



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΥΛΙΚΩΝ

*Αναγέννηση DPSK οπτικών σημάτων με χρήση  
ημιαγώγιμων οπτικών ενισχυτών (SOAs)*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γιάννης Κ. Γιαννούλης

Επιβλέπων : Ηρακλής Αβραμόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβρης 2009

---



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και  
Τεχνολογίας Υλικών

*Αναγέννηση DPSK οπτικών σημάτων με χρήση ημιαγωγικών  
οπτικών ενισχυτών (SOAs)*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

**Γιάννη Κ. Γιαννούλη**

Επιβλέπων : **Ηρακλής Αβραμόπουλος**  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2009.

(Υπογραφή)

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

(Υπογραφή)

.....  
Νικόλαος Ουζούνουλου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....  
Κωνσταντίνος Δέρβος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2009

---

(Υπογραφή)

.....

**Γιάννης Γιαννούλης**

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

**Copyright** © Γιάννης Γιαννούλης ,2009.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. **All rights reserved.**

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

---

## Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετάται η δυνατότητα για αναγέννηση DPSK σημάτων με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά αλλοίωσης θορύβου από μια αναγεννητική διάταξη που περιλαμβάνει έναν ακολουθητή 1-bit και ένα συμβολόμετρο Mach-Zehnder το οποίο είναι εφοδιασμένο με ημιαγωγίμους οπτικούς ενισχυτές στους δύο βραχίονες του. Στην αρχή περιγράφηκε αναλυτικά η σημασία που αποκτά στις οπτικές επικοινωνίες η έννοια της αναγέννησης της πληροφορίας στη μετάδοση του σήματος με σχήμα διαμόρφωσης DPSK.

Στη συνέχεια, περιγράφεται η αναγεννητική διάταξη που χρησιμοποιώ και πιο συγκεκριμένα τα δύο τμήματα από τα οποία αποτελείται. Ακολουθώ μια αναλυτική διερεύνηση σε επίπεδο μαθηματικής θεμελίωσης που περιγράφουν τις δύο διατάξεις του αναγεννητή και προσπαθώ να μοντελοποιήσω τη λειτουργία του με τη χρήση μιας παραμέτρου που θα χρησιμοποιήσω και σε όλη τη μελέτη της αναγεννητικής διαδικασίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναζητείται μια θεωρητική μελέτη η οποία θα μου δώσει μια εικόνα για τη συμπεριφορά της αναγεννητικής διάταξης μου και η οποία βασίζεται σε στοχαστικό μοντέλο το οποίο θα δέχεται μια είσοδο για την παραμόρφωση του σήματος εισόδου με όρους θορύβου στο πλάτος και στη φάση του σήματος με έναν ανεξάρτητο τρόπο και σαν απόκριση θα προσδιορίζει τον περιορισμό του θορύβου στην έξοδο του συμβολόμετρου. Τα εργαλεία που χρησιμοποιώ αντλούνται από τη θεωρία των πιθανοτήτων και συνδυάζει τα στοιχεία των οπτικών κυκλωμάτων που έχω καταλήξει στο κεφάλαιο 2.

Στο τέταρτο κεφάλαιο θα παραθέσω μια σειρά από πειραματικά αποτελέσματα τα οποία είναι αποτέλεσμα ενός πειράματος που έλαβε χώρα στο εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών του ΕΜΠ και έρχεται να δώσει μια εικόνα σύγκρισης, βαθύτερων συμπερασμάτων σε επίπεδο παραμέτρων και επιβεβαίωσης στα αποτελέσματα τα θεωρητικής ανάλυσης.

Τέλος, παρουσιάζονται συμπεράσματα από τη διπλωματική εργασία και κυρίως οι άξονες οι οποίοι χρήζουν περαιτέρω ερευνητικής επεξεργασίας και γεννήθηκαν μέσα από την προσπάθεια της συγκεκριμένης εργασίας.

## Λέξεις Κλειδιά

**Αναγεννητής DPSK οπτικών σημάτων , συμβολόμετρο Mach-Zehnder , ημιαγωγά οπτικοί ενισχυτές, θόρυβος παραμόρφωσης πλάτους και φάσης σήματος, ακολουθητής 1-bit, στοχαστικό μοντέλο, μαθηματική ανάλυση οπτικών κυκλωμάτων.**

---

---

## Abstract

The purpose of this thesis is to examine and develop the possibility for the regeneration differential phase-shift keying optical signals with characteristics of input noise from an all optical regenerator which includes a delay- interferometer 1 bit and a Mach-Zehnder interferometer which uses semiconductor optical amplifiers in its optical arms. At first, I describe analytically the point which appears in optical communications the meaning of regeneration of information in optical transmissions with the scheme of DPSK phase modulation.

In the chapter 2, the two parts which are used to make the DPSK regenerator are described with analytical way. I follow a mathematical building in order to describe the mechanism of these parts and at least, a mathematical parameter included for the model of regeneration problem.

At chapter 3, I am looking for a theoretical analysis in order to give the base of behavior of the regenerator. This format is based on stochastic model with input the amplitude and phase noise suppression – with an independent view – and output the results of the regenerated signals. The basic keys of this trying are offered of the theory of probabilities and the mechanism of the optical regeneration.

At chapter 4, an all optical method for regeneration is experimentally demonstrated and the results of this trying appear in order to be compared with the results of theoretical analysis. The experimental set up has taken place on photonic communication lab of NTUA.

Finally, I propose the results of this thesis and I try to look for fields with a value of studying and experimental demonstrations.

## Key Words

DPSK Regenerator for optical signals, interferometer Mach-Zehnder , semiconductor optical amplifiers, noise amplitude and phase variation, delay – interferometer 1-bit, stochastic model, mathematical formalization of optical problems.

---



---

## Ευχαριστίες

Η διπλωματική αυτή συντάχθηκε στη διάρκεια της ακαδημαϊκής χρονιάς 2008-2009 στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών στον τομέα συστημάτων μετάδοσης πληροφορίας και τεχνολογίας υλικών.

Καταρχήν, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή του Ε.Μ.Π. Ηρακλή Αβραμόπουλο γιατί κατάφερε να μου δώσει τη δυνατότητα και την έμπνευση να ασχοληθώ με ένα πραγματικά ενδιαφέρον θέμα των οπτικών επικοινωνιών. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω του υποψήφιο Διδάκτορα Χρήστο Κουλουμέντα γιατί κατάφερε να με βοηθήσει πραγματικά με τις γνώσεις του στο αντικείμενο της εργασίας αυτής και να ορίσουμε το μεθοδολογικό πλαίσιο για τη διεκπεραίωση της.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τον πατέρα μου Κώστα, τη μητέρα μου Σοφία και την αδερφή μου Μαρίνα καθώς στέκονται πάντα δίπλα μου. Τους φίλους και τις φίλες μου για όλα αυτά που έζησα μαζί τους και κατάφεραν να χρωματίσουν τα φοιτητικά μου χρόνια με έντονες πινελιές. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τη γενιά μου γιατί καταφέραμε-μέσα από τα μαθήματα της αμφισβήτησης, αξιοπρέπειας και της αλληλεγγύης που δώσαμε- να ψηλαφίσουμε την ουτοπίας μας...

---

---

---

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

## Εισαγωγή

### 1.1) Οπτικές επικοινωνίες

Στην ανάπτυξη το τελευταίο διάστημα των επικοινωνιών γεννιούνται μια σειρά από παραμέτρους που η βελτιστοποίησή τους θα έρθει να αναβαθμίσει την ποιότητα τους αλλά και να διευρύνει μια σειρά λειτουργιών και απαιτήσεων που εμφανίζονται. Η αλματώδη ζήτηση εύρους ζώνης είναι ένας μοχλός που οδηγεί στην ανάπτυξη δικτύων μεγαλύτερης χωρητικότητας και μικρότερου κόστους ταυτόχρονα. Βασικός άξονας τροφοδοσίας αυτής της ζήτησης αποτελεί η ανάπτυξη του Internet η οποία φέρνει όλο και μεγαλύτερο αριθμό χρηστών να καταναλώνουν μεγάλο εύρος ζώνης για τη μεταφορά δεδομένων. Τα φωτονικά δίκτυα είναι η τεχνολογική απάντηση σε αυτή τη ζήτηση με βασικό πυρήνα τους την οπτική ίνα η οποία χρησιμοποιείται σαν μέσο μετάδοσης στα ευρυζωνικά αυτά δίκτυα. Η ανατροπή της χρησιμοποίησης μεταλλικού καλωδίου το οποίο με τους ηλεκτρονιακούς φορείς του κατάφερε μέσω της ηλεκτρικής τάσης και της διακύμανσης αυτής να αποτελεί το όχημα στο οποίο μεταφέρεται η πληροφορία, αλλά και των ασύρματων ζεύξεων που αποτέλεσαν το εργαλείο για τη μετάδοση κυμάτων τα οποία καλύπτουν μια σειρά από εφαρμογές ήρθε να φέρει στην επιφάνεια την οπτική ίνα και τη δημιουργία οπτικών δικτύων.

Η οπτική ίνα παρέχει τη δυνατότητα μετάδοσης που χαρακτηρίζεται από χαμηλές απώλειες σε ένα τεράστιο, σε σύγκριση με τα άλλα μέσα μετάδοσης, φάσμα συχνοτήτων. Μια ποσοτικοποίηση αυτού προσεγγίζεται από ένα μέγεθος της τάξης των 25THz το οποίο είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από τα άλλα μέσα. Άμεσο πλεονέκτημα που κατακτάμε είναι η δυνατότητα να μεταδίδουμε ένα οπτικό σήμα σε πολύ μεγάλους ρυθμούς και σε μεγάλες αποστάσεις μέχρι να υπάρξει η ανάγκη οπτικής ενίσχυσης του η αναγέννησης του, έννοιες που κωδικοποιούνται παρακάτω.

### 1.2) Σχήματα διαμόρφωσης

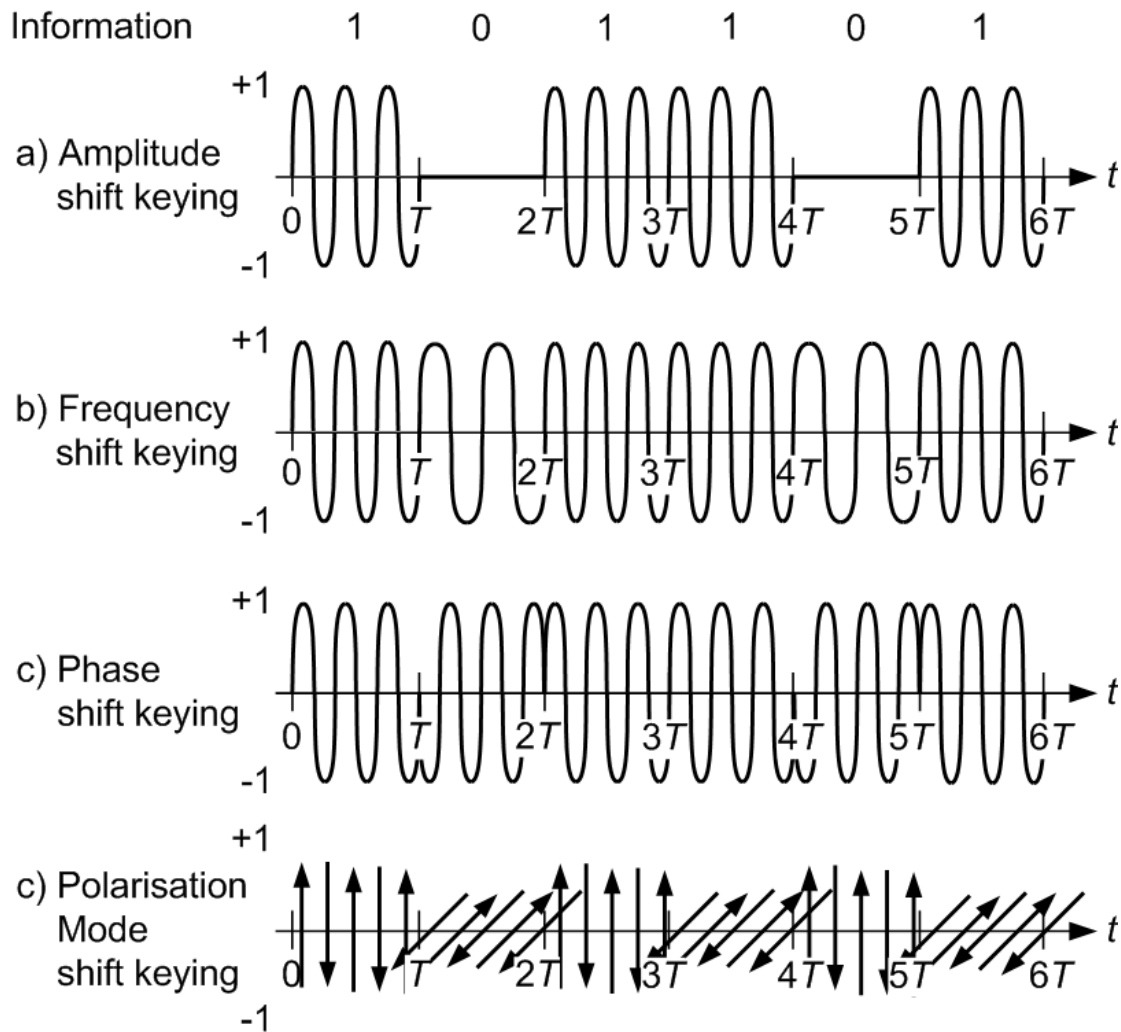
Στην αρχή της ενότητας θα παρουσιάσω κάποια βασικά στοιχεία από τη θεωρία επικοινωνιών τα οποία αναφέρονται στη διαμόρφωση σημάτων. Το βασικό συστατικό σε όλο το φάσμα των τηλεπικοινωνιών είναι η ενσωμάτωση της πληροφορίας που θέλω να μεταδοθεί σε ένα όχημα το οποίο θα αναλάβει τη διαδικασία της μετάδοσης μέσα από τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Το όχημα αυτό είναι το φέρον και αποτελεί τη βασική συνάρτηση που χρησιμοποιώ στη θεωρία επικοινωνιών. Η συνάρτηση αυτή είναι η

$c(t) = a(t) \cos[\theta(t)]$  και εξειδικεύοντας τα μέρη της θα μπορούσα να διακρίνω το πλάτος της  $a(t)$  και τη φάση της  $\theta(t)$  οι οποίες είναι δύο συναρτήσεις οι οποίες μεταβάλλονται συναρτήσει κάποιου σήματος πληροφορίας  $f(t)$ . Το σήμα αυτό πληροφορίας  $f(t)$  ουσιαστικά εμπεριέχει την πληροφορία των δεδομένων που θέλω να μεταδώσω και καθορίζεται μια αναλυτική μορφή για αυτό η οποία θα είναι κατάλληλη για να διαμορφώσει το φέρον ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης που έχω.

---

Εάν θέλω να προσεγγίσω μια κατηγοριοποίηση για τα σχήματα διαμόρφωσης θα ήταν καλύτερο προσαρμόσω την παρουσίαση στο κομμάτι της οπτικής διαμόρφωσης το οποίο έχει και υλικό αντίκρισμα στις οπτικές επικοινωνίες. Η βασική θεώρηση της οπτικής διαμόρφωσης συγκροτείται στη διαμόρφωση του φέροντος το οποίο στην περίπτωση μου είναι το φως το οποίο παράγει μια οπτική πηγή. Συγκεκριμένα η οπτική πηγή που συνήθως παράγει το φέρον είναι συνήθως μια πηγή Laser η οποία παράγει μια μονοχρωματική ακτίνα φωτός(στην ιδανική θεώρηση της μιας και σε πραγματικές συνθήκες έχω ένα μικρό φάσμα συχνοτήτων γύρω από μια συχνότητα  $f_0$  ή μήκος κύματος  $\lambda_0$  αντίστοιχα). Αντλώντας την κυματική προσέγγιση για το ηλεκτρομαγνητικό κύμα από τη διττή φύση του φωτός μπορώ να κατασκευάσω την εξίσωση που περιγράφει το φέρον μου και η οποία είναι η  $E(t) = A(t) \cos[\omega(t)t + \varphi(t)]$  και βασίζεται στο γενικό μοντέλο του φέροντος που ανέφερα παραπάνω. Η πληροφορία μπορεί να είναι «κρυμμένη» είτε στο πλάτος  $A(t)$ , είτε στη φάση  $\varphi(t)$ , είτε και σπανιότατα στη συχνότητα  $\omega(t)$ . Η διάκριση αυτή είναι που προσφέρει μια πρώτη γενική κατηγοριοποίηση στις τεχνικές διαμόρφωσης οι οποίες αναφέρονται κατ' αντιστοιχία ως διαμόρφωση πλάτους(AM), διαμόρφωση φάσης(PM) και διαμόρφωση συχνότητας(FM) που η καθεμιά εμφανίζει ιδιότητες τις οποίες τις εκμεταλλεύομαι ανάλογα με τις απαιτήσεις του τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Επιστρέφοντας στην παρουσίαση της οπτικής διαμόρφωσης έρχομαι να διακρίνω τις τρεις κατηγορίες:

- Διαμόρφωση πλάτους (ASK ή OOK)
- Διαμόρφωση φάσης (PSK)
- Διαμόρφωση συχνότητας(FSK)
- Διαμόρφωση που βασίζεται στην πόλωση του κύματος



Εικόνα 1.1) Σχηματική παρουσίαση των βασικών κατηγοριών ψηφιακής οπτικής διαμόρφωσης.

Στα πλαίσια αυτού του εισαγωγικού σημειώματος έχει νόημα να παρουσιάσω με ένα συμπυκνωμένο τρόπο τη διαμόρφωση φάσης μιας και αυτή θα είναι που θα χρησιμοποιηθεί στην περαιτέρω ανάλυση και εξειδικεύοντας στη διαφορική μεταλλαγή μετατόπιση φάσης (DPSK) που αποτελεί και το σχήμα διαμόρφωσης φάσης που χρησιμοποιώ. Η διαμόρφωση φάσης που αναφέρεται σε ψηφιακά σήματα μπορεί να ερμηνευθεί ως η κωδικοποίηση της μεταδιδόμενης πληροφορίας στη φάση του οπτικού φέροντος.

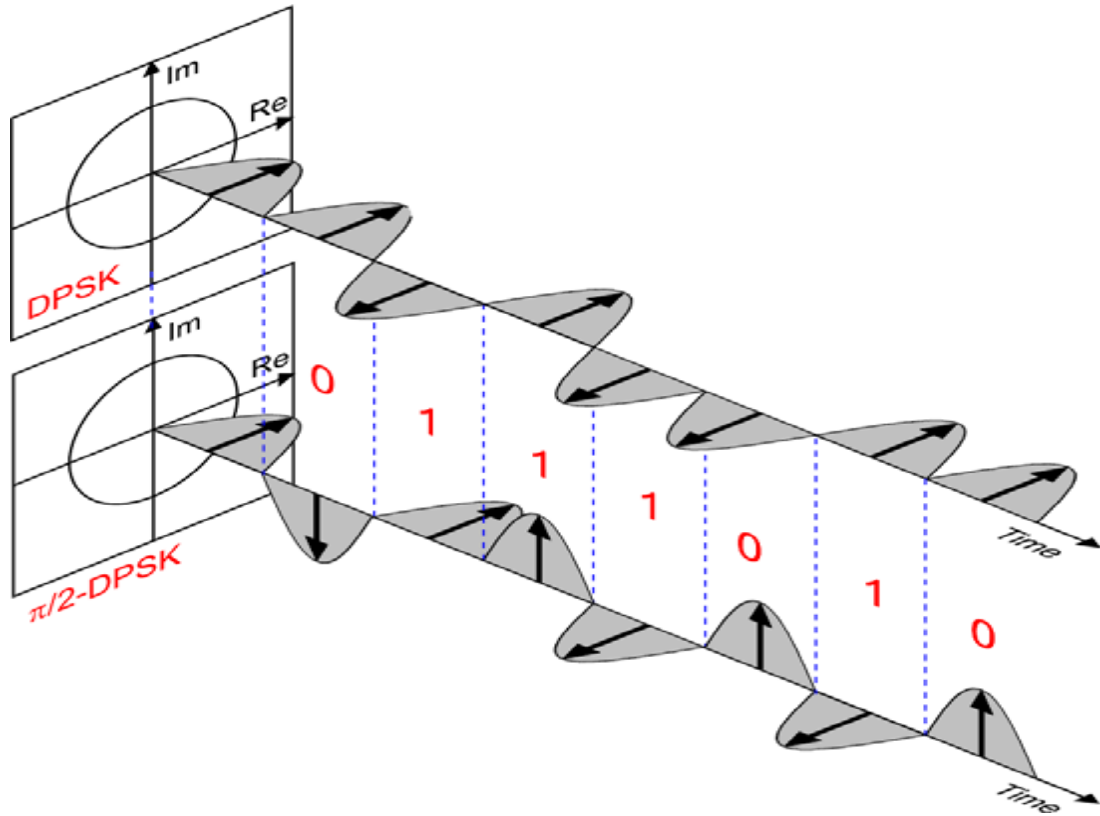
Στη PSK (phase shift keying) όπως περιγράφεται και στο όνομα της διαμορφώνω τη φάση του φέροντος ενώ διατηρώ σταθερό το πλάτος του αλλά και τη συχνότητά του. Η ψηφιακή μορφή της πληροφορίας στα πλαίσια της δυαδικής αναπαράστασης των bits(0,1) έρχεται να δώσει τη δυνατότητα στη φάση να παίρνει δύο διακριτές τιμές που τις περισσότερες περιπτώσεις επιλέγεται να είναι 0 ή π. Ένα βασικό πλεονέκτημα που εντοπίζουμε στην PSK είναι η διατήρηση της ισχύος του σήματος που διαμορφώνουμε σε επίπεδα σταθερής ισχύος, καθώς δεν επηρεάζεται το πλάτος του, ανεξάρτητα από το bit που εμφανίζεται αλλά και την αλληλουχία τους. Στα οπτικά δίκτυα το πλεονέκτημα αυτό αναβαθμίζεται καθώς έτσι καταφέρνω να περιορίσω την επίδραση των μη γραμμικών

---

φαινομένων τα οποία κλιμακώνουν την παρουσία τους ανάλογα με τη στάθμη της ισχύος των οπτικών σημάτων. Συνεπώς η PSK διαμόρφωση έχει μεγαλύτερη ανοχή στα μη γραμμικά φαινόμενα.

Ενδιαφέρον ωστόσο παρουσιάζει η παράθεση των κριτηρίων τα οποία πρέπει να πληρούνται από κάθε σχήμα διαμόρφωσης ώστε να είναι αποδοτική η χρήση του στα συστήματα μετάδοσης. Ένας παράγοντας που ανέφερα και παραπάνω είναι η ανοχή σε φαινόμενα διάδοσης τα οποία εμφανίζονται στα οπτικά δίκτυα και συγκεκριμένα η διασπορά των παλμών που οδηγεί στη διασυμβολική παρεμβολή αλλά και τα μη γραμμικά φαινόμενα τα οποία έρχονται να παραμορφώσουν το σήμα που διαδίδεται. Επίσης η πολυπλοκότητα τόσο του πομπού όσο και του δέκτη για το σχήμα διαμόρφωσης το οποίο έχει ρόλο τόσο σε επίπεδο υλοποίησης αλλά και ευρύτερα στην οικονομοτεχνική ανάλυση του συστήματος μετάδοσης. Τρίτος άξονας επιλογής είναι η απαιτούμενη ευαισθησία του δέκτη αλλά και η ικανή προσέγγιση ενός σηματοθορυβικού λόγου(SNR) ικανού ώστε να μην ηγεμονεύει η παρουσία του θορύβου στη μετάδοση ώστε να είναι δυνατή η ανίχνευση. Τέλος ιδιαίτερη σημασία έχει η αποδοτική χρήση του φάσματος του σήματος. Η παράμετρος αυτή μοντελοποιείται μέσα από τη διερεύνηση του spectral efficiency (Ρυθμός μετάδοσης ανά κανάλι/channel spacing), για το οποίο έχω σαν στόχο να επιλέγω σχήματα διαμόρφωσης, τα οποία για τον ίδιο ρυθμό μεταδιδόμενης πληροφορίας να έχω στενότερο φάσμα.

Θα παρουσιάσω στη συνέχεια με βάση τα κριτήρια αυτά τη διαφορική μεταλλαγή μετατόπισης φάσης(DPSK) η οποία μπορεί να θεωρηθεί σαν η ασύμφωνη έκδοση της PSK. Η πληροφορία μου κωδικοποιείται χρησιμοποιώντας τη διαφορά φάσης μεταξύ δύο διαδοχικών bits. Πιο συγκεκριμένα, το κάθε bit του κωδικοποιημένου σήματος συγκρίνεται με το επόμενο bit του κανονικού σήματος πληροφορίας. Μετάβαση από 0 σε 1 ή από 1 σε 0 αντιστοιχεί σε φάση  $\pi$ , ενώ η διατήρηση της αξίας του bit οδηγεί σε φάση 0.



Εικόνα 1.2) σχηματική παρουσίαση για το πλάτος και τη φάση που εμφανίζονται στο σχήμα διαμόρφωσης DPSK(πάνω διάγραμμα) και  $\pi/2$ -DPSK (κάτω). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα χρησιμοποιήσα RZ Return to Zero παλμούς.

Σε πρώτο επίπεδο χρήσιμη είναι η παρουσίαση της υλοποίησης σε λογικό επίπεδο του πομπού και του δέκτη DPSK. Η διαδικασία διαφορικής κωδικοποίησης στην είσοδο του πομπού αρχίζει με ένα αυθαίρετο bit , που λειτουργεί σαν αναφορά και κατόπιν δημιουργείται η διαφορική ακολουθία κωδικοποίησης  $\{d_k\}$  χρησιμοποιώντας τη λογική εξίσωση  $d_k = d_{k-1}b_k \oplus \bar{d}_{k-1}\bar{b}_k$  όπου  $b_k$  είναι το δυαδικό ψηφίο εισόδου τη χρονική στιγμή  $kT_b$  και  $d_{k-1}$  είναι η προηγούμενη τιμή του διαφορικά κωδικοποιημένου ψηφίου. Το σύμβολο  $\oplus$  συμβολίζει πρόσθεση modulo-δύο και η χρήση επιγραμμών υποδηλώνει αντιστροφή. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας πίνακας αναπαράστασης της παραγωγής ενός DPSK σήματος μέσα από τα στοιχεία που αναφέρθηκαν καθώς και το δομικό διάγραμμα παρουσίασης του πομπού αλλά και του δέκτη DPSK. Από την ανάλυση αυτή προκύπτει άμεσα ένα άλλο πλεονέκτημα για την DPSK σύμφωνα με το οποίο η ικανότητα διαφορικής λήψης προσφέρει τη δυνατότητα μεγαλύτερης ευαισθησίας κατά 3db στο δέκτη.

Σημαντική παράμετρος σε όλα τα σχήματα ψηφιακής διαμόρφωσης αποτελεί και η μέση πιθανότητα σφάλματος συμβόλων. Εκφράζει με ένα στοχαστικό τρόπο την αδυναμία στη διαδικασία της διαμόρφωσης να κωδικοποιηθεί ένα λογικό ψηφίο και να αποκωδικοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε στην έξοδο να μην έχω αλλαγές στην ακολουθία των δυαδικών ψηφίων και άρα και στην ποιότητα της πληροφορίας. Η πιθανότητα αυτή στην DPSK είναι

$$P_e = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_b}{N_0}\right).$$

Στην προηγούμενη σχέση  $E_b$  είναι η ενέργεια/bit που μεταδίδεται και  $N_0$  είναι ο αριθμός των δυαδικών ψηφίων. Με βάση την πάγια επιδίωξη για όσο το δυνατό



---

μικρότερη πιθανότητα λάθους η DPSK μας παρέχει μια ικανοποιητική πολιτική σφαλμάτων σε παραβολή με τις άλλες τεχνικές διαμόρφωσης.

### 1.3) Αναγέννηση οπτικών σημάτων

Το σύνολο των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων επιβαρύνεται από μια σειρά φαινόμενα που οδηγούν στην παραμόρφωση των σημάτων που μεταδίδονται. Η παραμόρφωση αυτή σε κάθε ενσύρματο δίκτυο-όπως είναι και τα οπτικά δίκτυα- είναι συσσωρευτικό αποτέλεσμα μιας σειράς φαινομένων. Επιμερίζοντας στα οπτικά δίκτυα θα αναφερθούμε στις απώλειες ισχύος κατά τη διάδοση των οπτικών σημάτων, φαινόμενο το οποίο εμφανίζονται σε όλα τα συστήματα μετάδοσης και ενοποιεί τις απώλειες που μπορώ να έχω στο μέσο διάδοσης (οπτική ίνα) από τις φυσικές διεργασίες απωλειών σε αυτό(απορρόφηση υλικού-σκέδαση Rayleigh-ανομοιομορφίες κυματοδηγού). Επιπρόσθετα η διασπορά είναι ένα φαινόμενο από το οποίο υποφέρουν έντονα οι οπτικές επικοινωνίες και η δράση του συνοψίζεται στη «διαστολή» των παλμών στο πεδίο του χρόνου που οφείλεται σε φυσικά φαινόμενα όπως η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από τη συχνότητα (χρωματική διασπορά), η διασπορά σε περίπτωση διέγερσης πολλαπλών ρυθμών, η διασπορά που οφείλεται στο υλικό, και μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα διασυμβολικής παρεμβολής και προφανώς σε αλλοίωση του περιεχομένου της πληροφορίας. Τα μη γραμμικά φαινόμενα είναι φαινόμενα που κωδικοποιούν την ύπαρξη τους ως η μη γραμμική απόκριση ενός διηλεκτρικού μέσου όταν το επιβαλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι μεγάλης ισχύος-συγκεκριμένα μεγάλης χωρικής πυκνότητας ισχύος για τα φωτονικά δίκτυα- και έρχονται να αλλοιώσουν την ποιότητα των σημάτων που διαδίδονται σε αυτά. Η πόλωση είναι φαινόμενο το οποίο έχει σημαντικό ρόλο στα φαινόμενα κυματικής διάδοσης καθώς υπεισέρχεται σε διαδικασίες ερμηνείας και μεταβολής αρκείων μεγεθών και για το λόγο αυτό η διαρκής μεταβολή της για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που διαδίδονται σε οπτικές ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων οδηγεί σε επιβάρυνση στην ποιότητα του σήματος και επιπλέον παραμόρφωση. Τέλος ο καθολικός ενοχλητικός παράγοντας που εμφανίζεται σε όλα τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα είναι ο θόρυβος ο οποίος γεννιέται από τις συνθήκες στα μέσο μετάδοσης αλλά και από τις ενισχυτικές ή άλλες διατάξεις που χρησιμοποιώ κατά μήκος του οπτικού μου δικτύου.

Το σύνολο των επιβαρυντικών για το δίκτυο παραγόντων αναφέρθηκε ως η αιτία δημιουργίας της παραμόρφωσης του σήματος. Η έννοια της παραμόρφωσης ωστόσο επιμερίζεται σε μια σειρά αλλοιώσεις που εντοπίζεται στο οπτικό σήμα που μεταδίδεται. Η εξασθένιση ισχύος λόγω των απωλειών είναι η πρώτη έκφραση της παραμόρφωσης, όπως και η παραμόρφωση των σχημάτων των παλμών του σήματος, η απώλεια σωστού χρονισμού των διψύων του λόγω αυξημένης χρονικής ολίσθησης (jitter). Στόχος μου παραμένει να περιορίσω σε όσο το δυνατό μεγαλύτερο βαθμό τις επιπτώσεις που συνοδεύουν την παραμόρφωση του σήματος για να εξυπηρετήσω και τον τελικό στόχο μου που είναι να έχω στο δέκτη μου το σύνολο της πληροφορίας χωρίς καμιά αλλοίωση σε σχέση με αυτό που στέλνει ο πομπός. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση των αναγεννητών ανά τακτά χωρικά διαστήματα κατά μήκος του δικτύου. Ως αναγεννητής αναφέρεται εκείνη η διάταξη η οποία καταφέρει να ανακτήσει το σήμα που μεταδίδεται στο οπτικό δίκτυο τα αρχικά χαρακτηριστικά του τα οποία επηρεάζονται από την παραμόρφωση του.

Γεννιέται λοιπόν η ανάγκη για την αναγέννηση των οπτικών σημάτων ώστε να επιτευχθεί η επαναφορά της ποιότητας τους που έχει διαβρωθεί από την παραμόρφωση. Υπάρχουν

---

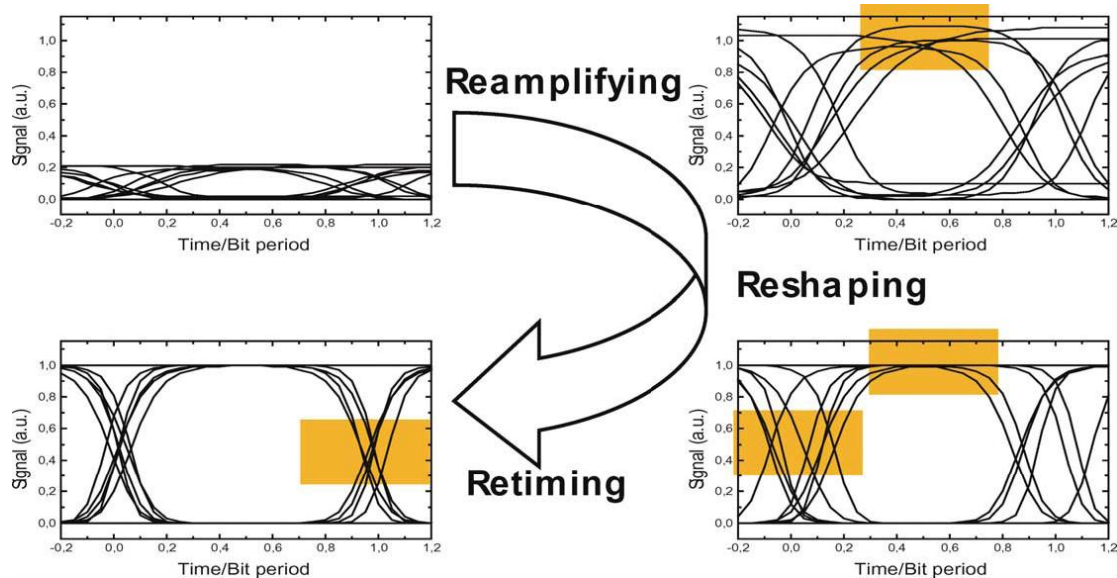
τεχνικές και εργαλεία τα οποία αντλούνται από τον τομέα της οπτοηλεκτρονικής αλλά και σύγχρονες τεχνικές που αναφέρονται στην πλήρως οπτική αναγέννηση. Η προσέγγιση της οπτοηλεκτρονικής αναγέννησης έγκειται στη χρησιμοποίηση ηλεκτρονικών πολλαπλασιαστών κατά μήκος της οπτικής ζεύξης χρησιμοποιώντας διατάξεις που συγκροτούνται στο μετασχηματισμό ισχύος από οπτική σε ηλεκτρική μορφή. Στη δεύτερη προσέγγιση της πλήρους οπτικής αναγέννησης η αποκατάσταση σήματος λαμβάνει χώρα με μικρότερο βαθμό πολυπλοκότητας σε επίπεδο χρήσης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων τα οποία επίσης συνοδεύονται από περιορισμό στη χρήση φάσματος σε ευρυζωνικές διεργασίες.

Και στις δύο προσεγγίσεις της αναγέννησης εμπλέκονται τρεις βασικές διεργασίες επεξεργασίας σήματος, η ενανίσχυση (re-amplifying), η επανασχηματοποίηση (re-shaping) και η χρονική επαναφορά (re-timing), από τις οποίες προκύπτει και το ακρωνύμιο 3R.

Η απλή οπτική ενίσχυση παρέχει μόνο μια “1R” αναγέννηση ή επεξεργασία του σήματος (*1R functionality*). Η διαδικασία αυτή γίνεται πλήρως οπτικά και το εισερχόμενο σήμα απλώς ενισχύεται από έναν ενισχυτή ερβίου (EDFA - Erbium doped Amplifier). Έτσι η αναγέννηση είναι διαφανής σε ότι αφορά στην διαμόρφωση (ψηφιακή ενδεχομένως) και μπορεί να χειριστεί και αναλογικά δεδομένα με την ίδια ευκολία. Ωστόσο, προστίθεται θόρυβος και η επίδραση των μη γραμμικοτήτων και της διασποράς στην ίνα δεν αναιρούνται.

Εναλλακτικά, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα οι διαδικασίες του reamplifying και του reshaping, αλλά χωρίς να γίνει χρήση της διαδικασίας του retiming. Τότε λέμε ότι επιτελείται “2R” αναγέννηση και το σύστημα μας παρέχει *2R functionality*. Η συγκεκριμένη διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε ψηφιακό σήμα, το οποίο ανασχηματίζεται στέλνοντας το μέσα από μια λογική πύλη. Επιπρόσθετη χρονική διαφορά φάσης (jitter) προστίθεται στο σήμα μέσω αυτής της διαδικασίας, κάτι το οποίο τελικά περιορίζει τον συνολικό αριθμό τέτοιων στοιχείων που μπορούμε να έχουμε στο σύστημά μας. Στην εργασία αυτή θα γίνεται αναφορά σ’ αυτόν τον περιορισμό με τον όρο *μέγιστη διαδοχική επανατοποθέτηση του συστήματος*.

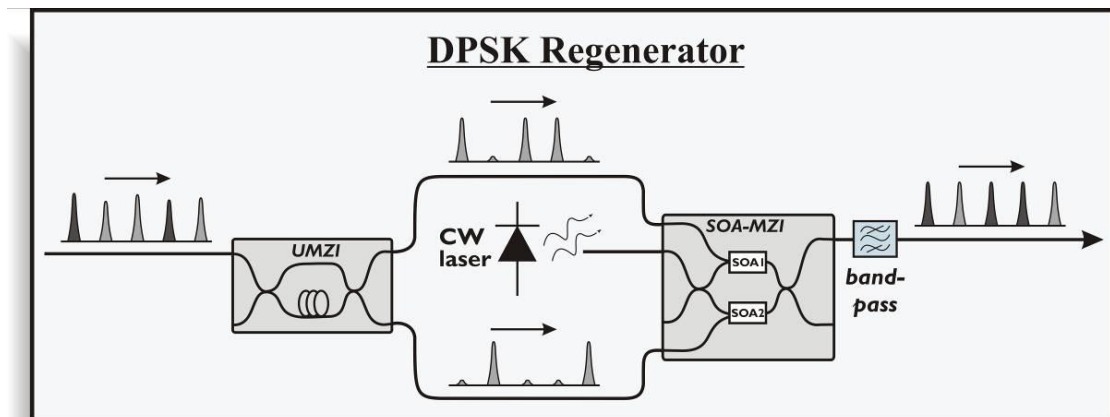
Τέλος, όταν επιτελείται επιπρόσθετα και retiming με την χρήση κάποιου ειδικού κυκλώματος λέμε ότι έχουμε 3R επεξεργασία (*3R functionality*). Η διαδικασία αυτή αναιρεί εντελώς τα αποτελέσματα των μη γραμμικοτήτων της ίνας, της διασποράς και του θορύβου των ενισχυτών. Επιπρόσθετα δεν εισάγει καθόλου επιπλέον θόρυβο. Ωστόσο, η διαδικασία του retiming εξαρτάται από την ίδια την ακολουθία ψηφίων και χάνουμε έτσι την διαφάνεια. Αν η διαφάνεια είναι μια ιδιότητα που δε μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα τότε η τελευταία προσέγγιση είναι αρκετά ελκυστική.



Εικόνα 1.3 παρουσίαση διαδικασιών 1R,2R,3R

#### 1.4) Παρουσίαση του DPSK αναγεννητή (regenerator)

Στη συνέχεια θα παρουσιάσω συνοπτικά την αναγεννητική διάταξη που χρησιμοποιώ στη συγκεκριμένη εργασία ως αναγεννητική διάταξη για DPSK σήματα. Θα παρουσιάσω τις δύο διατάξεις που το αποτελούν αλλά και τον τρόπο με τον οποίο αναγεννιέται στην έξοδο της διάταξης ένα νέο σήμα DPSK με επαναπροσδιορισμένα χαρακτηριστικά.



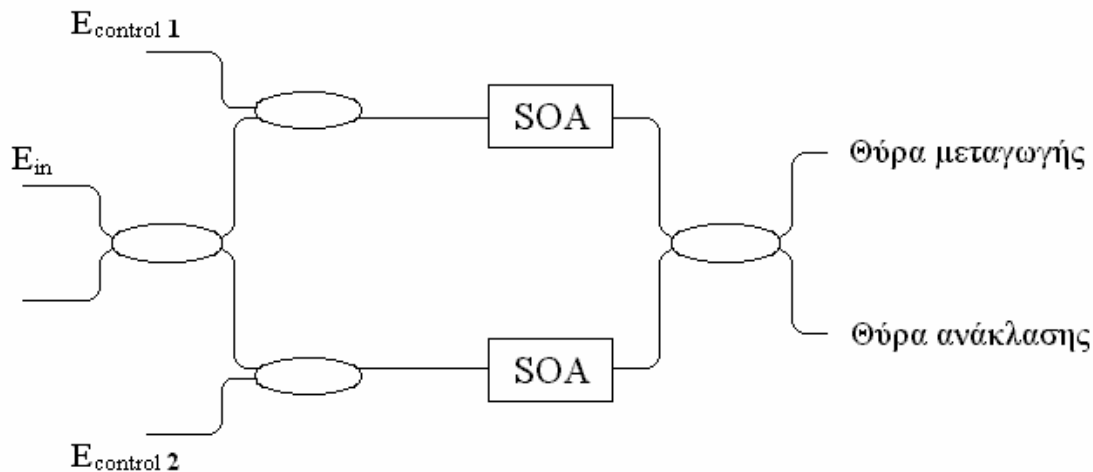
Εικόνα 1.4) διαγραμματική παρουσίαση του DPSK αναγεννητή.

Στο πρώτο στάδιο της επεξεργασίας εντοπίζεται ένα συμβολόμετρο καθυστέρησης (DI) το οποίο έρχεται να επεξεργαστεί το σήμα DPSK εισόδου για τον αναγεννητή. Βασική του λειτουργία είναι η διαδικασία στην οποία καταφέρει να «αποσπάσει» την πληροφορία που βρίσκεται στη φάση του σήματος και να τη «μεταφράσει» στο όχημα του πλάτους-ισχύος των παλμών ελέγχου που προκύπτουν στην έξοδο του. Άρα μπορώ να θεωρήσω ότι καταφέρει να μεταβιβάσει τη διαμόρφωση φάσης (PM) σε μια διαδικασία διαμόρφωσης πλάτους (AM). Άλλωστε η διαδικασία της αναγέννησης που συντελείται στο MZI βασίζεται

τόσο σε επίπεδο πλάτους καθώς οι SOAs ενεργοποιούνται από τους παλμούς ελέγχου και ο μηχανισμός τους όπως εξηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο 2 συγκροτείται στην ισχύ των παλμών ελέγχου οι οποίοι καθορίζουν τα χαρακτηριστικά τα ενίσχυσης που συντελείται στους βραχίονες του MZI. Ταυτόχρονα συνυπάρχει και ο μηχανισμός ολίσθησης φάσης που προκαλούν οι δύο βραχίονες και έχουν ως αποτέλεσμα στην έξοδο της διάταξης να εμφανίζονται φαινόμενα συμβολής ενισχυτικής ή αναιρευτικής που να οδηγούν τη μετάβαση ισχύος σε μια συγκεκριμένη θύρα μεταγωγής.

