

«Σύμφωνα Ασύρματα Οπτικά Συστήματα ως Δομικά Στοιχεία για την Υλοποίηση Δικτύων Οικίας και Επαγγελματικών Χώρων Επόμενης Γενιάς, (COWS)»

Κωδικός Έργου : 3525

COWS

Παραδοτέο:	Π4.1
Τίτλος:	Τεχνικές Υλοποίησης Δομικών Στοιχείων
Ημερομηνία:	11/1/2015
Επιμέρους Δράση:	Π.Ε. 3
Υπεύθυνος Σύνταξης:	Θωμάς Καμαλάκης
Ομάδα Εργασίας:	Θωμάς Καμαλάκης, Αντώνιος Μπόγρης, Βασίλειος Δαλάκας, Γεωργία Δέδε, Δημήτριος Αλεξόπουλος, Εμμανουήλ Φυτράκης
Είδος:	Τεχνική Αναφορά

1. Περιεχόμενα

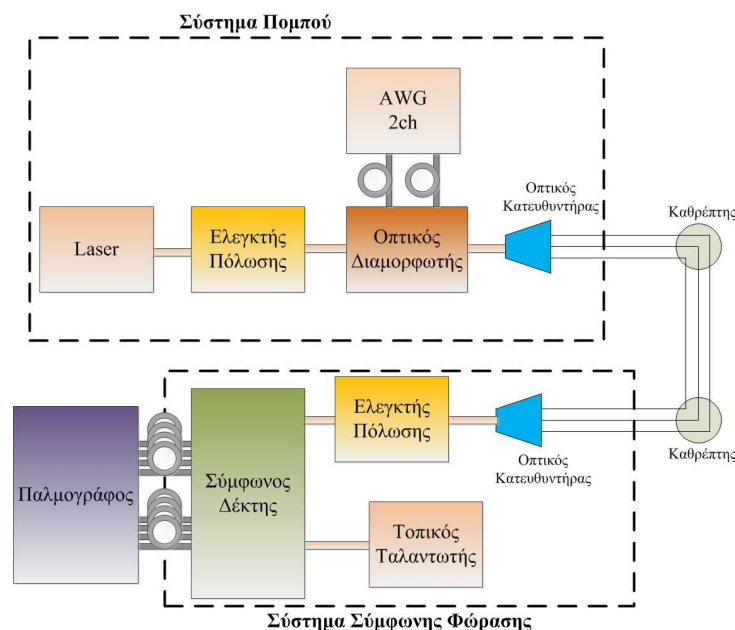
1. Περιεχόμενα.....	2
2. Σκοπός του παραδοτέου.....	3
3. Περιγραφή του συστήματος COWS.....	3
3.1 Σύστημα πομπού.....	3
3.2 Σύστημα σύμφωνης φώρασης.....	4
4. Σύστημα Πομπού.....	5
4.1 Συζεύκτης -3dB.....	6
4.2 Συμβολόμετρο Mach-Zehnder.....	6
4.3 Οπτικός διαμορφωτής.....	7
5. Ασύρματη οπτική ζεύξη.....	9
5.1 Οπτική διόπτρα.....	9
5.2 Οπτική πύλη ίνας.....	9
5.3 Διόπτρα μεταβλητού δείκτη διάθλασης (GRIN).....	10
6. Σύμφωνος Δέκτης.....	12
7. Τεχνικές Προδιαγραφές.....	15
8. Αναφορές.....	33

2. Σκοπός του παραδοτέου

Στο παρόν παραδοτέο παρουσιάζονται τα βασικά δομικά στοιχεία τα οποία θα αποτελέσουν ένα ολοκληρωμένο οπτικό ασύρματο σύστημα που χρησιμοποιεί σύμφωνη φώραση (coherent optical wireless system - COWS). Θα αναλύσουμε τα απαραίτητα χαρακτηριστικά των οπτικό-ηλεκτρονικών στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν στην πειραματική διάταξη COWS. Τέλος θα παραθέσουμε τις τεχνικές προδιαγραφές της πειραματικής διάταξης COWS.

3. Περιγραφή του συστήματος COWS.

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η γενική εικόνα των οπτικό-ηλεκτρονικών στοιχείων που απαιτούνται για ένα λειτουργικό σύστημα COWS. Όπως σε κάθε τηλεπικοινωνιακό σύστημα τα στοιχεία που το απαρτίζουν χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες το σύστημα του πομπού, το κανάλι μετάδοσης και τέλος το σύστημα λήψης. Στην Εικόνα 3-1, αποτυπώνεται το σχεδιάγραμμα της πειραματικής διάταξης ενός οπτικά ασύρματου συστήματος σύμφωνης φώρασης.



Εικόνα 3-1. Σχηματική αναπαράσταση ενός ολοκληρωμένου ασύρματου οπτικού συστήματος σύμφωνης φώρασης. Στο σχήμα ξεχωρίζουν με νοητές γραμμές η περιοχή του πομπού και του δέκτη.

3.1 Σύστημα πομπού

Απαραίτητα στοιχεία που θα πρέπει να έχει το σύστημα του πομπού ενός συστήματος COWS είναι μία οπτική πηγή (Laser ή LED). Ο φωτεινή πηγή θα παρέχει στο σύστημα ένα οπτικό φέρον πάνω στο οποίο θα αποτυπωθεί η πληροφορία προς μετάδοση. Ο τρόπος που η πληροφορία αποτυπώνεται πάνω στο οπτικό φέρον καθορίζεται από τον οπτικό διαμορφωτή. Όπως θα εξηγήσουμε αναλυτικότερα παρακάτω, ο οπτικός διαμορφωτής αντλεί την πληροφορία που δέχεται σε RF (Radio Frequency) συχνότητες και την αποτυπώνει επάνω στο οπτικό φέρον. Επιθυμητό χαρακτηριστικό ενός οπτικού διαμορφωτή είναι η ικανότητα εισόδου δύο RF εισόδων ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολυπλοκότερα σχήματα διαμόρφωσης. Η πληροφορία που συνήθως αναμένεται να μεταδοθεί από ένα σύστημα COWS είναι μία ακολουθία συμβόλων του επιλεγμένου σχήματος διαμόρφωσης, το οποίο διοχετεύεται στον οπτικό διαμορφωτή μέσω μίας ψηφιακής γεννήτριας κυματομορφών (Arbitrary Waveform Generator, AWG). Για να μεταδοθεί το διαμορφωμένο οπτικό σήμα σε μία ικανοποιητική απόσταση ώστε να φτάσει στον δέκτη, απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί ένα σύστημα φακών, οι οποίοι θα καθορίσουν την επάρκεια της ισχύος του σήματος σε μία περιοχή κάλυψης. Στην Εικόνα 3-1, το σύστημα των φακών αναφέρεται σαν οπτικός κατευθυντήρας, η αναλυτικότερη περιγραφή του οποίου αλλά και εναλλακτικές διατάξεις περιγράφονται στην ενότητα 5.

Τέλος απαραίτητη προϋπόθεση για ένα ολοκληρωμένο λειτουργικό σύστημα COWS αποτελεί η χρήση ενός ελεγκτή πόλωσης. Ο ελεγκτής πόλωσης είναι μία οπτική διάταξη, η οποία επιτυγχάνει το πολωτικό ταίριασμα μεταξύ διαφορετικών οπτικών διατάξεων ευαίσθητων στην πολωτική κατάσταση του φωτός. Επιλέγοντας της κατάλληλες ρυθμίσεις στον ελεγκτή πόλωσης, επιτυγχάνουμε το εισερχόμενο αδιαμόρφωτο οπτικό σήμα στον διαμορφωτή να έχει την κατάλληλη πόλωση ώστε να συμβαδίζει με την πολωτική κατάσταση του οπτικού διαμορφωτή.

3.2 Σύστημα σύμφωνης φώρασης

Στην πλευρά του δέκτη ενός συστήματος COWS, απαραίτητο χαρακτηριστικό αποτελεί καταρχήν μία συστοιχία φακών η οποία θα είναι σε θέση να συγκεντρώσει ένα σημαντικό μέρος της προσπίπτουσας ισχύος αντιστοιχίζοντας τα χαρακτηριστικά της φάσης του μετώπου σε πολύ μικρότερο αποτύπωμα (της τάξης λίγων μικρομέτρων). Στην Εικόνα 3-1, η συστοιχία αυτή αναφέρεται ως οπτικός κατευθυντήρας αλλά θα αναλύσουμε περαιτέρω τα χαρακτηριστικά αυτής της διάταξης στην ενότητα 5. Στην συνέχεια το οπτικό σήμα μεταφέρεται μέσω οπτικής ίνας στην είσοδο ενός οπτικού σύμφωνου δέκτη, ικανός να συνδυάσει το εισερχόμενο οπτικό σήμα με αυτό ενός ισχυρότερου τοπικού ταλαντωτή (Local Oscillator, LO). Ο σύμφωνος δέκτης ο οποίος μελετάται αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 6, θα πρέπει να έχει την ικανότητα να αντληφθεί και να συνδυάσει το διαμορφωμένο σήμα με αυτό του LO και στις δύο κάθετες γραμμικές πολώσεις του φωτός. Ο λόγος για τον οποίο το γεγονός αυτό αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για ένα σύστημα COWS είναι το γεγονός ότι το διαμορφωμένο σήμα μεταδίδεται ασύρματα στον ελεύθερο χώρο, χωρίς να υπάρχει καμία προστασία στην πόλωση του φωτός. Οπότε αναμένεται το εισερχόμενο φως στον σύμφωνο δέκτη να έχει απρόβλεπτη πόλωση. Στο κεφάλαιο 6, αναλύεται με μεγαλύτερη ακρίβεια η διαδικασία του οπτικού σήματος μέσα από ένα σύμφωνο δέκτη. Ένας σύμφωνος δέκτης απαιτεί την παρουσία μίας δεύτερη οπτικής πηγής (του τοπικού ταλαντωτή) ικανή να προσαρμόζεται στο ίδιο μήκος κύματος με αυτό του εισερχόμενου, στον δέκτη, διαμορφωμένου σήματος ώστε να παρέχει την αποδιαμόρφωση και ταυτόχρονη ενίσχυση του σήματος. Όπως περιγράφεται αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 6, ο σύμφωνος δέκτης μετατρέπει το οπτικό σήμα ξανά σε ηλεκτρικό σήμα. Τέλος, ένας παλμογράφος στην έξοδο του σύμφωνου δέκτη επιτρέπει την επεξεργασία της αρχικής πληροφορίας.

