(fp22);
//Power Gain
for (j=0; j<=p; j++) {
  fprintf(fp23,"%e\n",GPs2[j]);
}
fclose(fp23);
//first "column", Input control Gauss pulse
for (j=0; j<=p; j++) {
```

```
fprintf(fp24,"%e\n",Pc2[j*(m+1)]);
  }
  fclose(fp24);
  //last "column", Output control Gauss pulse
  for (j=0; j<=p; j++) {
    fprintf(fp25,"%e\n",Ps2[j*(m+1)+m]);
  }
  fclose(fp25);
  //Input signal pulse 2
  for (j=0; j<=p; j++) {
     fprintf(fp26,"%e\n",Ps2[j*(m+1)]);
  }
  fclose(fp26);
  //Output phase 2
  for (j=0; j<=p; j++) {
    fprintf(fp27,"%e\n",fs2[j*(m+1)+m]);
  }
  fclose(fp27);
  free(Gc2);
  free(Pc2);
  free(Ps2);
  free(Gs2);
//phase difference
  df=fopen("Phase difference.txt","w");
  if (df==NULL) {
    return;
  }
  for (j=0; j<=p; j++) {
    fprintf(df,"%e\n",Dfs[j]);
  }
  fclose(df);
  free(fs1);
  free(fs2);
//MachZehnder, transmission port
  fo1=fopen("MachZehnder_Output_1.txt","w");
  if (fo1==NULL) {
    return;
  }
```

```
for (j=0; j \le p; j++)
    fprintf(fo1,"%e\n",FOut1[j]);
  fclose(fo1);
//MachZehnder, reflection port
  fo2=fopen("MachZehnder_Output_2.txt","w");
  if (fo2==NULL) {
    return;
  }
  for (j=0; j<=p; j++) {
    fprintf(fo2,"%e\n",FOut2[j]);
  fclose(fo2);
//MachZehnder, total output (transmission and reflection ports)
  fo=fopen("MachZehnder SumOutput.txt","w");
  if (fo==NULL) {
    return;
  }
  for (j=0; j<=p; j++) {
    fprintf(fo,"%e\n",FOut[j]);
  ł
  fclose(fo);
  free(GPs1);
  free(GPs2);
  free(Dfs);
  free(FOut1);
  free(FOut2);
  free(FOut);
//characterization
  //transmission port
  am1=fopen("Amplitude Modulation 1.txt","w");
  if (am1==NULL) {
    return;
  }
  for (j=0; j<(NUM MAX-NUM MIN); j++) {
    fprintf(am1,"%e\n",Ampmod1[j]);
  }
```

```
fclose(am1);
free(Ampmod1);
er1=fopen("Extinction Ratio 1.txt","w");
if (er1==NULL) {
  return;
}
for (j=0; j<(NUM MAX-NUM MIN); j++) {
  fprintf(er1,"%e\n",Extratio1[j]);
fclose(er1);
free(Extratio1);
//reflection port
am2=fopen("Amplitude Modulation 2.txt","w");
if (am2==NULL) {
  return;
}
for (j=0; j<(NUM MAX-NUM MIN); j++) {
  fprintf(am2,"%e\n",Ampmod2[j]);
fclose(am2);
free(Ampmod2);
er2=fopen("Extinction Ratio 2.txt","w");
if (er2==NULL) {
  return;
}
for (j=0; j<(NUM MAX-NUM MIN); j++) {
  fprintf(er2,"%e\n",Extratio2[j]);
}
fclose(er2);
free(Extratio2);
//contrast ratio
cr=fopen("Contrast Ratio.txt","w");
if (cr==NULL) {
  return;
}
for (j=0; j<(NUM MAX-NUM MIN); j++) {
```

```
fprintf(cr,"%e\n",Contratio[j]);
}
fclose(cr);
free(Contratio);
//transmitted power
tp=fopen("Transmitted Power.txt","w");
if (tp==NULL) {
  return;
}
for (j=0; j<(NUM MAX-NUM MIN); j++) {
   fprintf(tp,"%e\n",TranPower[j]);
}
fclose(tp);
free(TranPower);
//control pulse energy
en c=fopen("Control Pulse Energy.txt","w");
if (en c==NULL) {
  return;
}
for (j=0; j<(NUM_MAX-NUM_MIN); j++) {
   fprintf(en_c,"%e\n",energy_c[j]);
fclose(en c);
free(energy c);
//control pulse energy difference
en d=fopen("Control Pulse Energy Difference.txt","w");
if (en d==NULL) {
  return;
}
for (j=0; j<(NUM MAX-NUM MIN); j++) {
   fprintf(en_d,"%e\n",endif[j]);
fclose(en d);
free(endif);
//signal pulse energy
```