Σε επίπεδο λειτουργίας του μηχανισμού του ακολουθητή 1-bit (DI) η βασική λειτουργία που επιτελείται είναι η υπέρθεση στην έξοδο της διάταξης δύο διαδοχικών παλμών που εμφανίζονται στην είσοδο του. το γεγονός αυτό είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τον ίδιο το μηχανισμό του DPSK σχήματος διαμόρφωσης καθώς από τη θεωρία των προηγούμενων παραγράφων γνωρίζω πως η πληροφορία μεταφέρεται στο περιεχόμενο της διαφοράς φάσης δύο διαδοχικών παλμών τα ακολουθίας παλμών και είναι κωδικοποιημένη με τον τρόπο που έχει περιγραφθεί παραπάνω. Σε επίπεδο αναλυτικής παρουσίασης των διάταξης του ακολουθητή 1-bit υπάρχει αναλυτική επεξεργασία των σχέσεων που τον διέπουν στο κεφάλαιο 3 και για το λόγο αυτό αποφεύγω να επαναλάβω έστω και τις βασικές εξισώσεις που περιγράφουν τη διάταξη.

Στη συνέχεια, τα σήματα τα οποία εξέρχονται από τον DI, χρησιμοποιούνται από το συμβολόμετρο Mach-Zehnder ως παλμοί ελέγχου που χρησιμοποιούνται για να οδηγηθούν στους SOAs που είναι εφοδιασμένοι οι βραχίονες του συμβολόμετρου. Στην αρχή θα παρουσιάσω τις βασικές αρχές λειτουργίας που ικανοποιεί το συμβολόμετρο στη συγκεκριμένη εφαρμογή του, καθώς και τα βασικά συστατικά του που το αποτελούν.



Εικόνα 1.5) συμβολόμετρο Mach-Zehnder

Η διάταξη του συμβολόμετρου Mach-Zehnder εικονίζεται στο σχήμα 1.5. Αποτελείται από τέσσερις συζεύκτες και δύο ημιαγωγικούς οπτικούς ενισχυτές. Θεωρώντας συζεύκτες 3dB, το σήμα εισόδου ( $E_{in}$ ) 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. Αναλυτική παρουσίαση και εξαγωγή βασικών σχέσεων που διέπουν τη συμπεριφορά του οπτικού κυκλώματος θα παρουσιασθούν αναλυτικά στο κεφάλαιο 2 και για το λόγο αυτό αποφεύγω προς το παρόν να προχωρήσω σε παράθεση εξισώσεων για τη λειτουργία του συμβολόμετρου.

---

Στην περίπτωση που τα σήματα ελέγχου ( $E_{\text{control}}$ ) 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 στην θύρα μεταγωγής (switched ή transmission port) να είναι ίση με  $\pi$  ακτίνια, ενώ στην θύρα ανάκλασης (unswitched ή reflection port) ίση με μηδέν ακτίνια. Συνεπώς, στην θύρα μεταγωγής παρουσιάζεται αναιρετική συμβολή, ενώ στη θύρα ανάκλασης ενισχυτική συμβολή, με αποτέλεσμα η ισχύς εξόδου να εξέρχεται από την θύρα ανάκλασης.

Αν όμως χρησιμοποιηθούν διαφορετικά σήματα ελέγχου, είναι δυνατόν οι ενισχυτές να προκαλέσουν διαφορική στροφή φάσης σε κάθε σήμα. Στην περίπτωση που αυτή η διαφορική στροφή φάσης γίνει ίση με  $\pi$  ακτίνια (ιδανικά), η ισχύς εισόδου τελικά εξέρχεται από την θύρα μεταγωγής. Φυσικά, υπό την παρουσία θορύβου και δεδομένου ότι η διαφορική στροφή φάσης, που οφείλεται στους ενισχυτές, δεν είναι στη πράξη ακριβώς ίση με  $\pi$  ακτίνια, θα υπάρχει και κάποια μικρή ποσότητα ισχύος στην θύρα ανάκλασης.

Η προηγούμενη συνοπτική παρουσίαση ερμηνεύει το μηχανισμό που χρησιμοποιείται για να εξάγω από τη θύρα μεταγωγής S, το αναγεννημένο μου σήμα το οποίο θα μεταφέρει την πληροφορία μου απαλλαγμένο από ενοχλητικά στοιχεία θορύβου τα οποία ενυπήρχαν στο σήμα μου κατά την είσοδο του στον DI. Στη συνέχεια της εργασίας μου θα προσδιορίσω τους όρους με τους οποίους είναι δυνατόν να έχω μια όσο το δυνατόν ποιοτικότερη επανάκτηση των χαρακτηριστικών μου στο σήμα μου στη θύρα μεταγωγής S, αναιρώντας τα στοιχεία θορύβου που ενυπάρχουν στο σήμα και προσομοιάζοντας στην ιδανική συμπεριφορά του MZI ως προς τα χαρακτηριστικά της μετάδοσης που περιγράφηκαν παραπάνω ώστε στην έξοδο να έχω το DPSK σήμα μου.

## 1.5) Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία καταβάλλεται μια προσπάθεια για τη θεωρητική μελέτη και την απόδειξη της δράσης της διάταξης που περιέγραψα στην προηγούμενη ενότητα ως 2R και rephrasing regenerator. Παράλληλα συνοδεύεται και από ένα κεφάλαιο το οποίο παραθέτει τα αποτελέσματα ενός πειράματος το οποίο έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Φωτονικών επικοινωνιών του ΕΜΠ, το οποίο έρχεται να συμπληρώσει σ επίπεδο ερμηνείας μια σειρά από συμπεράσματα τα οποία εξάγονται από την επεξεργασία των θεωρητικών αποτελεσμάτων.

Πιο συγκεκριμένα στο δεύτερο κεφάλαιο επεξεργάστηκα με αναλυτικά εργαλεία τη διάταξη που θα μελετήσω και πιο συγκεκριμένα αναζήτησα ένα μοντέλο λειτουργίας – περιγραφής για το συμβολόμετρο Mach-Zehnder το οποίο θα με ικανοποιεί τόσο σε επίπεδο μαθηματικής μοντελοποίησης στο φαινόμενο των διαταραχών που εισάγουν οι αβεβαιότητες στην είσοδο της διάταξης αλλά και επίσης στο φυσικό επίπεδο της μετάδοσης πληροφορίας σε σχήμα διαμόρφωσης DPSK και τα φαινόμενα που το συνοδεύουν. Για αυτό το λόγο δημιούργησα ένα μοντέλο αναλυτικής περιγραφής το οποίο συγκροτείται στην ποσότητα  $\Delta\varphi$ , που αποτελεί τη διαφορά φάσης που εισάγεται στους δύο οπτικούς βραχίονες του MZI και συνδέεται στενά όπως θα περιγραφεί και παρακάτω με τη λειτουργία της διάταξης.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται με ένα πιο αναλυτικό τρόπο η απόκριση της διάταξης με είσοδο σήματα τα οποία εμφανίζουν διακύμανση στα χαρακτηριστικά τους (πλάτος, φάση). Συγκεκριμένα με ένα στοχαστικό τρόπο αφού ορίσω συγκεκριμένη

---

παρουσία θορύβου στο σήμα εισόδου μου μετρώντας τα στατιστικά δεδομένα της διασποράς θα προσδιορίσω τα αντίστοιχα μεγέθη για την έξοδο της θύρας μεταγωγής. Στόχος μου είναι να αποδείξω πως η πιθανοτική κατανομή του πλάτους και της φάσης στην έξοδο εμφανίζει μικρότερη διακύμανση σε σχέση με την αρχική που εισάγω στο σήμα μου. Μελετώ αυτόνομα την αβεβαιότητα στο πλάτος και τη φάση του σήματος μου αντίστοιχα και για κάθε μια περίπτωση εξετάζω την επίδραση της διαταραχής στη φάση και το πλάτος στη θύρα μεταγωγής.

Τέλος στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφω την πειραματική διαδικασία η οποία χρησιμοποίησε την ίδια αναγεννητική διάταξη που μελετήθηκε στα πρώτα κεφάλαια και οδήγησε σε συμπεράσματα τα οποία θα πρέπει να συγκλίνουν σε ποιοτικά αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης.

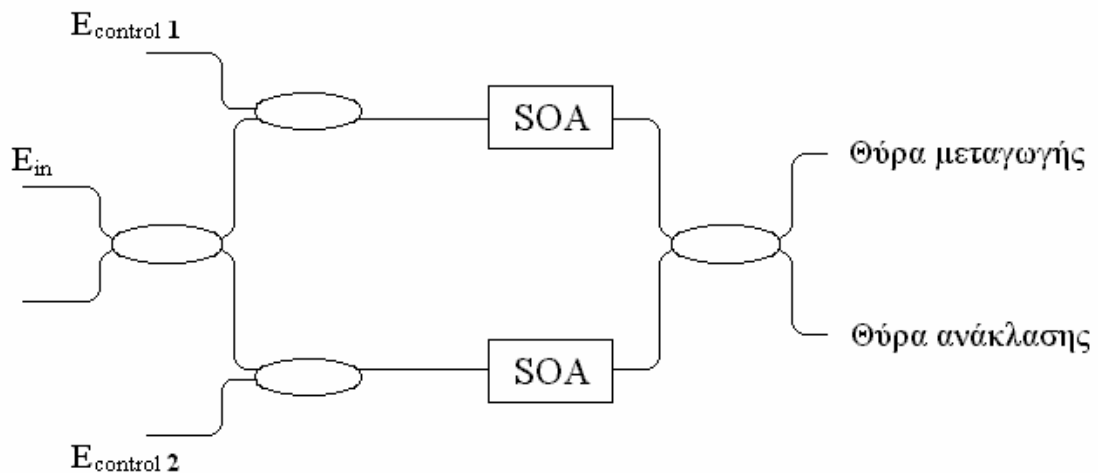
---

## Κεφάλαιο 2

### Μελέτη οπτικού συμβολόμετρου Mach-Zehnder (MZI)

#### 2.1) Αναλυτική περιγραφή εξισώσεων που διέπουν το συμβολόμετρο Mach-Zehnder (MZI)

Για την περιγραφή για μοναδιαία κέρδη και εξαγωγή εξισώσεων στην περίπτωση που στους οπτικούς βραχίονες χρησιμοποιώ ενισχυτές με μοναδιαία κέρδη και που προκαλούν μια στροφή φάσης. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα μου οι δύο αγωγιμοί οπτικοί ενισχυτές (SOAs) έχουν κέρδη  $G_1=G_2=1$  για τα πλάτη του κύματος ενώ προκαλούν στροφή φάσης  $\varphi_1, \varphi_2$  αντίστοιχα στους βραχίονες που προκύπτουν από τις εξόδους του πρώτου οπτικού συζεύκτη.



Εικόνα 2.1.1 Παρουσίαση συμβολόμετρου που θα χρησιμοποιηθεί στη διάταξη του οπτικού αναγεννητή

Θεωρώ ότι στην είσοδο 1 εισέρχεται σήμα  $cw$  το οποίο μπορεί να περιγραφεί

$$\vec{E}_{in} = E_{in} e^{-i\alpha} \hat{p}$$

όπου το διάνυσμα  $\hat{p}$  περιγράφει την πόλωση του διανύσματος της ηλεκτρικής έντασης. Χρησιμοποιώντας τη βασική σχέση που συνδέει την είσοδο και την έξοδο του οπτικού συζεύκτη  $adb$ , όπου η παράμετρος  $\alpha$  καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται τόσο το πλάτος όσο και η φάση της πεδιακής κατανομής στις εισόδους και τις εξόδους του οπτικού συζεύκτη. Η περιγραφική του σχέση σε μητρική μορφή

$$\begin{pmatrix} E_{out}^1 \\ E_{out}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{1-a} & i\sqrt{a} \\ i\sqrt{a} & \sqrt{1-a} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{in}^1 \\ E_{in}^2 \end{pmatrix}$$

για την οποία θεωρώ ότι η παράμετρος  $\alpha=0.5$  επειδή έχω οπτικό συζεύκτη 3db οπότε καταλήγω στη συνάρτηση μεταφοράς για τον συγκεκριμένο συζεύκτη

$$\begin{pmatrix} E_{out}^1 \\ E_{out}^2 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{in}^1 \\ E_{in}^2 \end{pmatrix}$$

που τη χρησιμοποιώ σε όποια περίπτωση συναντώ το συγκεκριμένο οπτικό συζεύκτη και θέλω να προσδιορίσω το οπτικό πεδίο στις δύο εξόδους του συναρτήσει των πεδιακών κατανομών που έχω στην είσοδο του.

Έχω λοιπόν στην έξοδο του συζεύκτη για την ισχύ

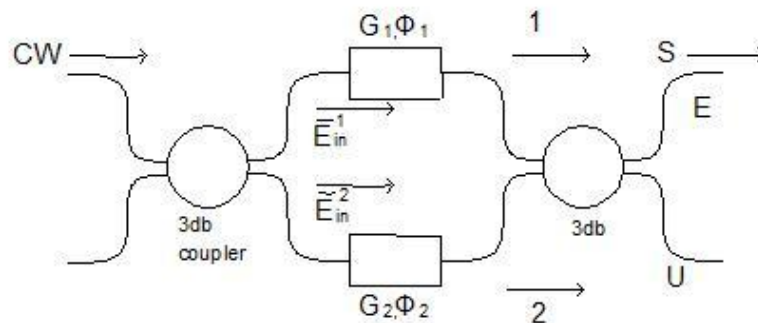
$$P_{in} = P_{cw} = \overline{E_{in} E_{in}} = |\overline{E_{in}}|^2$$

στους δύο οπτικούς βραχίονες θα υπάρχουν οι πεδιακές συνιστώσες αντίστοιχα

$$E_{in}^x = E_{in} e^{-i\omega t}$$

$$E_{in}^y = E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} e^{-i\omega(t+\frac{\pi}{2})}$$

Από τη θεωρία των ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών οι οποίοι έχουν μοναδιαίο κέρδος εισάγεται μια στροφή φάσης  $\varphi_1$  και  $\varphi_2$  αντίστοιχα οπότε στην είσοδο του δεύτερου οπτικού συζεύκτη θα έχω τις πεδιακές κατανομές



Εικόνα 2.1.2 Συμβολόμετρο Mach-Zender με χρήση στους οπτικούς βραχίονες SOAs κέρδη πλάτους  $G_1, G_2$  αντίστοιχα και φάσεις  $\varphi_1, \varphi_2$  που εισάγουν



$$E^x = \sqrt{G_1} E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp[-i(\omega t + \phi_1)]$$

$$E^y = \sqrt{G_2} E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp\left[-i(\omega t + \phi_2 + \frac{\pi}{2})\right]$$

Στον οπτικό συζεύκτη στην έξοδο του MZI προφανώς θα έχω για τις εξόδους S,U τις εκφράσεις για την ηλεκτρική ένταση

$$E_S^x = \sqrt{G_1} E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp[-i(\omega t + \phi_1)] = \sqrt{G_1} E_{in} \frac{1}{2} \exp[-i(\omega t + \phi_1)]$$

$$E_U^x = \sqrt{G_1} E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp\left[-i(\omega t + \phi_1 + \frac{\pi}{2})\right] = \sqrt{G_1} E_{in} \frac{1}{2} \exp\left[-i(\omega t + \phi_1 + \frac{\pi}{2})\right]$$

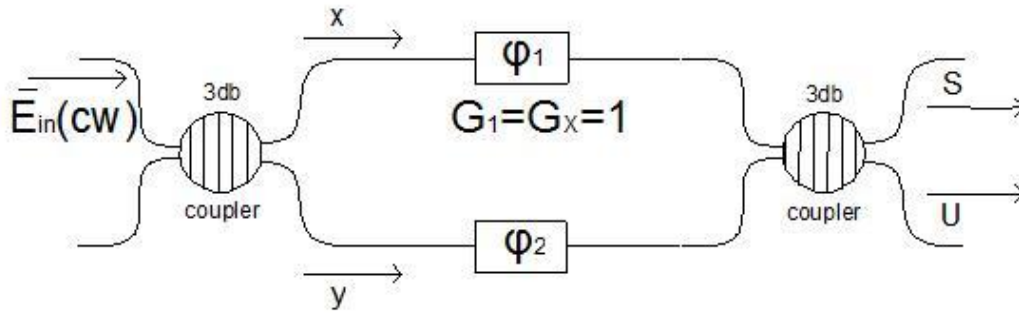
$$E_S^y = \sqrt{G_2} E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp\left[-i(\omega t + \phi_2 + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2})\right] = \sqrt{G_2} E_{in} \frac{1}{2} \exp[-i(\omega t + \phi_2 + \pi)]$$

$$E_U^y = \sqrt{G_2} E_{in} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp\left[-i(\omega t + \phi_2 + \frac{\pi}{2})\right] = \sqrt{G_2} E_{in} \frac{1}{2} \exp\left[-i(\omega t + \phi_2 + \frac{\pi}{2})\right]$$

Με απασχολεί η θύρα εξόδου S οπότε εφαρμόζοντας την αρχή της επαλληλίας για τις συνιστώσες της εξόδου καταλήγω

$$E^S = E_x^S + E_y^S = \frac{\sqrt{G_1}}{2} E_{in} \exp[-i(\omega t + \phi_1)] + \frac{\sqrt{G_2}}{2} E_{in} \exp[-i(\omega t + \phi_2 + \pi)]$$

Θεωρώντας μοναδιαία κέρδη για τους ενισχυτές  $G_1=G_2=1$  καταλήγω στην έκφραση για το πεδίο στη θύρα μεταγωγής



Εικόνα 2.1.3 συμβολόμετρο Mach-Zender έχοντας ενισχυτές με μοναδιαία κέρδη στους δύο βραχίονες

$$\begin{aligned}
 E^S &= \frac{E_{in}}{2} [\exp(-i(\omega t + \phi_1)) + \exp(-i(\omega t + \phi_2))] = \frac{E_{in}}{2} \exp(-i\omega t) [\exp(-i\phi_1) + \exp(-i\phi_2 + \pi)] \\
 &= \frac{E_{in}}{2} \exp(-i\omega t) (e^{-i\phi_1} - e^{-i\phi_2})
 \end{aligned}$$

Στην προηγούμενη έκφραση προχωρώ σε μία διερεύνηση λαμβάνοντας υπόψη τη φάση που εισάγουν τα SOAs σε κάθε βραχίονα

1) εάν  $\phi_2=0$

$$E^S = \frac{E_{in}}{2} \exp(-i\omega t) (e^{-i\phi_1} - 1) = \frac{E_{in}}{2} \exp(-i\omega t) (e^{-i\phi_1} + e^{-i\pi})$$

Κάνοντας χρήση των σχέσεων που απέδειξα στο παράρτημα τριγωνομετρίας καταλήγω για το πεδίο στη θύρα μεταγωγής

$E^S = \frac{E_{in}}{2} e^{-i\omega t} g(\phi_1)$  όπου η συνάρτηση  $g(\phi_1)$  προκύπτει αλγεβρικά ως η συνάρτηση που συσχετίζει την της πεδιακής κατανομής από τη φάση που εισάγει το SOA στον πάνω οπτικό βραχίονα και υπολογίζεται

$$g(\phi_1) = 2 \cos \left[ \frac{1}{2} (\phi_1 + \pi) \right] \cos \left[ \frac{1}{2} (\pi - \phi_1) \right] - 2i \sin \left[ \frac{1}{2} (\phi_1 + \pi) \right] \cos \left[ \frac{1}{2} (\pi - \phi_1) \right]$$

$$g(\phi_1) = 2 \cos \left( \frac{\phi_1}{2} \right) \cos \left( \frac{\phi_1}{2} \right) - 2i \sin \left( \frac{\phi_1}{2} \right) \cos \left( \frac{\phi_1}{2} \right) = 2 \cos \left( \frac{\phi_1}{2} \right) \left[ \cos \left( \frac{\phi_1}{2} \right) - i \sin \left( \frac{\phi_1}{2} \right) \right]$$

$$g(\phi_1) = 2 \cos \left( \frac{\phi_1}{2} \right) e^{-\frac{i\phi_1}{2}}$$

Άρα η έξοδος στη θύρα μεταγωγής είναι

$$E^S = \frac{E_{in}}{2} e^{-i\omega t} 2 \cos\left(\frac{\phi_1}{2}\right) e^{\frac{-i\phi_1}{2}} = E_{in} \cos\left(\frac{\phi_1}{2}\right) e^{-i(\omega t + \phi_1)}$$

Παρατηρώ πως εισάγεται η εξάρτηση από τη φάση  $\phi_1$  τόσο του πλάτους του κύματος με τον παράγοντα  $\cos\left(\frac{\phi_1}{2}\right)$  αλλά και με τη φάση που εισάγεται στο κύμα που είναι η ίδια ακριβώς με αυτή που εισάγει το SOA.

II) Εάν  $\phi_1=0$

$$E^S = \frac{E_{in}}{2} e^{-i\omega t} (e^{i0} - e^{-i\phi_2}) = \frac{E_{in}}{2} e^{-i\omega t} (1 - e^{-i\phi_2})$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις του παραρτήματος τριγωνομετρίας καταλήγω με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως στην προηγούμενη περίπτωση στη σχέση για την ηλεκτρική ένταση και συγκεκριμένα για την συνάρτηση  $f(\phi_2)$  η οποία εισάγει την εξάρτηση από τη γωνία  $\phi_2$ .

$$E^S = \frac{E_{in}}{2} e^{-i\omega t} f(\phi_2)$$

Έχω αναλυτικά

$$\begin{aligned} f(\phi_2) &= 2 \cos\left[\frac{1}{2}(-\phi_2)\right] \cos\left[\left[\frac{1}{2}(\phi_2)\right]\right] + i2 \sin\left[\frac{1}{2}(-\phi_2)\right] \cos\left[\frac{1}{2}(\phi_2)\right] \\ f(\phi_2) &= 2 \cos\left(\frac{1}{2}\phi_2\right) \cos\left(\frac{1}{2}\phi_2\right) + i2 \sin\left(-\frac{\phi_2}{2}\right) \cos\left(\frac{1}{2}\phi_2\right) \\ f(\phi_2) &= 2 \cos\left(\frac{1}{2}\phi_2\right) \left[\cos\left(\frac{\phi_2}{2}\right) - i \sin\left(\frac{\phi_2}{2}\right)\right] = 2 \cos\left(\frac{1}{2}\phi_2\right) e^{\frac{-i\phi_2}{2}} \end{aligned}$$

Άρα η έκφραση για τη θύρα μεταγωγής είναι

$$E^S = \frac{E_{in}}{2} e^{-i\omega t} 2 \cos\left(\frac{\phi_2}{2}\right) e^{\frac{-i\phi_2}{2}} = E_{in} \cos\left(\frac{\phi_2}{2}\right) e^{-i(\omega t + \frac{\phi_2}{2})}$$

2.1.2) Θεωρητική ανάλυση για την έκφραση της ισχύος στη θύρα μεταγωγής

Η οπτική ισχύς στη θύρα μεταγωγής  $P_s$  είναι η ποσότητα που θα την παραμετροποιήσω με βάση τα μεγέθη που εισέρχονται στη μελέτη του οπτικού κυκλώματος. Συγκεκριμένα θα εκφραστεί με βάση την ισχύ εισόδου του cw σήματος  $P_{in}$ , αλλά και με τις φάσεις που εισάγουν τα SOAs στους οπτικούς βραχίονες του MZI. Λαμβάνοντας υπόψη την έκφραση για το σήμα εισόδου

$$\vec{E}_{in} = E_{in} e^{-i\omega t} \hat{p} \quad \text{έχω για την ισχύ εισόδου} \quad P_p = |\vec{E}_{in}|^2 = \vec{E}_{in} \overline{\vec{E}_{in}} = E_{in}^2$$

Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει θα θεωρήσω ότι τα SOAs εισάγουν φάση  $\phi_1, \phi_2$  και επίσης κέρδη  $G_1, G_2$  για τα πλάτη των κυμάτων

Χρησιμοποιώντας τη γενικευμένη ανάλυση και την παραδοχή που έκανα πριν για τα SOAs και με βάση τις σχέσεις που διέπουν τους οπτικούς συζεύκτες 3db που ανέφερα στην αρχή του συγκεκριμένου κεφαλαίου έχω από την αρχή της υπέρθεσης για το πεδίο στη θύρα μεταγωγής

$$E^S = E_x^S + E_y^S = \frac{\sqrt{G_1}}{2} E_{in} \exp[-i(\omega t + \phi_1)] + \frac{\sqrt{G_2}}{2} E_{in} \exp[-i(\omega t + \phi_2 + \pi)]$$

$$E^S = \frac{1}{2} E_{in} \left[ \sqrt{G_1} \exp(-i(\omega t + \phi_1)) + \sqrt{G_2} \exp(-i(\omega t + \phi_2 + \pi)) \right]$$

$$E^S = \frac{1}{2} E_{in} \left[ \sqrt{G_1} e^{-i\phi_1} + \sqrt{G_2} e^{-i(\phi_2 + \pi)} \right]$$

Για την εύρεση της ισχύος στη θύρα μεταγωγής έχω από τη θεωρία των μιγαδικών phasors για την ισχύ

$$P_s = |\vec{E}_s|^2 = |E_s^x + E_s^y|^2 = (E_s^x + E_s^y) \overline{(E_s^x + E_s^y)}$$

Εφαρμόζοντας βασικές αρχές από την άλγεβρα των μιγαδικών αριθμών καταλήγω στην έκφραση για την ισχύ

$$P_s = \frac{E_{in}^2}{4} \left[ G_1 + G_2 + \sqrt{G_1 G_2} \exp(-i(\phi_1 - \phi_2 - \pi)) + \sqrt{G_1 G_2} \exp(-i(\phi_2 - \phi_1 + \pi)) \right]$$

$$P_s = \frac{E_{in}^2}{4} \left\{ G_1 + G_2 + \sqrt{G_1 G_2} \left[ \exp(-i(\phi_1 - \phi_2 - \pi)) + \exp(i(\phi_1 - \phi_2 - \pi)) \right] \right\}$$

Κάνοντας χρήση της τριγωνομετρικής ταυτότητας  $e^{ix} + e^{-ix} = 2 \cos x$  καταλήγω στη σχέση για την οπτική ισχύ εξόδου

$$P_s = \frac{E_{in}^2}{4} \left[ G_1 + G_2 + \sqrt{G_1 G_2} 2 \cos(\phi_2 - \phi_1 + \pi) \right] = -\frac{E_{in}^2}{4} \left[ G_1 + G_2 + \sqrt{G_1 G_2} 2 \cos(\phi_2 - \phi_1) \right]$$

Θέτοντας  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$  και έχοντας  $\cos(\Delta\phi) = 1 - 2 \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right)$  έχω για την  $P_s$  εάν λάβω υπόψη και τη έκφραση για την ισχύ εισόδου του cw σήματος εισόδου  $P_{in}$

$$P_s = \frac{E_{in}^2}{4} \left[ (\sqrt{G_1} + \sqrt{G_2})^2 - 4\sqrt{G_1 G_2} \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \right] = \frac{P_{in}}{4} \left[ (\sqrt{G_1} + \sqrt{G_2})^2 - 4\sqrt{G_1 G_2} \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \right]$$

## 2.2) Στοιχεία θεωρίας ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών (SOAs)

Στο βασικό οπτικό κύκλωμα του αναγεννητή φάσης που μελετώ στα πλαίσια της διπλωματικής μου χρησιμοποιώ στους βραχίονες του MZI ημιαγωγικούς οπτικούς ενισχυτές οι οποίοι έχουν συγκεκριμένο ρόλο στο φυσικό μηχανισμό της αναγέννησης και συνάμα αποτελούν ένα νευραλγικό κομμάτι της ανάλυσης του αναγεννητή τον οποίο εξετάζω. Στη συγκεκριμένη ενότητα θα παρουσιασθούν συνοπτικά κάποια από τα βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τους ενισχυτές καθώς και τα βασικά φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν χώρα μέσα σε αυτούς.

Ως προς την αρχή λειτουργίας ενός SOA, αυτή βασίζεται στη θεωρία επανασύνδεσης ηλεκτρονίων και οπών στην ενεργό περιοχή του ημιαγωγού. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, θερμικές, ηλεκτρικές ή οπτικές διεγέρσεις των ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας συντελούν στη δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων και οπών στην ενεργό περιοχή του ημιαγωγού. Η διαδικασία αυτή καλείται αναστροφή πληθυσμού. Το κάθε ζεύγος ηλεκτρονίου και οπής ονομάζεται φορέας. Η αντίστροφη διαδικασία της επανασύνδεσης ηλεκτρονίων και οπών μπορεί να είναι μη ακτινοβολούσα (δημιουργία φωνονίου ή επανασύνδεση Auger) ή ακτινοβολούσα (δημιουργία φωτονίου). Η ακτινοβολούσα επανασύνδεση συνίσταται στην αυθόρμητη αποδιέγερση των ηλεκτρονίων ή στην εξαναγκασμένη αποδιέγερση των φορέων λόγω εισερχόμενου φωτονίου. Η πρώτη διαδικασία προκαλεί την αυθόρμητη εκπομπή φωτός, ενώ η δεύτερη προκαλεί την εξαναγκασμένη εκπομπή φωτός. Η εξαναγκασμένη εκπομπή φωτός παράγει φωτόνια, τα οποία έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τα εισερχόμενα φωτόνια, και είναι η διαδικασία, που αξιοποιείται για τη λειτουργία του SOA ως ενισχυτή.

Ενίσχυση του εισερχόμενου οπτικού σήματος μπορεί να επιτευχθεί αν ο ρυθμός εξαναγκασμένης εκπομπής υπερτερεί του ρυθμού απορρόφησης. Συνήθης τρόπος για την απαιτούμενη αναστροφή πληθυσμού είναι η ηλεκτρική διέγερση, δηλαδή η έγχυση ηλεκτρικού ρεύματος στην ενεργό περιοχή. Βέβαια, η αυθόρμητη και η εξαναγκασμένη εκπομπή δρουν αντίθετα με την έγχυση φορέων, αφού μειώνουν την συγκέντρωση των φορέων στη ζώνη αγωγιμότητας (πυκνότητα φορέων  $N$ ). Η

εξίσωση ροής είναι ο συνδυαστικός κέρδος των παραπάνω διαδικασιών που θεωρώντας άξονα διατομής για τον ημιαγωγό τον άξονα-z έχω σε μια χρονική στιγμή t

$$\frac{dN(z,t)}{dt} = \frac{I}{eV} - \frac{N(z,t)}{\tau_c} - \frac{2\pi\Gamma g[N(z,t) - N_T]P(z,t)}{A h \omega_0} \quad (2.2.1)$$

Στην προηγούμενη σχέση,  $I$  είναι το ρεύμα έγχυσης,  $e$  το φορτίο ηλεκτρονίου,  $V$  ο όγκος της ενεργού περιοχής,  $\tau_c$  ο χρόνος ζωής των φορέων,  $\Gamma$  ο οπτικός παράγοντας σύμπτυξης οπτικής ισχύος (optical confinement factor),  $g$  ο παράγοντας κέρδους,  $N_T$  η πυκνότητα των φορέων στην περιοχή διαφάνειας του ενισχυτή,  $A$  το εμβαδό διατομής της ενεργούς περιοχής του ημιαγωγού,  $h$  η σταθερά Planck,  $\omega_0$  η φέρουσα συχνότητα του εισερχόμενου οπτικού πεδίου, και  $P(z,t)$  η ισχύς του εισερχόμενου οπτικού σήματος. Ο πρώτος όρος του δεξιού σκέλους της σχέσης,  $I/eV$ , αποδίδει τη διέγερση φορέων λόγω έγχυσης ρεύματος, ενώ ο δεύτερος και τρίτος όρος αποδίδουν την αποδιέγερση και, επομένως, τη μείωση των φορέων λόγω της αυθόρμητης και της εξαναγκασμένης επανασύνδεσης, αντίστοιχα.

### 2.2.1) ενίσχυση οπτικού σήματος και κέρδος του ενισχυτή

Όπως και στη θεωρία των ημιαγωγικών laser το κέρδος ανά μονάδα μήκους ορίζεται ως

$$g(N) = a(N - N_0) \quad \text{όπου } a \text{ η διαφορική απολαβή } \frac{dg}{dN} \text{ και } N_0 \text{ η πυκνότητα φορέων στο}$$

σημείο διαφάνειας, εκεί που οι απώλειες ισούται με την απολαβή. Η απολαβή  $g$  εξαρτάται από το μήκος κύματος, από την πυκνότητα φορέων, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την ένταση του φωτός  $P$ . Συμπεριλαμβανοντας τον παράγοντα σύμπτυξης της εγκάρσιας συγκέντρωσης της φωτεινής ροής στο εσωτερικό της ενεργού περιοχής  $\Gamma$  η καθαρή απολαβή είναι  $\Gamma g - a$ . Έτσι μετά από διάδοση σε διαδρομή  $dz$  στην ενεργό περιοχή η οπτική ισχύς αυξάνεται κατά  $dP(z)$ , έχοντας αναλυτικά:  $dP(z) = (\Gamma g - a)P(z)dz$  από την οποία ολοκληρώνοντας σε όλο το μήκος του SOA θα έχω

$$\int_{P_{in}}^{P_{out}} \frac{dP(z)}{P(z)} = \ln[P(z)]_{P_{in}}^{P_{out}} = \int_{z=0}^{z=L} (\Gamma g - a) dz = (\Gamma g - a)L \rightarrow G_{ss} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \exp[(\Gamma g - a)L]$$

όπου στη σχέση αυτή θα έχω την απλή έκφραση για το κέρδος απλής διέλευσης ενός σήματος από το SOA. Η σχέση αυτή έρχεται να δώσει το φυσικό μηχανισμό ενίσχυσης για το SOA και φαίνεται να έχει σημασία από πλευράς λειτουργίας του ίδιου του SOA.

Στην αρχή της παραγράφου θα προσδιορίσω την έννοια του κέρδους του ενισχυτή έτσι όπως ερμηνεύεται στα πλαίσια των οπτικών διατάξεων εξετάζοντας τη βασική θεώρηση των ενεργητικών στοιχείων. Ξεκινώντας από τη διάδοση ενός οπτικού σήματος στο διαμήκη άξονα(άξονας z) περιγράφει τη διάδοση ισχύος μέσα από τη σχέση

$$\frac{dP(z,t)}{dz} = [\Gamma \cdot g \cdot [N(z,t) - N_T] - a_s] \cdot P(z,t) \quad (2.2.2)$$

Η σταθερά  $a_s$  ειφράζει τις εσωτερικές απώλειες ισχύος του ενισχυτή λόγω σκέδασης του κυματοδηγούμενου πεδίου.

Οι εξισώσεις (2.2.1) και (2.2.2) αποτελούν τις δύο κλασικές εξισώσεις ροής του ενισχυτή. Στις δύο εξισώσεις ροής αγνοούνται τα ενδοζωνικά φαινόμενα (intraband effects) των φορέων, όπως δημιουργία φασματικής οπής (spectral hole burning), θέρμανση φορέων (carrier heating) και απορρόφηση ελεύθερων φορέων-απορρόφηση δύο φωτονίων (free carrier absorption – two photon absorption). Αυτά τα ενδοζωνικά φαινόμενα έχουν πολύ μικρούς χαρακτηριστικούς χρόνους απόκρισης, που κυμαίνονται από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες fsec. Αποτέλεσμα των μικρών χρονικών σταθερών απόκρισης αυτών των φαινομένων στην περίπτωση των οπτικών σημάτων διάρκειας μερικών psec είναι τα ενδοζωνικά φαινόμενα να επέρχονται σε σταθερή κατάσταση και να μην επηρεάζουν την απόκριση του ενισχυτή.

Το κέρδος ενίσχυσης ενός SOA, θεωρώντας την περίπτωση ενίσχυσης οπτικού σήματος συνεχούς (CW) κύματος, ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος εξόδου από τον ενισχυτή προς την ισχύ εισόδου σε αυτόν. Αν θεωρήσουμε την ισχύ εισόδου ίση με  $P(z=0) = P_{in}$  και την ισχύ εξόδου ίση με  $P(z=L) = P_{out}$ , όπου  $L$  το μήκος του κυματοδηγού, το κέρδος περιγράφεται από την σχέση

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P(z=L)}{P(z=0)} \quad (2.2.3)$$

Η εξίσωση (2.2.3) έρχεται να δώσει το φυσικό υπόβαθρο της ενίσχυσης του οπτικού σήματος το οποίο διαδίδεται στο εσωτερικό του SOA. Ωστόσο κομβικό στοιχείο στην ανάλυση των SOAs αποτελεί η περιοχή λειτουργίας τους που διαχωρίζεται από το αν βρίσκεται ή όχι ο ενισχυτής στην περιοχή κορεσμού του. Στη συνέχεια λοιπόν για τον αναλυτικό υπολογισμό του κέρδους του ημιαγωγού θα πρέπει να εξετάσουμε δύο διαφορετικές περιπτώσεις, ανάλογα με την περιοχή λειτουργίας του SOA. Έτσι αναφερόμαστε στην ακόρεστη (unsaturated) και στην κορεσμένη (saturated) περιοχή, όπου έχουμε αντίστοιχα το κέρδος ασθενούς σήματος (small signal gain) και το κορεσμένο κέρδος (saturated gain) του ενισχυτή.

### 2.2.3) Κέρδος ασθενούς σήματος

Το κέρδος ασθενούς σήματος του ενισχυτή είναι το κέρδος, που αποδίδει ο SOA, όταν το εισερχόμενο οπτικό σήμα έχει πολύ μικρή οπτική ισχύ. Στην περίπτωση αυτή, η πυκνότητα φορέων  $N(z,t)$  καθίσταται ανεξάρτητη από τη χωρική μεταβλητή  $z$ , αφού η μικρή ισχύς του οπτικού σήματος εισόδου θεωρούμε ότι δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά του ενισχυτή. Θέτοντας στη σχέση (2.1)  $P(z,t) \cong 0$ , η πυκνότητα φορέων στη μόνιμη

κατάσταση βρίσκεται ότι είναι ίση με  $N_{ss} = \frac{I \cdot \tau_c}{eV}$ .

Ορίζουμε το κέρδος ασθενούς σήματος ως

$$G_0 = \frac{P(L,t)}{P(0,t)} = \exp[\Gamma \cdot g \cdot [N_{ss} - N_T] \cdot L - a_s \cdot L] \quad (2.2.4)$$

Επιπλέον, ορίζουμε το συνολικό αριθμό φορέων ανά διατομή, που είναι διαθέσιμοι προς ενίσχυση [48]

$$N_{tot}(t) = \int_{z=0}^{z=L} [N(z,t) - N_T] \cdot dz \quad (2.2.5)$$

Με ολοκλήρωση της σχέσης (2.2.2) και αντικαθιστώντας το συνολικό αριθμό φορέων από την σχέση (2.2.5), προκύπτει ότι το κέρδος του ενισχυτή σε κάθε χρονική στιγμή δίνεται από την σχέση

$$G(t) = \exp[\Gamma \cdot g \cdot N_{tot}(t) - a_s \cdot L] \quad (2.2.6)$$

Κατέληξα λοιπόν μια έκφραση για το  $G_0$ - κέρδος ασθενούς σήματος- το οποίο είναι μια παράμετρος η οποία θα χρησιμοποιηθεί και στη συνέχεια του υποκεφαλαίου και είναι συστατικό για την ερμηνεία της συμπεριφοράς του SOA και στην περιοχή του κόρου αλλά και στη διέγερση του από βραχύ οπτικό παλμό.

#### 2.2.4) κορεσμός του SOA από βραχύ οπτικό παλμό

Θεωρούμε ότι ο ενισχυτής δέχεται ως είσοδο στενό οπτικό παλμό μη μηδενικής ισχύος, ενώ λειτουργεί στην περιοχή ασθενούς σήματος. Σε αυτήν την περίπτωση το κυρίαρχο φαινόμενο, για όση χρονική διάρκεια διαδίδεται ο παλμός μέσα από τον ενισχυτή, είναι η αποδιέγερση των φορέων λόγω εξαναγκασμένης εκπομπής, δεδομένου ότι στο μικρό αυτό χρονικό διάστημα, που χρειάζεται για να διαδοθεί ο παλμός μέσα από το SOA, η διέγερση φορέων λόγω έγχυσης ρεύματος και η αυθόρμητη εκπομπή φορέων συμβάλλουν σε πολύ μικρό βαθμό στη μεταβολή της πυκνότητας φορέων. Κατά συνέπεια, αγνοούμε τους δύο πρώτους όρους του δεξιού σκέλους της σχέσης (2.2.1). Με ολοκλήρωση της σχέσης (2.2.1) έχουμε

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} N_{tot}(t) &= -\frac{1}{h\omega_0 A} \int_{z=0}^{z=L} P(z,t) \cdot \Gamma \cdot g \cdot [N(z,t) - N_T] \cdot dz \\ \xrightarrow{(2.2)} \frac{d}{dt} N_{tot}(t) &= -\frac{1}{h\omega_0 A} \int_{z=0}^{z=L} \frac{\partial P(z,t)}{\partial z} dz = -\frac{1}{h\omega_0 A} [P(L,t) - P(0,t)] \quad (2.2.7). \end{aligned}$$

Από το φυσικό μηχανισμό του κέρδους έχω για τον υπολογισμό της κυματοδηγούμενης ισχύος στην έξοδο του SOA η οποία είναι θεωρείται ως χρονομεταβλητό μέγεθος

$$G(t) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \rightarrow P(L,t) = G(t) \cdot P(0,t) \quad (2.2.8)$$

Οπότε με αντικατάσταση στη σχέση (2.2.7) που υπολογίζει τη μεταβολή της πυκνότητας των φορέων έχω



$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} N_{tot}(t) &= -\frac{1}{h\omega_0 A} \int_{z=0}^{z=L} \frac{\partial P(z,t)}{\partial z} dz = -\frac{1}{h\omega_0 A} [P(L,t) - P(0,t)] \xrightarrow{(2.2.8)} \\ \frac{d}{dt} N_{tot}(t) &= -\frac{1}{h\omega_0 A} P(0,t)[G(t)-1] \xrightarrow{\Gamma g} \Gamma g \frac{d}{dt} N_{tot}(t) = -\frac{\Gamma g}{h\omega_0 A} P(0,t)[G(t)-1] \\ \rightarrow \frac{\Gamma g}{G(t)-1} \frac{d}{dt} N_{tot}(t) &= -\frac{\Gamma g}{h\omega_0 A} P(0,t) \quad (2.2.9) \end{aligned}$$

Για να προσδιορίσω μια βασική σχέση για το κέρδος  $G(t)$  του SOA έχω στη συνέχεια παραγωγίζοντας τη σχέση που μας δίνει τη συγκέντρωση φορέων στον ενισχυτή

$$\frac{dG(t)}{dt} = \Gamma \cdot g \cdot \frac{dN_{tot}(t)}{dt} \cdot G(t) \rightarrow \frac{\Gamma \cdot g}{G(t)-1} \frac{dN_{tot}(t)}{dt} = \frac{1}{G(t)-1} \frac{dG(t)}{dt} \frac{1}{G(t)} \quad (2.2.10)$$

Με αντικατάσταση της σχέσης (2.2.9) στη σχέση (2.2.10) θα έχω επιλύοντας τη διαφορική εξίσωση 1<sup>ης</sup> τάξης για το κέρδος  $G(t)$ , το οποίο αποτελεί το κέρδος κορεσμού του SOA από βραχύ οπτικό παλμό είναι

$$G(t) = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1}{G_0} \right) \cdot \exp\left( -\frac{U_{in}(t)}{U_{sat}} \right) \right]^{-1} \quad (2.2.11)$$

Στην παραπάνω σχέση,  $U_{in}(t)$  είναι η ενέργεια του παλμού, που βρίσκεται μέσα στον ενισχυτή τη χρονική στιγμή  $t$ . Αν θεωρήσουμε ως χρονική στιγμή 0 τη στιγμή, που ο παλμός με κυματομορφή ισχύος  $P_{in}(t)$  αρχίζει να εισέρχεται στο SOA, τότε η  $U_{in}(t)$  εκφράζεται ως  $U_{in}(t) = \int_0^t P_{in}(t') dt'$ . Η παράμετρος  $U_{sat}$ , κατά αντιστοιχία με την  $P_{sat}$ , είναι

η ενέργεια κορεσμού του SOA και σχετίζεται με την  $P_{sat}$  μέσω της σχέσης  $U_{sat} = P_{sat} \cdot \tau_c$ . Η σχέση (2.8) δείχνει ότι το κέρδος του ημιαγωγού μειώνεται, για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η διάδοση του στενού παλμού μέσα από τον ημιαγωγό. Επομένως, ο χρόνος κορεσμού του SOA μπορεί να είναι αρκετά μικρός και να μην υπερβαίνει τα μερικά psec.