4. Σύστημα Πομπού

Το σύστημα του πομπού ενός συστήματος COWS όπως περιγράφηκε στην ενότητα 3.1, αποτελείται από ένα laser το οποίο παρέχει το οπτικό φέρον, μία ψηφιακή γεννήτρια κυματομορφών η οποία θα παρέχει σήματα πληροφορίας και έναν οπτικό διαμορφωτή ο οποίος θα αποτυπώνει την πληροφορία στο οπτικό φέρον. Το κανονικοποιημένο ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο μας παρέχει ιδανικά ένα τυπικό laser συνεχούς κύματος (continuous wave, CW) περιγράφεται ως εξής:

$$E(t) = \sqrt{P} e^{j(\omega t + \varphi_0)} \cdot p \tag{1}$$

, όπου \sqrt{P} είναι το πλάτος του πεδίου, $\omega/2\pi$ είναι η συχνότητα, φ_0 είναι η αρχική φάση και $p = a\hat{x} + b\hat{y}$ εκφράζει την πόλωση του ηλεκτρικού πεδίου. Στην πραγματικότητα ένα laser εισάγει ένα θόρυβο στο πλάτος αλλά και στην φάση του πεδίου που εκφράζει η εξίσωση (1), καταλήγοντας στη παρακάτω έκφραση,

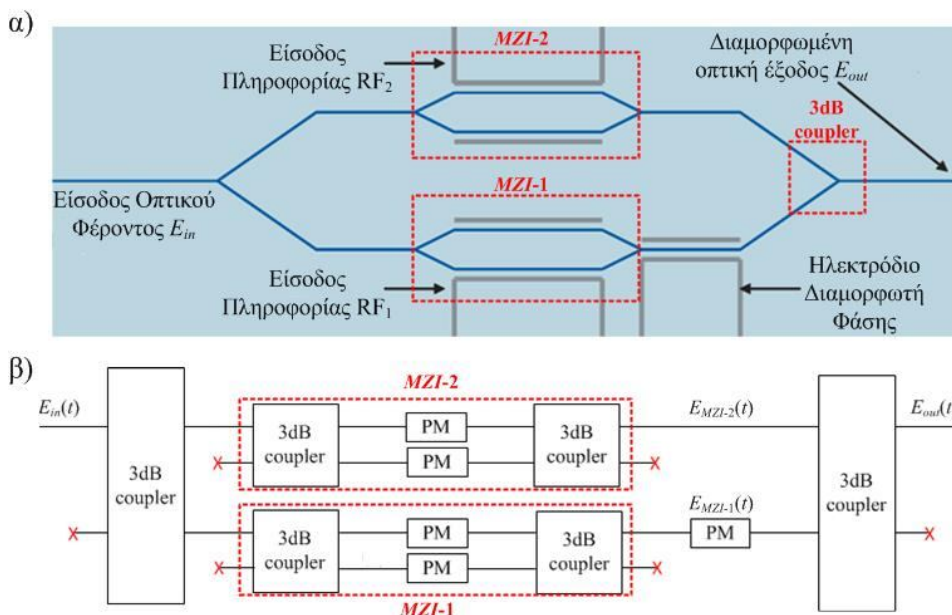
$$E(t) = \sqrt{P + \delta P_n} e^{j(\omega t + \varphi_0 + \varphi_n)} \cdot p \tag{2}$$

, όπου δP_n είναι τυχαίες διακυμάνσεις στην ένταση του φωτός και φ_n είναι ο θόρυβος φάσης του laser, ο οποία προκαλείται από αυθόρμητη εκπομπή φωτονίων με τυχαία ασυμφωνία φάσης με την συντονισμένη εκπομπή φωτονίων του laser [1].

Η διάταξη η ο οποία χρήζει περισσότερης ανάλυσης είναι αυτή του οπτικού διαμορφωτή. Στην Εικόνα 4-1(α) αποτυπώνεται το οπτικό κύκλωμα ενός οπτικού διαμορφωτή δύο RF εισόδων. Όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 4-1(α), ο οπτικός διαμορφωτής αποτελείται από ένα οπτικό συμβολόμετρο (Mach-Zehnder interferometer, MZI), ο οποίος χωρίζει την οπτική ισχύ σε δύο ίσα μέρη (-3dB coupler). Κάθε βραχίονας του συμβολόμετρου, καταλήγει σε ένα νέο οπτικό συμβολόμετρο (MZI-1 ή MZI-2 στην Εικόνα 4-1(α)), οι βραχίονες του οποίου είναι εφοδιασμένοι με ηλεκτροδία. Τα ηλεκτροδία αυτά αποτελούν διαμορφωτές φάσης (phase modulators, PM), οι οποίοι αποτυπώνουν της διακυμάνσεις της διαφοράς δυναμικού στα άκρα τους, σε διακυμάνσεις της φάσης του φωτός μέσω του ήλεκτρο-οπτικού φαινομένου [2]. Η φάση $\varphi_{PM}(t)$ που εισάγει ο διαμορφωτής φάσης εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός λ , το μήκος αλληλεπίδρασης l_{eff} (δηλαδή το μήκος του ηλεκτροδίου) και την μεταβολή του ενεργού δείκτη διάθλασης που μπορεί να επιτευχθεί, Δn_{eff} σύμφωνα με την σχέση,

$$\varphi_{PM}(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{eff} l_{eff} \tag{3}$$

Συνήθως η μεταβολή της φάσης που επιφέρει ένας διαμορφωτής φάσης εκτιμάται ανάλογη της διαφοράς δυναμικού που εφαρμόζεται στα άκρα του ηλεκτροδίου.



Εικόνα 4-1.(α) Σχηματική αναπαράσταση του οπτικού κυκλώματος ενός οπτικού διαμορφωτή δύο RF εισόδων και (β) το αντίστοιχο block διάγραμμα στο οποίο αποτυπώνονται τα διάφορα στάδια που περνάει το οπτικό σήμα.

Το κανονικοποιημένο ηλεκτρικό πεδίο στην έξοδο ενός οπτικού διαμορφωτή φάσης θα δίνεται από την έκφραση,

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \cdot e^{j\varphi_{PM}(t)} = E_{in}(t) \cdot e^{j\frac{V_{in}(t)}{V_\pi}\pi} \quad (4)$$

, όπου $V_{in}(t)$ είναι η εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού στα άκρα του ηλεκτροδίου και V_π είναι η διαφορά δυναμικού που θα επιφέρει διαφορά φάσης $\varphi_{PM}(t)=\pi$. Στην Εικόνα 4-1(α), η πληροφορία σε μορφή διαφοράς δυναμικού αποτυπώνεται στους δύο οπτικά συμβολόμετρα, MZI-1 και MZI-2 αντίστοιχα. Το ηλεκτρικό πεδίο στην έξοδο κάθε οπτικού συμβολόμετρου δίνεται από την έκφραση,

$$E_{out}(t) = \frac{E_m(t)}{2} \cdot (e^{j\varphi_1(t)} + e^{j\varphi_2(t)}) \quad (5)$$

, όπου $\varphi_1(t)$ και $\varphi_2(t)$ είναι η διαφορά φάσης που προκαλεί η εφαρμοζόμενη τάση στους δύο βραχίονες του εκάστοτε συμβολόμετρου MZI-1 ή MZI-2. Η Εικόνα 4-1(β) αποτυπώνει ένα block διάγραμμα όπου εμφανίζονται οι διάφορες διατάξεις από τις οποίες πρέπει να περάσει το οπτικό σήμα σε έναν οπτικό διαμορφωτή ώστε να καταλήξει στην έξοδο. Στην Εικόνα 4-1(α), κάθε φορά που η οπτική ισχύς διαχωρίζεται σε δύο ίσα τμήματα, υπονοείται η χρήση ενός συζεύκτη -3dB.

4.1 Συζεύκτης -3dB

Ως συζεύκτης καλείται η οπτική διάταξη που αποτελείται από δύο οπτικούς κυματοδηγούς παράλληλα τοποθετημένους σε πολύ κοντινή απόσταση. Ένας οπτικός συζεύκτης έχει δύο οπτικές εισόδους και δύο εξόδους (2x2), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-2. Η εκάστοτε έξοδος του συζεύκτη -3dB δέχεται έναν συνδυασμό της μισής ισχύος των εισόδων του, σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα μεταφοράς,

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Εφαρμόζοντας τον πίνακα μεταφοράς της εξίσωσης (6) όταν εισάγουμε πεδία $E_1(t)$ και $E_2(t)$ στις εισόδους του οπτικού συζεύκτη 1 και 2 αντίστοιχα, παίρνουμε τις παρακάτω εκφράσεις στις εξόδους του οπτικού συζεύκτη,



Εικόνα 4-2. Σχηματική αναπαράσταση οπτικού συζεύκτη 2x2.