```
en_s=fopen("Signal_Pulse_Energy.txt","w");
if (en_s==NULL) {
    return;
}
for (j=0; j<(NUM_MAX-NUM_MIN); j++) {
    fprintf(en_s,"%e\n",energy_s[j]);
}
fclose(en_s);
free(energy_s);
return;
}</pre>
```

Η συνάρτηση printfiles() εκτυπώνει τα αποτελέσματα του προγράμματος σε αρχεία κειμένου (.txt). Οι γραφικές παραστάσεις που παρουσιάστηκαν στην εργασία έγιναν με τη βοήθεια ορισμένων αρχείων Matlab (.m). Η βασική εντολή που χρησιμοποιήθηκε στα αρχεία αυτά ώστε τα αποτελέσματα των αρχείων κειμένου (.txt) να αποθηκευτούν σε πίνακες της Matlab είναι η εξής:

fid=fopen('Ovoµa_Apyɛíou.txt');
data=fscanf(fid,'%f');

Με την παραπάνω εντολή τα αποτελέσματα που βρίσκονται στο συγκεκριμένο αρχείο κειμένου (.txt) αποθηκεύονται ως στοιχεία του πίνακα data. Η διαδικασία αυτή γίνεται για όλα τα αρχεία κειμένου που περιέχουν αποτελέσματα και στη συνέχεια με χρήση της ενολής "plot" δημιουργούνται οι γραφικές παραστάσεις.
Βιβλιογραφία

- [1] Η. Αβραμόπουλος, Φωτονική Τεχνολογία για Τηλεπικοινωνίες, Εκδόσεις
 Ε.Μ.Π.
- [2] Ι. Στ. Βενιέρης, Δίκτυα Ευρείας Ζώνης, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2001
- [3] Ν. Κ. Ουζούνογλου, Τηλεπικοινωνίες Οπτικών Ινών, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1990
- [4] R. Ramaswami and K.N. Sivarajan, Optical Networks: A Practical perspective, Academic Press Inc., 2nd Ed., New York, 2002
- [5] Α. Μπακόπουλος και Ι. Χρυσοβέργης, Εισαγωγή στην Αριθμητική Ανάλυση, Εκδόσεις Συμεών
- [6] G. D. Smith, Numerical Solutions of Partial Differential Equations, Oxford University Press, NY, 1960
- [7] Χ. Ε. Μπίντζας, Αμιγώς Οπτική Μεταγωγή και Δρομολόγηση Δεδομένων σε Ψηφιακά Τηλεπικοινωνικά Δίκτυα, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2003
- [8] G. O. Toptchiyski, Analysis of All-Optical Interferometric Switches Based on Semiconductor Optical Amplifiers, Dissertation, Techn. Univ., Berlin, 2002
- [9] Γ. Θ. Κανέλλος, Αμιγώς Οπτική Ανάκτηση Ρολογιού σε Ταχύτητα Μετάδοσης 10 Gbit/sec, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2002
- [10] M. Eiselt, W. Pieper and H. G. Weber, "SLALOM: Semicondustor Laser Amplifier in a Loop Mirror", J. Lightwave Technol, vol. 13, No. 10, pp. 2099-2112, Oct. 1995
- [11] R. Gutiérrez-Castrejón, Laurent Schares, Lorenzo Occhi and George Guekos, "Modeling and Measurement of Longitudinal Gain Dynamics in Saturated Semiconductor Optical Amplifiers of Different Length", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 36, No. 12, pp. 1476-1484, Dec. 2000
- [12] J. M. Tang and K. A. Shore, "Analysis of the Characteristics of TOAD's Subject to Frequency-Detuned Control and Signal Picosecond Pulses", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 35, No. 11, pp. 1704-1712, Nov. 1999
- [13] K. Tajima, S. Nakamura and Y. Ueno, "Ultrafast all-optical signal processing with Symmetric Mach-Zehnder type all-optical switches", *Opt. Quantum Electron.*, pp. 875-897, Vol. 33, 2001

[14] S. Bischoff, A. Buxens, St. Fischer, M. Dülk, A. T. Clausen, H. N. Poulsen and J. Mørk, "Comparison of all-optical co- and counter-propagating highspeed signal processing in SOA-based Mach-Zehnder interferometers", *Opt. Quantum Electron.*, pp. 907-926, Vol. 33, 2001