## 2.2.5) Χρονική σταθερά ανάκαμψης φορέων

Αμέσως μετά την έξοδο του στενού οπτικού παλμού από τον ενισχυτή, το κέρδος του ενισχυτή αρχίζει να ανακάμπτει, λόγω της διέγερσης φορέων από την έγχυση ρεύματος προς την αρχική του τιμή, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η τιμή του κέρδους ασθενούς σήματος. Ως χρόνος ανάκαμψης του κέρδους του ενισχυτή ορίζεται το χρονικό διάστημα, που απαιτείται για να ανακάμψει το κέρδος από το 10% στο 90% της μέγιστης τιμής του  $G_0$ .

Κατά την χρονική περίοδο της ανάκαμψης του κέρδους δεν υπάρχει οπτικό σήμα μέσα στο SOA, οπότε στη σχέση (2.2.1) μπορούμε να αγνοήσουμε τον τρίτο όρο του δεξιού σκέλους, ο οποίος είναι ο όρος εξαναγκασμένης εκπομπής. Από την σχέση (2.2.1) λοιπόν έχουμε

$$\frac{\partial N(z,t)}{\partial t} = \frac{I}{eV} - \frac{N(z,t)}{\tau_c} = \frac{I}{eV} - \frac{N_T}{\tau_c} - \frac{N(z,t) - N_T}{\tau_c} \quad \text{οπότε ολοκληρώνοντας τη σχέση}$$

$$\frac{d}{dt} N_{tot}(t) = \left( \frac{I}{eV} - \frac{N_T}{\tau_c} \right) L - \frac{N_{tot}(t)}{\tau_c} = \left( \frac{N_{ss} - N_T}{\tau_c} \right) L - \frac{N_{tot}(t)}{\tau_c}$$

$$\Gamma \cdot g \cdot \frac{d}{dt} N_{tot}(t) = \Gamma \cdot g \cdot \left( \frac{N_{ss} - N_T}{\tau_c} \right) L - \Gamma \cdot g \cdot \frac{N_{tot}(t)}{\tau_c} \rightarrow$$

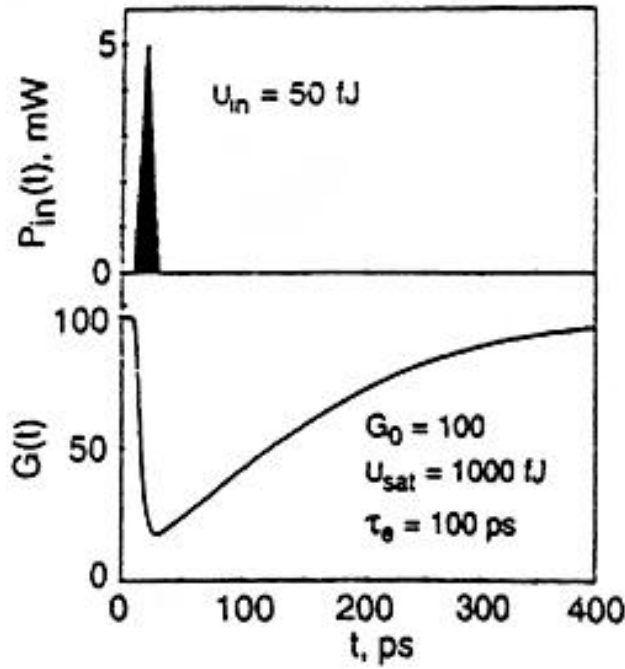
$$\frac{1}{G(t)} \frac{dG(t)}{dt} = \frac{\ln G_0}{\tau_c} - \frac{\ln G(t)}{\tau_c}$$

Κατάφερα να καταλήξω η οποία είναι μια διαφορική εξίσωση με άγνωστη συνάρτηση την χρονικά μεταβαλλόμενη συνάρτηση του κέρδους του ενισχυτή. Η λύση της περιγράφει τη χρονική εξέλιξη του κέρδους στη διάρκεια της ανάκαμψης και είναι η εξής:

$$G(t) = G_0 \cdot \left[ \frac{G(t_s)}{G_0} \right]^{\exp[-(t-t_s)/\tau_c]} \quad , t \geq t_s$$

Με βάση αυτή την αναλυτική έκφραση (2.2.12) ανάκαμψης του κέρδους, προκύπτει ότι η χρονική σταθερά ανάκαμψης από το 10% στο 90% του  $G_0$  συνδέεται με το χρόνο ζωής των φορέων μέσω της σχέσης  $\tau_r = \tau_c \cdot \ln\left(\frac{\ln 0,1}{\ln 0,9}\right) \cong 3,13 \cdot \tau_c$ . Τυπικές τιμές χρονικών σταθερών ανάκαμψης κέρδους για τους ημιαγωγούς είναι από μερικές δεκάδες ως μερικές εκατοντάδες psec.

Η συμπεριφορά του κέρδους ενός ενισχυτή, κατά τον κορεσμό του από στενό οπτικό παλμό και κατά την ανάκαμψή του μέχρι την αρχική του κατάσταση, αποδίδεται γραφικά στο σχήμα 2.2.1.



Σχήμα 2.2.1 Κορεσμός από στενό οπτικό παλμό και ανάκαμψη του κέρδους ενός SOA.

Η χρονική σταθερά ανάκαμψης του SOA είναι πολύ σημαντική παράμετρος για τη χρήση του ενισχυτή σε οπτικές μεταγωγικές διατάξεις, καθώς αυτή καθορίζει τη μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας του ενισχυτή. Για αύξηση της ταχύτητας λειτουργίας, είναι απαραίτητη η μείωση του χρόνου ανάκαμψης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες τεχνικές επιτάχυνσης της χρονικής απόκρισης, όπως είναι η εφαρμογή ισχυρού CW σήματος στον ενισχυτή, με μήκος κύματος του σήματος στην περιοχή κέρδους ή στην περιοχή διαφάνειας του ενισχυτή.

### 2.2.6) Κορεσμένο κέρδος του SOA υπό την επίδραση CW σήματος

Αν ως είσοδος στον ενισχυτή θεωρηθεί οπτικό CW σήμα με σταθερή οπτική ισχύ  $P_{CW}$  στην είσοδο, τότε η πυκνότητα φορέων διαμορφώνεται πάλι σε μια μόνιμη σταθερή κατάσταση, διαφορετική όμως από αυτήν της περιοχής ασθενούς σήματος. Η τιμή  $N(z)$  της πυκνότητας φορέων σε αυτήν την κατάσταση, σε κάθε  $z$ , βρίσκεται από τη σχέση (2.1), μηδενίζοντας τη χρονική παράγωγο της πυκνότητας φορέων και αγνοώντας, πλέον, τη χρονική εξάρτηση των υπολοίπων μεγεθών, οπότε προκύπτει

$$N(z) - N_T = \frac{(N_{ss} - N_T)}{1 + \frac{P(z)}{P_{sat}}} \quad (2.2.13)$$

όπου  $P(z)$  η ισχύς του CW σήματος σε κάθε σημείο  $z$  του ημιαγωγού και  $P_{sat} = \frac{\hbar\omega_0 A}{\Gamma g \tau_c}$  η ισχύς κορεσμού του SOA, η οποία εκφράζει το ποσό της ισχύος του

σήματος, που απαιτείται για να μειωθεί η συνολική πυκνότητα των φορέων στο μισό της αντίστοιχης τιμής της στην περιοχή ασθενούς σήματος.

Στη συνέχεια θα προσδιορίσω την έκφραση για το κέρδος  $G_{CW}$  από τις εξισώσεις που προσδιορίζουν την έκφραση του συναρτήσε των αναλυτικών εξισώσεων της συγκέντρωσης φορέων. Μια βασική παραδοχή είναι η θεώρηση αμελητέων εσωτερικών απωλειών για τον ενισχυτή  $a_s$  για την αναζήτηση του κέρδους του ενισχυτή και η κατάληξη της σχέσης για το κέρδος  $G_{CW}$  στη μόνιμη κατάσταση είναι η εξής:

$$G_{CW} = G_0 \cdot \exp\left[-(G_{CW} - 1)P_{CW}/P_{sat}\right] \quad (2.2.14)$$

Εφαρμόζοντας στον SOA ένα βραχύ αλλά ισχυρό οπτικό παλμό μαζί με το CW, το κέρδος του θα αρχίσει να μεταβάλλεται όπως προηγουμένως, με αλλαγμένο όμως πλέον το  $G_0$ . Αν επαναλάβουμε την ανάλυση για τον κορεσμό του ενισχυτή, έχοντας όμως κατά νου ότι ο αριθμός των φορέων  $N_{tot}$  και το  $G_0$  έχουν μειωθεί, το κέρδος του προκύπτει ίσο με

$$G(t) = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{1}{G_{CW}}\right) \exp\left(-\frac{U_{in}}{U_{sat}}\right)} \quad (2.2.15)$$

Όταν παρέλθει ο παλμός, ο SOA θα ξαναρχίσει τη διαδικασία ανάκαμψης κέρδους, παρά την ύπαρξη του CW σήματος. Το πέρασμα του παλμού, μετέβαλε τον αριθμό των φορέων μέχρι την τιμή  $N_{tot}(0)$ , που είναι η τιμή από την οποία αρχίζει η ανάκαμψη κέρδους. Η διαφορική εξίσωση που δίνει τη χρονική μεταβολή του  $N_{tot}$  είναι

$$\frac{dN_{tot}}{dt} + \frac{N_{tot}}{\tau_c} + \frac{\Gamma g N_{tot} P_{in}}{Ah\omega_0} - \frac{(N_{ss} - N_T)L}{\tau_c} = 0$$

Με χρήση κατάλληλων μετασχηματισμών προκύπτει

$$N_{tot}(t) = \left[ N_{tot}(0) - \frac{(N_{ss} - N_T)L}{1 + \frac{P_{in}}{P_{sat}}} \right] \exp\left[ -\frac{t \left(1 + \frac{P_{in}}{P_{sat}}\right)}{\tau_c} \right] + \frac{(N_{ss} - N_0)L}{1 + \frac{P_{in}}{P_{sat}}}$$

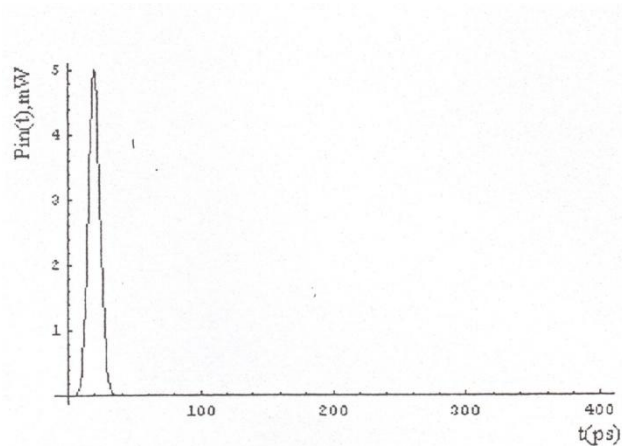
Καταλήγω λοιπόν σε μια σχέση για την ανάκαμψη κέρδους στον ενισχυτή η οποία θα προσδιορίσει τον παράγοντα στο πεδίο του χρόνου με τον οποίο ανακάμπτει και επαναποικιά η τιμή της ενίσχυσης του πλάτους μια συγκεκριμένη τιμή.

$$G(t) = G_0 \left[ \frac{G(t_s)}{G_0} \right] \exp\left(-\frac{t-t_s}{\tau_c/(1+P_{in}/P_{sat})}\right) \quad (2.2.16)$$

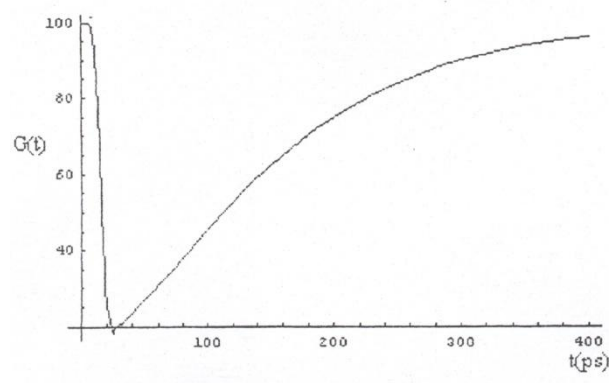
---

Από την σχέση (2.16) παρατηρούμε ότι η σταθερά ανάκαμψης χρόνου είναι μικρότερη, σε σχέση με την περίπτωση που δεν είχαμε CW σήμα. Αυτό σημαίνει ότι ο ενισχυτής φτάνει πιο γρήγορα τη μέγιστη τιμή του κέρδους ( $G_{CW}$ ). Οπότε, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η εφαρμογή ενός CW σήματος στον ενισχυτή οδηγεί σε μείωση του μέγιστου κέρδους, ενώ επιπλέον το κέρδος ανακάμπτει πιο γρήγορα.

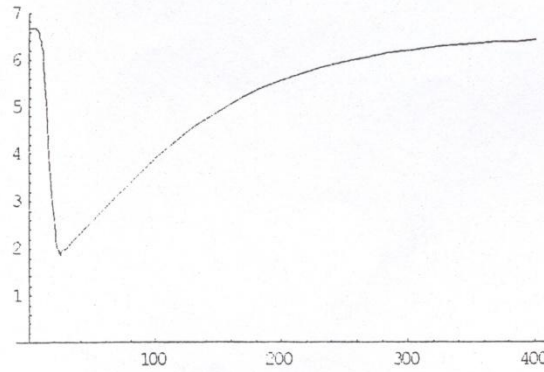
Τα παραπάνω συμπεράσματα μπορούν να φανούν καλύτερα μέσω γραφικών παραστάσεων για το κέρδος του ενισχυτή. Συγκεκριμένα, στο σχήμα 2.2 αναπαρίσταται η μεταβολή του κέρδους, με ή χωρίς CW, για παλμό εισόδου gaussian μορφής με εύρος 20 ps.



Εικόνα 2.2.6.1 Παλμός εισόδου



Εικόνα 2.2.6.2 κέρδος ενισχυτή χωρίς την παρουσία cw σήματος



Εικόνα 2.2.6.3 κέρδος ενισχυτή παρουσία cw σήματος

## 2.2.7) Δείκτης διάθλασης του SOA –Μη γραμμική στροφή φάσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο SOA είναι ένα μη γραμμικό στοιχείο, το οποίο προκαλεί στροφή φάσης στα σήματα που διαδίδονται σε αυτόν. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μεταβολή του κέρδους του ενισχυτή, που οδηγεί σε μεταβολή του δείκτη διάθλασης του ημιαγωγού, ο οποίος εξαρτάται από τη συγκέντρωση φορέων μέσα στον ενισχυτή.

Ο δείκτης διάθλασης των SOA είναι ένα μιγαδικό μέγεθος, του οποίου το πραγματικό μέρος περιγράφει την συμπεριφορά της φάσης του εισερχόμενου οπτικού πεδίου, ενώ το φανταστικό του μέρος περιγράφει το κέρδος του υλικού:

$$\underline{n} = n' - jn''$$

Έτσι, το πλάτος και η φάση ενός οπτικού πεδίου αφού διαδοθεί μέσα από τον ενισχυτή, περιγράφεται ως

$$\frac{E_{out}}{E_{in}} = \exp\left(-j \frac{2\pi nL}{\lambda}\right) = \exp\left(-j \frac{2\pi n'L}{\lambda}\right) \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi n''L}{\lambda}\right) = e^{-j\Delta\phi} \cdot \sqrt{G} \quad (2.2.17)$$

όπου  $\phi$  η μη γραμμική στροφή φάσης,  $G$  το κέρδος ισχύος του υλικού,  $L$  το μήκος του μέσου και  $\lambda$  το μήκος κύματος του φωτός.

Η παράμετρος, που συσχετίζει τη μεταβολή στη φάση με το κέρδος του υλικού, είναι ο παράγοντας επαύξησης ή διεύρυνσης φασματικής γραμμής- $\alpha$  (linewidth enhancement factor), και ισχύει:

$$\frac{dn'}{dN} = \alpha \frac{dn''}{dN} \quad (2.2.18)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι η στροφή φάσης και το κέρδος ισχύος του ενισχυτή συνδέονται με τη σχέση

$$\phi(t) = -\frac{\alpha}{2} \ln G(t) + \phi_{in} \quad (2.2.19)$$

Αποτέλεσμα της εξάρτησης της φάσης του πεδίου από το κέρδος, όταν το πεδίο, που διαδίδεται, είναι ένας στενός οπτικός παλμός, είναι η εμφάνιση *ολίσθησης συχνότητας (chirp)*, κατά μήκος του παλμού. Η μη γραμμική απόκριση κέρδους του ενισχυτή, κατά τον κορεσμό του, έχει ως αποτέλεσμα το προπορευόμενο χρονικά τμήμα του παλμού να αντιλαμβάνεται μεγαλύτερο κέρδος από το πίσω τμήμα του παλμού. Κατά συνέπεια, κάθε χρονικό τμήμα του παλμού αποκτά διαφορετική φάση, κατά τη διάδοσή του, και αντιλαμβάνεται διαφορετική συχνότητα ως φέρουσα. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, είναι η αλλοίωση του σχήματος του παλμού, όπως επίσης και η αλλοίωση του φασματικού του περιεχομένου, το οποίο, μάλιστα, διευρύνεται. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αυτοδιαμόρφωση φάσης (Self-Phase Modulation).

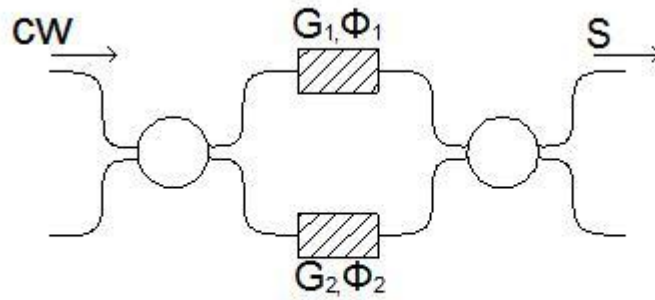
Αν ο ενισχυτής χρησιμοποιηθεί ως μη γραμμικό μέσο ενός συμβολόμετρου και θεωρήσουμε ότι  $G_1$ ,  $G_2$  είναι τα κέρδη που «βλέπουν» τα δύο σήματα στους οπτικούς δρόμους του συμβολόμετρου, η διαφορά φάσης θα δίνεται από την σχέση

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = -\frac{\alpha}{2} \ln\left(\frac{G_1}{G_2}\right) \quad (2.2.20)$$

Η τελευταία σχέση θα αποτελέσει βασικό εργαλείο στην προσπάθεια θεωρητικής ανάλυσης που θα επιχειρήσω στη συνέχεια. Θα τη χρησιμοποιήσω ώστε να συσχετίσω δύο διαφορετικές συμπεριφορές του ενισχυτή που συνεπάγεται και διαφορετική συμπεριφορά στους βραχίονες του Mach-Zender που ενισχύουν το σήμα μου. Προκαταβάλλοντας τη διαδικασία επεξεργασίας που ακολουθώ η σχέση (2.2.20) ενοποιεί τη διαταραχή που εμφανίζεται στην ισχύ των παλμών ελέγχου λόγω της παρουσίας θορύβου σε παραβολή με την ιδανική συμπεριφορά του συστήματος.

### 2.3) Εξαγωγή σχέσης για πλάτος-ισχύ στην έξοδο και για φάση του σήματος εξόδου έχοντας $Cw$ σαν input και παλμό σαν control.

Στο εδάφιο αυτό θα ασχοληθώ με τη μοντελοποίηση του οπτικού κυκλώματος MZI με τη χρήση SOAs στους δύο οπτικούς βραχίονες. Θα θεωρήσω  $cw$  σήμα εισόδου στο κύκλωμα και θα αναζητήσω τις σχέσεις που δίνουν την φάση του σήματος στη θύρα μεταγωγής  $S$  αλλά και την ισχύ που θα έχω στην έξοδο  $S$ . Οι μεταβλητές που χρησιμοποιώ στο συγκεκριμένο πρόβλημα μου είναι προφανώς οι φάσεις  $\phi_1, \phi_2$  που εισάγουν τα SOAs καθώς και τα κέρδη που εισάγουν  $G_1, G_2$  όπως και το πλάτος του σήματος εισόδου  $E_{in}$ .



Εικόνα 2.3.2 η θύρα μεταγωγής S που αποτελεί και το αντικείμενο της ανάλυσης στην παράγραφο 2.3

### 2.3.1) Εφαρμογή βασικών σχέσεων από τη θεωρία του συμβολόμετρου MZI

Στην αρχή του εδαφίου μου θα προσδιορίσω αναλυτικά την έκφραση για το πεδίο στη θύρα μεταγωγής S. Θα υπολογίσω συγκεκριμένα το πλάτος του κύματος αλλά και την φάση που θα με απασχολήσει κυρίως στα επόμενα κεφάλαια. Στην αρχή θα αναπτύξω την αναλυτική μέθοδο για την επεξεργασία του οπτικού κυκλώματος MZI με τα δύο SOAs τα οποία έχουν τα χαρακτηριστικά τα οποία ανέφερα παραπάνω. Έστω ότι το cw σήμα εισόδου στην είσοδο του MZI δίνεται

$\vec{E}_{cw} = E_{in} e^{-i\omega t} \hat{p}$  όπου το διάνυσμα  $\hat{p}$  καθορίζει την πόλωση του κύματος και στη συγκεκριμένη περίπτωση δε θα εξετασθεί σαν παράμετρος του προβλήματος και θα παραλείπεται στη διανυσματική έκφραση των πεδίων κατανομών.

Στην έξοδο του πρώτου 3db συζεύκτη έχω για τα πεδία στους δύο βραχίονες

$$E_m^1 = \frac{\sqrt{2}}{2} E_{in} e^{-i\omega t} \quad \text{και} \quad E_m^2 = \frac{\sqrt{2}}{2} E_{in} e^{-i(\omega t + \frac{\pi}{2})} \quad \text{αντίστοιχα. Μετά την ενίσχυση στους}$$

SOAs έχω τα κύματα στις εισόδους του δεύτερου οπτικού συζεύκτη

$$E^1 = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{G_1} E_{in} e^{-i(\omega t + \phi_1)}$$

$$E^2 = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{G_2} E_{in} e^{-i(\omega t + \phi_2 + \frac{\pi}{2})} \quad (2.3.2)$$

Στο δεύτερο οπτικό συζεύκτη 3db έχω για το πεδίο στη θύρα μεταγωγής S εφαρμόζοντας την αρχή της επαλληλίας στον συζεύκτη έχω

$$E^S = E_1^S + E_2^S = \frac{\sqrt{2}}{2} E^1 + \frac{\sqrt{2}}{2} e^{-i\frac{\pi}{2}} E^2 = \frac{\sqrt{2}}{2} E^1 + \frac{\sqrt{2}}{2} E^2 e^{-i\frac{\pi}{2}}$$

$$\xrightarrow{(2.3.2)} E^S = \frac{1}{2} \sqrt{G_1} E_{in} e^{-i(\omega t + \phi_1)} + \frac{1}{2} \sqrt{G_2} E_{in} e^{-i(\omega t + \phi_2 + \pi)}$$

$$E^S = \frac{1}{2} E_{in} e^{-i\omega t} \left\{ \sqrt{G_1} e^{-i\phi_1} + \sqrt{G_2} e^{-i(\phi_2 + \pi)} \right\} \quad (2.3.3)$$



που είναι η αναλυτική έκφραση για το πεδίο  $E^S$  το οποίο το προσδιόρισα στη γενική κυματική μορφή στην οποία ξεχωρίζω το πλάτος του αλλά και τη φάση του μέσα από τη μαθηματική μορφή  $E^S = |E^S| e^{-i(\omega t + \phi_s)}$ .

Στη συνέχεια θα αναζητήσω μια έκφραση η οποία θα απεικονίζει την εξάρτηση της φάσης  $\phi_s$  του οπτικού πεδίου στην έξοδο αλλά και την προσπάθεια μιας θεωρητικής προσέγγισης για να εξηγήσω την παραμετροποίηση της φάσης από τα μεγέθη του οπτικού κυκλώματος και τη φυσική του ερμηνεία που εντοπίζεται στο φαινόμενο της αναγέννησης φάσης.

### (2.3.2) αναλυτική διερεύνηση της γενικής περίπτωσης για την εύρεση της έκφρασης για το πεδίο της θύρας μεταγωγής

Υιοθετώντας καταρχήν τη γενική ανάλυση του οπτικού πεδίου στη θύρα S έχω για το πεδίο από τη σχέση (2.3.3)

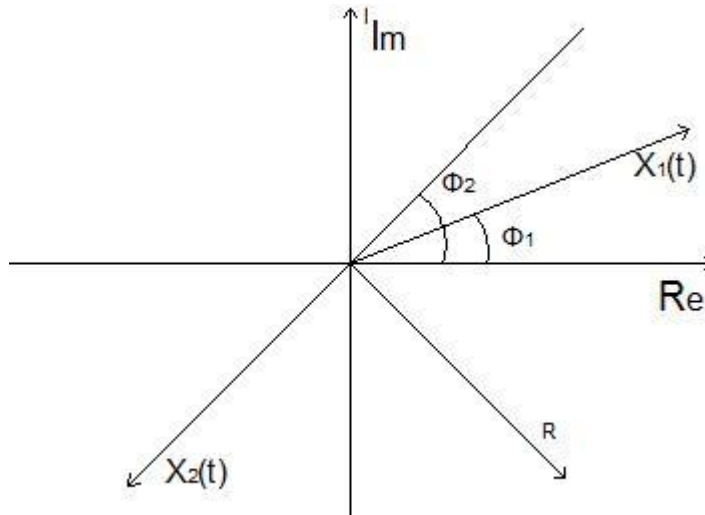
$$E^S = \frac{1}{2} E_{in} e^{-i\omega t} \left\{ \sqrt{G_1} e^{-i\phi_1} + \sqrt{G_2} e^{-i(\phi_2 + \pi)} \right\}$$

Μπορώ να θεωρήσω –όπως και προσέκυψε από την αρχή της υπέρθεσης στον δεύτερο coupler 3db- ότι στη θύρα S έχω επαλληλία δύο ταλαντώσεων με ίσες συχνότητες και διαφορετικά πλάτη. Από τη γενική θεωρία κυμάτων μπορώ να θεωρήσω ότι οι δύο ταλαντώσεις που απεικονίζονται από τους δύο όρους της έκφρασης του  $E^S$  είναι οι εξής

$x_1(t) = \sqrt{G_1} \cos(\omega t + \phi_1)$  και  $x_2(t) = -\sqrt{G_2} \cos(\omega t + \phi_2)$  αντίστοιχα. Οι σχέσεις αυτές προκύπτουν από την αντίστροφη απεικόνιση των μιγαδικών phasors για ημιτονικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται. Συγκεκριμένα προκύπτουν από τη σχέση

$x_n(t) = \text{Re} \left\{ E_n e^{-i\omega t} \right\}$  όπου  $E_1$  και  $E_2$  είναι οι όροι που προσδιόρισα προηγουμένως. Από τη σύνθεση των ταλαντώσεων αυτών λοιπόν με εφαρμογή απλών σχέσεων τριγωνομετρίας θα προκύψει η σχέση για το πεδίο  $E^S$  η οποία θα δίνεται  $E^S = \frac{1}{2} E_{in} e^{-i\omega t} R e^{-i\theta_s}$  όπου τα μεγέθη  $R$ ,  $\theta_s$  από τη σύνθεση ταλαντώσεων θα υπολογίζονται

$$R^2 = G_1 + G_2 - 2\sqrt{G_1 G_2} \cos(\phi_2 - \phi_1), \quad \tan \theta_s = \frac{\sqrt{G_1} \sin \phi_1 - \sqrt{G_2} \sin \phi_2}{\sqrt{G_1} \cos \phi_1 - \sqrt{G_2} \cos \phi_2}$$



Εικόνα 2.3.2) Παρουσίαση προσέγγισης σύνθεσης ταλαντώσεων για την υπέρθεση των δύο οπτικών πεδίων

Η συγκεκριμένη ανάλυση αν και με τη γενική ισχύ που τη συγκροτεί καταλήγει σε συγκεκριμένες εκφράσεις για τα στοιχεία του οπτικού πεδίου που με ενδιαφέρει έχει και μειονεκτήματα και για αυτό θα την παρακάμψω. Από τη στιγμή που δουλεύω με βάση τη θεωρία της υπέρθεσης των ταλαντώσεων δεν εκμεταλλεύομαι τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που μου δίνονται από τα στοιχεία του οπτικού κυκλώματος και τη συμπεριφορά τους όπως θα χρησιμοποιήσω παρακάτω (πχ τις σχέσεις που διέπουν τη λειτουργία των SOAs στην περιοχή του κόρου). Επίσης σημαντική αδυναμία εντοπίζεται στην προσπάθεια μαθηματικής επεξεργασίας των σχέσεων αυτών σε περιοχές λειτουργίας του MZI οι οποίες οδηγούν σε ένα μοντέλο προσεγγίσεων για τη μοντελοποίηση της  $\phi_s$  και το οποίο δίδεται παρακάτω.

### (2.3.3) χρησιμοποίηση εργαλείων ανάλυσης οπτικών κυκλωμάτων για επεξεργασία της έκφρασης της πεδιακής κατανομής στη θύρα S.

Στο συγκεκριμένο εδάφιο θα προχωρήσω στη μαθηματική επεξεργασία της σχέσης για το οπτικό πεδίο της θύρας μεταγωγής ώστε να καταλήξω σε μια συνάρτηση η οποία θα μου δίνει την  $\phi_s$  του κύματος.

Από την ανάλυση που έχει γίνει στην υποπαράγραφο (2.3.1) κατέληξα στην έκφραση για το  $E^S$  η οποία είναι  $E^S = \frac{1}{2} E_{in} e^{-i\omega t} \left\{ \sqrt{G_1} e^{-i\phi_1} + \sqrt{G_2} e^{-i(\phi_2+\pi)} \right\}$

Στόχος παραμένει η εξαγωγή μιας σχέσης που δίνει την  $\phi_s$  οπότε τροποποιώ την παράσταση

$$\sqrt{G_1} e^{-i\phi_1} + \sqrt{G_2} e^{-i(\phi_2+\pi)} = \sqrt{G_1} e^{-i\phi_1} + \sqrt{G_2} e^{-i\pi} e^{-i\phi_2} = \sqrt{G_1} e^{-i\phi_1} - \sqrt{G_2} e^{-i\phi_2} \quad (1)$$

Αυτή είναι η σχέση από την οποία προκύπτει η ζητούμενη φάση μετά από επεξεργασία της η οποία ακολουθεί. Από καθαρά αλγεβρική πλευρά είναι ο μόνος όρος που περιέχει την πληροφορία της φάσης στο όρισμά του.

Μια πρώτη παραδοχή στο πρόβλημα μου είναι οι δύο ενισχυτές έχουν τα ίδια ποιοτικά χαρακτηριστικά και συγκεκριμένα τον ίδιο παράγοντα φασματικής διεύρυνσης  $\alpha$ . Παράλληλα θεωρώ ότι και οι δύο ενισχυτές στο πρόβλημα μου έχουν περάσει στην περιοχή κορεσμού και δεν εξετάζω στην περίπτωση μου φαινόμενα δυναμικής συμπεριφοράς στα οποία εισάγεται η παράμετρος του χρόνου  $t$ . Με βάση αυτές τις παραδοχές θα συσχετίσω τις φάσεις και τα κέρδη πλάτους των ενισχυτών  $G$  και  $\phi$ , από τη γενική θεωρία των SOAs έχω στην περιοχή κόρου

$$\phi_1(t) = -\frac{a}{2} \ln[G_1(t)] \text{ και } \phi_2(t) = -\frac{a}{2} \ln[G_2(t)] \text{ οπότε έχω από τη χρονική}$$

ανεξαρτησία στην περιοχή του κόρου για την ποσότητα  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = -\frac{a}{2} \ln[G_1] + \frac{a}{2} \ln[G_2] = -\frac{a}{2} \ln\left[\frac{G_1}{G_2}\right] \quad (2)$$

$$\text{Άρα από τη σχέση (2) προκύπτει } \Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = -\frac{a}{2} \ln\left[\frac{G_1}{G_2}\right] \rightarrow \frac{G_1}{G_2} = \exp\left[\frac{-2\Delta\phi}{a}\right]$$

$$\rightarrow \sqrt{\frac{G_1}{G_2}} = \exp\left[\frac{-\Delta\phi}{a}\right] \quad (2.1)$$

Τροποποιώντας τη σχέση (1) έχω

$$\begin{aligned} \sqrt{G_1} e^{-i\phi_1} - \sqrt{G_2} e^{-i\phi_2} &= \sqrt{G_2} \left[ \sqrt{\frac{G_1}{G_2}} e^{-i\phi_1} - e^{-i\phi_2} \right] \\ \xrightarrow{(2.1)} \sqrt{G_1} e^{-i\phi_1} - \sqrt{G_2} e^{-i\phi_2} &= \sqrt{G_2} \left[ \exp\left[\frac{-\Delta\phi}{a}\right] e^{-i\phi_1} - e^{-i\phi_2} \right] \quad (3) \end{aligned}$$

Στο σημείο αυτό έχω καταλήξει στην έκφραση για το πεδίο  $E^S$  η οποία είναι

$$E^S = \frac{1}{2} E_m e^{-i\omega t} \sqrt{G_2} \left\{ \exp\left[\frac{-\Delta\phi}{a}\right] e^{-i\phi_1} - e^{-i\phi_2} \right\} \text{ με } \Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$$

2.3.2) Στο παρόν εδάφιο θα μελετηθεί η γενική περίπτωση ανάλυσης της σχέσης η οποία μπορεί να δώσει με αριθμητικό τρόπο τα χαρακτηριστικά του πεδίου στη θύρα S.

Συγκεκριμένα από την τροποποιημένη σχέση (3) έχω για την ποσότητα

$$\exp\left(-\frac{\Delta\phi}{a}\right) e^{-i\phi_1} - e^{-i\phi_2} = \exp\left(-\frac{\Delta\phi}{a}\right) \cos\phi_1 - \cos\phi_2 - i \sin\phi_1 \exp\left(-\frac{\Delta\phi}{a}\right) + i \sin\phi_2$$

$$\exp\left(-\frac{\Delta\phi}{a}\right) e^{-i\phi_1} - e^{-i\phi_2} = k \cos\phi_1 - \cos\phi_2 + i(\sin\phi_2 - k \sin\phi_1)$$

όπου έχω θέσει  $k = \exp\left(-\frac{\Delta\phi}{a}\right)$ . Έχοντας από την άλγεβρα μιγαδικών για την

$$\text{έκφραση } \exp\left(-\frac{\Delta\phi}{a}\right) e^{-i\phi_1} - e^{-i\phi_2} = |z| e^{i \text{Arg}(z)} \text{ με}$$

$$|z| = \left[ \text{Re}(z)^2 + \text{Im}(z)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \text{ και } \text{Arg}(z) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}(z)}{\text{Re}(z)} \right\} \text{ καταλήγω για το πλάτος}$$

και τη φάση του κύματος του ζητούμενου πεδίου  $E^S = |E^S| e^{-i(\omega t + \phi_s)}$

$$E = \frac{1}{2} E_m e^{-i\omega t} \sqrt{G_2} \left[ (k \cos \phi_1 - \cos \phi_2) + (\sin \phi_2 - k \sin \phi_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \text{ και}$$

$$\phi_s = \tan^{-1} \left[ \frac{\sin \phi_2 - k \sin \phi_1}{k \cos \phi_1 - \cos \phi_2} \right].$$

Η συγκεκριμένη υπολογιστική μέθοδος μπορεί να υπολογίσει με αριθμητικό τρόπο αποτελέσματα για τα χαρακτηριστικά της ζητούμενης πεδιακής κατανομής ωστόσο στο πεδίο της μαθηματικής μοντελοποίησης υστερεί στη δυνατότητα εύρεσης μιας συνάρτησης η οποία θα εισέρχεται στον προσδιορισμό των ζητούμενων χαρακτηριστικών και η οποία θα έχει μία ελεύθερη μεταβλητή και θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο επόμενο κεφάλαιο στο μοντέλο διαταραχών το οποίο θα χρησιμοποιηθεί. Άρα απαιτείται μία προσέγγιση για τον αναλυτικό υπολογισμό η οποία παρουσιάζεται στο επόμενο εδάφιο και η οποία έχει πλεονεκτήματα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια.

### 2.3.4) Αναλυτική αναζήτηση μοντελοποίησης με χρήση μαθηματικών εργαλείων

Χρησιμοποιώ το ανάπτυγμα Mac-Laurin για την εκθετική συνάρτηση

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \dots + \frac{x^v}{v!} + \dots \text{ στο οποίο θέτοντας } x = -\frac{\Delta\phi}{a} \text{ έχω αφού εξασφαλίζω}$$

τη σύγκλιση της σειράς για την εκθετική συνάρτηση

$$\exp\left(-\frac{\Delta\phi}{a}\right) = 1 - \frac{\Delta\phi}{a} + \frac{\left(\frac{\Delta\phi}{a}\right)^2}{2!} + \dots + \frac{\left(\frac{\Delta\phi}{a}\right)^v}{v!} + \dots$$

Οπότε χρησιμοποιώντας το ανάπτυγμα αυτό έχω τον εξής μετασχηματισμό

$$\exp\left(\frac{-\Delta\phi}{a}\right) e^{-i\phi_1} - e^{-i\phi_2} = \left\{ 1 - \sum_{v=1}^{+\infty} \frac{\left(\frac{-\Delta\phi}{a}\right)^v}{v!} \right\} e^{-i\phi_1} - e^{-i\phi_2} = e^{-i\phi_1} - e^{-i\phi_2} + \left\{ \sum_{v=1}^{+\infty} \frac{\left(\frac{-\Delta\phi}{a}\right)^v}{v!} \right\} e^{-i\phi_1}$$

Στόχος μου παραμένει να παραμετροποιήσω τη φάση  $\phi_s$

χρησιμοποιώντας ως ελεύθερη μεταβλητή τη διαφορά των φάσεων  $\Delta\phi$   
 $e^{-i\phi_1} - e^{-i\phi_2} = e^{-i\phi_1} (1 - e^{-i(\phi_2 - \phi_1)}) = (1 - e^{i\Delta\phi}) e^{-i\phi_1}$  (5)

η σχέση (4) τροποποιείται μέσω της σχέσης (5) και δίνει

$$e^{-i\phi_1} - e^{-i\phi_2} + \left\{ \sum_{\nu=1}^{+\infty} \frac{\left(\frac{-\Delta\phi}{a}\right)^\nu}{\nu!} \right\} e^{-i\phi_1} \xrightarrow{(4)}$$

$$e^{-i\phi_1} - e^{-i\phi_2} + \left\{ \sum_{\nu=1}^{+\infty} \frac{\left(\frac{-\Delta\phi}{a}\right)^\nu}{\nu!} \right\} e^{-i\phi_1} = \left\{ \sum_{\nu=1}^{+\infty} \frac{\left(\frac{-\Delta\phi}{a}\right)^\nu}{\nu!} \right\} e^{-i\phi_1} + (1 - e^{i\Delta\phi}) e^{-i\phi_1}$$

$$= e^{-i\phi_1} \left\{ 1 - e^{i\Delta\phi} + \sum_{\nu=1}^{+\infty} \frac{\left(\frac{-\Delta\phi}{a}\right)^\nu}{\nu!} \right\} \quad (6)$$

Για το πεδίο  $E^S$  έχω για τη φάση του που προκύπτει από το όρισμα της  
έκφρασης  $\phi_s = \text{Arg} \left\{ \exp\left(\frac{-\Delta\phi}{a}\right) e^{-i\phi_1} - e^{-i\phi_2} \right\}$ . Κάνοντας ωστόσο χρήση της σχέσης

(6) που μου δίνει  $\exp\left(\frac{-\Delta\phi}{a}\right) e^{-i\phi_1} - e^{-i\phi_2} = e^{-i\phi_1} \left\{ 1 - e^{i\Delta\phi} + \sum_{\nu=1}^{+\infty} \frac{\left(\frac{-\Delta\phi}{a}\right)^\nu}{\nu!} \right\}$  και παράλληλα

θέτοντας  $g(\Delta\phi) = 1 - e^{i\Delta\phi} + \sum_{\nu=1}^{+\infty} \frac{\left(\frac{-\Delta\phi}{a}\right)^\nu}{\nu!}$  μια μιγαδική συνάρτηση πραγματικής

μεταβλητής έχω εκμεταλλευόμενος την ιδιότητα από άλγεβρα μιγαδικών

$$\text{Arg} \{z_1 z_2\} = \text{Arg} \{z_1\} + \text{Arg} \{z_2\}$$

$$\phi_s = \text{Arg} \left\{ \exp\left(\frac{-\Delta\phi}{a}\right) e^{-i\phi_1} - e^{-i\phi_2} \right\} = \text{Arg} \left\{ e^{-i\phi_1} \left[ 1 - e^{i\Delta\phi} + \sum_{\nu=1}^{+\infty} \frac{\left(\frac{-\Delta\phi}{a}\right)^\nu}{\nu!} \right] \right\} = \text{Arg} \left\{ e^{-i\phi_1} g(\Delta\phi) \right\}$$

$\rightarrow \phi_s = \text{Arg} \{e^{-i\phi_1}\} + \text{Arg} \{g(\Delta\phi)\} = -\phi_1 + \text{Arg} \{g(\Delta\phi)\}$  με  $g(\Delta\phi)$  η συνάρτηση που  
δίνεται παραπάνω.