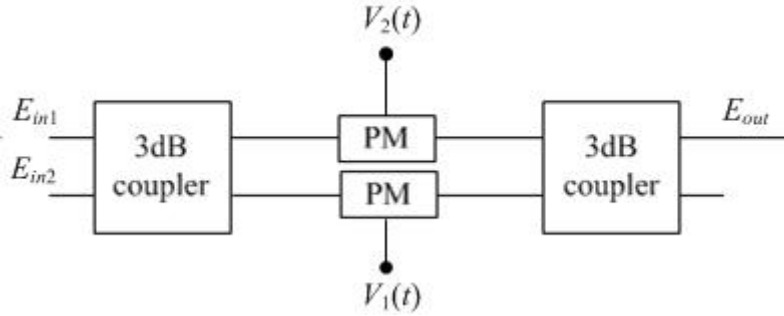
$$\begin{aligned} E_{out1} &= \frac{1}{\sqrt{2}} [E_{in1} + jE_{in2}] \\ E_{out2} &= \frac{1}{\sqrt{2}} [E_{in2} + jE_{in1}] \end{aligned} \quad (7)$$

4.2 Συμβολόμετρο Mach-Zehnder.

Το συμβολόμετρο Mach-Zehnder είναι η οπτική διάταξη η οποία δίνει την δυνατότητα συμβολής δύο κυμάτων ή δύο εκδοχών του ίδιου κύματος, τα οποία έχουν διανύσει διαφορετικές διαδρομές. Στην Εικόνα 4-1, απεικονίζονται δύο συμβολόμετρα Mach-Zehnder περιορισμένα σε κόκκινα πλαίσια. Στα συμβολόμετρα αυτά ένας συζεύκτης στην είσοδο διαχωρίζει το εισερχόμενο φως σε δύο βραχίονες. Κάθε βραχίονας είναι εφοδιασμένος με έναν διαμορφωτή φάσης, μεταβάλλοντας την φάση το διερχόμενου φωτός. Στην έξοδο του συμβολόμετρου ένας επιπλέον συζεύκτης συνδυάζει τα πεδία των δύο βραχιόνων. Ακολουθώντας την ακολουθία της οπτικής διαδρομής που απεικονίζεται στην Εικόνα 4-3, καταλλήγουμε στην παρακάτω έκφραση για το κανονικοποιημένο ηλεκτρικό πεδίο στην έξοδο του συμβολόμετρου,

$$E_{out} = \frac{E_{in1}}{2} \left(e^{j\frac{V_1}{V_\pi}\pi} - e^{-j\frac{V_2}{V_\pi}\pi} \right) + j \frac{E_{in2}}{2} \left(e^{j\frac{V_1}{V_\pi}\pi} + e^{-j\frac{V_2}{V_\pi}\pi} \right) \quad (8)$$

, όπου V_1 και V_2 η διαφορές δυναμικού που εφαρμόζονται στους διαμορφωτές φάσης του άνω και κάτω βραχίονα του συμβολόμετρου, αντίστοιχα. Η εξίσωση (8) εκφράζει το κανονικοποιημένο ηλεκτρικό πεδίο στον άνω ακροδέκτη εξόδου του συμβολόμετρου, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 4-3. Η έκφραση του ηλεκτρικού πεδίου για τον κάτω ακροδέκτη εξόδου είναι παρόμοιας μορφής.



Εικόνα 4-3. Σχηματική αναπαράσταση συμβολόμετρου Mach-Zehnder.

Στην περίπτωση όπου ηλεκτρικό πεδίο υπάρχει σε μία εκ των δύο εισόδων, η έκφραση της εξόδου απλοποιείται στην εξής έκφραση,

$$E_{out} = \frac{E_{in}}{2} \left(e^{j\frac{V_2}{V_\pi}\pi} - e^{-j\frac{V_1}{V_\pi}\pi} \right) \quad (9)$$

4.3 Οπτικός διαμορφωτής.

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζουμε την αναλυτική περιγραφή του πεδίου στην έξοδο του οπτικού διαμορφωτή. Όπως προαναφέρεται στην Εικόνα 4-1(β) αποτυπώνεται ένα block διάγραμμα των λειτουργιών που εμπεριέχονται στην διάταξη του οπτικού διαμορφωτή. Στην είσοδο της διάταξης τοποθετούμε ηλεκτρικό πεδίο $E_{in}(t)$ που περιγράφεται από την εξίσωση (1). Το εισερχόμενο σήμα χωρίζεται από τον συζεύκτη -3dB σε δύο πεδία $E_{in}/\sqrt{2}$ και $jE_{in}/\sqrt{2}$ τροφοδοτούν τα δύο συμβολόμετρα, MZI-1 και MZI-2 αντίστοιχα. Στην έξοδο των συμβολομέτρων παίρνουμε τα πεδία,

$$E_{MZI-1} = E_{in} \left(e^{j\frac{V_1}{V_\pi}\pi} - e^{-j\frac{V_1}{V_\pi}\pi} \right) / 2\sqrt{2} \quad (10)$$

$$E_{MZI-2} = jE_{in} \left(e^{j\frac{V_2}{V_\pi}\pi} - e^{-j\frac{V_2}{V_\pi}\pi} \right) / 2\sqrt{2} \quad (11)$$

, όπου τα συμβολόμετρα MZI-1 και MZI-2 απεικονίζονται σε κόκκινα πλαίσια στην Εικόνα 4-1(β). Η εξίσωση (10) προκύπτει όταν στο συμβολόμετρο MZI-1 εφαρμόζεται ένα δυναμικό $+V_1$ και ένα $-V_1$ στους δύο διαμορφωτές φάσης (PM). Παρομοίως, όταν στο συμβολόμετρο MZI-2 εφαρμόζεται δυναμικό $+V_2$ και $-V_2$ στους δύο διαμορφωτές αντίστοιχα, καταλήγουμε στην εξίσωση (11). Τα δυναμικά V_1 και V_2 αντιστοιχούν στις συνιστώσες I (in-phase) και Q (quadrature) ενός δισδιάστατου αστερισμού διαμόρφωσης (όπως για παράδειγμα ορθογωνική διαμόρφωση πλάτους (QAM) ή ψηφιακή διαμόρφωση φάσης (PSK)). Σύμφωνα με την Εικόνα 4-1(β), το πεδίο στην έξοδο του MZI-1 θα περάσει από έναν επιπλέον διαμορφωτή φάσης, οποίος είναι ρυθμισμένος ώστε να προκαλεί σταθερή διαφορά φάσης $\pi/2$ στην εισερχόμενο σήμα. Το πεδίο που περιγράφεται από την εξίσωση (11) όταν θα υποστεί μία διαφορά φάσης $\pi/2$ λόγω του διαμορφωτή φάσης, δίνεται από την έκφραση,

$$E_{MZI-1} = -E_{in} \left(e^{j\frac{V_1}{V_\pi}\pi} - e^{-j\frac{V_1}{V_\pi}\pi} \right) / 2\sqrt{2} \quad (12)$$

Τα πεδία που περιγράφονται από τις εξισώσεις (10) και (12) τροφοδοτούν τις δύο εισόδους του τελικού συζεύκτη που αποτυπώνεται στην Εικόνα 4-1(β). Η έξοδος του οπτικού διαμορφωτή σε αυτή την περίπτωση θα δίνεται από την άνω έξοδο του τελικού συζεύκτη. Η έξοδος του συζεύκτη προκύπτει από το αποτέλεσμα του γινομένου του πίνακα μεταφορά του οπτικού συζεύκτη με τα πεδία στην είσοδό του, σύμφωνα με την έκφραση,

$$E_{out}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{MZI-2}(t) \\ E_{MZI-1}(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Το αποτέλεσμα της εξόδου του οπτικού διαμορφωτή θα δίνεται από την έκφραση,

$$E_{out}(t) = \frac{\sqrt{P}}{2} \left[\sin\left(\frac{V_1}{V_\pi}\pi\right) + j \sin\left(\frac{V_2}{V_\pi}\pi\right) \right] e^{j(\omega t + \varphi)} \quad (14)$$

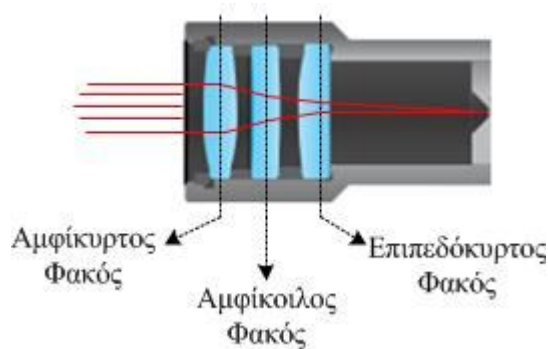
Η εξίσωση (14) εκφράζει το ηλεκτρικό πεδίο στην έξοδο του οπτικού διαμορφωτή αλλά και του συστήματος του πομπού. Στην ίδια εξίσωση έχουμε υποθέσει ότι το εισερχόμενο φως είναι σύμφωνη με τον πολωτικό άξονα του οπτικού διαμορφωτή.