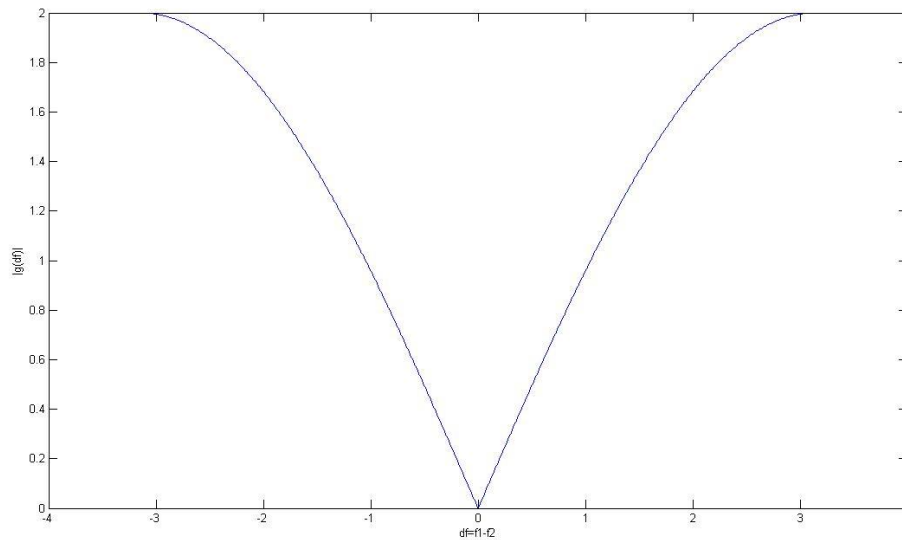
Άρα κατάφερα να υπολογίσω αναλυτικά το πεδίο της θύρας μεταγωγής  $E^S$  στη  
μορφή  $E^S = E e^{-i(\omega t + \phi_s)}$  με προσδιορισμένα τόσο το πλάτος του κύματος όσο και τη  
φάση του. Κατέληξα για το πλάτος ηλεκτρικής έντασης

$$E = \frac{1}{2} E_{in} \sqrt{G_2} |g(\Delta\phi)| \text{ με } |g(\Delta\phi)| \text{ το μέτρο της μιγαδικής συνάρτησης. Στη σχέση}$$

αυτή πρώτο στοιχείο παρατήρησης ίσως να είναι η απουσία του κέρδους  $G_1$  που εισάγει ο πρώτος ενισχυτής στο MZI. Ωστόσο το κέρδος  $G_1$  είναι σε μορφή κρυμμένης παραμέτρου στον όρο  $\Delta\phi$  ο οποίος τον περιέχει σαν αποτέλεσμα της σχέσης του ορισμού του από τη

θεωρία των SOAs:  $\Delta\phi = -\frac{a}{2} \ln\left[\frac{G_1}{G_2}\right]$ . Παράλληλα παρατηρώ ότι το πλάτος έχει μια

γραμμική εξάρτηση με το μέτρο του σήματος εισόδου  $E_{in}$  το οποίο είναι απόλυτα λογικό στα πλαίσια της λειτουργίας ενίσχυσης από τους SOAs. Παρατηρώ τέλος ότι βασικό συστατικό μεταβολής του πλάτους είναι η μεταβλητή  $\Delta\phi$  η οποία και θα παίζει τον καθοριστικό ρόλο και σε επόμενα κεφάλαια. Στη συνέχεια παρατίθενται και γραφικές παραστάσεις για διάφορες τιμές των παραμέτρων για το πλάτος της εξόδου.



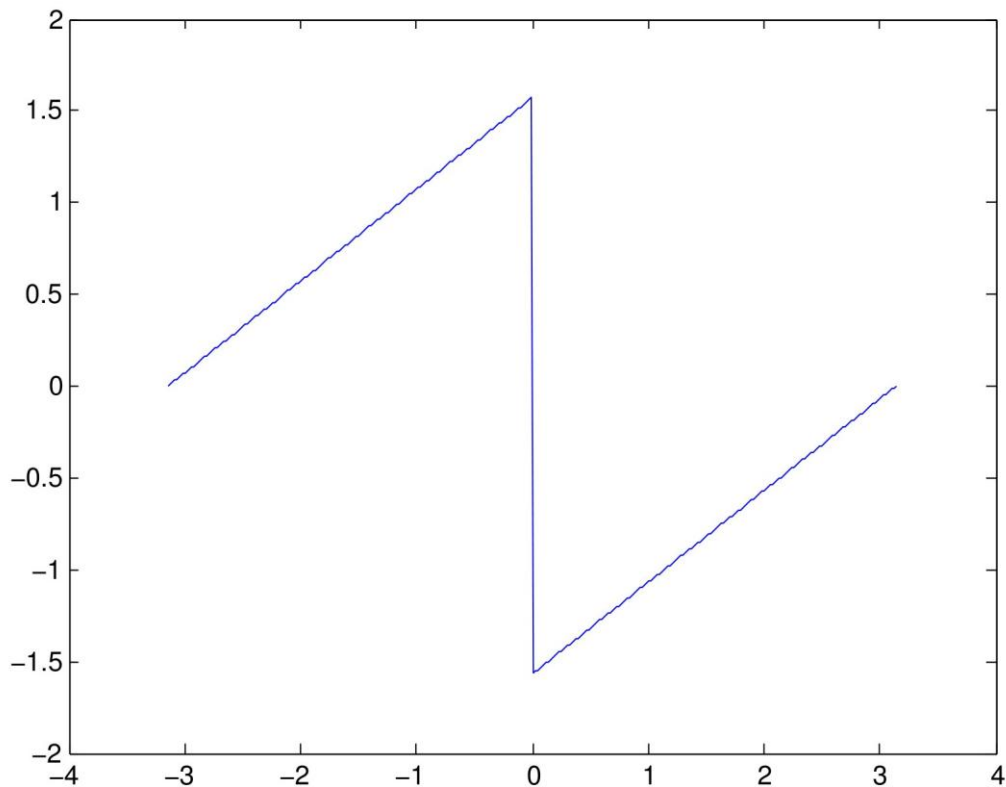
Εικόνα 2.3.1 παρουσίαση της γραφικής παράστασης για το πλάτος  $\|g(\Delta\phi)\|$  στο διάστημα ορισμού

Σχετικά με το σχολιασμό της συνάρτησης για το πλάτος παρατηρώ πως στο πεδίο ορισμού του  $[-\pi, +\pi]$ , έχει ένα πεδίο τιμών το οποίο είναι  $[0, 2]$ . Εκτός από τα μαθηματικά εργαλεία που οδηγούν στο αποτέλεσμα αυτό υποκρύπτει και φυσικό νόημα στη βάση του γεγονότος ότι θα χρησιμοποιηθεί ως συντελεστής σε επόμενες εφαρμογές για σχέσεις πλατών κυμάτων.

$$\phi_s = -\phi_1 + \text{Arg}\{g(\Delta\phi)\} \text{ για τη φάση το κύματος.}$$

Η συνάρτηση που υπεισέρχεται στον υπολογισμό των δύο μεγεθών είναι η  $g(\Delta\phi)$  της οποίας μεταβλητή είναι η  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ , διαφορά φάσεων που εισάγουν οι δύο SOAs στους δύο βραχίονες του MZI. Το πεδίο ορισμού της συνάρτησης είναι το διάστημα  $[-\pi, \pi]$  και στη συνέχεια με την παρουσίαση των διαγραμμάτων θα ερμηνευθούν και τα σημεία

συμπεριφοράς της φάσης  $\phi_s$  στο πεδίο ορισμού της συνάρτησης με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά του κυκλώματος αλλά και τις περιοχές λειτουργίας του. Ένα στοιχείο το οποίο θα εμφανιστεί και στο επόμενο κεφάλαιο είναι ο προσδιορισμός της περιοχής κανονικής λειτουργίας του οπτικού κυκλώματος του αναγεννητή με βάση την τιμή της παραμέτρου  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ . Άλλο στοιχείο παρατήρησης είναι η απουσία του όρου της φάσης  $\phi_2$  που εισάγει ο δεύτερος ενισχυτής του MZI. Σε αναλογία με το πλάτος βλέπω και εδώ ότι βρίσκεται η παράμετρος αυτή "φωλιασμένη" στον όρο  $\Delta\phi$  μέσω της συνάρτησης  $g(\Delta\phi)$ . Ένας πρώτος δείκτης που αξίζει να σημειώσω είναι η συμμετρία που εμφανίζεται στην παρουσία των χαρακτηριστικών των ενισχυτών στις σχέσεις για το πλάτος και τη φάση καθώς σε κάθε μέγεθος ρόλο ελεύθερης μεταβλητής έχουν στοιχεία διαφορετικού ενισχυτή  $(G_2, \phi_1)$ . Σε επίπεδο μαθηματικής θεμελίωσης του προβλήματος ο ορισμός της  $g(\Delta\phi)$ , που αποτελεί και τη βάση της μοντελοποίησης αυτής, θεμελιώνεται στο τέλος του κεφαλαίου στο μαθηματικό παράρτημα.



Εικόνα 3.3.2 παρουσίαση της συμπεριφοράς του πρωτεύοντος ορίσματος για την συνάρτηση  $g(\Delta\phi)$  στο διάστημα  $[0, 2\pi]$

Παρατηρώντας τη γραφική παράσταση για το πρωτεόν ορίσμα της μιγαδικής συνάρτησης  $g(\Delta\phi)$  μπορώ να παρατηρήσω κάποια βασικά χαρακτηριστικά. Καταρχήν στο σημείο  $\Delta\phi=0$ , στο οποίο θα εμφανίζεται όταν  $\phi_1=\phi_2$ , η  $g(\Delta\phi)$  είναι ασυνεχής και έχω ένα άλμα από την τιμή  $\pi/2$  στην τιμή  $-\pi/2$ . Εκτός από το μαθηματικό υπόβαθρο της συγκεκριμένης εφαρμογής η φυσική αντανάκλαση του γεγονότος αυτού θεωρείται στην ανατροπή που εμφανίζεται εάν αλλάξει το πρόσημο της διαφοράς  $\Delta\phi$  το οποίο μεταφράζεται σε αλλαγή της οδήγησης στους δύο βραχίονες του MZI, το οποίο δεν έχει

---

κανένα νόημα στη μετάδοση σήματος στον αναγεννητή. Άλλο χαρακτηριστικό στο διάγραμμα που παραθέτω, είναι το πεδίο τιμών της τιμής  $\text{Arg}\{g(\Delta\phi)\}$  το οποίο κινείται στο διάστημα  $[-\pi/2, +\pi/2]$ . Άλλο ποιοτικό σημείο της διαγραμματικής απεικόνισης είναι η “σχεδόν” γραμμική συμπεριφορά που εμφανίζει η συνάρτηση στο πεδίο ορισμού της και η οποία μπορεί να προσεγγιστεί με τη συνάρτηση μεταφοράς ενός γραμμικού μέσου. Σε επίπεδο τηλεπικοινωνιακής εφαρμογής θα είχε ένα ενδιαφέρον να παρατηρηθεί πως η συνάρτηση μεταφοράς του οπτικού κυκλώματος αυτού προσομοιάζει με τη συμπεριφορά ενός οπτικού κυκλώματος Sagniac το οποίο έχει ομοειδή εφαρμογή στο οπτικό κύκλωμα του αναγεννητή DPSK.



---

## Παράρτημα

### Π.1) Παράρτημα τριγωνομετρίας

Στο προηγούμενο κεφάλαιο χρησιμοποίησα βασικές σχέσεις τριγωνομετρίας οι οποίες παραθέτονται με μια στοιχειώδη απόδειξη στο συγκεκριμένο εδάφιο.

Συγκεκριμένα για την παράσταση  $e^{iA} + e^{iB}$  και χρησιμοποιώντας τον τύπο του Euler  $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$  έχω

$$e^{iA} + e^{iB} = \cos A + i \sin A + \cos B + i \sin B$$

$$e^{iA} + e^{iB} = (\cos A + \cos B) + i(\sin A + \sin B)$$

Ωστόσο από την τριγωνομετρία έχω τις βασικές σχέσεις

$$\cos a + \cos b = 2 \cos\left[\frac{1}{2}(a+b)\right] \cos\left[\frac{1}{2}(a-b)\right]$$

$$\sin a + \sin b = 2 \sin\left[\frac{1}{2}(a+b)\right] \cos\left[\frac{1}{2}(a-b)\right]$$

Οπότε καταλήγω στη σχέση

$$e^{iA} + e^{iB} = 2 \cos\left[\frac{1}{2}(A+B)\right] \cos\left[\frac{1}{2}(A-B)\right] + i 2 \sin\left[\frac{1}{2}(A+B)\right] \cos\left[\frac{1}{2}(A-B)\right] \quad (\text{Π.1})$$

Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο εξάγεται και η σχέση για την έκφραση  $e^{iA} - e^{iB}$  για την οποία έχω σύμφωνα με τα βήματα που ακολούθησα προηγουμένως

$$e^{iA} - e^{iB} = \cos A + i \sin A - \cos B - i \sin B$$

$$e^{iA} - e^{iB} = (\cos A - \cos B) + i(\sin A - \sin B)$$

Από τις σχέσεις που μετασχηματίζουν τη διαφορά ημιτόνων και συνημιτόνων σε γινόμενα έχω

$$\cos a - \cos b = 2 \sin\left[\frac{1}{2}(a+b)\right] \sin\left[\frac{1}{2}(b-a)\right]$$

$$\sin a - \sin b = 2 \sin\left[\frac{1}{2}(a-b)\right] \cos\left[\frac{1}{2}(a+b)\right]$$

Οπότε καταλήγω στη σχέση (Π.2) που χρησιμοποίησα στο κεφάλαιο 2

$$e^{iA} - e^{iB} = 2 \sin\left[\frac{1}{2}(A+B)\right] \sin\left[\frac{1}{2}(A-B)\right] + i 2 \sin\left[\frac{1}{2}(A-B)\right] \cos\left[\frac{1}{2}(A+B)\right] \quad (\text{Π.2})$$

Π.2) Μελέτη συνάρτησης που εισάγεται στο μοντέλο για τον προσδιορισμό της φάσης του κύματος στη θύρα μεταγωγής.

---


$$g(\Delta\phi) = 1 - e^{i\Delta\phi} + \sum_{\nu=1}^{+\infty} \frac{\left(\frac{-\Delta\phi}{a}\right)^\nu}{\nu!} \quad \text{είναι μια μιγαδική συνάρτηση πραγματικής}$$

μεταβλητής. Έχει πεδίο ορισμού το διάστημα  $[-\pi, +\pi)$  και σύνολο τιμών στον μιγαδικό κύκλο ένα πεπερασμένο χωρίο. Για τη ευστάθεια της αρκεί να συγκλίνει η αριθμητική σειρά

$$\sum_{\nu=1}^{+\infty} \frac{\left(\frac{-\Delta\phi}{a}\right)^\nu}{\nu!} \quad \text{ώστε να ορίζεται με μονότιμο τρόπο και φραγμένο η συνάρτηση. Για την}$$

παράμετρο  $\alpha$ -παράγοντας φασματικής διεύρυνσης των SOAs- γνωρίζω από θεωρία ότι παίρνει τιμές στο διάστημα  $[3,11]$ . Άρα για τη σύγκλιση της σειράς έχω από θεώρημα Leibniz για εναλλάσσουσες σειρές ότι εφόσον

$$\lim_{\nu \rightarrow \infty} \frac{\left(\frac{\Delta\phi}{a}\right)^\nu}{\nu!} \rightarrow 0 \quad \text{για τις τιμές της μεταβλητής } \Delta\phi \text{ και για τις τιμές της } a, \text{ η ζητούμενη}$$

σειρά συγκλίνει και άρα θεμελιώνεται ο ορισμός της  $g(\Delta\phi) : \mathfrak{R} \rightarrow \mathbb{C}$ .

---

# Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

## Θεωρητική μελέτη αναγεννητή

### 3.1) Μελέτη- περιγραφή του DI

Το βασικό πρόβλημα της αναγέννησης έγκειται στην αντιμετώπιση των φαινομένων της αβεβαιότητας φάσης και πλάτους που εντοπίζονται στο αρχικό σήμα DPSK και οφείλονται σε προβλήματα που δημιουργεί η παρουσία του θορύβου. Για την κατανόηση-αντιμετώπιση των φαινομένων αυτών έχει κομβική σημασία να κατανοηθεί ο μηχανισμός της μετάδοσης της πληροφορίας ανά τμήμα της διάταξης του οπτικού αναγεννητή καθώς και οι μετατροπές που λαμβάνουν χώρα σε κάθε στάδιο.

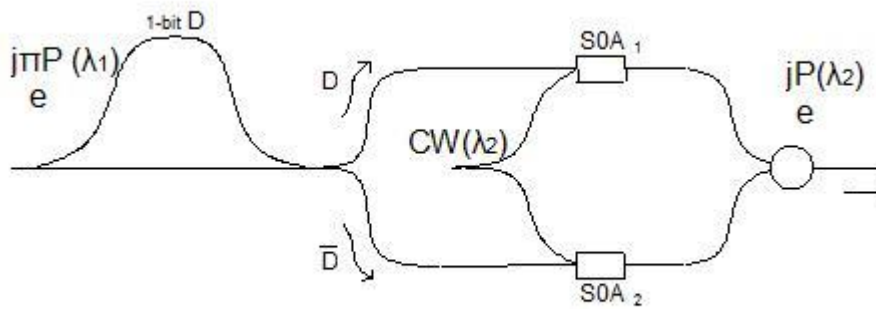
Στο πρώτο στάδιο της επεξεργασίας εντοπίζεται ένα συμβολόμετρο καθυστέρησης (DI) το οποίο έρχεται να επεξεργαστεί το σήμα DPSK εισόδου για τον αναγεννητή. Βασική του λειτουργία είναι η διαδικασία στην οποία καταφέρει να «αποσπάσει» την πληροφορία που βρίσκεται στη φάση του σήματος και να τη «μεταφράσει» στο όχημα του πλάτους-ισχύος των παλμών ελέγχου που προκύπτουν στην έξοδο του. Άρα μπορώ να θεωρήσω ότι καταφέρει να μεταβιβάσει τη διαμόρφωση φάσης (PM) σε μια διαδικασία διαμόρφωσης πλάτους (AM). Άλλωστε η διαδικασία της αναγέννησης που συντελείται στο MZI βασίζεται τόσο σε επίπεδο πλάτους καθώς οι SOAs ενεργοποιούνται από τους παλμούς ελέγχου και ο μηχανισμός τους όπως εξηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο 2 συγκροτείται στην ισχύ των παλμών ελέγχου οι οποίοι καθορίζουν τα χαρακτηριστικά τα ενίσχυσης που συντελείται στους βραχίονες του MZI. Ταυτόχρονα συνυπάρχει και ο μηχανισμός ολίσθησης φάσης που προκαλούν οι δύο βραχίονες και έχουν ως αποτέλεσμα στην έξοδο της διάταξης να εμφανίζονται φαινόμενα συμβολής ενισχυτικής ή αναιρευτικής που να οδηγούν τη μετάβαση ισχύος σε μια συγκεκριμένη θύρα μεταγωγής.

Πιο συγκεκριμένα για τον DI θα θεωρήσω σαν είσοδο του ένα σήμα DPSK το οποίο περιλαμβάνει την πληροφορία στη φάση διατηρώντας σταθερή την ισχύ του. Ο DI αποτελείται από 2 οπτικούς συζεύκτες 3db οι οποίοι περιγράφονται όπως ανέφερα στο κεφάλαιο 2 από τη σχέση σε μητρική μορφή

$$\begin{pmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{pmatrix} \quad \text{όπου } E_{in1}, E_{in2} \text{ είναι οι είσοδοι στον πάνω και κάτω}$$

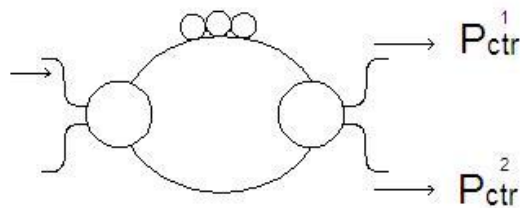
βραχίονα αντίστοιχα και  $E_{out1}, E_{out2}$  οι αντίστοιχοι έξοδοι. Ο βασικός μηχανισμός του DI βασίζεται στην καθυστέρηση που προκύπτει στον πάνω οπτικό βραχίονα μετά τον πρώτο coupler για ένα από τα σήματα των δύο εισόδων του DI κατά 1 bit. Σε επίπεδο θεωρήσης παλμών μπορεί να θεωρηθεί ότι ο ένας παλμός καθυστερεί κατά χρονική διάρκεια μιας περιόδου(T) σε αντίθεση με τον άλλον. Οπότε κατά την έξοδο και από το δεύτερο coupler, δηλαδή στην έξοδο του DI θα έχω τα σήματα

$$E_{o1} = \frac{1}{2} [-E_n(t) + E_n(t-T)] \text{ και } E_{o2} = \frac{i}{2} [E_n(t) + E_n(t-T)] .$$



Εικόνα 3.1.1 σχηματική παρουσίαση αναγεννητή με χρήση του καθυστερητή 1-bit και του συμβολόμετρου Mach-Zender με SOAs

Στο προηγούμενο σχήμα παρουσιάζεται συνοπτικά ένα σήμα στην είσοδο του αναγεννητή το οποίο έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και στόχος είναι στην έξοδο να αναγεννηθεί ως προς τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του. Η περαιτέρω παρουσίαση της ανατροπής των χαρακτηριστικών θορύβου μέσα από τον αναγεννητή παρουσιάζεται παρακάτω. Να σημειωθεί ότι στην έξοδο του DI εμφανίζεται με συμπληρωματικό τρόπο μια σειρά-ακολουθία παλμών που θα χρησιμοποιηθούν ως παλμούς ελέγχου στους ενισχυτές.



Εικόνα 3.1.2 σχηματική παρουσίαση του ακολουθητή 1-bit ο οποίος στη συνέχεια θα οδηγήσει τις δύο εξόδους του στους ενισχυτές του συμβολόμετρου MZI

3.2) θεωρητική ανάλυση σήματος το οποίο έχει διακύμανση φάσης.

3.2.1) ανάλυση για την επίδραση της αβεβαιότητας της φάσης στην ανισορροπία του συστήματος

Θεωρώ DPSK σήμα το οποίο εμφανίζεται στην είσοδο του οπτικού αναγεννητή φάσης. Το σήμα αυτό εμφανίζει αβεβαιότητα φάσης και ιδανική συμπεριφορά στο πλάτος. Στο σημείο εξόδου του DI έχω από την υπέρθεση δύο διαδοχικών παλμών λόγω καθυστέρησης 1-bit που εισάγεται από τη λειτουργία του ακολουθητή όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Έχω αναλυτικά για τους παλμούς  $\widetilde{A}_n(\tau)$  και  $\widetilde{A}_{n-1}(\tau)$ . Η περιγραφή των παλμών που εισέρχονται και συμβάλλουν στην έξοδο του DI δίνεται στη γενική μορφή

$$\widetilde{A}(\tau) = \widetilde{A}_o \exp \left\{ i\widetilde{\phi}_o(\tau) - \left( \frac{\tau}{T_o} \right)^2 \right\} \exp(i\phi_n + i\Delta\phi_n), \text{ όπου } \widetilde{A}_o \text{ το πλάτος του παλμού που δεν}$$

έχει αβεβαιότητα. Ο παράγοντας  $\exp \left\{ i\widetilde{\phi}_o(\tau) - \left( \frac{\tau}{T_o} \right)^2 \right\}$  καθορίζει την κυματική

περιοδικότητα των παλμών οι οποίοι είναι από τη μορφή είναι παλμοί Gauss. Τέλος ο παράγοντας  $\exp(i\phi_n + i\Delta\phi_n)$  καθορίζει τη φάση του παλμού στην οποία εντοπίζεται η δυαδική πληροφορία, συγκεκριμένα από τη θεωρία των DPSK σημάτων οι δυνατές τιμές της φάσης  $\phi_n$  είναι  $\{0, \pi\}$  που απεικονίζουν τα δυαδικά ψηφία  $\{0, 1\}$ . Παράλληλα εισάγεται και η διακύμανση φάσης  $\Delta\phi_n$  που είναι στοχαστικό μέγεθος και το οποίο θα περιγραφεί αναλυτικά παρακάτω. Επειδή στο συγκεκριμένο εδάφιο έχω ιδανική συμπεριφορά στο πλάτος και η Gaussian μορφή των παλμών δε μετασχηματίζεται μπορώ να θέσω

$$\widetilde{A}(\tau) = \widetilde{A}_o \exp \left\{ i\widetilde{\phi}_o(\tau) - \left( \frac{\tau}{T_o} \right)^2 \right\} \text{ και η έκφραση των διαδοχικών παλμών είναι για τον } n\text{-οστό και τον } (n-1)\text{-οστό παλμό}$$

$\widetilde{A}_n(\tau) = \widetilde{A}(\tau) \exp(i\phi_n + i\Delta\phi_n)$  και  $\widetilde{A}_{n-1}(\tau) = \widetilde{A}(\tau) \exp(i\phi_{n-1} + i\Delta\phi_{n-1})$  αντίστοιχα. Από την αρχή της υπέρθεσης έχω λοιπόν στην έξοδο του DI

$$\begin{aligned} \widetilde{A}_{n-1}(\tau) + \widetilde{A}_n(\tau) &= \widetilde{A}(\tau) [\exp(i\phi_{n-1} + i\Delta\phi_{n-1}) + \exp(i\phi_n + i\Delta\phi_n)] \rightarrow \\ \widetilde{A}_{n-1}(\tau) + \widetilde{A}_n(\tau) &= \widetilde{A}(\tau) \exp(i\phi_n + i\Delta\phi_n) \{1 + \exp[-i(\phi_n - \phi_{n-1}) + i(\Delta\phi_{n-1} - \Delta\phi_n)]\} \\ \widetilde{A}_{n-1}(\tau) + \widetilde{A}_n(\tau) &= \widetilde{A}(\tau) \exp(i\phi_n + i\Delta\phi_n) \{1 + \exp[-i(\phi_n - \phi_{n-1}) \times \exp[i(\Delta\phi_{n-1} - \Delta\phi_n)]]\} \end{aligned} \quad (3.2.1)$$

Από τη θεωρία των PSK παλμών όμως έχω για τις φάσεις  $\phi_n$  και  $\phi_{n-1}$  ότι παίρνουν δύο τιμές  $\{0, \pi\}$  οπότε η διαφορά τους  $\phi_n - \phi_{n-1}$  παίρνει τιμές από το σύνολο  $\{0, -\pi, +\pi\}$ . Άρα ο παράγοντας  $s_n = \exp[-i(\phi_n - \phi_{n-1})]$  (2) παίρνει τις δύο δυνατές τιμές  $\{-1, +1\}$ . Άρα καταλήγω για την τροποποίηση της φάσης της σχέσης (1)

$$\exp(i\phi_n + i\Delta\phi_n) \{1 + \exp[-i(\phi_n - \phi_{n-1}) + i(\Delta\phi_{n-1} - \Delta\phi_n)]\} = \exp(i\phi_n + i\Delta\phi_n) [1 + s_n \times \exp[i(\Delta\phi_{n-1} - \Delta\phi_n)]]$$

θέτοντας επίσης για τις αβεβαιότητες φάσης

$$\exp[i(\Delta\phi_{n-1} - \Delta\phi_n)] = g_1(\Delta\phi_n, \Delta\phi_{n-1}) \quad (3). \text{ Κατέληξα λοιπόν στην έκφραση για την υπέρθεση}$$

$$\widetilde{A}_{n-1}(\tau) + \widetilde{A}_n(\tau) = \widetilde{A}(\tau) [\exp(i\phi_{n-1} + i\Delta\phi_{n-1}) + \exp(i\phi_n + i\Delta\phi_n)] \xrightarrow{(2)} \xrightarrow{(3)}$$

$$\widetilde{A}_{n-1}(\tau) + \widetilde{A}_n(\tau) = \widetilde{A}(\tau) \exp(i\phi_n + i\Delta\phi_n) [1 + s_n \times g_1(\Delta\phi_n, \Delta\phi_{n-1})]. \quad (4)$$

Από την εποπτεία του οπτικού αναγεννητή οι έξοδοι του DI θα χρησιμοποιηθούν ως παλμοί ελέγχου στους ενισχυτές του MZI. Άρα από τη φυσική ερμηνεία της μετάδοσης της πληροφορίας στο κύκλωμα με ενδιαφέρει το επίπεδο ισχύος των παλμών ελέγχου και ο τρόπος μεταβολής της ισχύος αυτής που υπεισέρχεται στη λειτουργία των SOAs- αυτό το στοιχείο είναι που θα επικαθορίσει την αναγέννηση της πληροφορίας . Συνεπώς στην προκειμένη θα με απασχολήσει το μέτρο της ζητούμενης έκφρασης της υπέρθεσης, που είναι και το μέτρο της ισχύος των παλμών στις εξόδους του DI. Έχω λοιπόν

$$\begin{aligned} \left| \widetilde{A}_{n-1}(\tau) + \widetilde{A}_n(\tau) \right| &= \left| \widetilde{A}(\tau) \exp(i\phi_n + i\Delta\phi_n) [1 + s_n \times \exp[i(\Delta\phi_{n-1} - \Delta\phi_n)]] \right| \rightarrow \\ &= \left| \widetilde{A}(\tau) \right| \left| \exp(i\phi_n + i\Delta\phi_n) \right| \left| [1 + s_n \times \exp[i(\Delta\phi_{n-1} - \Delta\phi_n)]] \right| \end{aligned}$$

Έχω από τύπο Euler προφανώς ότι  $|\exp(i\phi_n + i\Delta\phi_n)| = 1$  και άρα έχω

$$\left| \widetilde{A}_{n-1}(\tau) + \widetilde{A}_n(\tau) \right| = \left| \widetilde{A}(\tau) \right| \left| [1 + s_n \times \exp[i(\Delta\phi_{n-1} - \Delta\phi_n)]] \right| \text{ όπου για τον παράγοντα του μέτρου } \left| [1 + s_n \times \exp[i(\Delta\phi_{n-1} - \Delta\phi_n)]] \right| \text{ έχω τον υπολογισμό του στη συνέχεια}$$

Θέτω τους μιγαδικούς  $z_1 = 1$  και  $z_2 = s_n g_1(\Delta\phi_n, \Delta\phi_{n-1})$  (5). Από απλή εφαρμογή μέτρου μιγαδικών έχω  $|z_1 + z_2|^2 = |z_1|^2 + |z_2|^2 + (z_1 \bar{z}_2 + \bar{z}_1 z_2) = |z_1|^2 + |z_2|^2 + 2\text{Re}(\bar{z}_1 z_2)$ .

Εφαρμόζοντας στην προηγούμενη εξίσωση τα στοιχεία που έθεσα έχω κατά σειρά  $|z_1|^2 = 1$  και  $|z_2|^2 = |s_n \times \exp(i\Delta\phi_n - i\Delta\phi_{n-1})|^2 = |s_n|^2 \times |\exp(i\Delta\phi_n - i\Delta\phi_{n-1})|^2 = 1 \times 1 = 1$ . Θέτοντας  $\Delta\phi' = \Delta\phi_n - \Delta\phi_{n-1}$  μια στοχαστική μεταβλητή η οποία θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια και περιγράφει τις αβεβαιότητες των φάσεων που εισάγουν οι διαδοχικοί παλμοί PSK. Θα υπολογίσω για δύο ξεχωριστές περιπτώσεις ανάλογα με τη διαμόρφωση δύο διαδοχικών λογικών ψηφίων- εάν είναι τα ίδια ή όχι. Εάν θεωρήσω ότι  $s_n = 1$  δηλαδή  $\phi_n - \phi_{n-1} = 0$  στην περίπτωση που διαμορφώνω το ίδιο λογικό ψηφίο έχω

$$|z_1 + z_2|^2 = 2 + 2s_n \cos(\Delta\phi') = 2[1 + \cos(\frac{\Delta\phi'}{2})] = 4\cos^2(\frac{\Delta\phi'}{2}) \xrightarrow{(5)}$$

$$|z_1 + z_2| = 2 \left| \cos(\frac{\Delta\phi'}{2}) \right|$$

Ομοίως στην περίπτωση όπου έχω  $s_n = -1$  δηλαδή  $\phi_n - \phi_{n-1} = \pi$  και άρα διαμορφώνονται δύο διαδοχικά συμπληρωματικά δυαδικά ψηφία έχω

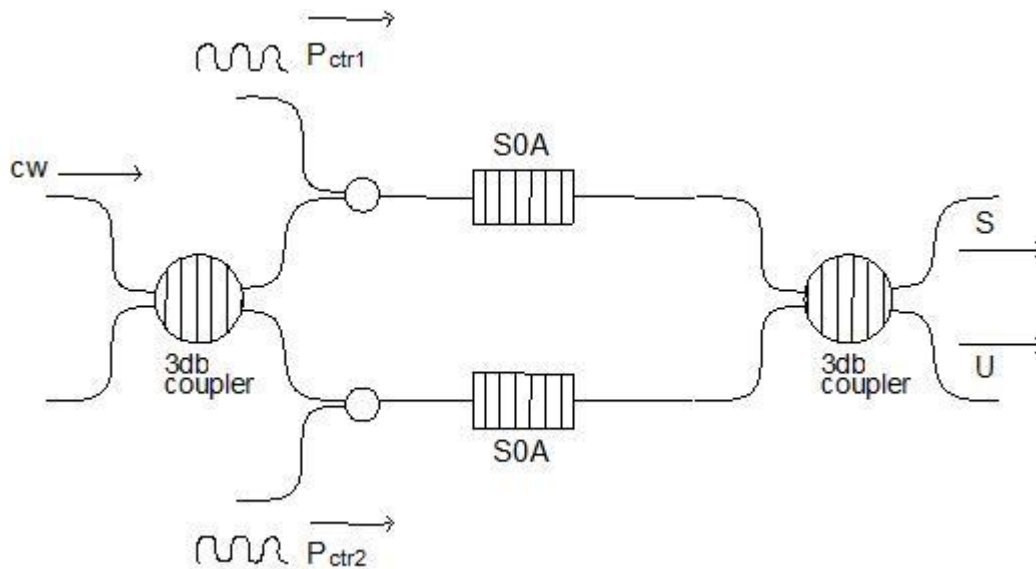
$$|z_1 + z_2|^2 = 4\sin^2(\frac{\Delta\phi'}{2}) \xrightarrow{(5)} |z_1 + z_2| = 2\sin(\frac{\Delta\phi'}{2}). \text{ Άρα ανακεφαλαιώνοντας στην}$$

περίπτωση όπου έχω ακολουθία παλμών που διαμορφώνουν ίδιο λογικό ψηφίο τότε στην έξοδο του ακολουθητή έχω

$$\left| \widetilde{A}_n(\tau) + \widetilde{A}_{n-1}(\tau) \right| = 2 \left| \widetilde{A}_0 \right| \exp \left[ -\left(\frac{\tau}{T_0}\right)^2 \right] \left| \cos(\frac{\Delta\phi'}{2}) \right| \quad (6)$$

Στην περίπτωση που έχω ακολουθία παλμών που διαμορφώνουν συμπληρωματικά λογικά ψηφία στην έξοδο του ακολουθητή έχω

$$\left| \widetilde{A}_n(\tau) + \widetilde{A}_{n-1}(\tau) \right| = 2 \left| \widetilde{A}_0 \right| \exp \left[ -\left(\frac{\tau}{T_0}\right)^2 \right] \left| \sin(\frac{\Delta\phi'}{2}) \right| \quad (7).$$



Εικόνα 3.2.1 οπτικό κύκλωμα αναγεννητή στο οποίο σχηματικά εμφανίζονται οι παλμοί ελέγχου.

Από την ανάγνωση του προηγούμενου αποτελέσματος συμπεραίνω: α) η ιδανική ισχύς των παλμών ελέγχου είναι συγκεκριμένη-έστω  $P_o$ - η οποία καταμερίζεται στις δύο εξόδους του ακολουθητή με μια κατανομή της μορφής  $P_o \cos^2\left(\frac{\Delta\phi'}{2}\right)$  και  $P_o \sin^2\left(\frac{\Delta\phi'}{2}\right)$  και ακολούθως στους δύο οπτικούς ενισχυτές του MZI. Η ιδανική λειτουργία-χωρίς την παρουσία της αβεβαιότητας φάσης  $\Delta\phi' = 0$ - θα προβλεπόταν εφόσον η ισχύς  $P_o$  θα οδηγείται σε έναν από τους δύο οπτικούς ενισχυτές του MZI. β) η διακύμανση της φάσης που υπάρχει στους παλμούς PSK προφανώς επιβάλλει μια μεταστροφή στη ροή ισχύος στην έξοδο του ακολουθητή η οποία είναι ανάλογη της ίδιας της διακύμανσης. Συγκεκριμένα από τον παράγοντα  $\sin^2\left(\frac{\Delta\phi'}{2}\right)$  φαίνεται ότι καθώς αυξάνεται η αβεβαιότητα  $\Delta\phi'$  αυξάνεται και η ανισοκατανομή της ισχύος σε σχέση με την ιδανική συμπεριφορά που βέβαια είναι απόλυτα λογικό. γ) στις προηγούμενες σχέσεις βασικό συστατικό είναι η τριγωνομετρικές συναρτήσεις  $\sin^2(x)$  και  $\cos^2(x)$ -στις οποίες η μεταβλητή  $x$  είναι τυχαία μεταβλητή- οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στις συναρτήσεις διαταραχής που θα προκύψουν στη συνέχεια.

Για τη μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος της αβεβαιότητας φάσης θα παραμετροποιήσω το πρόβλημα με βάση μια ιδανική συμπεριφορά του συστήματος χωρίς

την παρουσία της διαταραχής και στο τέλος θα ποσοτικοποιήσω την επίδραση της διαταραχής. Από τα παραπάνω έχω ότι στην έξοδο του DI εμφανίζονται παλμοί ελέγχου οι

οποίοι έχουν ισχύ  $P_{ctr}^1 = P_o \cos^2\left(\frac{\Delta\phi'}{2}\right)$  και  $P_{ctr}^2 = P_o \sin^2\left(\frac{\Delta\phi'}{2}\right)$  και οδηγούνται στους δύο

ενισχυτές του MZI.  $P_o$  είναι η ισχύς της ιδανικής συμπεριφοράς του συστήματος. Άρα πλέον η πληροφορία που μεταφερόταν προηγουμένως στη φάση των σημάτων πλέον μεταφέρεται στο πλάτος των σημάτων και στην ισχύ των παλμών ελέγχου του MZI.

Από τη θεωρία των SOAs που κωδικοποιείται στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο έχω για το κέρδος πλάτους που εισάγεται από τους ενισχυτές

$$G_1(t) = \left[ 1 - \left(1 - \frac{1}{G_0}\right) \exp\left(-\frac{U_{in}(t)}{U_{sat}}\right) \right]^{-1} \text{ όπου } U_{in}(t) \text{ είναι η ενέργεια του παλμού ελέγχου}$$

που βρίσκεται μέσα στον ενισχυτή τη χρονική στιγμή  $t$ . Με βάση την παραδοχή που έχω κάνει στο κεφάλαιο 2 δεν εξετάζω τη δυναμική περιοχή συμπεριφοράς των SOAs παρά μόνο την περιοχή του κόρου. Άρα για την ενέργεια εισόδου στους SOAs έχω

$$U_{in}(t) = \int_{-\infty}^t P_{in}(t') dt' = P_p \int_{-\infty}^t a(t') dt' \text{ και στην περιοχή του κόρου θεωρώντας ότι η}$$

περιβάλλουσα των παλμών ελέγχου  $a(t')$  είναι ολοκληρώσιμη έχω  $\int_{-\infty}^t a(t') dt' = A$

$$\rightarrow U_{in}(t) = P_p \int_{-\infty}^t a(t') dt' = P_p A \text{ για την περιοχή του κόρου που εξετάζω στο πρόβλημα}$$

μου. Συνεπώς έχω για τα κέρδη των ενισχυτών στους δύο βραχίονες του MZI με βάση τα παραπάνω

$$G_1 = \left[ 1 - \left(1 - \frac{1}{G_0}\right) \exp\left(-\frac{P_{ctr}^1 A}{U_{sat}}\right) \right]^{-1} \text{ και } G_2 = \left[ 1 - \left(1 - \frac{1}{G_0}\right) \exp\left(-\frac{P_{ctr}^2 A}{U_{sat}}\right) \right]^{-1} \text{ καθώς στο}$$

πρόβλημα μου τα δύο SOAs έχουν τα ίδια ποιοτικά χαρακτηριστικά και συγκεκριμένα το ίδιο κέρδος μόνιμης κατάστασης αλλά και ενέργεια κορεσμού. Η

ενέργεια κορεσμού υπολογίζεται από τη θεωρία  $P_{sat} = \frac{n\omega_0 A}{\Gamma g \tau_c}$  όπου  $A$  η παράμετρος

που υπολογίστηκε παραπάνω. Οι υπόλοιπες παράμετροι της σχέσης εξηγούνται αναλυτικά στο κεφάλαιο 2.