5. Ασύρματη οπτική ζεύξη.

Ένα σύστημα COWS περιγράφει την ασύρματη οπτική ζεύξη μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται οι διατάξεις, οι οποίες επιτρέπουν την μετάβαση του φωτός από τον κυματοδηγό (οπτική ίνα) στον ελεύθερο χώρο αλλά και αντίστροφα.

5.1 Οπτική διόπτρα.

Στην ενότητα 4, πρωτοαναφέραμε την οπτική διάταξη του οπτικού κατευθυντήρα, η οποία είναι ικανή να μεταφέρει το φως από την συγκεντρωμένη φύση της μέσα στην οπτική ίνα σε μία μορφή παράλληλης δέσμης στον ελεύθερο χώρο. Η διάταξη αυτή στην βιβλιογραφία συχνά αναφέρεται ως διόπτρα (collimator). Η βασική δομή μίας διόπτρας αποτελείται από μία συστοιχία κατάλληλα τοποθετημένων φακών, που προκαλούν την διεύρυνση και σταδιακή παραλληλοποίηση της οπτικής δέσμης που εξέρχεται από μία μονότροπη ίνα (με διάμετρο πυρήνα περίπου 8μm). Η πιο συνήθης μέθοδος για την παραλληλοποίηση μίας οπτικής δέσμης απεικονίζεται στην Εικόνα 5-1. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-1, η διόπτρα τριπλού φακού αποτελείται από έναν επιπεδόκυρτο, έναν αμφίκυκλο και έναν αμφίκυρτο φακό, τοποθετημένοι σειριακά ο ένας μετά τον άλλο. Στην είσοδο της διάταξης τοποθετείται μία μονότροπη οπτική ίνα.

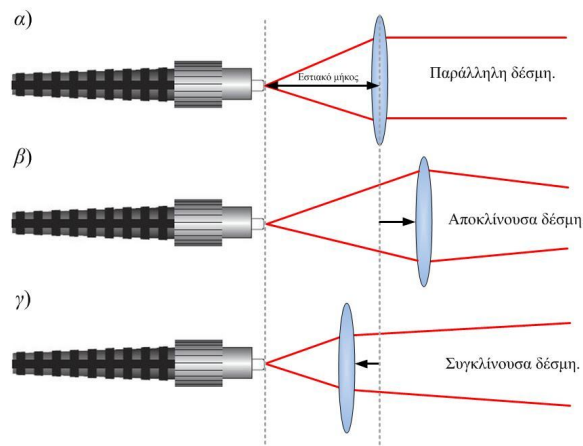


Εικόνα 5-1. Τομή παράλληλη του άξονα μίας διόπτρας τριπλού φακού.

Η οπτική δέσμη εξέρχεται από την μονότροπη ίνα με διάμετρο περίπου 8μm και εκπέμπεται στον αέρα μέχρι να φτάσει στον πρώτο φακό ελαφρώς διευρυμένη. Η δέσμη περνώντας από τους δύο πρώτους φακούς διευρύνεται σταδιακά και παραλληλοποιείται στην έξοδο της διάταξης από τον τρίτο φακό. Το υλικό μεταξύ των φακών είναι αέρας. Η αναλυτική περιγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της δέσμης εξαρτάται από τις αποστάσεις μεταξύ των φακών αλλά και από το επίπεδο κυρτότητας και κοιλότητα των φακών [3]. Στις διόπτρες τριπλού φακού, η πλήρης γωνία απόκλισης (full-angle of divergence) της εξερχόμενης δέσμης εξαρτάται από το μήκος κύματος του διερχόμενου φωτός και κυμαίνεται σε επίπεδα της τάξης 0.01°.

5.2 Οπτική πύλη ίνας.

Το διαμορφωμένο φως εξέρχεται από την διόπτρα στην μορφή μίας παράλληλης δέσμης με ακτίνα που καθορίζεται από την γεωμετρία και τις αποστάσεις των φακών. Η διάταξη η οποία είναι υπεύθυνη να συγκεντρώσει την παράλληλη οπτική δέσμη από τον ελεύθερο χώρο στην οπτική ίνα καλείται οπτική πύλη ίνας (fiber port). Στην ουσία τον ρόλο μίας οπτική πύλη ίνας μπορεί να παίξει ένας φακός ικανός να συγκεντρώσει το εισερχόμενο φως σε περιοχή της τάξης περίπου 8μm. Στην Εικόνα 5-2 αποτυπώνεται σχηματικά η περίπτωση όπου ο ίδιος φακός μπορεί να εστιάσει το φως εισερχόμενο φως στον πυρήνα μίας μονότροπης ίνας.

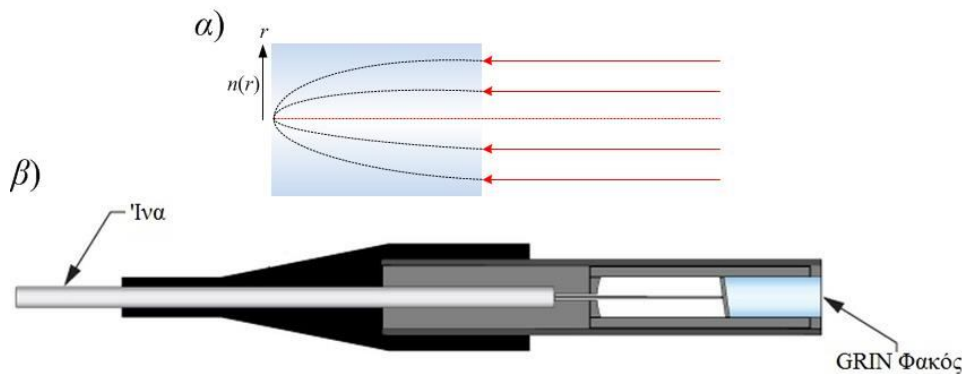


Εικόνα 5-2. Σχηματική αναπαράσταση της εστίασης οπτικής δέσμης σε οπτική ίνα όταν η εισερχόμενη στον φακό οπτική είναι α) παράλληλη, β) αποκλίνουσα και γ) συγκλίνουσα.

Μία διάταξη οπτικής πύλης ίνας δεν είναι τίποτα παραπάνω από έναν αμφίκυρτο φακό τοποθετημένο σε μίας απόσταση x από τον τερματισμό της ίνας. Όταν η εισερχόμενη δέσμη στον φακό είναι παράλληλη, τότε ο φακός θα πρέπει να τοποθετηθεί σε απόσταση από τον τερματισμό της οπτικής ίνας η οποία θα είναι ίση με το εστιακό μήκος (focal length) του φακού. Στην περίπτωση όπου η εισερχόμενη δέσμη είναι αποκλίνουσα ή συγκλίνουσα, ο φακός θα πρέπει να τοποθετηθεί σε μεγαλύτερη ή μικρότερη απόσταση από τον τερματισμό της ίνας αντίστοιχα, ώστε να εστιαστεί η δέσμη στην ίνα. Μία ρεαλιστική υλοποίηση της οπτικής πύλης ίνας θα πρέπει να δίνει την δυνατότητα μικρό-ρυθμίσεων της απόστασης μεταξύ του φακού και του τερματισμού της ίνας έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η κατάλληλη εστιακή απόσταση και να καλύπτει όλα τα ενδεχόμενα που αποτυπώνονται στην Εικόνα 5-2. Γενικά, μία διάταξη οπτική πύλης ίνας ή μίας οπτικής διόπτρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μετάβαση του φωτός από τον κυματοδηγό προς τον ελεύθερο αλλά και αντίστροφα.

5.3 Διόπτρα μεταβλητού δείκτη διάθλασης (GRIN).

Οι ανωτέρω μεταβάσεις υλοποιούνται επίσης και με φακούς μεταβλητού δείκτη διάθλασης (graded index, GRIN). Οπτικές διατάξεις που χρησιμοποιούν τέτοιου είδους φακούς καλούνται διόπτρες μεταβλητού δείκτη διάθλασης (GRIN collimators).



Εικόνα 5-3. α) Σχηματική αναπαράσταση ενός φακού μεταβλητού δείκτη διάθλασης. β) Υλοποίηση μίας διόπτρας GRIN με ενσωματωμένη οπτική ίνα.

Στην Εικόνα 5-3(α), απεικονίζεται ένας φακός μεταβλητού δείκτη διάθλασης. Όπως φαίνεται στην ίδια εικόνα όταν μία δέσμη εισέρχεται στον φακό GRIN αντλαμβάνεται διαφορετικό δείκτη διάθλασης, η τιμή του οποίου εξαρτάται από την απόσταση πρόσπτωσης r της ακτίνας από το κέντρο του φακού ($r=0$). Η κατανομή του δείκτη διάθλασης δίνεται από την σχέση [4],

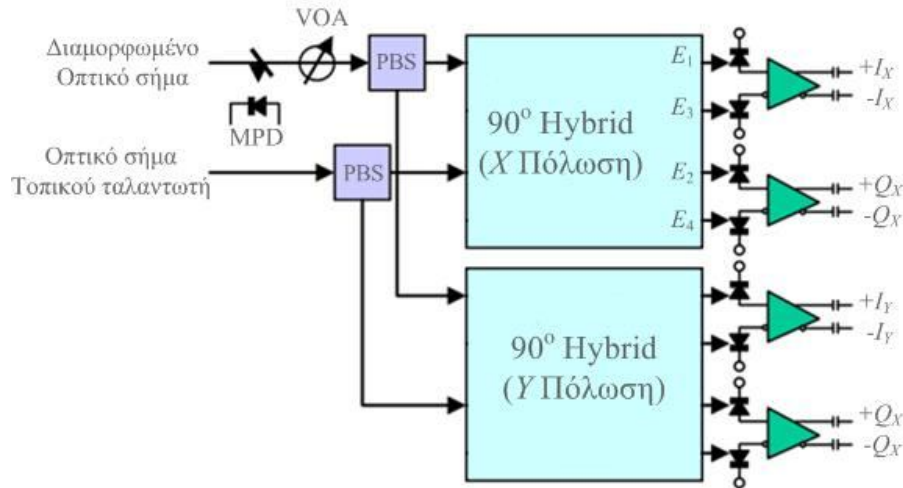
$$n(r) = n_0 \left(1 - \frac{A}{2} r^2 \right) \tag{15}$$

, όπου n_0 είναι ο δείκτης διάθλασης για $r=0$ και A είναι μία θετική σταθερά. Χαρακτηριστικό γνώρισμα του φακού GRIN είναι το γεγονός ότι η προσπίπτουσα ακτίνα στο κέντρο του φακού ($r=0$) δεν εκτρέπεται καθόλου. Ο δείκτης διάθλασης μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης του σημείου πρόσπτωσης της ακτίνας από το κέντρο του φακού, γεγονός που προκαλεί την εκτροπή της εισερχόμενης ακτίνας προς το κέντρο τον άξονα του φακού (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή στην Εικόνα 5-3(α)). Αποτέλεσμα της κατανομής του δείκτη διάθλασης που παρουσιάζει ένας φακός GRIN είναι ότι μία δέσμη μπορεί να εστιαστεί στο κέντρο του φακού διανύοντας μικρότερο μήκος σε σχέση με την χρήση συμβατικών φακών. Στην Εικόνα 5-3(β), αποτυπώνεται μία δίοπτρα GRIN ενσωματωμένη ίνας. Μία δίοπτρα GRIN μπορεί να χρησιμοποιηθεί απαλλαγμένη από τις απώλειες εισόδου του φωτός στην οπτική ίνα καθώς παρέχονται συνήθως με ενσωματωμένο τερματισμό ίνας όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-3(β). Το μοναδικό ίσως μειονέκτημα τέτοιων οπτικών διατάξεων αποτελεί η μεγαλύτερη πλήρης γωνία απόκλισης (της τάξης των 0.2°) γεγονός που προκαλεί την μικρότερη απόσταση όπου η δέσμη παραμένει παράλληλη (περίπου στα 20mm).

Στην περίπτωση όπου δεν είναι εφικτή η ευθύγραμμη σύνδεση του πομπού και του δέκτη αλλά και για την καλύτερη καθοδήγηση της οπτικής δέσμης στην οπτική πύλη ίνας στον δέκτη είναι η χρήση καθρέπτων, όπως φαίνονται στην Εικόνα 3-1. Οι καθρέπτες θα πρέπει να είναι τοποθετημένοι σε ειδικούς βραχίονες που θα δίνουν την δυνατότητα μικρό-ρυθμίσεων στον άξονα κάθετο στο επίπεδο που ορίζει ο καθρέπτης. Χρησιμοποιώντας δύο ή περισσότερους καθρέπτες δίνουν τους απαραίτητους βαθμούς ελευθερίας ώστε η δίοπτρα του πομπού και η οπτική πύλη ίνας στον δέκτη να τοποθετηθούν σε μεγάλο αριθμό τοπολογιών του συστήματος COWS.

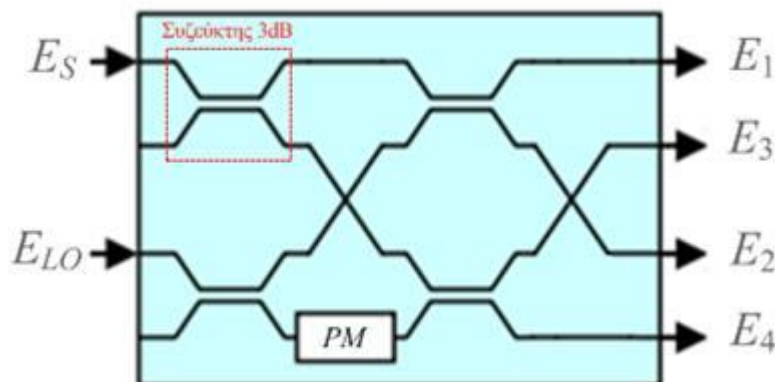
6. Σύμφωνος Δέκτης

Ο δέκτης του συστήματος COWS παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-1, και αποτελείται από την οπτική πύλη ίνας που περιγράψαμε στην ενότητα 5.2, το laser του τοπικού ταλαντωτή και την οπτική διάταξη του σύμφωνου δέκτη, η λειτουργία της οποίας περιγράφεται σε αυτή το κεφάλαιο. Η σχηματική αναπαράσταση των λειτουργιών ενός σύμφωνου δέκτη αποτυπώνονται στην Εικόνα 6-1.



Εικόνα 6-1. Σχηματική αναπαράσταση των λειτουργιών του σύμφωνου δέκτη.

Σύμφωνα με την Εικόνα 6-1, ο σύμφωνος δέκτης δέχεται δύο οπτικές εισόδους, οι οποίες είναι το διαμορφωμένο σήμα που κατάφερε να συλλέξει η οπτική πύλη ίνας και το αδιαμόρφωτο φως του τοπικού ταλαντωτή. Το διαμορφωμένο σήμα παρουσιάζει απροσδιόριστη πόλωση ακόμη και αν τοποθετήσουμε μία διάταξη ελέγχου της πόλωσης λίγο πριν το εκπέμπσουμε στον ελεύθερο χώρο. Το γεγονός οφείλεται στο ότι η πόλωση της οπτικής δέσμης θα μεταβληθεί απρόβλεπτα κατά την διαδρομή του στον ελεύθερο χώρο. Για τον σκοπό αυτό, στον σύμφωνο δέκτη τα δύο οπτικά σήματα διαχωρίζονται σε δύο κάθετους άξονες πόλωσης, οι οποίοι ονομάζονται X και Y αντίστοιχα, από δύο οπτικούς διαχωριστές πόλωσης (polarization beam splitter, PBS). Στην συνέχεια μετά τους PBS, το ποσοστό των δύο οπτικών σημάτων στην εκάστοτε πόλωση διοχετεύονται σε έναν υβριδικό οπτικό συζεύκτη 90 μοιρών (90° hybrid). Η λειτουργία ενός υβριδικού οπτικού συζεύκτη 90 μοιρών, απεικονίζεται σχηματικά στην Εικόνα 6-2.



Εικόνα 6-2. Σχηματική απεικόνιση ενός υβριδικού οπτικού συζεύκτη 90 μοιρών.

Στην Εικόνα 6-2, τα γραμμικά πολωμένα ηλεκτρικά πεδία (E_S και E_{LO}) τροφοδοτούν την άνω είσοδο ενός οπτικού συζεύκτη 3dB , έκαστο. Η περιγραφή των εξόδων ενός συζεύκτη 3dB περιγράφηκε στην ενότητα 4.1. Στην συνέχεια το διαχωρισμένο ηλεκτρικό πεδίο των δύο σημάτων τροφοδοτούν ένα δεύτερο ζεύγος από συζεύκτες 3dB , με την διαφορά ότι η μία εκ των δύο εξόδων του εκάστοτε συζεύκτη τροφοδοτεί την είσοδο του διαγώνιου συζεύκτη, όπως αποτυπώνεται με την διασταύρωση των διαδρομών στην Εικόνα 6-2. Επίσης η μία έξοδος του συζεύκτη που τροφοδοτεί το σήμα του τοπικού ταλαντωτή υπόκειται σε μία

περαιτέρω διαμόρφωση φάσης κατά 90° . Στην έξοδο του δεύτερου ζεύγους συζευκτών 3dB τα ηλεκτρικά πεδία θα δίνονται από τις παρακάτω εκφράσεις (αριθμημένες με βάση την Εικόνα 6-2):

$$E_1 = \frac{1}{2}(E_S - E_{LO}) \quad (16)$$

$$E_2 = \frac{j}{2}(E_S + E_{LO}) \quad (17)$$

$$E_3 = \frac{j}{2}(E_S + jE_{LO}) \quad (18)$$

$$E_4 = -\frac{1}{2}(E_S - jE_{LO}) \quad (19)$$

Οι εξισώσεις (16)-(19) περιγράφουν τις οπτικές εξόδους του εκάστοτε υβριδικού συζεύκτη 90 μοιρών, οι οποίες αποτελούν έναν γραμμικό συνδυασμό των δύο αρχικών σημάτων (E_S και E_{LO}). Η ίδια διαδικασία πραγματοποιείται παράλληλα και από την άλλη κάθετη πόλωση μέσω του δεύτερου υβριδικού συζεύκτη 90° . Στην συνέχεια τα οπτικά πεδία τροφοδοτούν ισάριθμες φωτοδιόδους (όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 6-1) μετατρέποντας τα οπτικά σήματα σε φωτόρευμα. Μία φωτοδίοδος μετατρέπει το προσπίπτον φως σε φωτόρευμα με βάση την έκφραση,