### 3.2.2) Αβεβαιότητα φάσης στη θύρα μεταγωγής S του αναγεννητή

Βασικό στοιχείο της μαθηματικής μοντελοποίησης του προβλήματος της αναγέννησης φάσης είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος με την παρουσία των ενοχλητικών φαινομένων θορύβου σε παραβολή με τη συμπεριφορά του εφόσον απουσιάζουν αυτά τα φαινόμενα. Στην προκειμένη η ιδανική συμπεριφορά θα εμφανιζόταν στην περίπτωση όπου

δεν έχω διακύμανση φάσης στην είσοδο, άρα  $\Delta\phi' = 0$ . Τότε  $P_p^{ctr1} = P_o$  και  $P_p^{ctr2} = 0$  η ιδανική ισχύς των παλμών ελέγχου. Άρα τα κέρδη των ενισχυτών στο MZI θα

υπολογίζονται  $G_1^{id} = \left[ 1 - \left(1 - \frac{1}{G_1}\right) \exp\left(-\frac{P_o A}{U_{sat}}\right) \right]^{-1} = \left\{ \left[ 1 - \left(1 - \frac{1}{G_1}\right) \right] \left[ \exp\left(-\frac{U_{in}}{U_{sat}}\right) \right] \right\}^{-1}$  (4) και



$G_2^{id} = [1 - (1 - \frac{1}{G_2}) \exp(0)] = G_2$ . Για τις παραμέτρους  $G_1$  και  $G_2$  γνωρίζω ότι

εξαρτώνται και από την ισχύ του σήματος ρολογιού γεγονός που θα μελετηθεί στη συνέχεια του κεφαλαίου. Όταν εισάγεται η αβεβαιότητα της φάσης τότε έχω για τα κέρδη των ενισχυτών

$$G_2' = [1 - (1 - \frac{1}{G_2}) \exp(-\frac{P_p^{ctr2}(\Delta\phi')A}{U_{sat}})]^{-1} \text{ με } P_{ctr}^2 = P_o \sin^2(\frac{\Delta\phi'}{2})$$

$$G_2' = [1 - (1 - \frac{1}{G_2}) \exp(-\frac{P_o \sin^2(\frac{\Delta\phi'}{2})A}{U_{sat}})]^{-1} = [1 - (1 - \frac{1}{G_2})]^{-1} [\exp(-\frac{P_o \sin^2(\frac{\Delta\phi'}{2})A}{U_{sat}})]^{-1} \rightarrow$$

$$G_2' = G_2^{id} [\exp(\frac{P_o \sin^2(\frac{\Delta\phi'}{2})A}{U_{sat}})] = G_2^{id} \{ \exp(\frac{U_{in}}{U_{sat}}) \}^{\sin^2(\frac{\Delta\phi'}{2})} \text{ . θέτοντας}$$

$$\lambda(\Delta\phi') = \lambda = \sin^2(\frac{\Delta\phi'}{2})$$

Καταλήγω στην έκφραση για το κέρδος  $G_2^{id} \{ \exp(\frac{U_{in}}{U_{sat}}) \}^\lambda$  το οποίο θα

χρησιμοποιηθεί αργότερα. Συγκεκριμένα θα έχω την γενική μορφή  $G_2' = G_2^{id} g(\Delta\phi')$

$$\text{με } g(\Delta\phi') = \exp[\frac{P_o A}{U_{sat}} \sin^2(\frac{\Delta\phi'}{2})].$$

Για τον άλλον ενισχυτή έχω για το κέρδος  $G_1'$  το οποίο πρέπει να εκφρασθεί σε μορφή όπως παραπάνω  $G_1' = G_1^{id} f(\Delta\phi')$ . Έχω

$$G_1' = [1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{P_o A}{U_{sat}} \cos^2(\frac{\Delta\phi'}{2}))]^{-1} \text{ (5) και } G_1^{id} = [1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{P_o A}{U_{sat}})]^{-1} \text{ (6)}$$

$$\text{Οπότε έχω για τη συνάρτηση } f(\Delta\phi') = \frac{G_1'}{G_1^{id}} = \left\{ \frac{[1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{P_o A}{U_{sat}})]}{1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{P_o A}{U_{sat}} \cos^2(\frac{\Delta\phi'}{2}))} \right\} \text{ (7).}$$

Στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσω τα συμπεράσματα και την ανάλυση που έχει γίνει στο κεφάλαιο 2 και τις σχέσεις που έχουν εξαχθεί για τον αναγεννητή. Συγκεκριμένα προσπαθώ να παρουσιάσω μια ανάλυση στην οποία θα εμφανίζεται η επίπτωση της μη ιδανικής συμπεριφοράς των PSK σημάτων λόγω της αβεβαιότητας φάσης στη φάση αλλά και την ισχύ του πεδίου στη θύρα μεταγωγής. Θα χρησιμοποιήσω τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου για την εξαγωγή σχέσεων με το MZI. Από την ανάλυση έχω

$$\text{για το πεδίο στην έξοδο S, όπου για τη φάση έχω } \phi_S = -\phi_1 + \text{Arg} \{ g(\Delta\phi) \} \text{ (2.6)}$$

Άρα θα βρω μια συνάρτηση διαταραχής για τη φάση στην έξοδο σε σχέση με την ιδανική συμπεριφορά. Για τη διαφορά φάσης έχω χρησιμοποιώντας τη θεωρία των SOAs δουλεύοντας στην περιοχή του κόρου.

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = -\frac{a}{2} \ln \left[ \frac{G_1'}{G_2'} \right] \xrightarrow[(7)]{(6)} \Delta\phi = -\frac{a}{2} \ln \left[ \frac{G_1^{id} f(\Delta\phi')}{G_2^{id} g(\Delta\phi')} \right] = -\frac{a}{2} \ln \left[ \frac{G_1^{id}}{G_2^{id}} \right] - \frac{a}{2} \ln \left[ \frac{f(\Delta\phi')}{g(\Delta\phi')} \right]$$

Όμως έχω για την ποσότητα  $\Delta\phi^{id} = -\frac{a}{2} \ln \left[ \frac{G_1^{id}}{G_2^{id}} \right]$  για την ιδανική συμπεριφορά του συστήματος, οπότε έχω τελικά  $\Delta\phi = \Delta\phi^{id} + h_1(\Delta\phi')$  όπου  $h_1(\Delta\phi')$  η συνάρτηση διαταραχής η οποία υπολογίζεται

$$h_1(\Delta\phi') = -\frac{a}{2} \ln \left[ \frac{f(\Delta\phi')}{g(\Delta\phi')} \right] \xrightarrow[(7)]{(6)} h_1(\Delta\phi') = -\frac{a}{2} \ln \left\{ \frac{\left[ \frac{1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{P_0 A}{U_{sat}})}{1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{P_0 A}{U_{sat}} \cos^2(\frac{\Delta\phi'}{2}))} \right]}{\exp[\frac{P_0 A}{U_{sat}} \sin^2(\frac{\Delta\phi'}{2})]} \right\}$$

$$\rightarrow h_1(\Delta\phi') = -\frac{a}{2} \ln \left\{ \frac{[1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{U_{in}}{U_{sat}})] \exp[\frac{U_{in}}{U_{sat}} \sin^2(\frac{\Delta\phi'}{2})]}{1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{U_{in}}{U_{sat}} \cos^2(\frac{\Delta\phi'}{2}))} \right\} \quad (8).$$

Για τον όρο της φάσης που εισάγει ο ένας μόνο ενισχυτής έχω με τον ίδιο ακριβώς τρόπο έχω για δύο διακριτές καταστάσεις του ενισχυτή

$$\phi_1 - \phi_1^{id} = -\frac{a}{2} \ln \left[ \frac{G_1'}{G_1^{id}} \right] \xrightarrow{(6)} \phi_1 - \phi_1^{id} = -\frac{a}{2} \ln \left[ \frac{G_1^{id} f(\Delta\phi')}{G_1^{id}} \right] = -\frac{a}{2} \ln [f(\Delta\phi')]$$

$$\rightarrow \phi_1 = \phi_1^{id} - \frac{a}{2} \ln [f(\Delta\phi')] = \phi_1^{id} - \frac{a}{2} \ln \left[ \frac{[1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{P_0 A}{U_{sat}})]}{1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{P_0 A}{U_{sat}} \cos^2(\frac{\Delta\phi'}{2}))} \right].$$

Συνεπώς προκύπτει μια άλλη συνάρτηση διαταραχής η οποία είναι

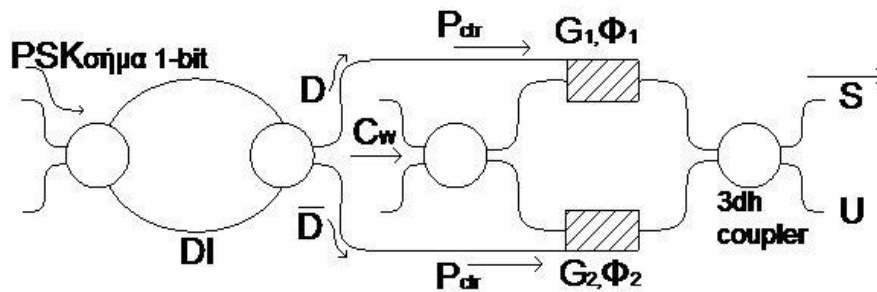
$$h_2(\Delta\phi') = -\frac{a}{2} \ln \left[ \frac{[1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{P_0 A}{U_{sat}})]}{1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{P_0 A}{U_{sat}} \cos^2(\frac{\Delta\phi'}{2}))} \right] \quad (9).$$

Άρα κατέληξα στις ζητούμενες συναρτήσεις διαταραχής για την επίδραση της αβεβαιότητας φάσης οι οποίες δίνονται με τον ακόλουθο τρόπο

$$\phi_1 = \phi_1^{id} + h_2(\Delta\phi') \quad (10) \quad \text{και} \quad \Delta\phi = \Delta\phi^{id} + h_1(\Delta\phi') \quad (11).$$

Άρα για να προσδιορίσω την τελική επίδραση στη φάση της θύρας μεταγωγής που με ενδιαφέρει καθώς εκεί γίνεται η διαδικασία αναγέννησης της πληροφορίας που έχει το φαινόμενο της μη επιθυμητής αβεβαιότητας φάσης στην είσοδο του αναγεννητή θα έχω

$$\begin{aligned} \Delta\phi_s &= \phi'_s - \phi_s^{id} \xrightarrow{(2.6)} \Delta\phi_s = -\phi_1 + \text{Arg}\{g(\Delta\phi)\} + \phi_1^{id} - \text{Arg}\{g(\Delta\phi^{id})\} \\ &\xrightarrow[\text{(11)}]{\text{(10)}} \Delta\phi_s = -\phi_1^{id} - h_2(\Delta\phi') + \text{Arg}\{g(\Delta\phi^{id} + h_1(\Delta\phi'))\} + \phi_1^{id} - \text{Arg}\{g(\Delta\phi^{id})\} \\ &\rightarrow \Delta\phi_s = -h_2(\Delta\phi') + \text{Arg}\left\{\frac{g(\Delta\phi^{id} + h_1(\Delta\phi'))}{g(\Delta\phi^{id})}\right\} \end{aligned}$$



Εικόνα 3.2.2 Ανάλυση συμβολόμετρου Mach-Zender για την επεξεργασία της επανάκτησης των χαρακτηριστικών

του σήματος στη θύρα μεταγωγής S

Στη σχέση αυτή έχω δύο παραμέτρους που καθορίζουν την τιμή της μεταβολής

της γωνίας της θύρας μεταγωγής  $\Delta\phi_s = \Delta\phi_s(\Delta\phi', \Delta\phi^{id})$  που οφείλεται στην αβεβαιότητα της φάσης των PSK σημάτων. Η πρώτη παράμετρος είναι τυχαία μεταβλητή η οποία ακολουθεί Gaussian κατανομή και περιγράφεται παρακάτω. Το φυσικό νόημα είναι προφανώς η διακύμανση της φάσης που εισάγουν διάφορα ανεπιθύμητα φαινόμενα. Η άλλη παράμετρος είναι η  $\Delta\phi^{id}$  η οποία εισήχθηκε στο κεφάλαιο 2 για την παρουσίαση του οπτικού κυκλώματος. Εξαρτάται άμεσα από την ισχύ του σήματος ρολογιού CW στο MZI και επηρεάζει προφανώς τα κέρδη και τις φάσεις που εισάγουν οι δύο ενισχυτές. Και οι δύο παράμετροι θα παρουσιαστούν αναλυτικά στη συνέχεια.

Στην σχέση που κατέληξα για την διαφορά φάσης  $\Delta\phi_s$  μπορώ να παρατηρήσω κάποια βασικά χαρακτηριστικά. Καταρχήν σε επίπεδο φυσικής υλοποίησης της οπτικής αναγέννησης στόχος μου είναι να επιτύχω έναν περιορισμό σε ενοχλητικά φαινόμενα τα οποία ενοποιούνται με όρους θορύβου στο σήμα μου. Σε επίπεδο μαθηματικής προσέγγισης οι διαταραχές-αβεβαιότητες στο αρχικό μου PSK σήμα απεικονίζονται από τη διασπορά

της πιθανοτικής κατανομής που ακολουθούν. Άρα στην περίπτωση του μοντέλου μου η διασπορά της Gaussian κατανομής για την αβεβαιότητα φάσης στο αρχικό σήμα είναι το μέγεθος το οποίο θα έχω ως στόχο στο τέλος να το περιορίσω. Με βάση το μέγεθος το οποίο έχω καταλήξει για τη διαφορά  $\Delta\phi_s = \phi_s^{id} - \phi_s^{noise}$  μπορώ να συμπεράνω από έναν απλό συλλογισμό ότι καθώς το μέγεθος της ιδανικής φάσης  $\phi_s^{id}$  δε διατηρεί στοχαστικά χαρακτήρα και άρα η διασπορά του μεγέθους του είναι 0 θα έχω τότε για το μέγεθος που κατέληξα:

$$Var(\Delta\phi_s) = Var(\phi_s^{id} - \phi_s^{noise}) = (-1)^2 Var(\phi_s^{noise}) = Var(\phi_s^{noise})$$

εφόσον είναι πιθανοτικά ανεξάρτητα μεγέθη και η μια παράμετρος είναι σταθερά.

Η σχέση αυτή δεν αποτελεί ένα αναλυτικό εργαλείο για τον υπολογισμό της διασποράς σε κάποιο μέγεθος, αλλά τη χρησιμοποιώ για να δείξω ότι η στατιστική επεξεργασία του μεγέθους  $\Delta\phi_s$  είναι

ικανό να αποτυπώσει το μέτρο για τον περιορισμό ή όχι της διασποράς στην έξοδο του αναγεννητή σε σχέση με την είσοδο. Στη συνέχεια παρατίθενται διαγράμματα που αποτυπώνουν τη στοχαστική συμπεριφορά της εξόδου του αναγεννητή με συγκεκριμένες παραμέτρους οι οποίες θα μεταβάλλονται κάθε φορά.

Θα προσδιορίσω τα διαγράμματα για την περίπτωση μου εφόσον μεταβάλλω αρχικά την παράμετρο  $\Delta\phi_{id}$  η οποία έρχεται να μεταβάλλει σε κάθε περίπτωση τη βασική παράμετρο της ενέργειας του παλμού ελέγχου που χρησιμοποιώ στους ενισχυτές. Συγκεκριμένα από την ανάλυση που έχω προχωρήσει έχω καταλήξει στη βασική έκφραση

$$\Delta\phi_{id} = -\frac{a}{2} \ln\left[\frac{G_1^{id}}{G_2^{id}}\right] = -\frac{a}{2} \ln\left\{\frac{[1 - (1 - \frac{1}{G_1})][\exp(-\frac{U_{in}}{U_{sat}})]^{-1}}{G_2}\right\}$$

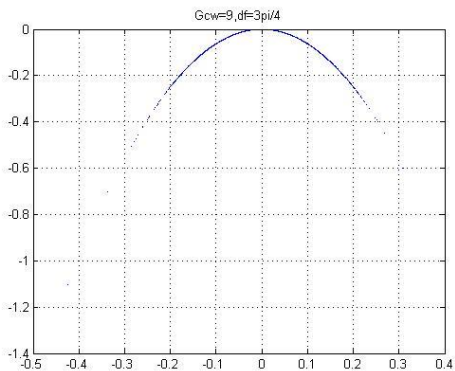
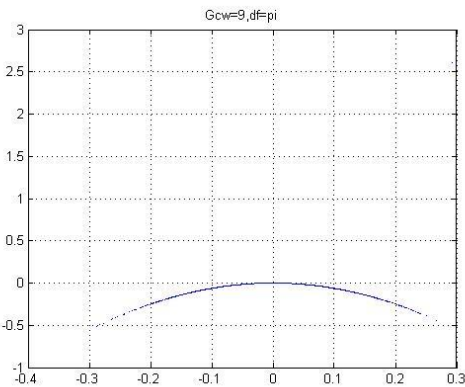
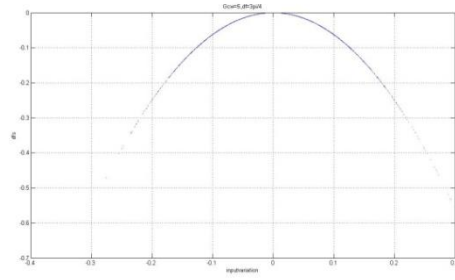
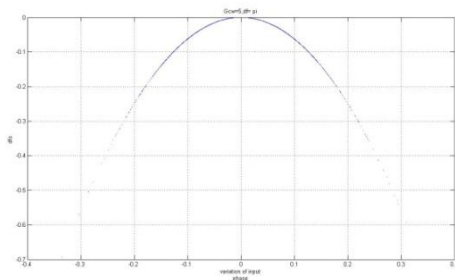
$$\xrightarrow{\frac{G_1, G_2}{G_{cw}}} \Delta\phi_{id} = -\frac{a}{2} \ln\left\{\frac{[1 - (1 - \frac{1}{G_{cw}})][\exp(-\frac{U_{in}}{U_{sat}})]^{-1}}{G_{cw}}\right\} \quad (3.2.2)$$

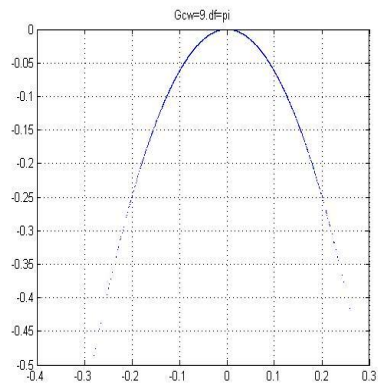
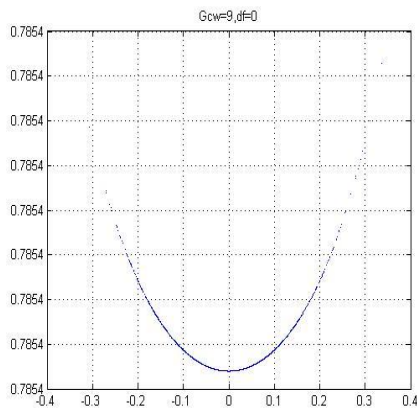
Στην προηγούμενη σχέση βλέπω πως μπορώ παραμετροποιώντας το λόγο  $\frac{U_{in}}{U_{sat}}$  και το κέρδος  $G_{cw}$  μπορώ να δημιουργήσω μια οικογένεια καμπυλών για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς της διασποράς στην έξοδο του αναγεννητή αλλάζοντας κάθε φορά είτε το κέρδος των ενισχυτών με την παρουσία σήματος cw, είτε ελέγχοντας και μεταβάλλοντας το λόγο της ενέργειας των παλμών ελέγχου. Είναι οι βασικές παράμετροι που έρχονται να απεικονίσουν και να με οδηγήσουν με όρους προβλήματος στην ανεύρεση βέλτιστης επιλογής χαρακτηριστικών για τον αναγεννητή ώστε να επιτύχω στο μεγαλύτερο βαθμό που γίνεται την ανίχνευση των φαινομένων αβεβαιότητας στην έξοδο μου.

Στα σχήματα που ακολουθούν, απεικονίζεται η γραφική αναπαράσταση της διασποράς της θύρας μεταγωγής S για διάφορες τιμές του κέρδους  $G_{cw}$ , καθώς μεταβάλλεται η ενέργεια του εισερχόμενου παλμού ελέγχου. Η ισχύς  $P_{cw}$  του σήματος εισόδου που αντιστοιχεί σε κάθε τιμή του κέρδους  $G_{cw}$  υπολογίζεται και παραμετροποιείται σε επόμενη παράγραφο.

Στην προσπάθεια που έκανα αποτύπωσα τη διερεύνηση δυνατοτήτων αναγέννησης μέσα από τρεις ομάδες-οικογένειες διαγραμμάτων, καμπύλων. Η πρώτη αναφέρεται στην αναλυτική παρουσίαση της συμπεριφοράς της εξόδου στην οποία είναι εμφανή τα στοιχεία της διασποράς των τιμών της φάσης της πεδιακής κατανομής για τη θύρα μεταγωγής, παράλληλα με το εύρος της διακύμανσης που μπορεί να εμφανισθεί. Η δεύτερη οικογένεια έρχεται πιο στοχευόμενα να αναδείξει την περιοχή κανονικής λειτουργίας του αναγεννητή σε μια περιοχή που έχει φυσικό νόημα με όρους λειτουργίας της διάταξης σαν αναγεννητής και στην οποία είναι λογικό να εμφανίζεται μια μεγαλύτερη δυνατότητα να περιορίσω το θόρυβο της εισόδου στην περίπτωση αυτή. Η παρουσίαση αυτής της κλίμακας λειτουργίας και η εύρεση της περιοχής κανονικής λειτουργίας προσδιορίζεται γύρω από την τιμή της

διαφοράς φάσης  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$  που αναφέρεται στη φάση που εισάγουν οι SOAs στους δύο βραχίονες. Η τρίτη καμπύλη ενοποιεί μια σειρά συμπερασμάτων και εμφανίζει σε κάθε περιοχή λειτουργίας του αναγεννητή την επίδραση που έχουν τα φαινόμενα αβεβαιότητας στην είσοδο στη φάση της εξόδου. Παράλληλα δίνεται μια ποσοτική εποπτεία στη συμπεριφορά του αναγεννητή σε σχέση με το βαθμό διασποράς του θορύβου στην είσοδο και συγκεκριμένα μεταβάλλοντας τη διασπορά της Gaussian κατανομής που έχει το στοχαστικό μοντέλο στην είσοδο και μετρώντας παράλληλα τη διασπορά της εξόδου.





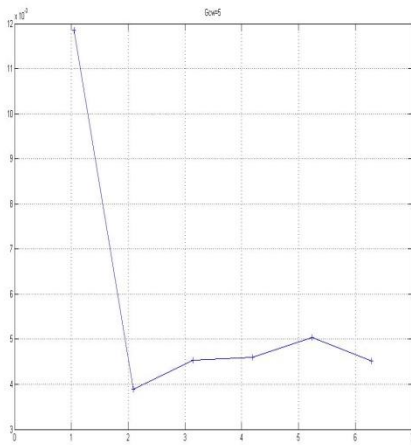
Από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις μπορώ να εξάγω μια σειρά από συμπεράσματα τα οποία εξάγονται από τα ενδεικτικά αυτά διαγράμματα.

- σε όλα τα διαγράμματα για τις τιμές της διαφοράς φάσης  $\Delta\varphi$  η έξοδος ακολουθεί gaussian κατανομή, γεγονός το οποίο είναι απόλυτα φυσιολογικό στο βαθμό που η μοναδική παράμετρος του προβλήματος είναι μια στοχαστική μεταβλητή που ακολουθεί την ίδια πιθανοτική κατανομή.

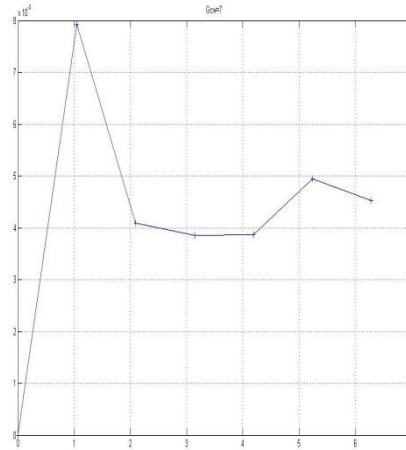
- σε όλες τις περιπτώσεις μου εκτός από την περίπτωση όπου  $\Delta\varphi=0$  οι τιμές που παίρνει η παράμετρος  $\Delta\varphi_s$  κινούνται σε ένα εύρος-πεδίο τιμών  $[-\pi/6, \pi/6]$ , γεγονός που υποδηλώνει το μέτρο της αβεβαιότητας που εισάγεται στην έξοδο σε σχέση με την ιδανική κατάσταση του συστήματος. Στην περίπτωση όπου  $\Delta\varphi=0$ , έχω σε απόλυτες τιμές μεταβολές που κινούνται στην περιοχή κοντά στο  $\pi/4$  μια τιμή που βρίσκεται εκτός ορίων φυσικής υπόστασης καθώς αλλοιώνει και οριακά ανατρέπει την πληροφορία της φάσης. Παράλληλα στην περίπτωση μου το μόνο μέτρο που έχει σημασία στα πλαίσια μελέτης του φαινομένου της αναγέννησης είναι η διασπορά του μεγέθους  $\Delta\varphi_s$  και συνεπώς η μέση τιμή των μεγεθών δεν με απασχολούν στα πλαίσια του προβλήματος μου.

- παρατηρώ εποπτικά ότι εμφανίζεται στην περιοχή κανονικής λειτουργίας, για την οποία ισχύει η εμφάνιση της μικρότερης διακύμανσης της εξόδου στην περιοχή όπου έχω  $\Delta\varphi=\pi$  γεγονός που αποτυπώνεται και στη μικρότερη διακύμανση στην έξοδο όπως θα φανεί πιο καθαρά και σε επόμενα διαγράμματα.

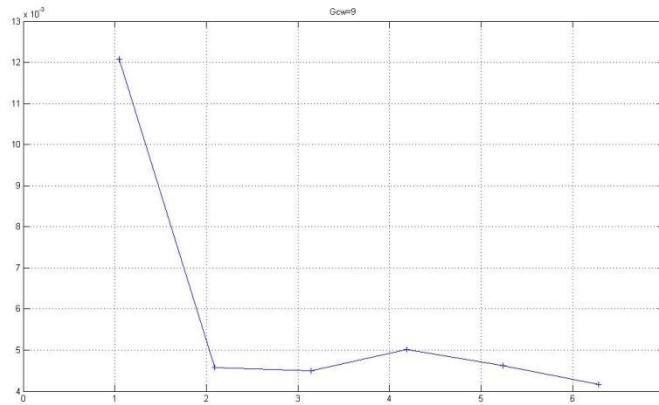
- η επίδραση που έχει το κέρδος  $G_{cw}$  των ενισχυτών στη διαδικασία της αναγέννησης αποτυπώνεται παρακάτω με πιο εμφανή τρόπο, στα διαγράμματα που ακολουθούν.



**G<sub>cw</sub> = 5**

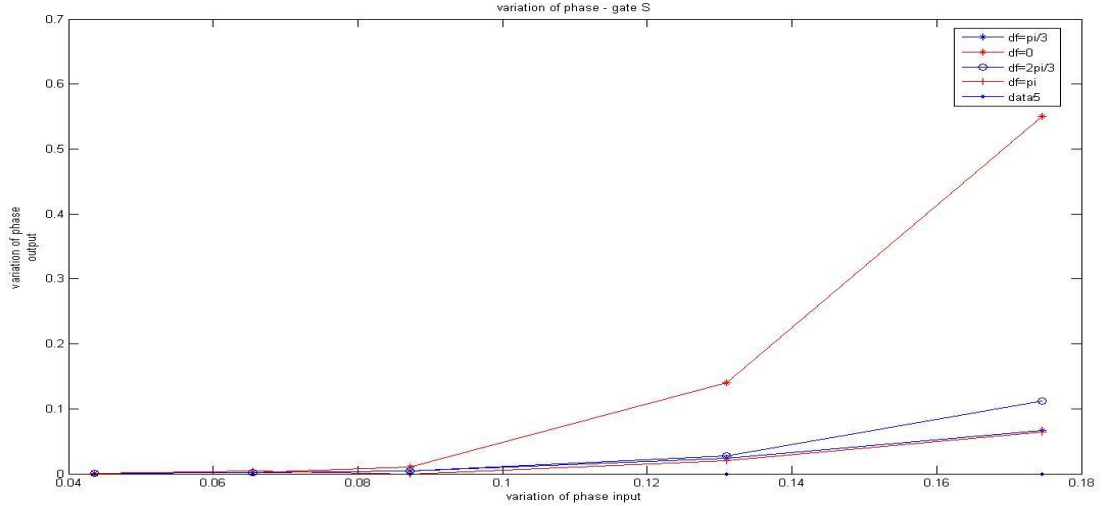


**G<sub>cw</sub> = 7**



**G<sub>cw</sub> = 9**

Στα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζεται η εξάρτηση της διακύμανσης εξόδου από την τιμή του κέρδους του SOA. Ο οριζόντιος άξονας δείχνει τις τιμές που έχει η τιμή της παραμέτρου  $\Delta\varphi$  που όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω υποκρύπτει την παράμετρο της ενέργειας των παλμών ελέγχου οι οποίοι είναι αυτοί που οδηγούν στηνωπεριοχή του κόρου τους ενισχυτές. Μια παρατήρηση που προκύπτει είναι η διάκριση της συμπεριφοράς στην περιοχή όπου  $\Delta\varphi=0$  ή  $\Delta\varphi=\pi/3$  περιοχές που δεν έχουν υπόσταση με όρους οπτικού κυκλώματος αναγεννητή, αλλά αποτελούν σημεία μαθηματικής αναφοράς. Συγκεκριμένα η περίπτωση στην οποία έχω  $\Delta\varphi=0$  προκύπτει για μη φυσικά αποδεκτές τιμές(π.χ  $G_{cw}=1$  που αντιτίθενται στην έννοια της ενίσχυσης), είτε στην τιμή για το  $G_{cw}$  που δεν ικανοποιεί την οριακή συνθήκη για την ολίσθηση φάσης( $G_{cw} = \exp(\frac{2\pi}{a})$ ).



Εικόνα 3.2.4) παρουσίαση της οικογένειας καμπυλών για την επίδραση του μέτρου της διασποράς εισόδου στην αβεβαιότητα της φάση στην έξοδο.

### 3.2.3) Αβεβαιότητα πλάτους στη θύρα μεταγωγής S

Για τη μαθηματική μοντελοποίηση της οπτικής ισχύος στη θύρα μεταγωγής όταν έχω αβεβαιότητα φάσης στο PSK σήμα εισόδου. Είναι για τη θύρα S  $P_S = \left| \overline{E^S} \right|^2$  από τη θεωρητική ανάλυση του κεφαλαίου 2 για το πεδίο έχω

$$\overline{E^S} = E^S e^{-i(\omega t + \phi_s)} \quad \text{όπου για το πλάτος του κύματος έχω} \quad E^S = \frac{1}{2} E_{in} \sqrt{G_2} |g(\Delta\phi)| \quad \text{όπου για}$$

τη συνάρτηση  $g(\Delta\phi) = 1 - e^{i\Delta\phi} + \sum_{v=1}^{+\infty} \frac{(-\frac{\Delta\phi}{a})^v}{v!}$ . Υπολογίζοντας την ισχύ έχω

$$P_S = \left| \overline{E^S} \right|^2 = \overline{E^S} \overline{\overline{E^S}} = \frac{1}{2} E_{in}^2 G_2 |g(\Delta\phi)|^2 \quad \text{όπου για την ποσότητα} |g(\Delta\phi)|^2 \quad \text{έχω}$$

$$|g(\Delta\phi)|^2 = g(\Delta\phi) \overline{g(\Delta\phi)} = (x - z)(x - \bar{z}) = x^2 - xz - x\bar{z} + |z|^2$$

$$\text{με} \quad x = 1 + \sum_{v=1}^{+\infty} \frac{(-\frac{\Delta\phi}{a})^v}{v!} \in \mathbb{R} \quad \text{και} \quad z = e^{i\Delta\phi}. \quad \text{Από τον προηγούμενο τύπο έχω λοιπόν}$$

$$|g(\Delta\phi)|^2 = \left(1 + \sum_{v=1}^{+\infty} \frac{(-\frac{\Delta\phi}{a})^v}{v!}\right)^2 + 1 - 2\left(1 + \sum_{v=1}^{+\infty} \frac{(-\frac{\Delta\phi}{a})^v}{v!}\right) \cos(\Delta\phi). \quad \text{Οπότε για την ισχύ έχω}$$

$$P_S = \frac{1}{4} E_{in}^2 G_2 (\lambda^2 + 1 - 2\lambda \cos \Delta\phi) \quad \text{με} \quad \lambda = \left(1 + \sum_{v=1}^{+\infty} \frac{(-\frac{\Delta\phi}{a})^v}{v!}\right) \in \mathbb{R}. \quad \text{Η σχέση αυτή δίνει την}$$

ισχύ στην έξοδο την οποία με απασχολεί η επεξεργασία της και με βάση τα προηγούμενα στοιχεία θα εισάγω την επίδραση της διακύμανση φάσης.

$$\text{Έχω για την παράμετρο} \quad \Delta\phi \quad \text{από την προηγούμενη σχέση} \quad \Delta\phi = \Delta\phi^{id} + h_1(\Delta\phi^i).$$



$\cos(\Delta\phi) = \cos(\Delta\phi^{id} + h_1(\Delta\phi')) = \cos(\Delta\phi^{id})\cos(h_1(\Delta\phi')) - \sin(\Delta\phi^{id})\sin(h_1(\Delta\phi'))$  για τον

όρο που εισάγεται στη σχέση της ισχύος. Εάν μελετηθεί η συνάρτηση  $h_1(\Delta\phi')$  μπορώ να υπολογίσω ότι το πεδίο τιμών της βρίσκεται σε τέτοιο διάστημα στο οποίο χωρίς τη βλάβη της γενικότητας προσεγγίζω  $\sin(h_1(\Delta\phi')) \rightarrow 0$ . Επομένως

$$\cos(\Delta\phi) = \cos(\Delta\phi^{id})\cos(h_1(\Delta\phi'))$$

Άρα για την ισχύ στη δυναμική κατάσταση του συστήματος όπου επικρατούν φαινόμενα διαταραχής διακύμανσης φάσης έχω

$$P'_S = \frac{1}{4} E_{in}^2 G_2 [\lambda^2 + 1 - 2\lambda \cos(\Delta\phi^{id}) \cos(h_1(\Delta\phi'))]$$

οπότε για να υπολογίσω τη διαταραχή που εισάγει στην οπτική ισχύ η αβεβαιότητα φάσης

$$\Delta P_{out} = \Delta P_S = P'_S - P_S^{id} = -\frac{1}{4} E_{in}^2 G_2 \{-2\lambda \cos(\Delta\phi^{id}) + 2\lambda \cos(\Delta\phi^{id}) \cos[h_1(\Delta\phi')]\} \rightarrow$$

$$\Delta P_{out} = -\frac{1}{4} E_{in}^2 G_2 2\lambda \cos(\Delta\phi^{id}) \{\cos[h_1(\Delta\phi')] - 1\} = -\frac{1}{4} E_{in}^2 G_2 2\lambda \cos(\Delta\phi^{id}) \{-2\sin^2[\frac{1}{2}h_1(\Delta\phi')]\} \rightarrow$$

$$\Delta P_{out} = E_{in}^2 G_2 \lambda \cos(\Delta\phi^{id}) \sin^2[\frac{1}{2}h_1(\Delta\phi')]$$

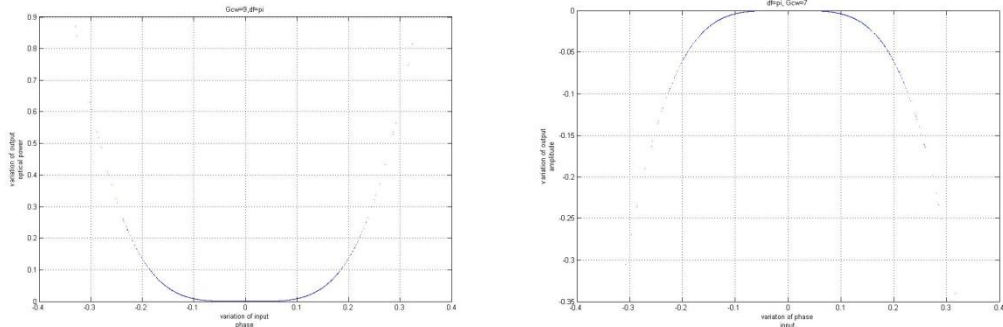
οπότε για να έχω μια ποιοτική εικόνα του φαινομένου της επίδρασης στην ισχύ εξόδου αρκεί να έχω ένα μέτρο για τη σχετική μεταβολή του μεγέθους

$$\frac{\Delta P_S}{P_S^{id}} = \frac{E_{in}^2 G_2 \lambda \cos(\Delta\phi^{id}) \sin^2[\frac{1}{2}h_1(\Delta\phi')]}{\frac{1}{4} E_{in}^2 G_2 (\lambda^2 + 1 - 2\lambda \cos(\Delta\phi^{id}))} = \frac{4\lambda \cos(\Delta\phi^{id}) \sin^2[\frac{1}{2}h_1(\Delta\phi')]}{(\lambda^2 + 1 - 2\lambda \cos(\Delta\phi^{id}))}$$

Στην προσπάθεια διαγραμματικής απεικόνισης για να αναδειχθεί η δυνατότητα που υπάρχει στην επανάκτηση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών για το σήμα μου στην έξοδο της αναγεννητικής διάταξης θα παραβάλλω συγκεκριμένα διαγράμματα σε αναλογία με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Πιο λεπτομερώς θα παρουσιάσω τη συμπεριφορά που εμφανίζει ο όρος της σχετικής μεταβολής για την ισχύ της εξόδου της

θύρας μεταγωγής  $\frac{\Delta P_S}{P_S^{id}}$  ένα μέγεθος το οποίο ουσιαστικά αντιπροσωπεύει τη διακύμανση

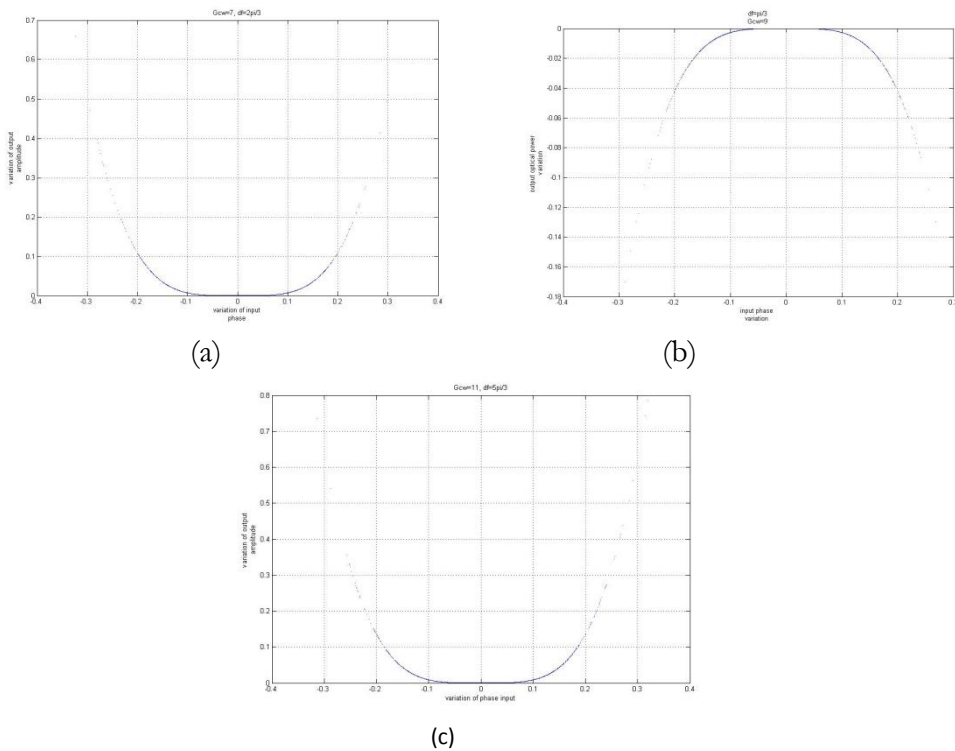
που εμφανίζεται στην ισχύ της εξόδου και κατ'επέκταση του πλάτους της πεδιακής κατανομής στη θύρα μεταγωγής S του αναγεννητή. Από απλές αρχές που διέπουν τη θεωρία πιθανοτήτων μπορώ να κατανοήσω πως η στοχαστική κατανομή του μεγέθους της σχετικής μεταβολής απεικονίζει ποιοτικά την τάση που ακολουθεί και η ισχύ της θύρας μεταγωγής. Στη συνέχεια θα παρουσιασθούν διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν τα ίδια χαρακτηριστικά αναζητήθηκαν και στην προηγούμενη ενότητα.



Εικόνα3.2.5) παρουσίαση μεταβολής οπτικής ισχύος για  $G_{cw}=9, G_{cw}=7$  για την περίπτωση όπου  $\Delta\varphi_{ideal}=\pi$ .

Στο σημείο αυτό παρατηρώ τη συμπεριφορά της οπτικής ισχύος εξόδου για την κατανομή της αβεβαιότητας φάσης που ακολουθεί Gaussian κατανομή. Παρατηρώ πως εμφανίζει παραβολική προσέγγιση η μεταβολή της ισχύος ως προς την παραμόρφωση που εισάγει η αβεβαιότητα φάσης στην είσοδο για τους PSK παλμούς. Ας σημειωθεί ότι πρόκειται για σχετική μεταβολή στο μέγεθος της ισχύος εξόδου και για το λόγο αυτό οι τιμές που λαμβάνει η συνάρτηση είναι στην περιοχή  $[0, 0.18]$ . ένα στοιχείο που εποπτικά ίσως να ξενίζει είναι η αλλαγή πρόσημου που εμφανίζεται στη μεταβολή του μεγέθους μου για διαφορετική τιμή του κέρδους του ενισχυτή.

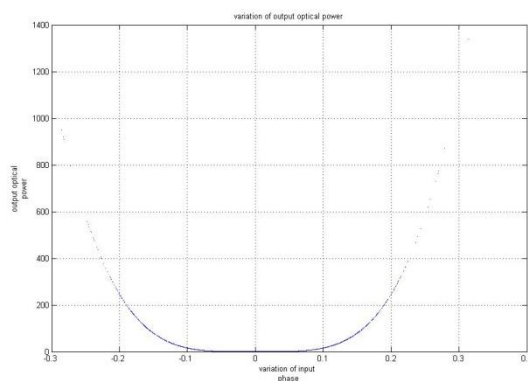
Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα μεταβολής της ισχύος εξόδου σε διαφορετικές τιμές της παραμέτρου  $\Delta\varphi_{ideal}$  που όπως έχει ήδη τονισθεί αντιπροσωπεύουν διαφορετικές τιμές για την ενέργεια των παλμών εισόδου στους ενισχυτές, αλλά και για διάφορες τιμές του κέρδους των SOAs.



Εικόνα 3.2.6) διαγραμματική απεικόνιση οπτικής ισχύος εξόδου για τις παρακάτω περιπτώσεις: (a)  $G_{cw}=11, \Delta\varphi_{ideal}=\pi/3$  (b)  $G_{cw}=9, \Delta\varphi_{ideal}=\pi/3$  (c)  $G_{cw}=9, \Delta\varphi_{ideal}=\pi/3$

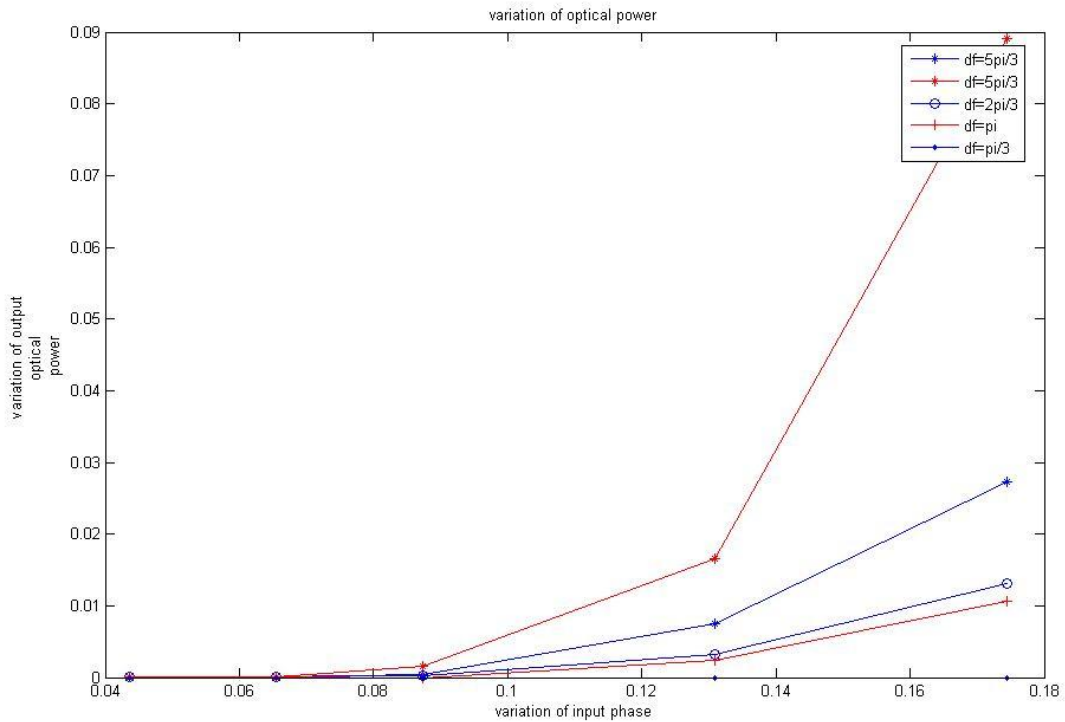
Στα διαγράμματα αυτά είναι πιο εμφανής η διαφορετική απόκριση που εμφανίζεται στην ισχύ της θύρας μεταγωγής S εάν μεταβληθούν τα μεγέθη του κέρδους  $G_{ew}$  για τους SOAs αλλά και η περιοχή λειτουργίας της αναγεννητικής διάταξης που ορίζει η τιμή της παραμέτρου  $\Delta\varphi_{ideal}$  της μοντελοποίησης. Ένα γενικό συμπέρασμα που εξάγεται από την απλή εποπτεία των διαγραμμάτων αυτών βρίσκεται στο γεγονός της μεγάλης αύξησης που εμφανίζει η διαταραχή στην έξοδο η ισχύς σε περιοχές λειτουργίας που ορίζονται για τιμές του  $\Delta\varphi_{ideal}$  στις περιοχές του  $\pi/3$  και  $5\pi/3$ . Παράλληλα παρατηρώ πως καθώς συγκλίνουν οι τιμές στην περιοχή του  $\pi$  υπάρχει μια τάση να περιορισθεί η διακύμανση της ισχύος στην έξοδο. Τέλος εάν κρίνω από το πεδίο τιμών για τη διαταραχή του πλάτους του σήματος που παίρνω στην έξοδο του αναγεννητή συμπεραίνω πως η επίδραση της αβεβαιότητας φάσης έρχεται να μου μεταβάλλει σε μικρό βαθμό το πλάτος των παλμών στην έξοδο σε αντιπαράβολή με το βαθμό που επιδρούν στη φάση της εξόδου.