$$I(t) = \frac{e\eta A_{eff}}{2\hbar\omega Z_0} |E(t)|^2 \quad (20)$$

, όπου A_{eff} είναι η ενεργός επιφάνεια της φωτοδίοδου, Z_0 είναι η εμπέδηση της διόδου και ο όρος $e\eta/\hbar\omega$ καλείται αποκρισιμότητα της φωτοδίοδου. Οι τέσσερις φωτοδιόδους που αντιστοιχούν στα πεδία που δέχονται τα πεδία των εξισώσεων (16)-(19) (όπως φαίνονται στην Εικόνα 6-1) θα προκαλέσουν τέσσερις εντάσεις ηλεκτρικού ρεύματος που θα δίνονται από τις παρακάτω εκφράσεις,

$$I_1(t) = \frac{R_0}{4} \left\{ |E_S(t)|^2 + |E_{LO}(t)|^2 - 2\text{Re}[E_S(t)E_{LO}^*(t)] \right\} \quad (21)$$

$$I_2(t) = \frac{R_0}{4} \left\{ |E_S(t)|^2 + |E_{LO}(t)|^2 + 2\text{Re}[E_S(t)(jE_{LO}(t))^*] \right\} \quad (22)$$

$$I_3(t) = \frac{R_0}{4} \left\{ |E_S(t)|^2 + |E_{LO}(t)|^2 + 2\text{Re}[E_S(t)E_{LO}^*(t)] \right\} \quad (23)$$

$$I_4(t) = \frac{R_0}{4} \left\{ |E_S(t)|^2 + |E_{LO}(t)|^2 - 2\text{Re}[E_S(t)(jE_{LO}(t))^*] \right\} \quad (24)$$

, όπου $R_0 = e\eta A_{eff}/2\hbar\omega Z_0$. Σύμφωνα με την Εικόνα 6-1, τα φωτορεύματα οδηγούνται σε έναν αθροιστή με δύο εισόδους, η μία εκ των οποίων αντιστρέφει το πρόσημο του εισερχόμενου σήματος προκαλώντας σαν αποτέλεσμα την διαφορά μεταξύ των δύο σημάτων. Οι εκφράσεις των σημάτων εξόδου του σύμφωνου δέκτη δίνονται,

$$+I_X = I_1(t) - I_3(t) = R_0 \text{Re}(E_S E_{LO}^*) \quad (25)$$

$$-I_X = -(I_1(t) - I_3(t)) = -R_0 \text{Re}(E_S E_{LO}^*) \quad (26)$$

$$+Q_X = I_2(t) - I_4(t) = R_0 \text{Re}(E_S (jE_{LO})^*) \quad (27)$$

$$-Q_X = -(I_2(t) - I_4(t)) = -R_0 \text{Re}(E_S (jE_{LO})^*) \quad (28)$$

Οι εκφράσεις των ηλεκτρικών πεδίων E_S και E_{LO} δίνονται από τον συνδυασμό των εξισώσεων (1) και (5),

$$E_S(t) = \frac{\sqrt{P_S}}{2} (e^{j\phi_1(t)} + e^{j\phi_2(t)}) e^{j\omega_S t} \quad (29)$$

$$E_{LO}(t) = \sqrt{P_{LO}} e^{j\omega_{LO}t} \quad (30)$$

Στις εξισώσεις (29) και (30) έχουμε υποθέσει ότι η αρχική φάση φ_0 που περιγράφεται στην εξίσωση (1), είναι μηδέν. Εφαρμόζοντας τις εκφράσεις (29) και (30) στις εξισώσεις (25) και (27) παίρνουμε,

$$+I_x(t) = \frac{R_0 \sqrt{P_S P_{LO}}}{2} \{ [\cos(\varphi_1(t)) + \cos(\varphi_2(t))] \cos(\Delta\omega t) - [\sin(\varphi_1(t)) + \sin(\varphi_2(t))] \sin(\Delta\omega t) \} \quad (31)$$

$$+Q_x(t) = \frac{R_0 \sqrt{P_S P_{LO}}}{2} \{ [\sin(\varphi_1(t)) + \sin(\varphi_2(t))] \cos(\Delta\omega t) + [\cos(\varphi_1(t)) + \cos(\varphi_2(t))] \sin(\Delta\omega t) \} \quad (32)$$

, όπου $\Delta\omega = |\omega_S - \omega_{LO}|$. Υποθέτοντας ότι το διαμορφωμένο σήμα και ο τοπικός ταλαντωτής βρίσκονται στην ίδια συχνότητα ($\Delta\omega = 0$) τότε οι ανωτέρω εκφράσεις απλοποιούνται ως εξής,

$$+I_x(t) = \frac{R_0 \sqrt{P_S P_{LO}}}{2} \{ [\cos(\varphi_1(t)) + \cos(\varphi_2(t))] \} \quad (33)$$

$$+Q_x(t) = \frac{R_0 \sqrt{P_S P_{LO}}}{2} \{ [\sin(\varphi_1(t)) + \sin(\varphi_2(t))] \} \quad (34)$$

Οι εκφράσεις (33) και (34) αποτυπώνουν την αποδιαμορφωμένη πληροφορία που εναπόθεσε στο οπτικό φέρον ο οπτικός διαμορφωτής, όπως περιγράψαμε στην ενότητα 4.3. Η αποδιαμορφωμένη πληροφορία παρουσιάζεται ενισχυμένη με την ισχύ που προσφέρει ο τοπικός ταλαντωτής. Στις εκφράσεις (33) και (34) έχουμε αγνοήσει την συνεισφορά του θορύβου φάσης, $\varphi_n(t)$. Ένας επιπλέον όρος θορύβου θα εισαχθεί εάν υποτεθεί ότι το σήμα έχει ελαφρώς διαφορετική συχνότητα από τον τοπικό ταλαντωτή ($\Delta\omega \ll \omega$). Μία πραγματική υλοποίηση ενός σύμφωνου δέκτη, συχνά παρέχει την ικανότητα ανίχνευση της ισχύος του διαμορφωμένου οπτικού σήματος που τροφοδοτεί την είσοδο του σύμφωνου δέκτη μέσω μίας φωτοδιόδου (monitor photodiode, MPD). Επίσης μεταξύ της εισόδου και του υβριδικού συζεύκτη 90° παρεμβάλλεται ένας μεταβλητός οπτικός εξασθενητής (variable optical attenuator, VOA).

7. Τεχνικές Προδιαγραφές.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται οι τεχνικές προδιαγραφές του συστήματος COWS.

Ηλεκτρονικοί Υπολογιστές	Απαίτηση
Τεμάχια	5
Κεντρική Μονάδα	
Κουτί με τροφοδοτικό χαμηλού θορύβου ≥450W	NAI
Ταχύτητα επεξεργαστή	≥3.5GHz
Συνολική μνήμη cache (L2+L3) επεξεργαστή	16Mbytes
Αριθμός Πυρήνων επεξεργαστή	≥8
Αρχιτεκτονική επεξεργαστή ≤32nm	NAI
Μητρική κάρτα με υποστήριξη μνήμης DDR3 με 4 υποδοχές μνήμης	NAI
Υποστήριξη δίσκων SATA 3.0	NAI
Υποστήριξη PCI-Express x16	NAI
Μνήμη συστήματος σε διάταξη Dual Channel	Ναι
Μέγεθος μνήμης RAM	≥8 GB
Ταχύτητα διαύλου μνήμης συστήματος (FSB)	≥1366 MHz
Αριθμός μονάδων σκληρού δίσκου	1
Διασύνδεση σκληρού δίσκου με SATA 3.0	NAI
Ταχύτητα περιστροφής σκληρού δίσκου 7.200 rpm	NAI
Χωρητικότητα σκληρού δίσκου	≥1TB
οπτικός δίσκος DVD-RW dual layer διασύνδεσης SATA	NAI
Κάρτα δικτύου 10/100/1000 Mbps	NAI
κάρτα ήχου	NAI
κάρτα γραφικών PCI-E με επεξεργαστή που να υποστηρίζει Open GL 3.0, DirectX 11.0 και CUDA με μνήμη ≥512 MB ξεχωριστή από τη μνήμη συστήματος	NAI
υποστήριξη σύνδεσης DVI ή VGA	NAI
θύρες USB (δύο τουλάχιστον εμπρός)	≥6

Ηλεκτρονικοί Υπολογιστές	Απαίτηση
Πληκτρολόγιο με μόνιμη αποτύπωση λατινικών και ελληνικών χαρακτήρων	NAI
οπτικό ποντίκι	NAI
Λειτουργικό σύστημα Windows 8 Professional 64-bit ή ισοδύναμο	NAI
Οθόνη	
οθόνη LED με διάμετρο	$\geq 22''$
Ανάλυση οθόνης	$\geq 1920 \times 1080$
υποστήριξη σύνδεσης DVI ή VGA	NAI
καλώδιο σύνδεσης με την έξοδο DVI ή VGA της κάρτας γραφικών με την οθόνη	NAI
Γενικά	
Έτη εγγύησης on-site NBD από τον προμηθευτή ή τον κατασκευαστή	≥ 1

Ψηφιακός Παλμογράφος	
Τεμάχια	1
Γενικά Χαρακτηριστικά	
Αναλογικό εύρος ζώνης συχνοτήτων (ανεξαρτήτως πλήθους καναλιών και αντίστασης εισόδου)	$\geq 2\text{GHz}$
Αριθμός αναλογικών καναλιών	≥ 4
Ελάχιστος χρόνος ανόδου	$< 180\text{ps}$
Ακρίβεια DC gain	$\pm 1.5\%$ ή καλύτερη
Ελάχιστο σετ τύπων σύζευξης εισόδου	AC, DC
Διακριτική ικανότητα	$\geq 8\text{ bit}$
Διακριτική ικανότητα όταν χρησιμοποιείται υψηλή ανάλυση	$\geq 11\text{ bit}$
Ακρίβεια βάσης χρόνου	$\pm 5\text{ppm}$ ή καλύτερη
Αντίσταση εισόδου	$1\text{ M}\Omega \pm 1\%$, $50\ \Omega \pm 1\%$

Ψηφιακός Παλμογράφος	
Ευαισθησία εισόδου (1 MΩ)	1 mV/div έως 10 V/div
Ευαισθησία εισόδου (50 Ω)	1 mV/div έως 1 V/div
Μέγιστη τάση εισόδου (1 MΩ)	300 VRMS με peaks $\leq \pm 425$ V
Ελάχιστη κλίμακα στο πεδίο το χρόνου	≤ 12.5 ps/div
Μέγιστη κλίμακα στο πεδίο το χρόνου	≤ 1000 s/div
Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας	0°C έως + 50°C ή καλύτερο
Σύστημα Ανάκτησης	
Μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας	≥ 10 GS/s
Μέγιστος ισοδύναμος χρόνος ρυθμού δειγματοληψίας	≥ 400 GS/s
Μέγιστο μήκος εγγραφής	≥ 50 Mpoints
Μέγιστη διάρκεια καταγραφής σημάτων πραγματικού χρόνου στην περίπτωση της ελάχιστης διακριτικής ικανότητας στο πεδίο του χρόνου	≥ 25 ms
Τυπική καθυστέρηση μεταξύ 2 καναλιών	≤ 100 ps
Ρυθμός σύλληψης κυματομορφών ανά κανάλι σε κατάσταση πραγματικού χρόνου	≥ 250.000 κυματομορφές/s
Δυνατότητα επιλογής segmented μνήμης	NAI
Ρυθμός σύλληψης κυματομορφών ανά κανάλι σε segmented μνήμη	> 300.000 κυματομορφές/s
Υποστήριξη ανάκτησης κυματομορφών με υπολογισμό της μέσης κυματομορφής (waveform averaging)	NAI
Ελάχιστος αριθμός κυματομορφών που συμμετέχουν στον υπολογισμό της μέσης κυματομορφής	≤ 2
Μέγιστος αριθμός κυματομορφών που συμμετέχουν στον υπολογισμό της μέσης κυματομορφής	≥ 10.000
Υποστήριξη ανάκτησης τύπου peak detect	NAI
Χαρακτηριστικά Χρονισμού	
Υποστήριξη χρονισμού τύπου edge	NAI

Ψηφιακός Παλμογράφος	
Υποστήριξη χρονισμού τύπου glitch	NAI
Υποστήριξη χρονισμού τύπου runt	NAI
Υποστήριξη χρονισμού τύπου width	NAI
Υποστήριξη χρονισμού τύπου pattern	NAI
Μετρήσεις κυματομορφών	
Λειτουργία αυτόματης αναζήτησης, εύρεσης και πλοήγησης σε events καθοριζόμενα από το χρήστη.	NAI
Αριθμός μετρήσεων που μπορούν να απεικονίζονται ταυτόχρονα στην οθόνη του παλμογράφου	≥ 8
Υποστήριξη τουλάχιστον 50 αυτόματων μετρήσεων	NAI
Υποστήριξη μέτρησης overshoot πλάτους κυματομορφής	NAI
Υποστήριξη μέτρησης οριζόντιου ανοίγματος διαγράμματος οφθαλμού	NAI
Υποστήριξη μέτρησης κάθετου ανοίγματος διαγράμματος οφθαλμού	NAI
Υποστήριξη μέτρησης jitter	NAI
Υποστήριξη μέτρησης Q-factor	NAI
Υποστήριξη Ιστογραμμάτων	NAI
Υποστήριξη στατιστικών μετρήσεων	NAI
Μαθηματική επεξεργασία και μετασχηματισμοί κυματομορφών	
Υποστήριξη αλγεβρικών πράξεων μεταξύ κυματομορφών των καναλιών: πρόσθεση, αφαίρεση πολλαπλασιασμός, διαίρεση	NAI
Υποστήριξη υπολογισμού αλγεβρικών παραστάσεων στις οποίες θα μπορούν να συμμετέχουν οι κυματομορφές και μετασχηματισμοί αυτών (ολοκλήρωμα, παράγωγος, κτλ)	NAI
Υποστήριξη φίλτρων ορισμένων από τον χρήστη	NAI
Φίλτρα παραθύρωσης: τετραγωνικό, Hanning, Flap-top, Hamming, Kaiser-Bessel, Blackman-Harris, Gaussian, Exponential	NAI
Οθόνη οργάνου	
Χρήση διαφορετικών χρωμάτων για κάθε κανάλι και επεξεργασμένη κυματομορφή που παρουσιάζεται	NAI
Είδη απεικόνισης	XT, XY

Ψηφιακός Παλμογράφος	
Ανάλυση οθόνης	≥1024×768
Ενσωματωμένη έγχρωμη οθόνη αφής	NAI
Τρόποι απεικόνισης κυματομορφών (με επιλογή του χρήστη)	Γραμμές, Κουκίδες, variable persistence, infinite persistence
Περιφερειακά και ενσωματωμένο σύστημα υπολογιστή	
Ενσωματωμένο λειτουργικό σύστημα	Windows 7 ή νεότερο ή ισοδύναμο
Ρολόι επεξεργαστή	≥2GHz
Onboard μνήμη του ενσωματωμένου υπολογιστή	≥4GByte
Υποστήριξη σύνδεσης πληκτρολογίου μέσω USB	NAI
Ενσωματωμένος σκληρός δίσκος	≥ 450GB
Υποστήριξη σύνδεσης mouse μέσω USB	NAI
Υποστήριξη σύνδεσης σκληρού δίσκου μέσω USB	NAI
Θύρες εισόδου/εξόδου	
Αριθμός θυρών USB	>5
Θύρα Ethernet	NAI
Υποστήριξη LXI τάξης C	NAI
Συνοδευτικά Καλώδια και Παρελκόμενα	
Καλώδιο τροφοδοσίας AC	NAI
Πλήθος passive probe 1GHz	≥4
Εγχειρίδιο χρήσης	NAI
Δυνατότητα Αναβάθμισης	
Δυνατότητα εύκολης μελλοντικής αναβάθμισης μνήμης και καναλιών εισόδου	NAI
Μέγιστο μέγεθος αναβαθμιζόμενης μνήμης	≥250Mpoints
Βάρος	

Ψηφιακός Παλμογράφος	
Μέγιστο βάρος οργάνου	≤7Kg
Εγγύηση – Συντήρηση	
Έτη εγγύησης από τον προμηθευτή ή τον κατασκευαστή	≥1

Ψηφιακή Γεννήτρια	Απαίτηση
Τεμάχια	1
Είδη Κυματομορφών	
Ελάχιστο σετ υποστηριζόμενων κυματομορφών	Ημιτόνου, Τετραγωνική, Ramp, Θόρυβος, Αυθαίρετη, DDS
Υποστήριξη σύνθεσης αυθαίρετων (arbitrary) κυματομορφών από τον χρήστη	NAI
Κοινά χαρακτηριστικά παραγόμενων κυματομορφών	
Ελάχιστο πλήθος αναλογικών καναλιών	≥2
Ελάχιστο πλήθος ψηφιακών καναλιών	≥16
Μέγιστη συχνότητα κυματομορφής	>1GHz
Ανάλυση	≥14 bit
Ελάχιστος ρυθμός δειγματοληψίας	≤8MS/s
Μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας	≥2.5GS/s
Τύπος εξόδου	single ended, differential
Μέγιστο πλάτος εξόδου	≥4Vpp
Ανάλυση πλάτους	<1mV
Χρόνος ανόδου/καθόδου	≤600ps
Overshoot	<3%
Συνολικό jitter (2.5GS/s)	<120ps
Θόρυβος φάσης (625MHz, 1MHz offset)	≤-136 dBc/Hz

Ψηφιακή Γεννήτρια	Απαίτηση
Μη αρμονική παραμόρφωση (DC-1GHz)	$\leq -74\text{dBc}$
Διακριτικότητα συχνότητας	$< 1\text{Hz}$
Αντίσταση εξόδου	50Ω, 100Ω
Συνδετήρας εξόδου αναλογικών καναλιών	SMA
Συνδετήρας εξόδου ψηφιακών καναλιών	Infiniband 12x
Χαρακτηριστικά αυθαίρετων κυματομορφών	
Μέγιστος αριθμός δειγμάτων για κάθε περίοδο αυθαίρετης κυματομορφής	$\geq 16\text{Mpoints}$
Πλήθος κυματομορφών	$> 16\text{k}$
Δυνατές καταστάσεις λειτουργίας	συνεχής, triggered, gated, sequence
Ανάλυση ρολογιού δειγματοληψίας	≥ 8 ψηφία
Σταθερότητα εσωτερικού ρολογιού	$< \pm 0.5 \text{ ppm}$
Κυματομορφές Διαμόρφωσης	
Υποστήριξη κυματομορφών AM	NAI
Υποστήριξη κυματομορφών FM	NAI
Υποστήριξη κυματομορφών PM	NAI
Έλεγχος του οργάνου με H/Y	
Υποστήριξη θύρας για τον έλεγχο του οργάνου με H/Y	NAI
Υποστήριξη προγραμματισμού όλων των παραμέτρων των κυματομορφών	NAI
Τα προγράμματα οδήγησης και τα προγράμματα διαχείρισης της συσκευής θα παραδοθούν σε CD ή DVD	NAI
Παρελκόμενα	
Να παραδοθεί με 10 καλώδια SMA/M to SMA/M μήκους τουλάχιστον 1m.	NAI
Να παραδοθεί με τουλάχιστον 10 μετατροπείς miniSMP/F-SMA/M	NAI
Να παραδοθεί με τουλάχιστον 6 μετατροπείς SMP/F-SMA/M	NAI
Να παραδοθεί με τουλάχιστον 6 μετατροπείς SMA/F-BNC/M	NAI
Να παραδοθεί με τουλάχιστον 6 μετατροπείς SMA/F-SMA/F	NAI