Στη συνέχεια θα παρουσιάσω ένα διάγραμμα για την οριακή περίπτωση όπου έχω  $\Delta\varphi_{ideal}=0$ , που όπως και στη μελέτη της επίδρασης στη φάση στην έξοδο παρατηρώ πως οδηγεί σε αποτελέσματα τα οποία δεν είναι φυσικά αποδεκτά. Η μαθηματική προσομοίωση οδηγεί σε αποτελέσματα για τη σχετική μεταβολή της φάσης σε επίπεδα της τάξης αρκετών εκατοντάδων που ουσιαστικά καταλήγει σε εξαφάνιση της ισχύος στην έξοδο!. Στο σημείο αυτό θα είχε ένα νόημα να επιστρέψει κάποιος και στο κεφάλαιο 2 για να διαπιστώσει την ασυνέχεια που εμφανιζόταν στη συμπεριφορά της συνάρτησης  $g(\Delta\varphi)$  στο σημείο  $\Delta\varphi=0$  η οποία είχε αναλυθεί πιο λεπτομερώς.



Εικόνα 3.2.7) συμπεριφορά της ισχύος στην έξοδο για την περιοχή λειτουργίας  $\Delta\varphi=0$ .

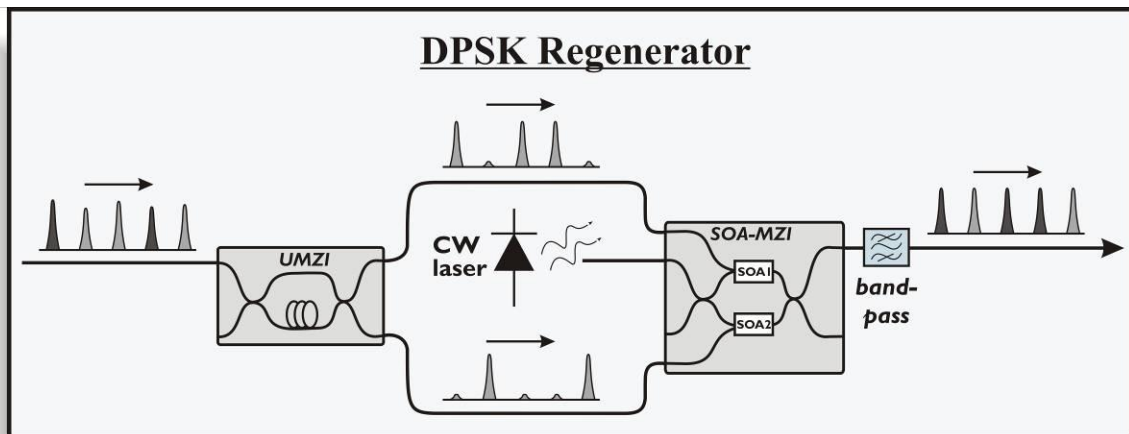
Στο τέλος του κεφαλαίου θα παρουσιασθεί η οικογένεια καμπυλών για διαφορετικές περιοχές λειτουργίας της αναγεννητικής διάταξης σε σχέση με την ένταση της παραμόρφωσης λόγω φαινομένων θορύβου που ενυπάρχει στο αρχικό μου σήμα στην είσοδο. Το συμπέρασμα που εξάγεται απευθείας είναι η περιοχή κανονικής λειτουργίας του οπτικού κυκλώματος αλλά και η δυνατότητα που δίνεται να έχω ποιοτική επανάκτηση στην πληροφορία μου για συγκεκριμένες τιμές αλλοίωσης στο αρχικό μου σήμα που θέλω να αναγεννήσω. Μια βασική παρατήρηση είναι η αναγωγή σε ποσοτικό επίπεδο που είναι απαραίτητη να γίνει από τη μεταβολή ισχύος στα διαγράμματα μου στο πλάτος εάν ληφθεί υπόψη η θεμελιώδη σχέση για την ισχύ  $P = \|\vec{E}\|^2$ .



Εικόνα 3.2.8) μεταβολή της ισχύος-πλάτους στην έξοδο σε σχέση με το μέτρο της αβεβαιότητας στην είσοδο για διάφορες τιμές της τυπικής απόκλισης θορύβου στην είσοδο.

3.3) θεωρητική ανάλυση σήματος το οποίο έχει διακύμανση πλάτους.

3.3.1) ανάλυση για την επίδραση της αβεβαιότητας του πλάτους εισόδου στην ανισορροπία του συστήματος



Η γενική περίπτωση των PSK παλμών περιλαμβάνει ανισοϋψία και διακύμανση στη φάση. Συγκεκριμένα θεωρώντας το σήμα PSK στην είσοδο του ακολουθητή DI είναι  $\widetilde{E}_n^{in} = (A_0 + \Delta A_n) \exp(i\phi_n + \Delta\phi_n)$ . Στην προηγούμενη ενότητα εξέτασα την επίδραση της αβεβαιότητας φάσης και τώρα θεωρώντας ότι εμφανίζεται μόνο ανισοϋψία θα έχω στην είσοδο του ακολουθητή DI

$$\widetilde{E}_n^{in} = (A_0 + \Delta A_n) \exp(i\phi_0(\tau) - (\frac{\tau^2}{T_0})) \exp(i\phi_n) \quad \text{όπου τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της}$$

περιβάλλουσας του παλμού που περιγράφονται από τον όρο  $\exp(i\phi_0(\tau) - (\frac{\tau^2}{T_0}))$  έχουν

ερμηνευθεί στην προηγούμενη ενότητα. Με μια στοιχειώδη επεξεργασία του DI για την εξαγωγή των σχέσεων έχω για δύο διαδοχικούς παλμούς σήματος PSK παραλείποντας την περιβάλλουσα

$$\widetilde{E}_n^{up} = \widetilde{E}_n + \widetilde{E}_{n+1} = \left( \frac{A_n}{\sqrt{2}} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \right) + \left( \frac{A_{n+1}}{\sqrt{2}} e^{-i\frac{\pi}{2}} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-i\frac{\pi}{2}} \right) \rightarrow$$

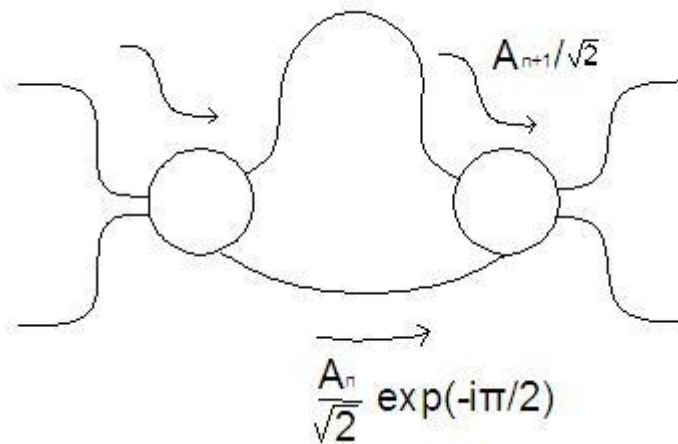
$$\widetilde{E}_n^{up} = \left( \frac{A_n}{2} + \frac{A_{n+1}}{2} e^{-i\pi} \right) = \left( \frac{A_n}{2} - \frac{A_{n+1}}{2} \right)$$

Άρα στη γενική περίπτωση έχω  $\widetilde{E}_n^{up} = \frac{1}{2} (\widetilde{E}_n^{in} - \widetilde{E}_{n+1}^{in})$  (3.3.1) για τη μία έξοδο του

ακολουθητή που καταλήγει στον πάνω οπτικό βραχίονα του MZI. Ομοίως για την άλλη έξοδο έχω από την υπέρθεση των διαδοχικών παλμών

$$\widetilde{E}_n^{low} = \widetilde{E}_n + \widetilde{E}_{n+1} = \left( \frac{E_n}{\sqrt{2}} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \right) e^{-i\frac{\pi}{2}} + \left( \frac{E_{n+1}}{\sqrt{2}} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \right) e^{-i\pi} e^{-i\frac{\pi}{2}} = \frac{E_n}{2} e^{-i\frac{\pi}{2}} + \frac{E_{n+1}}{2} e^{-i\frac{3\pi}{2}} \rightarrow$$

$$E_n^{low} = \frac{i}{2} (E_n^{in} - E_{n+1}^{in})$$



Εικόνα 3.3.1) παρουσίαση ανάλυσης του ακολουθητή DI για την αναλυτική διερεύνηση του

Στη συνέχεια θα εισάγω τις αβεβαιότητες του πλάτους με σκοπό να παραμετροποιήσω την ισχύ των παλμών ελέγχου που οδηγούνται στο ΜΖΙ.

Στην έξοδο με απασχολεί η ισχύς των παλμών ελέγχου καθώς είναι το όχημα στο οποίο μεταφέρεται η πληροφορία.

$$E_n^{up} = \frac{1}{2} \{ (A_0 + \Delta A_n) \exp(i\phi_n) - (A_0 + \Delta A_{n+1}) \exp(i\phi_{n+1}) \} \exp[i\phi_0(\tau) - (\frac{\tau}{T_0})^2]$$

$$\rightarrow E_n^{up} = \frac{1}{2} \{ (A_0 + \Delta A_n) - (A_0 + \Delta A_{n+1}) \exp[i(\phi_n - \phi_{n+1})] \} \exp[i\phi_0(\tau) - (\frac{\tau}{T_0})^2] \exp(i\phi_n)$$

είναι η έκφραση στο πεδίο του χρόνου για το κύμα, οπότε για την ισχύ παραλείποντας τον όρο της χρονικής περιβάλλουσας και κάνοντας χρήση των στοιχείων της διαμόρφωσης PSK, δηλαδή ότι  $\phi_n = \{0, \pi\}$  και άρα  $s_n = \exp[i(\phi_n - \phi_{n+1})] = \{+1, -1\}$

έχω από τη γενική εξίσωση

$$|E_n^{up}|^2 = A_0^2 \cos(\Delta\psi_n)(1 + \hat{\Delta}A_n) + \frac{1}{4} \Delta A_n^2 + \frac{1}{4} \Delta A_{n+1}^2 + \frac{1}{2} \Delta A_n \Delta A_{n+1} \quad \text{όπου οι παράμετροι}$$

$\Delta\psi_n$ ,  $\hat{\Delta}A_n$  εκφράζουν την αβεβαιότητα φάσης και πλάτους αντίστοιχα. Έχω  $\Delta\psi_n = \frac{\Delta\phi_n - \Delta\phi_{n+1}}{2}$  που στην περίπτωση μου είναι  $\Delta\psi_n = 0$  καθώς  $\Delta\phi_n = \Delta\phi_{n+1} = 0$  και η

κανονικοποιημένη αβεβαιότητα πλάτους  $\hat{\Delta}A_n = \frac{\hat{\Delta}A_n + \Delta A_{n+1}}{A_0}$ . Οπότε για την ισχύ έχω

$$|E_n^{up}|^2 = A_0^2 (1 + \hat{\Delta}A_n) + \frac{1}{4} \Delta A_n^2 + \frac{1}{4} \Delta A_{n+1}^2 + \frac{1}{2} \Delta A_n \Delta A_{n+1} \quad (3.3.3)$$

Για το κύμα στον κάτω οπτικό βραχίονα θα έχω  $E_n^{low} = \frac{i}{2} (E_n^{in} - E_{n+1}^{in})$  οπότε για την ισχύ

$$|E_n^{low}|^2 = \frac{1}{4} \Delta A_n^2 + \frac{1}{4} \Delta A_{n+1}^2 - \frac{1}{2} \Delta A_n \Delta A_{n+1} \quad \text{με την ίδια ακριβώς τεχνική που ανέπτυξα}$$

παραπάνω. (3.3.4)

Ακολουθώ το γενικό μοντέλο ανάλυσης διαταραχής το οποίο ακολούθησα και για την αβεβαιότητα φάσης. Συγκεκριμένα μελετώ την επίδραση της ανισοϋψίας  $\hat{\Delta}A_n$  στα χαρακτηριστικά του κύματος της θύρας μεταγωγής S σε σύγκριση με την ιδανική περίπτωση όπου  $\hat{\Delta}A_n = 0$ . Στη συνέχεια μελετώ τη συμπεριφορά της διαταραχής σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος σήματος ρολογιού (CW) που υπεισέρχεται στην ανάλυση μου. Έχω λοιπόν για την ισχύ των παλμών ελέγχου

$$|E_n^{up}|^2 = A_0^2 (1 + \hat{\Delta}A_n) + \frac{1}{4} \Delta A_n^2 + \frac{1}{4} \Delta A_{n+1}^2 + \frac{1}{2} \Delta A_n \Delta A_{n+1} \quad \text{από την (3.3.3) η οποία}$$

$$\text{γράφεται} \quad |E_n^{up}|^2 = A_0^2 + A_0^2 \hat{\Delta}A_n + \frac{1}{4} A_0^2 \left( \frac{\Delta A_n + \Delta A_{n+1}}{A_0} \right) = A_0^2 + A_0^2 \left[ \hat{\Delta}A_n + \frac{1}{4} (\hat{\Delta}A_n)^2 \right] \quad \text{άρα}$$

ο όρος διαταραχής περιγράφεται  $E(\hat{\Delta}A_n) = \hat{\Delta}A_n + \frac{1}{4} (\hat{\Delta}A_n)^2$ . Για τον άλλο παλμό θα

$$\text{έχω} \quad |\widetilde{E}_n^{low}|^2 = \frac{1}{4} (\Delta A_n - \Delta A_{n+1})^2 \quad \text{. Στην ιδανική περίπτωση προφανώς θα είχα}$$

$$|\widetilde{E}_n^{up}|^2 = A_0^2 \quad \text{και} \quad |\widetilde{E}_n^{low}|^2 = 0 \quad \text{το οποίο επαληθεύει προφανώς και την αρχή της}$$

συμπληρωματικότητας στην έξοδο του DI(έξοδοι  $D$ ,  $\bar{D}$ ). Παρατηρώ επίσης σε παραβολή με το μοντέλο της αβεβαιότητας φάσης στην οποία διατηρούνταν το ποσό της ισχύος των PSK παλμών καθώς καταμεριζόταν η ιδανική ισχύς  $P_0$  σε δύο ποσότητες  $P_0 \cos^2(\frac{\Delta\phi'}{2})$  και  $P_0 \sin^2(\frac{\Delta\phi'}{2})$ . Αντιθέτως στην περίπτωση της ανισοϋψίας από τις παραπάνω εκφράσεις φαίνεται ότι μπορεί να υπάρξει ενδεχόμενο να προκύψει  $P \geq P_0$  ή  $P \leq P_0$  για το άθροισμα των ισχύων των παλμών ελέγχου. Το γεγονός αυτό ανατροπής μιας παραμέτρου συμμετρίας στην ισχύ ποιοτικά μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η επίδραση του φαινομένου της ανισοϋψίας έχει πιο ισχυρά αποτελέσματα στο πως μεταφέρεται η αβεβαιότητα στην έξοδο.

Για την περαιτέρω μαθηματική μοντελοποίηση στο οπτικό κύκλωμα θα δουλέψω με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που δουλέψα και για τη φάση. Προσδιορίζω την ισχύ σε κάθε παλμό ελέγχου σε συνάρτηση με την ιδανική ισχύ που θα προβλεπόταν. Έχω αναλυτικά

$P_{cr}^1 = P_0 g(\hat{\Delta A}_n)$  και  $P_{cr}^2 = P_0 h(\Delta \bar{A}_n)$ . Για τη συνάρτηση διαταραχής  $h(\Delta \bar{A}_n)$  που εξάγεται από  $|\widetilde{E}_n^{low}|^2 = \frac{1}{4}(\Delta A_n - \Delta A_{n+1})^2$  εάν θέσω  $\Delta \bar{A}_n = \frac{\Delta A_n - \Delta A_{n+1}}{A_0}$  οπότε

$|\widetilde{E}_n^{low}|^2 = \frac{1}{4} A_0^2 (\Delta \bar{A}_n)^2$ , οπότε προκύπτει για τη  $h(x_2)$  όπου  $x_2 = \frac{\Delta A_n - \Delta A_{n+1}}{A_0}$  μια τυχαία

μεταβλητή που ακολουθεί Gaussian κατανομή με χαρακτηριστικά που αναφέρονται παρακάτω  $h(x_2) = \frac{1}{4} x_2^2 = (\frac{1}{2} x_2)^2$ . Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο μελετώ και τη συνάρτηση

διαταραχής  $g(x_1)$  όπου  $x_1 = \Delta \hat{A}_n = \frac{\Delta A_n + \Delta A_{n+1}}{A_0}$  η άλλη τυχαία μεταβλητή.

$$g(x_1) = 1 + x_1 + \frac{1}{4} x_1^2 = (1 + \frac{x_1}{2})^2.$$

Άρα κατέληξα στις σχέσεις με γνωστές πλέον συναρτήσεις  $P_{cr}^2 = P_0 h(x_2)$  και  $P_{cr}^1 = P_0 g(x_1)$ .

Εκφράζω τώρα τα καινούργια κέρδη που εισάγει η αβεβαιότητα  $\Delta A_n$  συναρτήσει των ιδανικών συμπεριφορών που θα εμφάνιζαν τα SOAs διεγερόμενα από παλμούς ελέγχου. Η λογική είναι αυτή που ερμηνεύει τη μετάδοση πληροφορίας με όχημα πλέον την ισχύ των παλμών ελέγχου στους ενισχυτές. Στην περιοχή του κόρου έχω λοιπόν για τον ένα οπτικό

βραχίονα  $G_1'' = [1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{P_p A g(x_1)}{U_{sat}})]^{-1}$ . Στόχος μου παραμένει να αναζητήσω μια

εκφραση της μορφής  $G_1'' = G_1^{id} f_2(x_1)$  όπου το ιδανικό κέρδος προσδιορίζεται από τη γνωστή θεωρία των ενισχυτών. Άρα έχω λοιπόν για την  $f_2(x_1)$ :

$$G_1'' = G_1^{id} f_2(x_1) \rightarrow f_2(x_1) = \frac{G_1''}{G_1^{id}}$$

$$\rightarrow f_2(x_1) = \frac{[1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{P_p A g(x_1)}{U_{sat}})]^{-1}}{[1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{P_p A}{U_{sat}})]^{-1}} = \frac{[1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{U_{in}}{U_{sat}})]}{[1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{U_{in} g(x_1)}{U_{sat}})]} \quad (3.3.8) \quad \text{όπου}$$

η  $g(x_1)$  είναι συνάρτηση που εντοπίστηκε στην αρχή της παραγράφου. Με τον ίδιο ακριβώς

τρόπο προσδιορίζω και την άλλη συνάρτηση διαταραχής  $g_2(x_1)$  η οποία εμφανίζεται στην έκφραση  $G_2'' = g_2(x_1)G_2^{id}$  όπου για το κέρδος του έτερου ενισχυτή είναι

$G_2'' = [1 - (1 - \frac{1}{G_2}) \exp(-\frac{P_p Ah(x_2)}{U_{sat}})]^{-1}$ . Άρα η ζητούμενη συνάρτηση διαταραχής  $g_2(x_1)$  είναι

$$g_2(x_2) = \frac{G_2''}{G_2^{id}} = \frac{[1 - (1 - \frac{1}{G_2}) \exp(-\frac{P_p Ah(x_2)}{U_{sat}})]^{-1}}{[1 - (1 - \frac{1}{G_2}) \exp(-\frac{P_p A}{U_{sat}})]^{-1}} = \frac{[1 - (1 - \frac{1}{G_2}) \exp(-\frac{U_{in}}{U_{sat}})]}{[1 - (1 - \frac{1}{G_2}) \exp(-\frac{U_{in}}{U_{sat}} h(x_2))]} \quad (3.3.9)$$

Στη συνέχεια με βάση την ανάλυση του συστήματος που έχω κάνει και στην προηγούμενη παράγραφο θα προσδιορίσω τη συνάρτηση διαταραχής για το κύμα της εξόδου του οπτικού κυκλώματος, της θύρας μεταγωγής S. Έχω από τον τύπο που δίνει τη φάση του πεδίου  $\phi_s = -\phi_1 + \text{Arg}\{g(\Delta\phi)\}$  οπότε συνδυάζοντας στοιχεία θεωρίας των ενισχυτών έχω για την προσομοίωση των ποσοτήτων  $\Delta\phi$  και  $\phi_1$ :

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = -\frac{a}{2} \ln\left(\frac{G_1''}{G_2''}\right) = -\frac{a}{2} \ln\left(\frac{G_1^{id} f_2(x_1)}{G_2^{id} g_2(x_2)}\right) = -\frac{a}{2} \ln\left(\frac{G_1^{id}}{G_2^{id}}\right) - \frac{a}{2} \ln\left(\frac{f_2(x_1)}{g_2(x_2)}\right) \rightarrow \Delta\phi = \Delta\phi^{id} + z(x_1, x_2)$$

όπου η συνάρτηση διαταραχής είναι

$$z(x_1, x_2) = -\frac{a}{2} \ln\left(\frac{f_2(x_1)}{g_2(x_2)}\right) = -\frac{a}{2} \ln\left\{\frac{[1 - (1 - \frac{1}{G_2}) \exp(-\frac{U_{in}}{U_{sat}} h(x_2))]}{[1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{U_{in}}{U_{sat}} g(x_1))]} \right\}$$

$$\xrightarrow{\frac{g(x_1)}{h(x_2)}} z(x_1, x_2) = -\frac{a}{2} \ln\left\{\frac{[1 - (1 - \frac{1}{G_2}) \exp(-\frac{U_{in}}{U_{sat}} (\frac{1}{2} x_2)^2)]}{[1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{U_{in}}{U_{sat}} (1 + x_1)^2)]}\right\} \quad (3.3.10), \text{ ως συνάρτηση}$$

των στοχαστικών μεταβλητών  $x_1$  και  $x_2$ . Με τον ίδιο τρόπο έχω για τη φάση  $\phi_1$

$$\phi_1' - \phi_1^{id} = -\frac{a}{2} \ln\left(\frac{G_1''}{G_1^{id}}\right) = -\frac{a}{2} \ln\left(\frac{G_1^{id} f_2(x_1)}{G_1^{id}}\right) = -\frac{a}{2} \ln(f_2(x_1)) \rightarrow \phi_1' = \phi_1^{id} + T(x_1).$$

$$T(x_1) = -\frac{a}{2} \ln(f_2(x_1)) \xrightarrow{\text{ορισμός}} T(x_1) = -\frac{a}{2} \ln\left\{\frac{[1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{U_{in}}{U_{sat}})]}{[1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{U_{in}}{U_{sat}} g(x_1))]} \right\}$$

Οπότε

$$\xrightarrow{\frac{g(x_1)}{h(x_2)}} T(x_1) = -\frac{a}{2} \ln\left\{\frac{[1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{U_{in}}{U_{sat}})]}{[1 - (1 - \frac{1}{G_1}) \exp(-\frac{U_{in}}{U_{sat}} (1 + x_1)^2)]}\right\}$$

(3.3.11)



### 3.3.2) αβεβαιότητα φάσης στη θύρα μεταγωγής S του αναγεννητή

Άρα κατέληξα λοιπόν στις ζητούμενες συναρτήσεις διαταραχής που βγάζουν την επίδραση του φαινομένου και που μου θα δώσουν τη ζητούμενη διαφορά φάσης στη θύρα μεταγωγής που εισάγουν οι μεταβολές στην ανισοψία των παλμών PSK. Έχω λοιπόν για τη διαφορά φάσης με βάση τις σχέσεις για τις φάσεις του συστήματος

$$\Delta\phi_S = \phi_S - \phi_S^{id} = -\phi_1' + \text{Arg}\{g(\Delta\phi)\} + \phi_1^{id} - \text{Arg}\{g(\Delta\phi^{id})\} \xrightarrow{(3.3.12)}$$

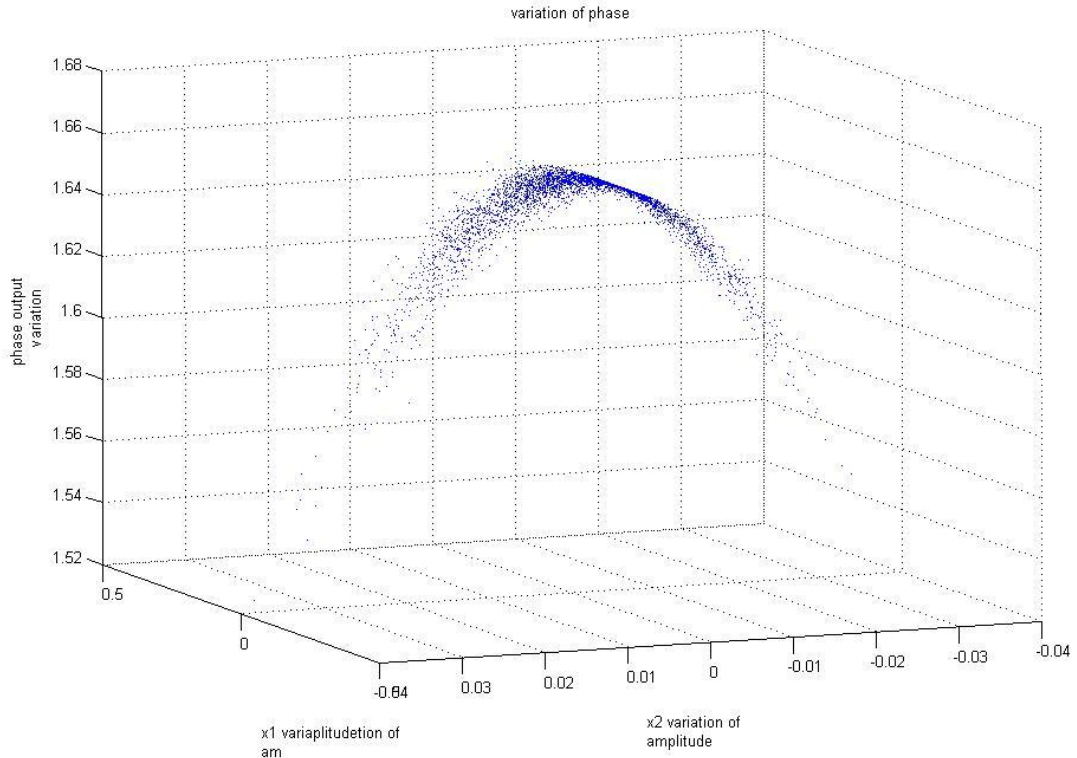
$$\Delta\phi_S = -\phi_1^{id} - T(x_1) + \text{Arg}\{g[\Delta\phi^{id} + z(x_1, x_2)]\} + \phi_1^{id} - \text{Arg}\{g(\Delta\phi^{id})\} \rightarrow$$

$$\Delta\phi_S = -T(x_1) + \text{Arg}\left\{\frac{g[\Delta\phi^{id} + z(x_1, x_2)]}{g(\Delta\phi^{id})}\right\}$$

όπου οι βασικές σχέσεις 
$$\begin{cases} \Delta\phi' = \Delta\phi^{id} + z(x_1, x_2) \\ \phi_1' = \phi_1^{id} + T(x_1) \end{cases} \quad (3.3.12)$$
 είναι ο πυρήνας της

μοντελοποίησης που κατασκεύασα. Κατέληξα και σε αυτήν την περίπτωση όπως και προηγουμένως σε μια συνάρτηση  $\Delta\phi_S = \Delta\phi_S(\Delta\phi^{id}, x_1, x_2)$  της οποίας οι μεταβλητές σε επίπεδο φυσικής υλοποίησης αφορούν: οι  $\{x_1, x_2\}$  τις στοχαστικές μεταβλητές που περιγράφουν το Gaussian πιθανοτικό μοντέλο κατανομής για την ανισοψία που έχω στους παλμούς PSK και ερμηνεύονται στο τέλος του κεφαλαίου με τα εργαλεία της θεωρίας πιθανοτήτων. Η παράμετρος  $\Delta\phi^{ideal}$  είναι μια μεταβλητή που το φυσικό της υπόβαθρο εντοπίζεται στο μέτρο της ισχύος του σήματος εισόδου που έχω στο MZI. Έρχεται να ποσοτικοποιήσει το γεγονός της διαφορετικής επίδρασης που μπορεί να έχει στη διακύμανση στην έξοδο του αναγεννητή για την ίδια διακύμανση εισόδου εφόσον αλλάξει η ισχύς του σήματος ρολογιού.

Ακολουθώντας τα ίδια εργαλεία που χρησιμοποίησα και σε προηγούμενες ενότητες θα παρουσιάσω μια οικογένεια διαγραμμάτων που θα απεικονίζουν τη συμπεριφορά της φάσης στη θύρα μεταγωγής του αναγεννητή στην περίπτωση που έχω στην είσοδο αβεβαιότητα στο πλάτος των παλμών.



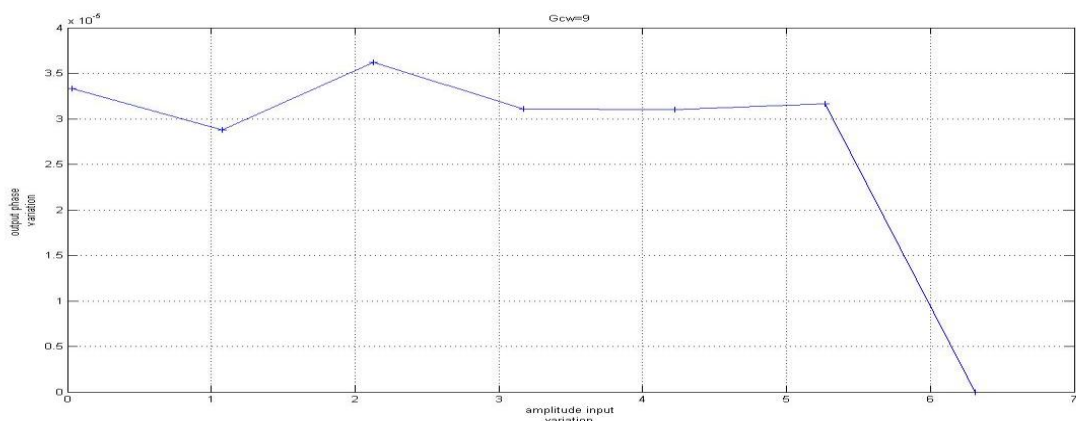
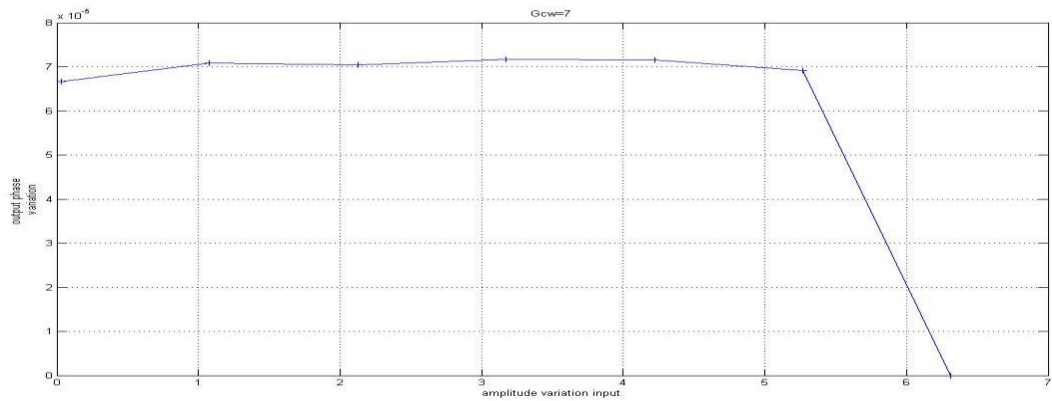
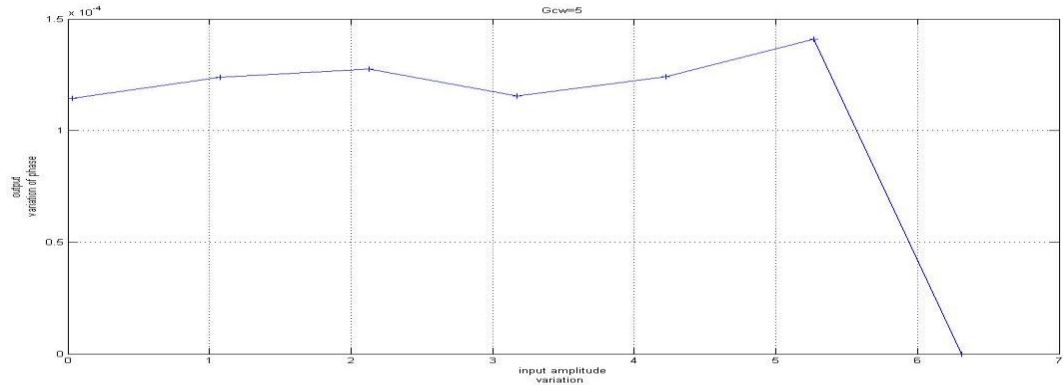
Εικόνα 3.3.1 συνάρτηση της φάσης στην έξοδο του αναγεννητή- θύρα μεταγωγής S του συμβολόμετρου Mach-Zender με παραμέτρους τις στοχαστικές μεταβλητές της ανισοϋψίας του σήματος εισόδου

Η παραπάνω γραφική παράσταση απεικονίζει τη συνάρτηση  $\Delta\varphi_s = \Delta\varphi_s(x_1, x_2)$  ως προς τις στοχαστικές παραμέτρους που εκφράζουν το μέτρο της ανισοϋψίας στο αρχικό σήμα εισόδου  $(x_1, x_2)$ . Μια πρώτη διαπίστωση είναι ο τρισδιάστατος τρόπος απεικόνισης, απόρροια του γεγονότος της συνάρτησης δύο μεταβλητών που αποτελεί η  $\Delta\varphi_s$  και άρα η γεωμετρική της ερμηνεία σε επίπεδο γραφικής αναπαράστασης οδηγεί σε μια επιφάνεια στο χώρο. Η συγκεκριμένη γραφική παράσταση έχει ληφθεί για συγκεκριμένη τιμή της παραμέτρου  $\Delta\varphi_{ideal} = \pi$ , που όπως έχει αναφερθεί σε αρκετά σημεία μέχρι τώρα αποτελεί και το σημείο κανονικής λειτουργίας για την αναγεννητική διάταξη. Μια βασική παρατήρηση αποτελεί ο στοχαστικός χαρακτήρας που αποκτά και η τιμή της  $\Delta\varphi_s$  ακολουθώντας όπως και οι στοχαστικές μεταβλητές  $(x_1, x_2)$  Gaussian κατανομή. Επίσης ένα σημαντικό σχόλιο που

προκύπτει από την εποπτεία της αναπαράστασης είναι οι απόλυτες τιμές του άξονα z που αναφέρεται στις τιμές της συνάρτησης της διαφοράς φάσης  $\Delta\varphi_s$  και οι οποίες εντοπίζονται σε τιμές χωρίς φυσικό νόημα γύρω από τα 1.6 rad (αρκετά μεγάλη τιμή για την επίδοση της μεταβολής στην έξοδο εκ πρώτης όψης). Η αντίφαση αυτή επιλύεται καταρχήν από την επιδίωξη που έχω να περιορίσω στην έξοδο του αναγεννητή τη διασπορά της αβεβαιότητας για τη φάση της πεδιακής κατανομής και όχι να τη μέση τιμή της συνάρτησης  $\Delta\varphi_s$ . Αυτό σε επίπεδο μαθηματικής αποτύπωσης μπορεί να διορθωθεί με μια μετατόπιση αξόνων-μέσης τιμής της γραφικής παράστασης στον άξονα z γύρω από το μηδέν που θα αποτυπώνει πλήρως το σκεπτικό της επιδίωξης μου και παράλληλα χωρίς να ανατρέπεται το φυσικό υπόβαθρο της λειτουργίας του συστήματος μετάδοσης.

Στη συνέχεια παρατίθενται μια σειρά διαγραμμάτων που παρουσιάζουν για συγκεκριμένο κέρδος στους ενισχυτές του συμβολόμετρου την απόκριση της διασποράς στην έξοδο για συγκεκριμένες τιμές της παραμέτρου  $\Delta\varphi_{ideal}$  που όπως έχω ήδη αναφέρει υποκρύπτει την ενέργεια των παλμών ελέγχου  $U_{in}$  που εισέρχονται και κορένουν τους ενισχυτές και

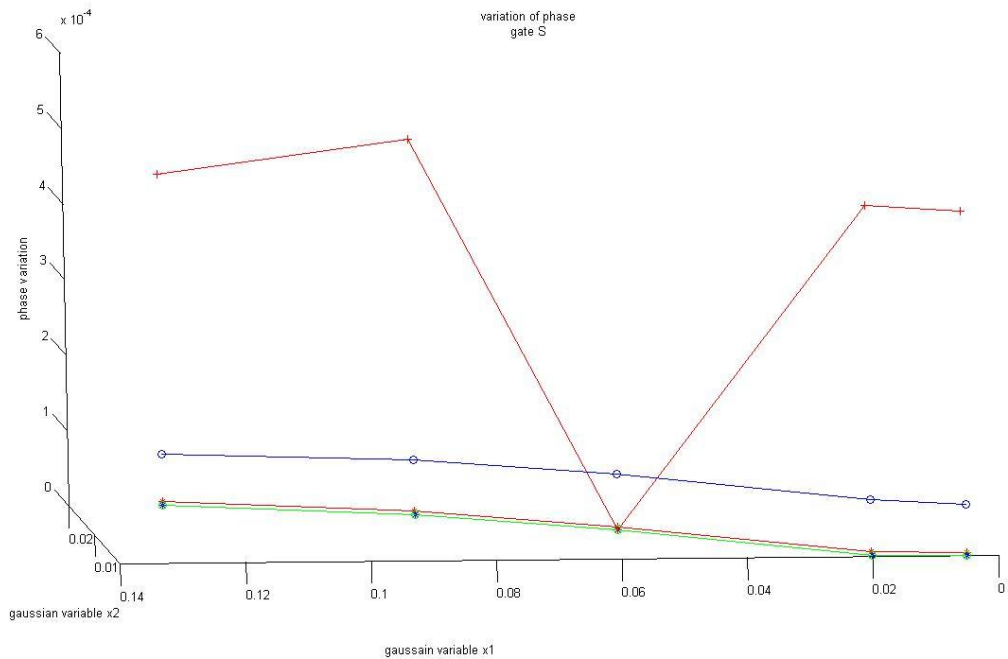
αποτυπώνει το σημείο κανονικής λειτουργίας για την αναγεννητική διάταξη. Θα περιοριστώ για λόγους περιορισμού του εύρους παράθεσης διαγραμμάτων σε τρεις αναπαραστάσεις για αντίστοιχα κέρδη των ενισχυτών  $G_{cw}=5,7,9$ .



Εικόνα 3.3.1.2) διαγράμματα για τη συμπεριφορά της διασποράς της φάσης της εξόδου για διάφορες τιμές του κέρδους  $G_{cw}=5,7,9$

Τέλος παρατίθεται όπως και στις προηγούμενες παραγράφους η οικογένεια διαγραμμάτων για την απόκριση της διασποράς στη φάση της εξόδου της πεδιακής κατανομής για διαφορετική διασπορά στην είσοδο για τον παράγοντα θορύβου και συγκριμένα τη

διασπορά της Gaussian κατανομής για το θόρυβο στην είσοδο και πιο αναλυτικά για την ανισοψφία που εμφανίζεται στους παλμούς της εισόδου. Οι καμπύλες αυτές έχουν χαρακτηρί για συγκεκριμένη τιμή του κέρδους  $G_{cw}=9$ , ενώ παράλληλα η απόκριση λαμβάνεται για την περιοχή του  $\Delta\phi_{ideal}$  στην περιοχή  $[0,2\pi]$ .



Εικόνα 3.3.1.3) οικογένεια καμπύλων για τη διασπορά της εξόδου σε σχέση με το μέτρο της στοχαστικής ανισοψφίας στην είσοδο

### 3.3.3) Αβεβαιότητα πλάτους στη θύρα μεταγωγής S

Συνεχίζω στην επίδραση της ανισοψφίας στην ισχύ της εξόδου για την πεδιακή κατανομή

$$\overline{E^S} = E^S e^{-i(\omega t + \phi_s)}$$

στην οποία το πλάτος περιγράφεται από την ανάλυση του MZI

$E^S = \frac{1}{2} E_{in} \sqrt{G_2} |g(\Delta\phi)| \xrightarrow{P^S = E^S \overline{E^S}} P_S = \frac{1}{4} E_{in}^2 G_2 |g(\Delta\phi)|^2$  και έπεται η ισχύς. Από την ανάλυση που έχω κάνει στην προηγούμενη ενότητα κατέληξα για την ποσότητα

$$|g(\Delta\phi)|^2 = \lambda^2 - 2\lambda \cos \Delta\phi + 1 \quad \text{με} \quad \lambda = \left(1 + \sum_{\nu=1}^{+\infty} \frac{\left(-\frac{\Delta\phi}{\alpha}\right)^\nu}{\nu!}\right) \in \mathbb{R}. \quad \text{Για τη θεωρητική ανάλυση}$$

που έκανα προηγουμένως με  $\Delta\phi = \Delta\phi^{id} + z(x_1, x_2)$  έχω

---


$$\cos \Delta\phi = \cos[\Delta\phi^{id} + z(x_1, x_2)] = \cos(\Delta\phi^{id}) \cos[z(x_1, x_2)] - \sin(\Delta\phi^{id}) \sin[z(x_1, x_2)]$$

Στην προσπάθεια μελέτης της  $z(x_1, x_2)$  θα κάνω χρήση του αναπτύγματος Mac-Laurin για την

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots$$

και επειδή η  $z(x_1, x_2)$  παίρνει μικρές τιμές για τις τιμές των στοχαστικών μεταβλητών έχω  $\sin[z(x_1, x_2)] \approx z(x_1, x_2)$ . Οπότε για να βρω τη μεταβολή της ισχύος της θύρας μεταγωγής S έχω

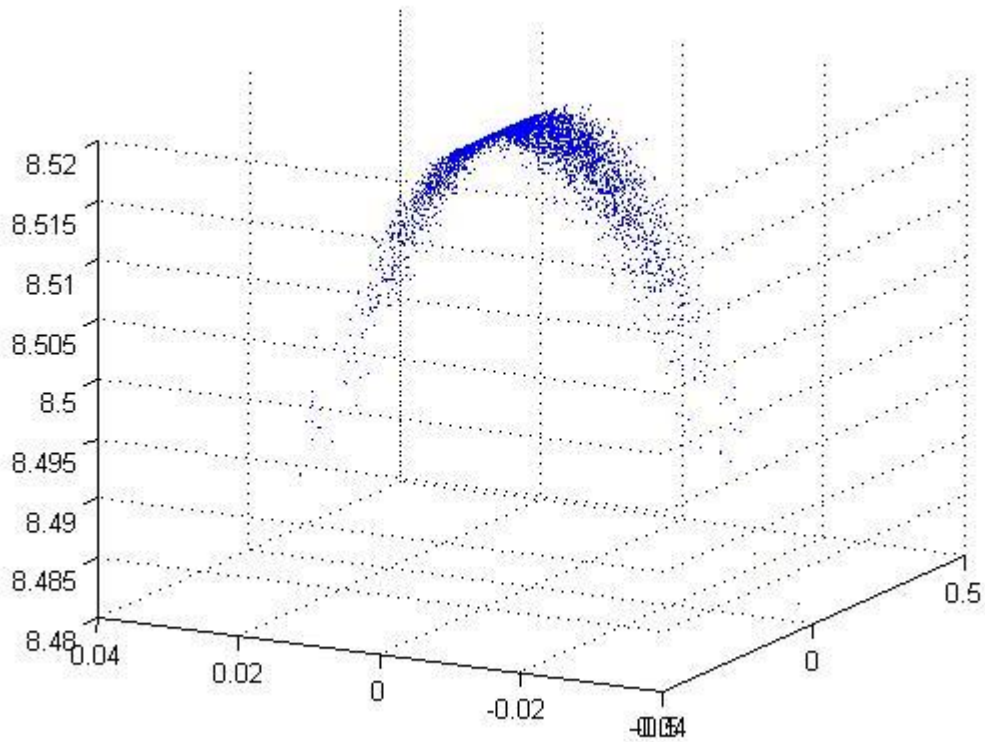
$$\Delta P_S = P'_S - P_S^{id} = \frac{1}{4} E_{in}^2 G_2 \{-2\lambda \cos[\Delta\phi^{id} + z(x_1, x_2)] + 2\lambda \cos(\Delta\phi^{id})\} \\ + \frac{1}{4} E_{in}^2 G_2 \left\{ \sum_{\nu=1}^{+\infty} \frac{(-\Delta\phi^{id} + z(x_1, x_2))^\nu}{\nu!} - \sum_{\nu=1}^{+\infty} \frac{(-\Delta\phi^{id})^\nu}{\nu!} \right\}$$

ενώ κάνοντας χρήση της προσέγγισης από κριτήριο σύγκλισης  $\sum_{\nu=1}^{+\infty} \frac{(z(x_1, x_2))^\nu}{\nu!} \rightarrow 0$  για την αριθμητική σειρά καταλήγω στη σχέση για τον προσδιορισμό της σχετικής μεταβολής ισχύος στην ενότητα αυτή που βρίσκεται

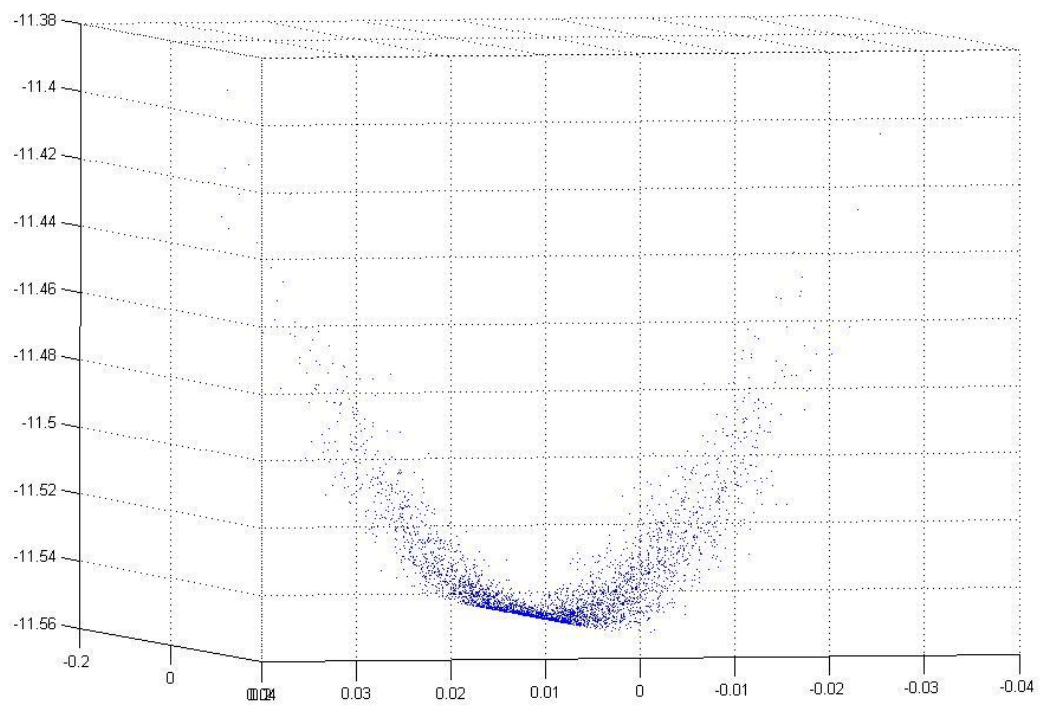
$$\frac{\Delta P_S}{P_S^{id}} = \frac{P'_S - P_S^{id}}{P_S^{id}} = \frac{\frac{1}{4} E_{in}^2 G_2 2\lambda \{\cos(\Delta\phi^{id}) - \cos[\Delta\phi^{id} + z(x_1, x_2)]\}}{\frac{1}{4} E_{in}^2 G_2 (\lambda^2 + 1 - 2\lambda \cos(\Delta\phi^{id}))} \rightarrow$$

$$\frac{\Delta P_S}{P_S^{id}} = \frac{\Delta P_S}{P_S^{id}}(\Delta\phi^{id}, x_1, x_2) = \frac{2\lambda \{\cos(\Delta\phi^{id})(1 - \cos[z(x_1, x_2)]) + \sin(\Delta\phi^{id})z(x_1, x_2)\}}{\lambda^2 + 1 - 2\lambda \cos(\Delta\phi^{id})}$$

Στη συνέχεια παρατίθενται διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν τη στοχαστική συμπεριφορά της σχετικής μεταβολής της ισχύος για την περίπτωση της ανισοψφίας του αρχικού σήματος στην είσοδο του αναγεννητή. Μπορώ να διακρίνω μια σειρά χαρακτηριστικών τα οποία διαφαίνονται από τις γραφικές παραστάσεις που παρατίθενται. Καταρχήν παρατηρώ μια παραβολική προσέγγιση στη στοχαστική μεταβολή της ισχύος στην έξοδο. Στο σημείο αυτό να τονίσω ότι ο άξονας z ο οποίος απεικονίζει την ποσότητα της σχετικής μεταβολής της ισχύος στη θύρα μεταγωγής παίρνει τιμές οι οποίες δεν έχουν φυσικό νόημα σε επίπεδο απόλυτων τιμών παρά μόνο σε επίπεδο διερεύνησης της διασποράς της πιθανοτικής κατανομής.



Εικόνα 3.3.2.1) παρουσίαση σχετικής μεταβολής ισχύος στην έξοδο της θύρας μεταγωγής S για συγκεκριμένες τιμές της διαταραχής της εισόδου στο πλάτος της.  $G_{cw}=7$  και  $\Delta\phi_{ideal}=\pi$ .



### 3.4) Θεωρητική ανάλυση φαινομένων διαταραχής που εξαρτώνται από το σήμα εισόδου (CW).

Στις προηγούμενες παραγράφους μελέτησα την επίδραση των φαινομένων της διακύμανσης φάσης αλλά και της ανισοϋφίας στην είσοδο του οπτικού αναγεννητή με την εύρεση ενός μοντέλου το οποίο θα απεικονίζει την αβεβαιότητα των μεγεθών που ανέφερα προηγουμένως στην αβεβαιότητα-διακύμανση των μεγεθών της εξόδου του αναγεννητή (φάση και πλάτος του σήματος που παίρνω αναγεννημένο). Σε ένα γενικό πλάνο ακολούθησα το διαχωρισμό των φαινομένων της διακύμανσης φάσης-πλάτους στην είσοδο των PSK σημάτων και τα μελέτησα διακριτά. Κατάφερα ακολουθώντας μια θεωρητική ανάλυση ανά τμήματα του οπτικού κυκλώματος να μοντελοποιήσω την είσοδο του φαινομένου της διακύμανσης σε ένα σύστημα που έχει απόκριση τη μεταβολή που επιφέρει το φαινόμενο αυτό στην έξοδο του συστήματος σε σχέση με την ιδανική συμπεριφορά του. Δηλαδή στο παράδειγμα της αβεβαιότητας φάσης θεωρώντας μια πιθανοτική κατανομή για το “σφάλμα” της φάσης κατέληξα σε μια συγκεκριμένη συνάρτηση  $\Delta\phi_s$  η οποία δείχνει ακριβώς τον τρόπο με τον οποίο έχω μεταβολή στην έξοδο- φάση  $\phi_s$  - σε σχέση με την ιδανική συμπεριφορά στην οποία θα έλειπε το σφάλμα αυτό. Προφανώς το μέτρο της επίδρασης αυτής έχει να κάνει με το κατά πόσο ο παλμός που εισάγεται στον οπτικό αναγεννητή είναι αρκετά “παρραμορφωμένος” δηλαδή ουσιαστικά με τα χαρακτηριστικά του σφάλματος-πόσο ισχυρό είναι τόσο σε εύρος αλλά πλάτος- που κωδικοποιούνται θεωρητικά στα χαρακτηριστικά της πιθανοτικής κατανομής που χρησιμοποιώ για την αβεβαιότητα στην είσοδο του σήματος. Ωστόσο όπως απέδειξα στα προηγούμενα εδάφια η μεταβολή αυτή είναι  $\Delta\phi_s = \Delta\phi_s(\Delta\phi^{id}, \Delta\phi')$ , που μεταφράζεται ως συνάρτηση που εξαρτάται προφανώς από το μέτρο-εύρος αβεβαιότητας της φάσης  $\Delta\phi'$  αλλά επίσης και από την παράμετρο  $\Delta\phi^{id}$  η οποία μπορεί επιφανειακά να υποδηλώνει απλά μια μαθηματική παράμετρο που εισάγεται στη μοντελοποίηση και πηγάζει από τη θεωρία των SOAs, αλλά στην ουσία της υποκρύπτει βασικά στοιχεία συμπεριφοράς του προβλήματος. Καταρχήν στα προηγούμενα εδάφια παρουσιάστηκαν μια σειρά από γραφικές παραστάσεις της συνάρτησης  $\Delta\phi_s = \Delta\phi_s(\Delta\phi^{id}, \Delta\phi')$  στις οποίες επιλέχθηκαν για την παράμετρο  $\Delta\phi^{id}$  τιμές στο διάστημα  $[0, \pi]$  με ρυθμό επιλογής  $\frac{\pi}{4}$ . Αυτό έγινε προφανώς γιατί με ενδιέφερε να

απομονώσω στη μελέτη μου το φαινόμενο της αβεβαιότητας της φάσης και προφανώς από την εποπτεία των αποτελεσμάτων συμπεραίνω διαφορετική συμπεριφορά-είτε ποιοτική είτε ποσοτική-στην απόκριση της συνάρτησης. Επίσης με απλή εποπτεία μπορώ να εστιάσω στο σημείο κανονικής λειτουργίας του αναγεννητή για συγκεκριμένη τιμή της  $\Delta\phi^{id} = \phi_1 - \phi_2$ . Ωστόσο στην τιμή της παραμέτρου  $\Delta\phi^{id}$  αντανακλάται η επίδραση στο πρόβλημα μιας πολύ σημαντικής παραμέτρου που είναι η ισχύς του σήματος εισόδου CW η οποία μπορεί να εισαχθεί στην ανάλυση μου και με ποσοτικό τρόπο. Συνδετικός κρίκος στην προσπάθεια αυτή αποτελεί και πάλι η θεωρία των SOAs η οποία συνδέει τα μεγέθη αυτά.

Συγκεκριμένα από τη θεωρία των ενισχυτών έχω ότι στην περίπτωση μου που οι ενισχυτές βρίσκονται στην περιοχή του κόρου τα κέρδη των ενισχυτών εξαρτώνται από την ισχύ πεδίου  $P_{CW}$ . Αναλυτικά για τους δύο ενισχυτές ισχύει

$G_1 = G_{CW} = G_{01} \exp\left[-\frac{(G_{CW} - 1)P_{CW}}{2P_{sat}}\right]$  και αντίστοιχα για τον άλλο βραχίονα

$G_2 = G_{CW} = G_{02} \exp\left[-\frac{(G_{CW} - 1)P_{CW}}{2P_{sat}}\right]$ . Στις παραπάνω σχέσεις προφανώς αμελώ να

συμπεριλάβω την περιοχή δυναμικής συμπεριφοράς των ενισχυτών στην οποία εμπεριέχεται ο χρόνος  $t$ . Η βασική σχέση που διέπει την εξάρτηση αυτή είναι μια πλεγμένη συνάρτηση η οποία ουσιαστικά καταλήγει σε μία συνάρτηση για το κέρδος των ενισχυτών της μορφής  $G_{CW} = G_{CW}(P_{CW})$  η οποία δεν είναι αναγκαίο να την αποπλέξω στη μορφή αυτή τη στιγμή αυτή. Επαναφέροντας κάποια στοιχεία από τη θεωρία των SOAs η παράμετρος  $G_{CW}$  εισέρχεται στις σχέσεις ενίσχυσης με τους παλμούς ελέγχου όπου

$$G_1(t) = \left[ 1 - \left(1 - \frac{1}{G_{CW}}\right) \exp\left(-\frac{\int_{-\infty}^t P_{in}(t') dt'}{U_{sat}}\right) \right]^{-1} \quad (3.4.1).$$

Στη γενική μοντελοποίηση που

ανέπτυξα παραπάνω στις εκφράσεις για την ποσότητα  $\Delta\phi = \Delta\phi^{id} + f(x)$ ,  $f(x)$  είναι η συνάρτηση που σε κάθε περίπτωση-αβεβαιότητα φάσης είτε ανισοϋψία- εκφράζει το φαινόμενο το οποίο εισάγεται λόγω μιας διακύμανσης-διαταραχής στο σήμα PSK της εισόδου του οπτικού αναγεννητή. Μελετήθηκε αυτόνομα και ποσοτικοποιήθηκε με συγκεκριμένες συναρτήσεις. Τώρα καλούμαι να εντοπίσω και να παραμετροποιήσω τον όρο  $\Delta\phi^{id}$  ο οποίος εξαρτάται από την ισχύ  $P_{CW}$ .

Στην αρχή θα περιγράψω τη φυσική λειτουργία των ενισχυτών με βάση τη θεωρία τους. Στην ιδανική περίπτωση όπου έχω για την έξοδο του ακολουθητή DI με την αρχή της συμπληρωματικότητας δύο εξόδους  $D, \bar{D}$  το οποίο μεταφράζεται σε έναν ημιτονικό παλμό ελέγχου στον πάνω βραχίονα και μηδενικό στον άλλον βραχίονα. Τότε θα εμφανισθεί στον πάνω βραχίονα ένα κέρδος το οποίο περιγράφεται παραπάνω στη σχέση (3.4.1). στη συνέχεια παραθέτω δυο βασικές αρχές που πρέπει να πληρεί το κέρδος  $G_{CW}$ , το οποίο είναι και αντικείμενο ανάλυσης στην ενότητα

A) επιλογή κέρδους  $G_{CW}$  τέτοιο ώστε να υπάρχει περιθώριο για ολίσθηση φάσης κατά  $\pi$  με επιλογή της  $U_{in}(t)$ . Έχω  $\Delta\phi = \pi = -\frac{a}{2} \ln\left(\frac{G_1}{G_2}\right) \rightarrow G_x^{\min} = G_1^{\min} \exp\left(-\frac{2\pi}{a}\right)$  (3.4.2) που

είναι η ελάχιστη τιμή του κέρδους του ενός ενισχυτή στον πάνω βραχίονα για να μην έχω το φαινόμενο της αντιστροφής στο MZI.(?)

B) για να διατηρήσω το φυσικό μηχανισμό της ενίσχυσης απαιτώ  $G_x^{\min} \geq 1 \xrightarrow{(3.4.2)} G_{CW} = \exp\left(\frac{2\pi}{a}\right)$ .

Για τη συνέχεια της μελέτης της  $\Delta\phi^{id}$  έχω από τη σχέση που συσχετίζει τη φάση με το

$$\text{κέρδος του υλικού που είναι } \Delta\phi = -\frac{a}{2} \ln\left(\frac{G_1}{G_2}\right) = -\frac{a}{2} \ln\left\{ \frac{G_2 \exp\left[-\frac{(G_{CW} - 1)P_{CW}}{P_{sat}}\right]}{\left[1 - \left(1 - \frac{1}{G_{CW}^1}\right) \exp\left(-\frac{U_{in}(t)}{U_{sat}}\right)\right]} \right\}$$

(3.4.3). Να σημειώσω ότι στην περίπτωση μελέτης της  $\Delta\phi^{id}$  βασικό συστατικό είναι η ιδανική συμπεριφορά του συστήματος και άρα θα ισχύει η αρχή της συμπληρωματικότητας για την έξοδο του ακολουθητή και συνεπώς στο βραχίονα του SOA2 θα έχω μηδενική ισχύ



από παλμό ελέγχου και στον άλλον ενισχυτή θα έχω όλη την ισχύ στον παλμό ελέγχου. Άρα από τα στοιχεία που ανέφερα παραπάνω για την  $G_{CW}^1$  του πάνω οπτικού βραχίονα θα έχω

$$G_{CW}^1 = G_1 \exp \left[ -\frac{(G_{CW} - 1)P_{CW}}{P_{sat}} \right] \quad (3.4.4) \quad \text{όπου έχω για την ισχύ σήματος εισόδου}$$

$P_{CW} = \frac{P_{cw}}{2}$  καθώς καταμερίζεται ισόποσα στους δύο βραχίονες και εξαρτάται από το πεδίο

που εισάγεται στο MZI. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 υπολογίζεται ως  $P_{CW} = |E_{in}|^2$

και για τον παράγοντα  $\exp(-\frac{U_{in}(t)}{U_{sat}})$  θα χρησιμοποιήσω τέτοια τιμή ώστε να λειτουργούν

οι ενισχυτές μου στην περιοχή βαθύ κορεσμού. Μια τυπική τιμή που χρησιμοποίησα σε προηγούμενη ενότητα είναι  $\frac{U_{in}(t)}{U_{sat}} \rightarrow 20$  όταν έχει εισέλθει ολόκληρος ο παλμός ελέγχου

στον ενισχυτή. Συνεπώς ανακεφαλαιώνοντας για την ποσότητα  $\Delta\phi^{id}$  έχω με βάση τις δύο προηγούμενες σχέσεις για την εξάρτηση από την  $P_{CW}$  της  $\Delta\phi^{id}$ :

$$\Delta\phi^{id} = \Delta\phi^{id}(P_{CW}) = -\frac{a}{2} \ln \left\{ \frac{G_2 \exp \left[ -\frac{(G_{CW} - 1)P_{CW}}{P_{sat}} \right]}{\left[ 1 - \left( 1 - \frac{1}{G_1} \exp \left[ \frac{(G_{CW} - 1)P_{CW}}{P_{sat}} \right] \right) \exp \left( -\frac{U_{in}(t)}{U_{sat}} \right) \right]} \right\} \quad (3.4.5)$$

---

## Μαθηματικό παράρτημα κεφαλαίου 3

Στο προηγούμενο κεφάλαιο χρησιμοποίησα κάποιες βασικές αρχές από τη θεωρία των πιθανοτήτων ώστε να παραμετροποιήσω τη διακύμανση που εμφανίζεται με όρους θορύβου στο αρχικό μου σήμα και η διαδικασία της αναγέννησης έρχεται να πετύχει την επανάκτηση της αρχικής έκφρασης του σήματος μου και κατ' επέκταση της πληροφορίας μου. Η γενική θεώρηση του φαινομένου οδηγεί σε μια αντίληψη εμφάνισης διακύμανσης τόσο στη φάση όσο και στο πλάτος των αρχικών σημάτων PSK. Η προσπάθεια της ενοποίησης της παρουσίας της αβεβαιότητας αυτής έρχεται να εμποδωθεί με τη θεωρία των πιθανοτήτων που θα δώσουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά στην αβεβαιότητα αυτή αλλά και τα εργαλεία ώστε να αναλυθεί ποσοτικά στα πλαίσια της θεωρητικής ανάλυσης του αναγεννητή.

Συγκεκριμένα τα μεγέθη τα οποία στην ενότητα μου ακολουθούν πιθανοτική κατανομή είναι η αβεβαιότητα φάσης αλλά και πλάτους στο σήμα μου. Η έκφραση του σήματος

εισόδου για το PSK σήμα είναι  $\tilde{A}(\tau) = \tilde{A}_o \exp\left\{i\tilde{\phi}_o(\tau) - \left(\frac{\tau}{T_o}\right)^2\right\} \exp(i\phi_n)$  στην ιδανική

περίπτωση που δεν εμφανίζονται διακυμάνσεις πλάτους-φάσης. Η ύπαρξη αυτών έρχεται να επαναπροσδιορίσει την αναλυτική έκφραση του σήματος ως

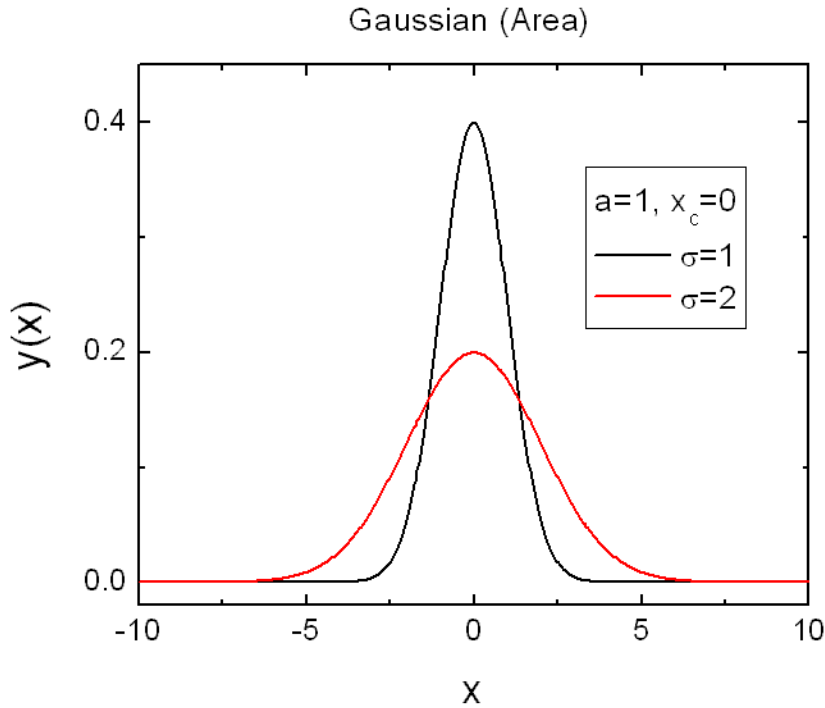
$\tilde{A}(\tau) = (\tilde{A}_o + \Delta\tilde{A}_n) \exp\left\{i\tilde{\phi}_o(\tau) - \left(\frac{\tau}{T_o}\right)^2\right\} \exp[i(\phi_n + \Delta\phi_n)]$  όπου τα μεγέθη  $\Delta\tilde{A}_n$ ,  $\Delta\phi_n$  θα

τα προσεγγίσω με στοχαστικό τρόπο.

Στην ανάλυση που κάνω θεωρώ ότι οι μεταβλητές-αβεβαιότητες  $\Delta\tilde{A}_n$ ,  $\Delta\phi_n$  ακολουθούν την κανονική κατανομή (Gaussian) η οποία προσεγγίζει μεγάλο κομμάτι φαινομένων στοχαστικού χαρακτήρα όπως ο θόρυβος στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα και τα μοντελοποιεί σαν φυσικές διεργασίες σε ικανοποιητικό βαθμό. Στην πρώτη περίπτωση μου, στην οποία εμφανίζεται αβεβαιότητα στη φάση του σήματος θεωρώ ότι η αβεβαιότητα φάσης  $\Delta\phi_n$  που εισάγεται ως όρος παραμόρφωσης στο σήμα μου ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση που μεταβάλλεται ανάλογα με τις παραμέτρους του προβλήματος μου. Σαν πυρήνα της μοντελοποίησης χρησιμοποίησα τη μεταβλητή  $\Delta\phi = \Delta\phi_n - \Delta\phi_{n-1}$ , όπου οι αβεβαιότητες φάσης ακολουθούν την Gaussian κατανομή. Για τον υπολογισμό των στατιστικών χαρακτηριστικών χρησιμοποίησα ένα θεώρημα από τη θεωρία πιθανοτήτων που μου υπαγορεύει ότι η διαφορά δύο τυχαίων μεταβλητών που ακολουθούν Gaussian κατανομή είναι και αυτή μια Gaussian τυχαία μεταβλητή με μέση τιμή και διαφορά αντίστοιχα:

$$\mu_x = \mu_{x_1} - \mu_{x_2} \text{ και } \sigma_x^2 = [\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2] \rightarrow \sigma_x = [\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.1})$$

Πιο συγκεκριμένα, εάν θέλω να μελετήσω την απόκριση του αναγεννητή για μεγαλύτερο δείκτη παραμόρφωσης του σήματος μου, θα χρησιμοποιήσω μεγαλύτερη τιμή για την τιμή της απόκλισης μου και συνεπώς μεγαλύτερο εύρος μεταβολής και επίδρασης του θορύβου. Η απόκριση όπως κατέληξα στο μοντέλο που δημιουργήσα αποτελεί και αυτή μια πιθανοτική κατανομή όπως ακριβώς ανέμενα καθώς αποτελεί μια συνάρτηση στοχαστικής μεταβλητής.



Εικόνα Π.1) Γραφική παράσταση που αποτυπώνει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της Gaussian πιθανοτικής κατανομής ως προς τα χαρακτηριστικά της μέσης τιμής ( $\mu$ ) και της τυπικής απόκλισης ( $\sigma$ ).

Στην περίπτωση που εμφανίζεται ανισοψφία μια βασική διαφοροποίηση έγκειται στο γεγονός της εισαγωγής δύο στοχαστικών μεταβλητών  $x_1$  και  $x_2$  οι οποίες έρχονται να περιπλέξουν τις αβεβαιότητες στα πλάτη των σημάτων. Στην αρχή της παραγράφου 3.3 εισήγαγα τις μεταβλητές

$$x_1 = \Delta \hat{A}_n = \frac{\Delta A_n + \Delta A_{n+1}}{A_0} \quad \text{και} \quad x_2 = \overline{\Delta A}_n = \frac{\Delta A_n - \Delta A_{n+1}}{A_0} \quad (\text{Π.2})$$

Από τη θεωρία των πιθανοτήτων πάλι γνωρίζω πως οι μεταβλητές  $x_1$  και  $x_2$  ακολουθούν και αυτές κανονική τιμή με χαρακτηριστικές τιμές που προκύπτουν πάλι από εφαρμογή των προηγούμενων σχέσεων (Π.1) με τη μόνη διαφορά πως στην περίπτωση μου έχω ανηγμένα μεγέθη στην ιδανική τιμή που έπρεπε να είχε το πλάτος ( $A_0$ ). στη συνέχεια προέκυψαν κάποιες συναρτήσεις διαταραχής των στοχαστικών μεταβλητών που εισέρχονται στη συμπεριφορά των μεγεθών της φάσης εξόδου και του πλάτους στη θύρα μεταγωγής. Μια βασική ιδιότητα των δύο αυτών μεταβλητών βρίσκεται που έχουν να συσχετίζεται η στοχαστική μεταβολή τους με τρόπο που δεν επιτρέπει σε πιθανοθεωρητικά προβλήματα να μεταβάλλονται ανεξάρτητα αλλά να προσαρμόζουν τη μεταβολή τους. Το γεγονός αυτό πηγάζει από την εισαγωγή στον ορισμό τους με διαφορετικό τρόπο οι αβεβαιότητες του πλάτους διαδοχικών παλμών PSK με τρόπο που αποτυπώνεται στη σχέση (Π.2).με περιορίζει λοιπόν η ιδιότητα αυτή στο να αναζητήσω με μεθόδους βελτιστοποίησης συγκεκριμένες περιοχές αβεβαιότητας στο πλάτος στις οποίες η αναγέννηση του σήματος συντελείται με αναβαθμισμένο τρόπο.

Σε όλο το φάσμα της θεωρητικής ανάλυσης χρησιμοποιώ κάποιες βασικές ιδιότητες για να προσδιορίσω φυσικές ποσότητες στο πρόβλημα της αναγέννησης των σημάτων μου. Πιο

---

αναλυτικά το μέγεθος το οποίο έπρεπε να προσδιορίσω σε καθένα από τα βήματα μου ήταν η διασπορά των φυσικών μεγεθών της φάσης και του πλάτους στη θύρα μεταγωγής του συμβολόμετρου. Από τη θεωρία των πιθανοτήτων έκανα χρήση κάποιων βασικών θεωρημάτων για την εύρεση της διασποράς τυχαίων μεταβλητών που φαίνονται παρακάτω:

$$\text{Var}(X_1 + c) = \text{Var}(X_1) \text{ και } \text{Var}(\lambda X + c) = \lambda^2 \text{Var}(X) \quad (\text{Π.3})$$

Ειδικά η δεύτερη ιδιότητα για τη μεταβλητότητα της τυχαίας μεταβλητής χρησιμοποιείται εάν θέλω να ποσοτικοποιήσω την έκφραση για τη διασπορά που εμφανίζεται στην ποσοτική ισχύ της εξόδου του συμβολόμετρου. Αυτό συμβαίνει γιατί στο μοντέλο που αναζητήθηκε υπολογίστηκε η πιθανοτική κατανομή της σχετικής μεταβολής της ισχύος εξόδου  $\frac{\Delta P_s}{P_s^{id}}$ , οπότε εάν θελήσω να βρω τα χαρακτηριστικά της διασποράς για την οπτική ισχύ στην έξοδο πρέπει να κάνω χρήση της ιδιότητας (Π.3) λαμβάνοντας την ιδανική τιμή της ισχύος  $P_s^{id}$  ως μια σταθερά ποσότητα.

---

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

### Πειραματικός προσδιορισμός αποτελεσμάτων για αναγεννητή DPSK στα 40 Gbit/s

#### 4.1) Εισαγωγικό σημείωμα πειραματικής διαδικασίας

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα παρουσιασθούν κάποια πειραματικά αποτελέσματα τα οποία θα έρθουν να συγκριθούν με τα συμπεράσματα και τις κατευθύνσεις οι οποίες εξάγονται από τη θεωρητική ανάλυση που προηγήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Αφού παρουσιασθούν συνοπτικά τα στοιχεία υλοποίησης της πειραματικής διαδικασίας που έλαβε χώρα στο εργαστήριο φωτονικής τεχνολογίας του ΕΜΠ για την αναγέννηση σημάτων DPSK θα δοθεί έμφαση στην επεξεργασία συγκεκριμένων στιγμιότυπων κατά την επεξεργασία της αναγέννησης και τα οποία ακολουθούν την ανάλυση που έχει προηγηθεί για τη θεωρητική ανάλυση.

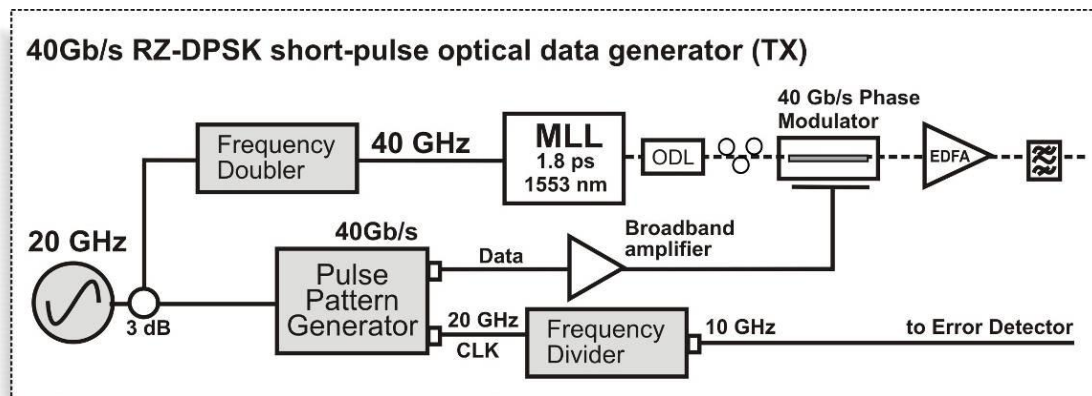
Η παρουσίαση θα ξεκινήσει από τη διάταξη του πομπού για τα DPSK τα οποία χρησιμοποιώ στη συγκεκριμένη διπλωματική για τη μελέτη μου. Στη συνέχεια θα παρουσιάσω τη διάταξη η οποία χρησιμοποιείται ώστε να εισάγει την αβεβαιότητα-αλλοίωση ποιότητας- στο σήμα μου και την οποία έχω ως στόχο να περιορίσω. Παράλληλα θα εμφανίζεται και η επίδραση της εισαγωγής της αβεβαιότητας αυτής στα σήματα με την παραβολή “διαγράμμάτων ματιού” (eye diagrams) στα οποία αποτυπώνεται στη βάση των πειραματικών δεδομένων πώς εμφανίζεται η παραμόρφωση στα σήματα μου.

Στη συνέχεια αφού περιγράψω την αναγεννητική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα και περιλαμβάνει τα στοιχεία τα οποία έχουν παρουσιασθεί αναλυτικά σε προηγούμενα κεφάλαια σε επίπεδο λειτουργίας και συμπεριφοράς θα παραβάλλω τα σήματα τα οποία εντοπίζονται στην έξοδο του αναγεννητή για να σχολιάσω το βαθμό της αναγέννησης που έχουν υποστεί. Στο τέλος παρουσιάζονται και τα διαγράμματα απόδοσης για τη διάταξη μου έχοντας επεξεργαστεί τα διαγράμματα που εμφανίζουν τα σφάλματα των bits κατά τη μεταφορά της πληροφορίας χρησιμοποιώντας το εργαλείο του ρυθμού BER(bits error rate).

#### 4.2) Παρουσίαση πομπού DPSK σημάτων στα 40Gbit/s

Ο πομπός DPSK σημάτων για μετάδοση πληροφορίας με ρυθμό μετάδοσης τα 40Gbit/s σχεδιάστηκε με συγκεκριμένες προδιαγραφές οι οποίες τηρούν βασικές αρχές-παραδοχές του πειράματος που έλαβε χώρα στο εργαστήριο και έχουν ληφθεί υπόψη μια σειρά παραμέτρων οι οποίες θα αναφερθούν στη συνέχεια. Η πιο διαδεδομένη τεχνική για την παραγωγή-γέννηση υψηλής ποιότητας οπτικών παλμών έγκειται στη χρησιμοποίηση mode-locked laser το οποίο βρίσκεται και στη διάθεση του εργαστηρίου και έχει συγκεκριμένη συχνότητα πηγής παραγωγής παλμών. Οπότε με τη χρήση αυτού σε μια συχνότητα 40GHz μπορώ να υλοποιήσω απευθείας την παραγωγή σημάτων DPSK χωρίς να καταφύγω στη χρησιμοποίηση της τεχνικής της πολυπλεξίας από τα 10 GHz. Το γεγονός

αυτό μου παρέχει το πλεονέκτημα της αποφυγής συγκεκριμένων διαφοροποιήσεων της φάσης των παλμών που εμφανίζεται στην τεχνική της πολυπλεξίας.

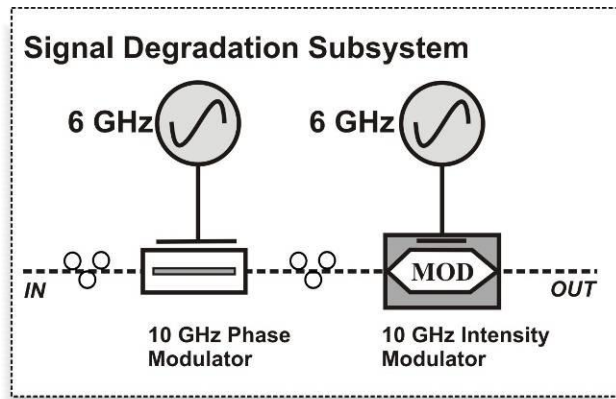


Εικόνα 4.1 παρουσίαση πομπού παλμών RZ στα 40Gbit/s για DPSK σχήμα διαμόρφωσης

Ως προς κάποια βασικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης διάταξης του πομπού αξίζει να τονιστεί η χρησιμοποίηση του mode-locked laser (MLL) το οποίο είναι κλειδωμένο σε ένα μήκος κύματος το οποίο είναι ρυθμισμένο στα 1552 nm με δυνατότητα μεταβολής κβαντισμένη στα 4 nm. Η επιλογή για το laser repetition ρυθμίστηκε στα 39.81312GHz με βήμα μεταβολής τα 200MHz. Βασικό στοιχείο της διάταξης αποτελεί ο διαμορφωτής φάσης ο οποίος παράγει το σήμα το οποίο μετά από το πέρασμα από τον προενισχυτή EDFA αποτελεί και το DPSK σήμα που με ενδιαφέρει. Η διάταξη ODL έχει σημαντικό ρόλο στη διάταξη του πομπού καθώς έρχεται να επιτύχει το συγχρονισμό στο πεδίο του χρόνου τόσο του ηλεκτρικού όσο και του οπτικού σήματος στον διαμορφωτή.

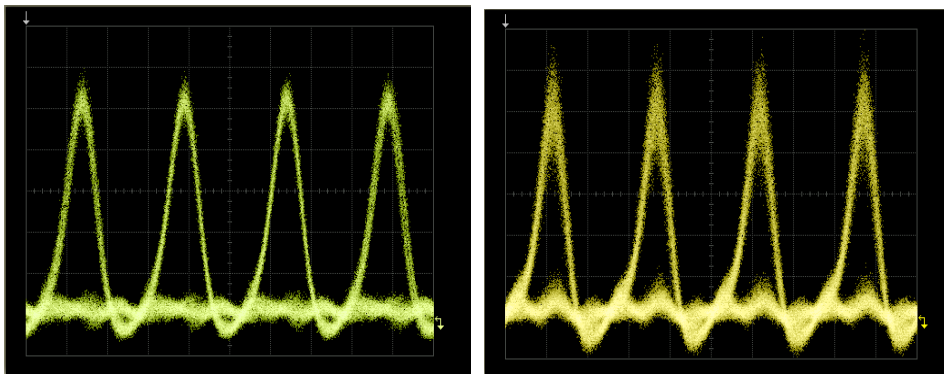
### 4.3) Διάταξη που εισάγει την παραμόρφωση στα σήματα

Με βάση την ανάλυση που έχει γίνει μέχρι τώρα για την ανάγκη της αναγέννησης των οπτικών σημάτων θα πρέπει να προσδιορίσω έναν μηχανισμό ο οποίος θα εισάγει μια αβεβαιότητα στο αρχικό μου σήμα και η οποία θα έρθει να αναιρεθεί με την παρουσία του αναγεννητή. Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας έγινε χρήση μιας διάταξης η οποία θα εισάγει ταυτόχρονα αβεβαιότητα στο πλάτος αλλά και στη φάση των DPSK σημάτων ταυτόχρονα. Το γεγονός αυτό έρχεται σε ένα πιο γενικευμένο πλαίσιο θεώρησης σε σύγκριση με τη θεωρητική ανάλυση που προηγήθηκε και στην οποία ακολουθήθηκε η ανεξάρτητη ανάλυση για αβεβαιότητα στη φάση και στο πλάτος των σημάτων. Τα συμπεράσματα ωστόσο από τις δυο διακριτές οικογένειες προσέγγισης του αναγεννητή τέμνονται στη δυνατότητα και τα χαρακτηριστικά που δίνεται από τη χρήση του αναγεννητή. Με βάση τη διάταξη που φαίνεται παρακάτω έχω την επιλογή να εισάγω ένα νετερμινιστικό πακέτο θορύβου στο αρχικό μου σήμα το οποίο παράγεται από τον πομπό στο πλάτος και στη φάση του σήματος.



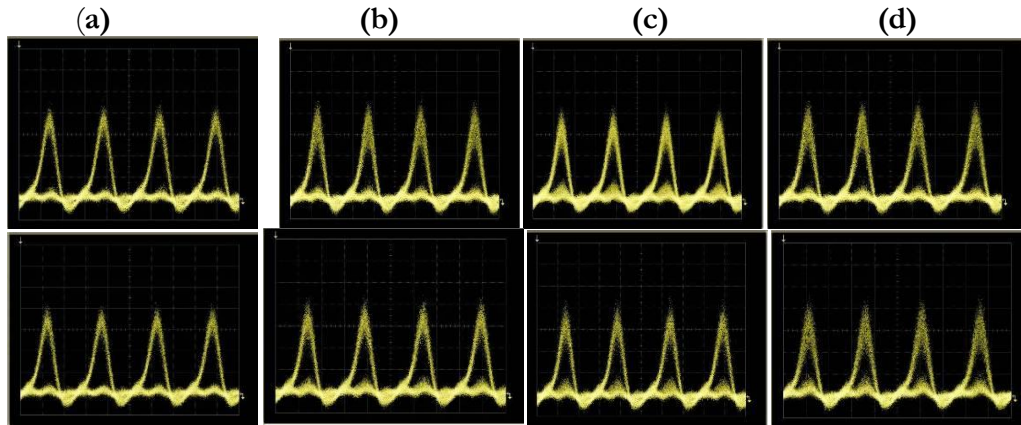
Εικόνα 4.2 Πειραματική διάταξη που εισάγει αβεβαιότητα φάσης και πλάτους ταυτόχρονα στο DPSK σήμα

Στη συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιώ για δύο σήματα RF που βρίσκονται στη συχνότητα των 6 GHz, ώστε να “χαλάσουν” την ποιότητα του σήματος μου. Χρησιμοποιώ ένα σήμα των 6GHz το οποίο έρχεται να λειτουργήσει ως λάθος σήμα και να οδηγήσει το διαμορφωτή φάσης ώστε να εισάγει μια αβεβαιότητα φάσης στο σήμα. Στη συνέχεια ένα άλλο σήμα ίδιας συχνότητας οδηγεί το διαμορφωτή Mach-Zender (MOD) με στόχο να εισάγει ένα λάθος στο πλάτος του σήματος. Σαν αποτέλεσμα της δράσης της συγκεκριμένης διάταξης στην πειραματική διαδικασία κατάφερα να εισάγω αβεβαιότητα στους παλμούς μου της τάξης των 0-2db για το πλάτος των εισερχόμενων σημάτων στη διάταξη. Για το λάθος που εισάγεται στη φάση των παλμών πετυχαίνω μια διακύμανση μεταξύ 0 και  $0.32 \cdot \pi$  rad για διαδοχικούς παλμούς αγνοώντας άλλα φαινόμενα τα οποία έρχονται να παραμορφώσουν τη φάση του σήματος.



Εικόνα 4.3 πειραματικά αποτελέσματα που δείχνουν πως εισάγεται η αβεβαιότητα στο πλάτος και στη φάση

Βασικό στοιχείο της διαδικασίας της αναγέννησης οπτικού σήματος είναι η δυνατότητα που δίνεται να επιτύχω ανάκτηση της πληροφορίας σε ένα σήμα όταν έχω υψηλά επίπεδα αβεβαιότητας στο αρχικό μου σήμα που μεταφέρει την πληροφορία. Όπως προσεγγίστηκε και στο κεφάλαιο 3 της εργασίας παρατηρείται μια διαφορετική αναγεννητική συμπεριφορά ανάλογα με τη στάθμη της διασποράς που εντοπίζεται στο αρχικό μου σήμα. Χαρακτηριστικά εξέτασα τη συμπεριφορά της αναγεννητικής μου διάταξης για συγκεκριμένες τιμές διασποράς των τιμών θορύβου που εμφανίζεται στο πλάτος και στη φάση του αρχικού σήματος. Μια ανάλογη διαδικασία σε πειραματικό επίπεδο οδήγησε στη δημιουργία μιας οικογένειας διαγραμμάτων τα οποία απεικονίζουν την παραμόρφωση της ποιότητας ανάλογα με τα επίπεδα του θορύβου-παραμόρφωσης που θέλω να εισάγω.



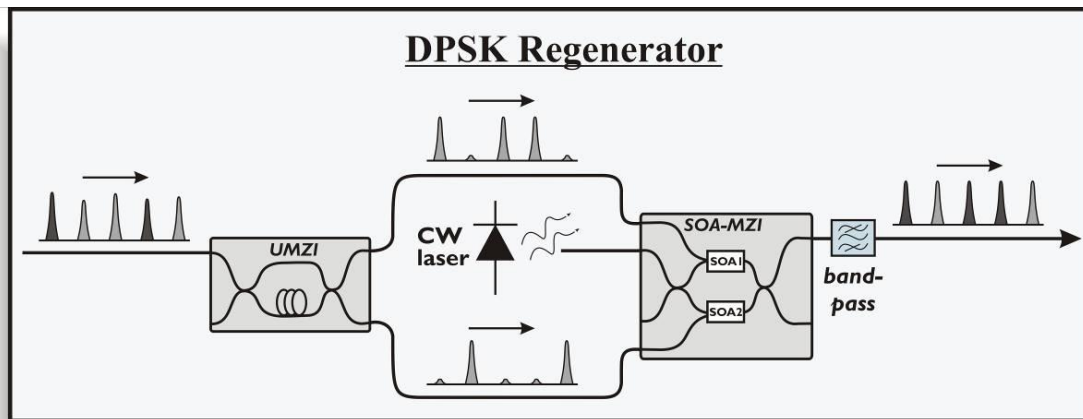
Εικόνα 4.4 πειραματικά δεδομένα τα οποία εμφανίζουν την παραμόρφωση του σήματος για συγκεκριμένη στάθμη της αβεβαιότητας που εισάγω. (a) το αρχικό μου σήμα DPSK χωρίς καμία εισαγωγή θορύβου. (b) 2 db διακύμανση στο πλάτος μου και 1.1 db διακύμανση στη φάση μου. (c) διακύμανση για το πλάτος του DPSK σήματος 2 db και για τη φάση του 1.3 db (d) διακύμανση πλάτους για το DPSK σήμα μου 2 db και για τη φάση 1.7 db.

Από τα παραπάνω πειραματικά δεδομένα παρατηρώ πως επιδρά η παραμόρφωση του αρχικού σήματος- το οποίο δεν υποφέρει από την παρουσία της επίδρασης του θορύβου που εισάγω- ανάλογα με τη στάθμη που επιλέγω να εισάγω την αβεβαιότητα. Διατηρώντας σταθερή τη διακύμανση της αβεβαιότητας που εισάγεται στο πλάτος του σήματος μεταβάλλω το επίπεδο της διακύμανσης της φάσης στο σήμα μου και παρατηρώ το επίπεδο παραμόρφωσης του. Μια πρώτη διαπίστωση η οποία θεμελιώνεται και στο τέλος της εργασίας είναι η μεγαλύτερη ευαισθησία που εμφανίζει το αρχικό DPSK σήμα ως προς την αλλοίωση της ποιότητας του, στην εισαγωγή μεγαλύτερης στάθμης αβεβαιότητας φάσης το οποίο αποτυπώνεται και στα διαγράμματα ματιού που παρατίθενται.

#### 4.4) Παρουσίαση πειραματικής διάταξης DPSK αναγεννητή

Μια συνοπτική παρουσίαση της διάταξης του DPSK αναγεννητή θα παρουσιασθεί στη συνέχεια εστιάζοντας τόσο στην υλοποίηση της πειραματικής διάταξης αλλά και στο μηχανισμό αναγέννησης ο οποίος λαμβάνει χώρα. Στην είσοδο της αναγεννητικής διάταξης θα έχω τα σήματα τα οποία έχουν υποστεί την εισαγωγή αβεβαιότητας θορύβου στη φάση και το πλάτος από τη διάταξη που περιέγραψα στην προηγούμενη ενότητα. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα ο αναγεννητής μου αποτελείται από μια διάταξη ενός ακολουθητή 1-bit (DI) και ένα συμβολόμετρο Mach-Zender(MZI) το οποίο χρησιμοποιεί ημιαγωγίμους οπτικούς ενισχυτές (SOAs).





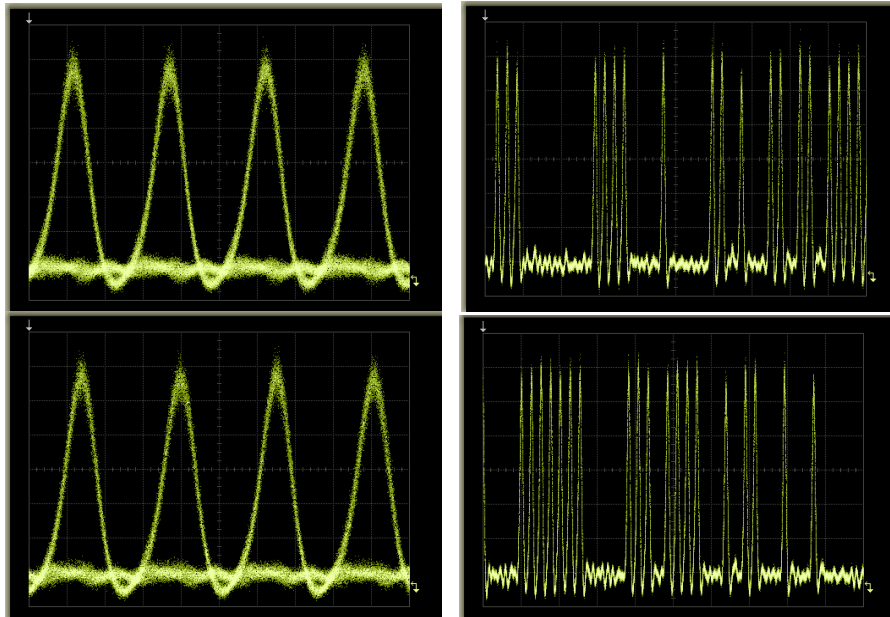
Εικόνα 4.5) αναγεννητής DPSK σημάτων με χρήση συμβολόμετρου MZI-SOA

Αντλώντας κάποια βασικά στοιχεία από τη θεωρία των προηγούμενων κεφαλαίων φαίνεται ότι το συμβολόμετρο MZI με χρήση των SOAs στους βραχίονες του αποικρίνεται στη μεταβολή του πλάτους των παλμών ελέγχου τα οποία οδηγούνται στους ενισχυτές αλλά όχι και στη φάση τους. Γι' αυτό ακριβώς το λόγο η διάταξη αυτή δεν μπορεί να λειτουργήσει απευθείας ως αναγεννητική διάταξη για σήματα διαμορφωμένα ως προς τη φάση τους. Για την επίλυση της συγκεκριμένης αντίφασης πρέπει να χρησιμοποιήσω ένα επίπεδο το οποίο θα ενοποιεί τη διαχείριση της πληροφορίας ως προς τη φάση του σήματος κάνοντας χρήση της διάταξης UMZI που φαίνεται και στο σχήμα. Οι δύο έξοδοι του ακολουθητή (UMZI) θα χρησιμοποιηθούν ως παλμοί ελέγχου στους δύο βραχίονες του MZI για να χρησιμοποιηθούν ως παλμοί ελέγχου στους δύο ενισχυτές (SOA1 και SOA2). Με βάση την έξοδο που παίρνω στο UMZI για την κωδικοποιημένη πληροφορία κάθε φορά υπάρχει ένας μόνο παλμός ελέγχου για κάθε bit πληροφορίας που φθάνει σε έναν από τους δύο ενισχυτές του MZI σε ένα από τους δύο βραχίονες. Σαν αποτέλεσμα της λειτουργίας αυτής στην έξοδο θα εμφανιστεί ένα σήμα το οποίο θα είναι μια σειρά διαδοχικών παλμών για τους οποίους θα εμφανίζεται μια διαφορετική προσέγγιση στη φάση τους. Συγκεκριμένα, η διαφορετική φάση των παλμών θα προκαλείται από τον παλμό ελέγχου ο οποίος θα προκαλεί την παραγωγή τους σε κάθε βραχίονα. Οι παλμοί που οδηγούνται από τον "πάνω" οπτικό βραχίονα θα έχουν φάση  $\pi$ , ενώ οι παλμοί που οδηγούνται από τον κάτω βραχίονα θα έχουν φάση  $2\pi$  και με αυτόν τον τρόπο σχηματίζεται ένα DPSK σήμα.

Συνοψίζοντας λοιπόν στη λειτουργία της διάταξης η αποκωδικοποίηση της πληροφορίας του DPSK σήματος στο στάδιο του UMZI οι διαφορετικές καταστάσεις της φάσης του σήματος στις οποίες εμπεριέχεται η πληροφορία μου μετασχηματίζονται σε καταστάσεις πλάτους που αναφέρονται στους παλμούς ελέγχου που οδηγούν τους ενισχυτές. Η αναγέννηση του οπτικού σήματος θα επιτευχθεί με βάση την αξιοποίηση της συνάρτησης μεταφοράς του συμβολόμετρου MZI-SOA που μελετήθηκε αναλυτικά σε προηγούμενα κεφάλαια και θα δώσει στην έξοδο την πληροφορία μου.

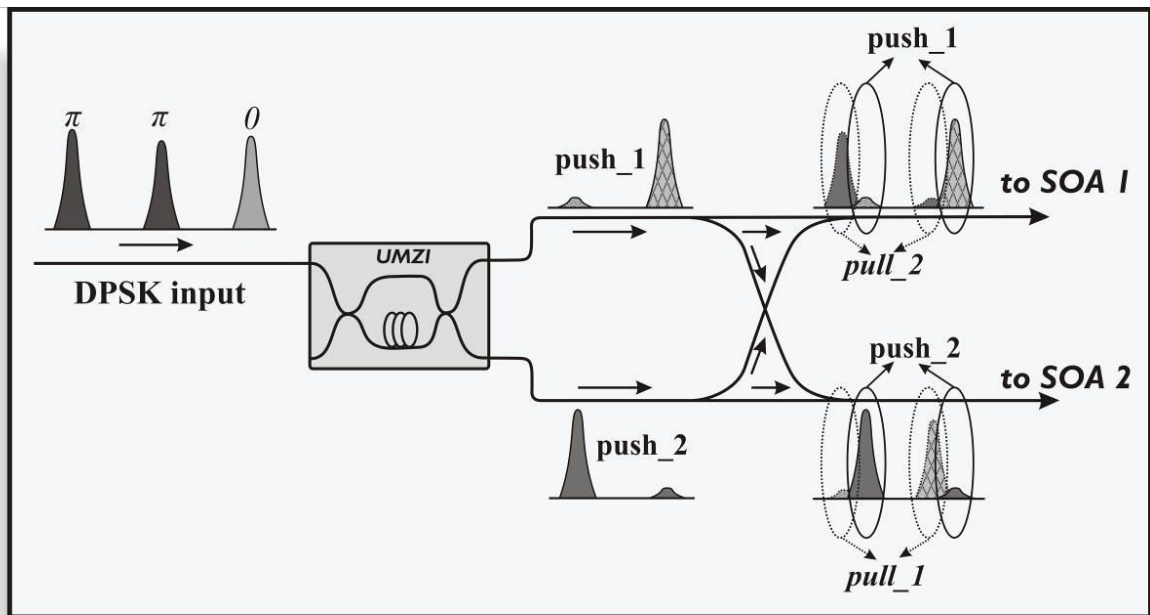
Για την υλοποίηση της πειραματικής διαδικασίας στην έξοδο του UMZI χρησιμοποιώ την τεχνική "push-pull" ώστε να έχω στη διάθεση μου δύο ζευγάρια παλμών ελέγχου που θα οδηγήσουν τους ενισχυτές στους δύο βραχίονες του συμβολόμετρου. Η τεχνική αυτή λαμβάνει χώρα για να ικανοποιήσει τη συνθήκη στους SOAs με στόχο να μειώσω το χρονικό παράθυρο ενίσχυσης στους SOAs. Συγκεκριμένα το σχήμα "push-pull" μου επιτρέπει να χειριστώ τις καμπύλες κόρου των ενισχυτών με τέτοιο τρόπο ώστε σύμφωνα με το σχήμα αυτό ένα αντίγραφο από τον παλμό ελέγχου που οδηγείται στον πάνω οπτικό βραχίονα 1, να οδηγείται με μια μικρή χρονική καθυστέρηση στο βραχίονα 2 με αποτέλεσμα να περιορίζω το παράθυρο προσπέλασης των παλμών και κορεσμού των ενισχυτών.

Έχω λοιπόν για τα δύο ζευγάρια παλμών που αναφέρονται στον πάνω και κάτω οπτικό βραχίονα του συμβολόμετρου και βρίσκονται στην έξοδο του ακολουθητή τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω. Όλα τα χαρακτηριστικά των παλμών αυτών απεικονίζονται στο διάγραμμα 4.6.



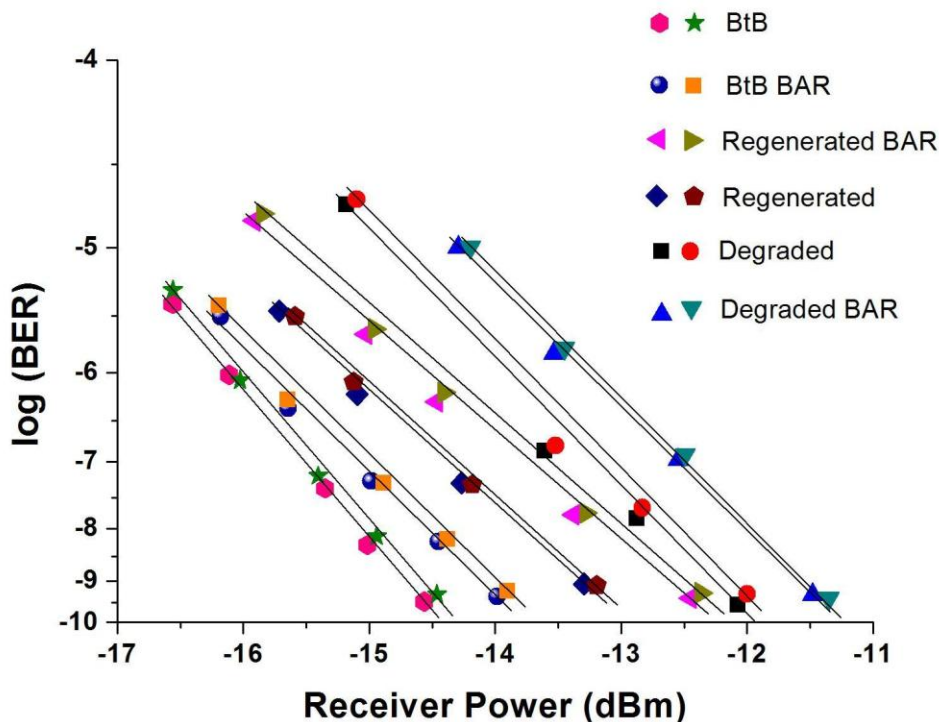
Εικόνα 4.6) πειραματικά αποτελέσματα για την είσοδο του συμβολόμετρου

Με μια πρώτη επεξεργασία των διαγραμμάτων αυτών μας δίνει την εικόνα για την έξοδο των αποκωδικοποιημένων παλμών που χρησιμοποιούνται σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν σε προηγούμενες ενότητες ως παλμοί ελέγχου στους SOAs. παρατηρώ σε πρώτο επίπεδο στο πεδίο του χρόνου την αναμενόμενη έκφραση της συμπληρωματικής δυαδικότητας που προβλέπεται στην έξοδο του ακολουθητή για την πληροφορία. Τα δύο αποκωδικοποιημένα κανάλια που απεικονίζονται παραπάνω, στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθούν και θα ενσωματώσουν-εντυπώσουν την πληροφορία στο σήμα μου CW με βάση τη λειτουργία που αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο για τη διαμόρφωση στο συμβολόμετρο.



Εικόνα 4.7) το σχήμα «push-pull» για τον αναγεννητή DPSK σε επίπεδο πειραματικής υλοποίησης διάταξης.

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής μελέτης του αναγεννητή εκμεταλλευτήκαμε ένα βασικό εργαλείο με το οποίο θα διερευνήσω περαιτέρω τα όρια της αναγεννητικής διαδικασίας, δηλαδή το κατά πόσον είναι εφικτό να ανακτήσω την πληροφορία που αλλοιώνεται λόγω της παρουσίας του θορύβου στο αρχικό μου σήμα. Συγκεκριμένα θα προσδιορίσω το ρυθμό σφαλμάτων των bits που φθάνουν στο δέκτη σε αναλογία με αυτά τα οποία εκπέμπει ο πομπός. Το μέγεθος αυτό θεωρείται ο BER (bits error rate) ο οποίος παρατίθεται σε κάθε στάδιο της αναγεννητικής διάταξης και εκφράζεται σε συνάρτηση με την εκπεμπόμενη ισχύ από τον πομπό. Για να μετρηθεί ο BER σε κάθε στάδιο της διαδικασίας αξίζει να αναφερθεί ότι έχει γίνει χρήση της διαδικασίας της αποικωδικοποίησης στην έξοδο του UMZI και αποπολυπλέκεται σε ένα ρυθμό μετάδοσης 10 Gbit/s σε κάθε κανάλι που χρησιμοποιώ μετά από την εφαρμογή της τεχνικής «push-pull» που ανέφερα τη λειτουργία της παραπάνω.

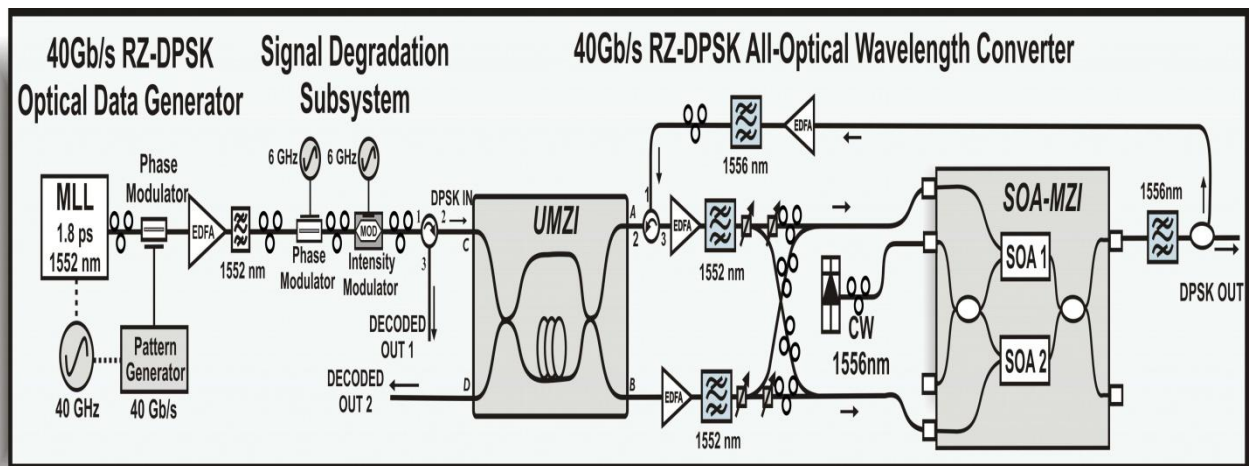


Εικόνα 4.8) επίδοση της διάταξης ως προς την τιμή του BER σ συγκεκριμένα στάδια της αναγεννητικής διαδικασίας

Για την επεξεργασία του προηγούμενου διαγράμματος αξίζει να αναφερθεί στην αρχή η σημασία σε επίπεδο μετάδοσης πληροφορίας η σημασία του μεγέθους BER (bits error rate). Θεωρώντας το πειραματικό setup της αναγεννητικής διάταξης πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από μετρήσεις για την εύρεση του σφάλματος των bits στη μετάδοση από τον πομπό μέχρι το τέλος της αναγεννητικής διαδικασίας στο οποίο θα πάρω το καινούργιο μου σήμα το αναγεννημένο. Ο άλλος διαγραμματικός άξονας είναι η λαμβανόμενη ισχύ σε dbm στην οποία μπορώ να βγάλω ένα εποπτικό-που συνάμα είναι και γενικό συμπέρασμα στα συστήματα μετάδοσης- συμπέρασμα το οποίο ερμηνεύει τον περιορισμό του σφάλματος στη μετάδοση των bits καθώς αυξάνεται η στάθμη ισχύος σε επίπεδο μέτρησης. Η δημιουργία μεγαλύτερης πιθανότητας λάθους στη μεταφορά πληροφορίας εξετάζεται σε κάθε στάδιο της πειραματικής διάταξης καθώς ξεκινώ από τον πομπό και συνεχίζω μέχρι την έξοδο του αναγεννητή. Η πρώτη οικογένεια καμπυλών BER αναφέρεται στο λόγο BtB (Back to Back) που ουσιαστικά εντοπίζει το εγγενές σφάλμα που εντοπίζεται στο δέκτη. Είναι λογικό το μέγεθος του  $\log(\text{BER})$  για μια συγκεκριμένη τιμή ισχύος να εμφανίζει μικρότερη τιμή στην κατάσταση BtB, καθώς στη συνέχεια της επεξεργασίας του σήματος πληροφορίας θα εισάγονται πακέτα θορύβου και παραμορφώσεων που αλλοιώνουν την ποιότητα της πληροφορίας.

Σε επίπεδο ερμηνείας κάποιων βασικών χαρακτηριστικών του διαγράμματος, αρχικά παρατηρώ μια διαφοροποίηση που προκύπτει για την τιμή της παραμέτρου BER στο στάδιο του πομπού (back to back-BtB) για τις περιπτώσεις της κανονικής ακολουθίας πληροφορίας και του συμπληρώματος του. η θεωρητική ερμηνεία θα προέβλεπε να εμφανιστεί ίδια τιμή του μεγέθους για την παράμετρο BER στο σημείο BtB και το συμπληρωματικό του, ωστόσο έρχεται να εμφανισθεί η έννοια της πειραματικής αβεβαιότητας και των σφαλμάτων στο πείραμα και τις μετρήσεις. Στη συνέχεια εμφανίζονται οι καμπύλες για τα δύο κανάλια στην έξοδο του αναγεννητή και τα σφάλματα που εμφανίζονται στις περιπτώσεις του regenerated και του regenerated BAR σήματος

πληροφορίας. Η ασυμφωνία που θεωρητικά ίσως να μας ξαφνιάζει και εδώ ερμηνεύεται με δύο κυρίως τρόπους. Καταρχήν η εμφάνιση σφάλματος σε επίπεδο πειραματικής μέτρησης η οποία πάλι έρχεται να δώσει διαφορετικά αποτελέσματα για ένα μέγεθος στο οποίο ανέμενα ίδια αποτελέσματα. Βασικός άξονας που ερμηνεύει τις διαφορετικές συμπεριφορές των περιπτώσεων που εξετάζω ωστόσο εντοπίζεται στο μηχανισμό που ερμηνεύει τη DPSK διαμόρφωση και την αναγεννητική διαδικασία. Συγκεκριμένα, για τη μετάδοση συμπληρωματικών ακολουθιών πληροφορίας ο μηχανισμός της οδήγησης των παλμών δημιουργείται σε διαφορετικούς βραχίονες του συμβολόμετρου Mach-Zender και άρα εμφανίζεται η δράση διαφορετικών ενισχυτών (SOAs)-αν και σε θεωρητικό επίπεδο προβλέπονται ίδιοι. Συγκεκριμένα ο μηχανισμός αυτός περιγράφεται στα θεωρητικά κεφάλαια εξηγεί το πώς στην κωδικοποίηση του λογικού '1' στο συμβολόμετρο συμβάλλουν δύο παλμοί από τον ίδιο βραχίονα- $\Delta\varphi=0$ - ενώ για την κωδικοποίηση του λογικού '0' συμβάλλουν από διαφορετικούς οπτικούς βραχίονες του MZI. Το γεγονός αυτό παραμορφώνει τους όρους που εισέρχονται τα διάφορα φαινόμενα και εξηγεί τη διαφορετική απόκριση για τις σφάλματα των bits και την αντανάκλαση στο μέγεθος BER. Τέλος, παρατηρώ πως τη "χειρότερη" συμπεριφορά ως προς τα σφάλματα των bits, για δεδομένη τιμή ισχύος εμφανίζεται στην περίπτωση του "χαλασμένου" σήματος, γεγονός που είναι απόλυτα σύμφωνο με το μηχανισμό παραμόρφωσης του σήματος που υποδηλώνει και το στόχο αυτό.



Εικόνα 4.9) πειραματικό "set up" που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο φωτονικής τεχνολογίας του ΕΜΠ

---

# Κεφάλαιο 5<sup>0</sup>

## Συμπεράσματα διπλωματικής εργασίας

Στη συγκεκριμένη εργασία έγινε προσπάθεια να αναζητηθεί η δυνατότητα που υπάρχει για αναγέννηση της πληροφορίας κατά τη μετάδοση της με σχήμα διαμόρφωσης DPSK. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η συμπεριφορά μιας αναγεννητικής διάταξης η οποία χρησιμοποιεί έναν ακολουθητή 1-bit (DI) στην είσοδο και στη συνέχεια ένα συμβολόμετρο Mach-Zender το οποίο στους βραχίονες του είναι εφοδιασμένο με ημιαγωγικούς οπτικούς ενισχυτές(SOAs). Στην είσοδο χρησιμοποιήσα DPSK σήματα εισόδου τα οποία εμφάνιζαν παραμόρφωση ως προς το πλάτος τους αλλά και τη φάση τους. Προσπάθησα να αναζητήσω ένα μοντέλο το οποίο θα δέχεται ως είσοδο το μέτρο της αβεβαιότητας στην είσοδο και η απόκριση του θα εντοπίζεται στα χαρακτηριστικά του σήματος που θα έχω στην έξοδο του αναγεννητή μου. Το καθολικό εργαλείο το οποίο επικαθορίζει και το βασικό στόχο της ίδιας της οπτικής αναγέννησης είναι ο περιορισμός της διακύμανσης παραμόρφωσης που εμφανίζεται στην είσοδο σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό στην έξοδο. Για την παραβολή συμπερασμάτων θα κατανείμω το σχολιασμό κάποιων αποτελεσμάτων, ξεκινώντας από το μοντέλο μαθηματικής προσαρμογής του οπτικού αναγεννητή που χρησιμοποιήσα στο κεφάλαιο 2 και στη συνέχεια στη θεωρητική επεξεργασία της διαδικασίας επανάκτησης των χαρακτηριστικών του σήματος εισόδου.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο κατέληξα σε μερικά συμπεράσματα από τη μαθηματική μοντελοποίηση του συμβολόμετρου Mach-Zender με τους SOAs για την επεξεργασία της εξόδου στη θύρα μεταγωγής του, που θα είναι και ο προσορισμός για το αναγεννημένο σήμα μου στη διάταξη του αναγεννητή. Βασικές παρατηρήσεις που εντοπίζονται κατά τη διάρκεια μελέτης της διάταξης παρατίθενται κατά την πορεία της εξαγωγής σχέσεων που διέπουν το οπτικό κύλιωμα και ο αναγνώστης θα εντοπίσει βασικά στοιχεία προσαρμογής και σχολιασμού στη συλλογιστική πορεία για την εξαγωγή τους. Παρακάτω παρατίθενται κάποιες βασικές επισημάνσεις που η σημασία τους εντοπίζεται στο να δώσουν εκείνα τα βασικά στοιχεία για την ερμηνεία φαινομένων που συναντώ στο επόμενο κεφάλαιο, που αποτελεί και τον κορμό της προσπάθειας της εργασίας. Κατέληξα στις εκφράσεις για το πλάτος και τη φάση του πεδίου  $E^S = Ee^{-i(\omega t + \phi_s)}$  στη θύρα μεταγωγής:

$$E = \frac{1}{2} E_{in} \sqrt{G_2} |g(\Delta\phi)| \text{ και } \phi_s = -\phi_1 + \text{Arg} \{g(\Delta\phi)\} \text{ αντίστοιχα με πυρήνα της}$$
$$\text{μοντελοποίησης τη συνάρτηση } g(\Delta\phi) = 1 - e^{i\Delta\phi} + \sum_{v=1}^{+\infty} \frac{\left(\frac{-\Delta\phi}{a}\right)^v}{v!}.$$

Από τις εκφράσεις αυτές μπορώ να σχολιάσω τα εξής:

# Η έξοδος εμφανίζει μια συμπεριφορά για το πλάτος η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά του σήματος εισόδου (CW)  $E_{in}$ , αλλά κυρίως η διαδικασία

---

της μεταβολής του επιτυγχάνεται από την παράμετρο της  $|g(\Delta\phi)|$ . Άλλα μπορώ να επιτύχω μια ρύθμιση- παραμετροποίηση για τα δεδομένα του πλάτους μου στην έξοδο παραμετροποιώντας τη διαφορά φάσης  $\Delta\phi$  που εισάγουν οι δύο βραχίονες με τους SOAs στο συμβολόμετρο.

# Για τη φάση  $\phi_s$  μπορώ να παρατηρήσω από τα διαγράμματα του κεφαλαίου 2 πως εμφανίζει μια γραμμική συμπεριφορά σε περιοχές λειτουργίας που απεικονίζονται για την παράμετρο  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$  και μπορεί να γίνει παραλληλισμός με τη χρήση οπτικού βρόχου Sagnac, διάταξης που χρησιμοποιείται ευρέως σε διατάξεις οπτικής αναγέννησης σημάτων DPSK. Η σύγκλιση αυτή είναι απόρροια του γεγονότος γεννάται από το γεγονός της λειτουργίας των SOAs στην περιοχή βαθύ κορεσμού.

# Η συμπεριφορά των SOAs αναλύθηκε στην περιοχή κορεσμού αγνοώντας την περιοχή δυναμικής συμπεριφοράς ανάκαμψης των φορέων και συνεπώς των χαρακτηριστικών που εισάγουν οι ενισχυτές. Το πεδίο διερεύνησης της περιοχής αυτής έχει ιδιαίτερη σημασία τόσο από θεωρητικής σκοπιάς, αλλά κυρίως γιατί η συμπεριφορά της συγκεκριμένης διάταξης αποκτά σημαντικό ενδιαφέρον σε αυτή την περιοχή λειτουργίας.

Στο κεφάλαιο 3 αναζητείται ο πυρήνας της δυνατότητας αναγέννησης DPSK σημάτων με χρήση της συγκεκριμένης διάταξης και η θεωρητική επεξεργασία του οπτικού κυκλώματος του αναγεννητή και της συμπεριφοράς του στην έξοδο. Η ανάλυση έχει προχωρήσει κατηγοριοποιώντας την αβεβαιότητα στην είσοδο ανάλογα με την εμφάνιση της στη φάση ή στο πλάτος του σήματος και εξετάζοντας για κάθε περίπτωση το πλάτος και τη φάση της εξόδου του αναγεννητή. από τα δεδομένα που έχουν περιγραφεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 3 εξάγονται κάποια βασικά συμπεράσματα:

# Μια βασική παρατήρηση βρίσκεται στο σημείο κανονικής λειτουργίας του οπτικού κυκλώματος του αναγεννητή, το οποίο εντοπίζεται με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της διασποράς στα μεγέθη του πλάτους και της φάσης στη θύρα μεταγωγής στην οποία θα εντοπιστεί το αναγεννημένο DPSK σήμα. Το σημείο αυτό προσδιορίστηκε σε όλες τις περιπτώσεις στην περιοχή του  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = \pi$ . Σε όλα τα διαγράμματα που απεικονίζεται η απόκριση της διάταξης για συγκεκριμένα επίπεδα θορύβου στην είσοδο και η επίδραση που έχουν αυτά στην έξοδο. η ελαχιστοποίηση της σε όλες τις οικογένειες καμπυλών εντοπίζεται στο σημείο που αναφέρθηκα για τη ποσότητα  $\Delta\phi$ . Παράλληλα τα συμπεράσματα αυτό βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με τον ίδιο το μηχανισμό της αναγέννησης στον DPSK αναγεννητή με τον τρόπο που έχω υπέρθεση παλμών τους βραχίονες του MZI, μηχανισμός που αναλύθηκε στην εισαγωγή της εργασίας.

# Στόχος της αναγέννησης με όρους ποσοτικοποίησης του, είναι να περιορίσω στην έξοδο τη διακύμανση στη φάση και το πλάτος του αναγεννημένου μου σήματος σε σχέση με τη διακύμανση της εισόδου. Από τα θεωρητικά αποτελέσματα τα οποία παρατίθενται με την προσομοίωση τους στο πρόγραμμα Matlab συμπεραίνω πως ο στόχος αυτός έχει επιτευχθεί για τα δεδομένα και τη συλλογιστική που έχω χρησιμοποιήσει στην εργασία μου. Για περιοχές λειτουργίας που βρίσκονται κοντά στην περιοχή κανονικής – βέλτιστης λειτουργίας βλέπω πως τα στατιστικά δεδομένα της στοχαστικής διαταραχής στην είσοδο μου έρχονται να περιορίσουν την εμφάνιση τους στη έξοδο. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η διακύμανση για το αναγεννημένο σήμα στην περίπτωση που στην είσοδο εμφανίζεται αβεβαιότητα φάσης με τυπικής απόκλισης  $\sigma = \pi/36$  rad, η οποία περιορίζεται σε μια τιμή της τάξης του  $\sigma = \pi/190$ , γεγονός που μας ικανοποιεί σε επίπεδο αναγέννησης.



---

# Καθώς αυξάνεται το επίπεδο του θορύβου στην είσοδο διευρύνεται και το επίπεδο της αβεβαιότητας του σήματος στο πλάτος και τη φάση στην έξοδο του αναγεννητή, γεγονός το οποίο επαληθεύει το βασικό μοχλό απεικόνισης της ποιότητας του σήματος στην είσοδο στην έξοδο του αναγεννητή. Όσο πιο πολύ “χαλασμένο” εμφανίζεται ένα σήμα στην είσοδο της διάταξης αναμένω ένα βελτιωμένης ποιότητας μεν - λόγω δράσης αναγεννητή - το οποίο βέβαια θα εμφανίζει μεγαλύτερο δείκτη αβεβαιότητας στα χαρακτηριστικά του σε σχέση με την είσοδο σήματος με μικρότερο βαθμό διαταραχής. Εξειδικεύοντας την παρατήρηση αυτή από τις οικογένειες καμπύλων συμπεραίνω πως σε περιοχές λειτουργίας του αναγεννητή που βρίσκονται στα όρια της λειτουργίας του ( $\Delta\varphi_{ideal} = \pi/6, 5\pi/6$ ) ο θόρυβος στην έξοδο για μεγάλες τιμές θορύβου στην είσοδο παραμένει αναλλοίωτος ουσιαστικά αναιρώντας το χαρακτήρα της διάταξης ως αναγεννητή. Σε αντίθεση με την περιοχή κανονικής λειτουργίας που η κλίση αύξησης του θορύβου στην έξοδο σε σχέση με την είσοδο είναι αρκετά μικρότερη και για μεγάλες τιμές διασποράς θορύβου στην είσοδο λαμβάνω ικανοποιητικές τιμές για το θόρυβο εξόδου.

# ένα βασικό χαρακτηριστικό της ανάλυσης που προηγήθηκε στην εργασία είναι ο ξεχωριστός τρόπος αντιμετώπισης για την παραμόρφωση του σήματος ως προς τη φάση του και το πλάτος και στη συνέχεια τη βελτίωση της διαταραχής αυτής από τη δράση του αναγεννητή. Θεώρησα σήματα τα οποία είχαν μια διακύμανση στη φάση και ιδανική συμπεριφορά στο πλάτος και αντίστροφα. Η περίπτωση αυτή ωστόσο στερείται πραγματικού ανάλογου καθώς σε συνθήκες μετάδοσης εμφανίζεται ταυτόχρονα αβεβαιότητα τόσο στο πλάτος, όσο και στη φάση του DPSK σήματος με στόχο τον περιορισμό τους. Με βάση τα δεδομένα που προσέγγισα από την εργασία μου παρατήρησα μια τάση δυαδικής συμπεριφοράς στη συμπεριφορά της αναγέννησης για το πλάτος και τη φάση του σήματος μου. Στην περίπτωση που στο αρχικό μου σήμα εμφανίζεται διαταραχή στη φάση του, ο περιορισμός για τη διαταραχή της φάσης στην έξοδο επιτυγχάνεται σε καλύτερο βαθμό σε σχέση με την επίδραση του θορύβου που εμφανίζεται στο πλάτος του εξερχόμενου σήματος. Ενώ αντίστροφα προσεγγίζεται η συμπεριφορά για την περίπτωση που στην είσοδο μου εμφανίζεται μια διαταραχή στο πλάτος. Το φυσικό νόημα που εξάγεται από τη συμπεριφορά αυτή εάν προχωρήσω σε μια υπέρθεση των καταστάσεων αυτών μας τονίζει ότι ίσως είναι αδύνατος ο περιορισμός ταυτόχρονα τόσο της αβεβαιότητας φάσης όσο και της αβεβαιότητας στο πλάτος με ικανοποιητικό τρόπο. Θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον η περαιτέρω θεωρητική ανάλυση για την περίπτωση που ανέφερα της ταυτόχρονης συνύπαρξης στο αρχικό μου σήμα διαταραχής στο πλάτος αλλά και στο πλάτος και η διερεύνηση της δυνατότητας που μου δίνεται να αναγεννήσω τα χαρακτηριστικά αυτά ή να εμφανισθεί η ισχύ της αρχής της απροσδιοριστίας του Heisenberg στην περίπτωση αυτή...



---

## Βιβλιογραφία

- [1] Αβραμόπουλος Ηρακλής, *Φωτονική Τεχνολογία στις Τηλεπικοινωνίες*, ΕΜΠ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ
- [2] John Wilson, John Hawkes, *Οπτοηλεκτρονική: Μια εισαγωγή*, Επιστημονική Επιμέλεια Α.Α Σεραφετινιδης, Αθήνα 2007.
- [3] O. Svelto, *Αρχές των Lasers*, Γ.Α Κουρούλλης – Α.Α Σεραφετινιδης, Αθήνα 1986.
- [4] Rongqing Hui, Benyuan Zhu, Renxiang Huang, Christopher T.Allen, Kenneth R. Demarest, Douglas Richards, *Subcarrier Multiplexing for High – Speed Optical Transmission*, Journal of Lightwave Technology , Vol. 20, No. 3 March 2002
- [5] Xiupu Zhang, Baozhu Liu, Jianping Yao, Ke Wu, Raman Kashyap, *A Novel Millimeter – Wave – Band Radio – over – Fiber System with Dense Wavelength – Division Multiplexing Bus Architecture*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 54, No. 2, February 2006.
- [6] Li Keren, Matsui Toshiaki, Izutsu Masayuki, *Photonic Antennas and its Application to Radio – over – Fiber Wireless Communication Systems*, Journal of the National Institute of Information and Communications Technology, Vol. 51, Nos. 1/2 2004.
- [7] A. Striegler and B.Schmauss, Member, IEEE, *All-Optical DPSK Signal Regeneration Based on Cross-Phase Modulation*, IEEE Photonics Technology letters, Vol. 16, No.4, April 2004
- [8] Robert Elschner, Alessandro Marques de Melo, Christian-Alexander Bunge, and Klaus Petermann, *Noise suppression properties of an interferometer-based regenerator for differential phase-shift keying data*, Optics letters/vol. 32/No.2/ January 15, 2007
- [9] P. Vorreau, A. Marculescu, J.Wang, G. Bottger, B.Sartorius, C. Bornholdt, J.Slovak, C.Schmidt, S.Tsadka, W.Freude, a, 2006nd J.Leuthond, *Cascadability and Regenerative Properties of SOA All-Optical DPSK Wavelength Converters – IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.18, No.18, September 15, 2006
- [10] Proakis, J.G., *Digital Communications*, McGraw-Hill, 2001.
- [11] Haykin, S., *Συστήματα Επικοινωνίας*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1995.
- [12] Tolga Kurt, Abbas Yongacoglu, Jean-Yves Chouinard, *OFDM and Externally Modulated Multi – mode Fibers in Radio over Fiber Systems*, IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 5, No. 10, October 2006.

- 
- [13] Peter J. Winzer, Rene-Jean Essiambre, *Advanced Modulation Formats for High – Capacity Optical Transport Networks*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 24, No. 12, December 2006
- [14] G. P. Agrawal, *Fiber – Optic Communication*, 1997
- [15] Π. Γ Κωττής, *Διαμόρφωση και Μετάδοση Σημάτων*, Τζιόλα 2005
- [16] Competent Consulting Services for the Laser and Photonics Industry,  
<http://www.rp-photonics.com>
- [17] Wikipedia  
<http://www.en.wikipedia.org>
- [18] Εισαγωγή στη θεωρία των πιθανοτήτων και Στατιστική Ι. Κοκολάκη- Γ. Σπηλιώτη- Αθήνα 1996 .
- [19] Σχεδίαση και υλοποίηση Μηχανισμού Μεταφοράς Δεδομένων από Συσκευές Αποθήκευσης σε δίκτυο Myrinet, χωρίς τη μεσολάβηση ιεραρχίας Μνήμης Αναστάσιου Α. Νάνου – διπλωματική εργασία ΣΗΜΜΥ ΕΜΠ, Αθήνα 2006
- [20] Ν. Α. Πλέρος, “Ψηφιακά Συστήματα Υπερυψηλών Ταχυτήτων για Οπτικά Δίκτυα Μεταγωγής Πακέτων”, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2004.

---