Ψηφιακή Γεννήτρια	Απαίτηση
Να συνοδεύεται από τουλάχιστον 4 μικροκυματικούς ενισχυτές με ακροδέκτες SMA, εικόνα θορύβου $\leq 5.5\text{dB}$ και ελάχιστη συχνότητα λειτουργίας $\leq 300\text{kHz}$, μέγιστη συχνότητα λειτουργίας $\geq 14\text{GHz}$	NAI
Εγγύηση – Συντήρηση	
Έτη εγγύησης από τον προμηθευτή ή τον κατασκευαστή	≥ 1

Προγραμματιζόμενο Τροφοδοτικό DC	Απαίτηση
Τεμάχια	2
Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά	
Πλήθος προγραμματιζόμενων εξόδων	≥ 1
Μέγιστη τάση εξόδου	$\geq 32\text{V-DC}$
Ελάχιστη τάση εξόδου	0V
Μέγιστο ρεύμα εξόδου	$\geq 3\text{A}$
Ελάχιστο ρεύμα εξόδου	0A
Ισχύς εξόδου	$\geq 96\text{W}$
Ρύθμιση φορτίου τάσης	0.01% + 2mV ή καλύτερο
Ρύθμιση φορτίου ρεύματος	0.05% + 0.1mA ή καλύτερο
Ρύθμιση γραμμής τάσης	0.01% + 1mV ή καλύτερο
Ρύθμιση γραμμής ρεύματος	0.05% + 0.1mA ή καλύτερο
Βασική ακρίβεια τάσης	0.03% ή καλύτερο
Βασική ακρίβεια ρεύματος	0.05% ή καλύτερο
Θόρυβος και Κυμάτωση	5mVpp ή καλύτερο
Λοιπά χαρακτηριστικά	
Να διαθέτει ενσωματωμένη ψηφιακή οθόνη για την αναφορά των παραμέτρων της εξόδου συμπεριλαμβανομένου της τιμής της τάσης και του ρεύματος	NAI
Υποστήριξη δυνατότητας καθορισμού μέγιστου ρεύματος και μέγιστης τάσης εξόδου με επιλογή του χρήστη	NAI

Προγραμματιζόμενο Τροφοδοτικό DC	Απαίτηση
Καθορισμός τάσης και ρεύματος εξόδου μέσω περιστρεφόμενου κουμπιού ελέγχου (control knob)	NAI
Καθορισμός τάσης και ρεύματος εξόδου μέσω αριθμητικού πληκτρολογίου	NAI
Να διαθέτει ενσωματωμένη οθόνη με ταυτόχρονη απεικόνιση τάσης, ρεύματος και ορίων	NAI
Προσαρμοζόμενη προστασία υπέρτασης	NAI
Εσωτερική μνήμη αποθήκευση τουλάχιστον 40 set ups	NAI
Αριθμητική είσοδος δεδομένων	NAI
Λειτουργία remote sense για περιορισμό voltage drop	NAI
Να υποστηρίζει απομακρυσμένο έλεγχο μέσω USB	NAI
Δυνατότητα εισαγωγής σε rack	NAI
Να συνοδεύεται με συμβατό λογισμικό Labview για επεξεργασία των μετρήσεων	NAI
Τα προγράμματα οδήγησης και τα προγράμματα διαχείρισης της συσκευής θα παραδοθούν σε CD ή DVD και ενημερώσεις του λογισμικού θα είναι διαθέσιμα μέσω internet από το site του κατασκευαστή	NAI
Έξοδοι οργάνου	
Ακροδέκτης θετικής τάσης (+) τύπου banana	NAI
Ακροδέκτης αρνητικής τάσης (-) τύπου banana	NAI
Ακροδέκτης γείωσης (GND) τύπου banana	NAI
Έξοδος USB για τον έλεγχο του οργάνου με H/Y	NAI
Βάρος και Διαστάσεις	
Μέγιστο Βάρος	<8Kg
Μέγιστο ύψος	95mm
Μέγιστο μήκος	250mm
Μέγιστο βάθος	400mm
Καλώδια και άλλα συνοδευτικά	
Καλώδιο τροφοδοσίας AC	NAI
Καλώδιο USB	NAI
Εγγύηση – Συντήρηση	
Έτη εγγύησης από τον προμηθευτή ή τον κατασκευαστή	≥1

LASER τοπικού ταλαντωτή	Απαίτηση
Τεμάχια	1
Γενικά Χαρακτηριστικά	
Τυπικό μήκος κύματος	1550nm

LASER τοπικού ταλαντωτή	Απαίτηση
Ελάχιστο μήκος κύματος	≤1530nm
Μέγιστο μήκος κύματος	≥1570nm
Τυπική ισχύ κορυφής	≥25mW
Εύρος γραμμής	≤130kHz
Τυπικός λόγος καταστολής πλευρικών τρόπων (side mode suppression ratio)	≥45dB
Τυπικό ρεύμα λειτουργίας	≤300mA
Μέγιστο ρεύμα λειτουργίας	≤500mA
Υποστήριξη διασύνδεσης με υπολογιστή μέσω USB	NAI
Έλεγχος LASER	
Να συνοδεύεται με κατάλληλο ελεγκτή ρεύματος και θερμοκρασίας (TEC)	NAI
Μέγιστο υποστηριζόμενο ρεύμα ελεγκτή	≥1A
Ελάχιστο υποστηριζόμενο ρεύμα ελεγκτή	≤1mA
Ακρίβεια ρεύματος ελεγκτή	±(0.1% + 500 μΑ) ή καλύτερη
Θόρυβος ρεύματος (τυπική τιμή rms)	≤15μΑ
Υποστήριξη ελέγχου θερμοκρασίας	NAI
Δυνατότητα διασύνδεσης με υπολογιστή μέσω USB	NAI
Υποστήριξη μετρήσεων μέσω τάσεως, ρεύματος ισχύος και θερμοκρασίας μέσω κατάλληλης οθόνης	NAI
Συνοδευτικά	
Να παραδοθεί με όλα τα απαραίτητα καλώδια τροφοδοσίας και ελέγχου	NAI
Να παραδοθεί με το απαραίτητο λογισμικό ελέγχου	NAI
Να παραδοθεί με 4 οπτικά καλώδια (patchcords) FC/PC to FC/APC 1m	NAI
Να παραδοθεί με σετ από 100 ειδικά γάντια χειρισμού από Latex μεγέθους L	NAI
Να παραδοθεί με τουλάχιστον 10 mating sleeves APC/APC και PC/PC	NAI
Να παραδοθεί με δύο ζευγάρια ειδικά προστατευτικά γυαλιά με οπτική πυκνότητα ≥4 στο φάσμα εκπομπής	NAI
Εγγύηση – Συντήρηση	
Έτη εγγύησης on-site NBD από τον προμηθευτή ή τον κατασκευαστή	≥1

LASER πομπού	Απαίτηση
Τεμάχια	1
Γενικά Χαρακτηριστικά	
Εγκιβωτισμός	14-pin butterfly package

LASER πομπού	Απαίτηση
Οπτική έξοδος με pigtailed οπτική ίνα που διατηρεί την πόλωση	NAI
Τύπος οπτικής εξόδου	FC/APC
Τυπικό κεντρικό μήκος κύματος	1550nm
Μέγιστη τυπική ισχύ κορυφής	$\geq 40\text{mW}$
Εύρος γραμμής	$\leq 100\text{kHz}$
Σχετικός θόρυβος έντασης (relative intensity noise)	-150dB/Hz ή καλύτερο
Τυπικό ρεύμα λειτουργίας	$\leq 300\text{mA}$
Τυπικός λόγος καταστολής πλευρικών τρόπων (side mode suppression ratio)	$\geq 45\text{dB}$
Τυπική θερμοκρασία λειτουργίας	$25^{\circ}\text{C} (\pm 2^{\circ}\text{C})$
Έλεγχος LASER	
Να συνοδεύεται με κατάλληλο ελεγκτή ρεύματος και θερμοκρασίας (TEC)	NAI
Μέγιστο υποστηριζόμενο ρεύμα	$\geq 1.5\text{A}$
Ελάχιστο υποστηριζόμενο ρεύμα	$\leq 1\text{mA}$
Ακρίβεια περιορισμού ρεύματος	$\pm(0.12\% + 800\ \mu\text{A})$ ή καλύτερη
Θόρυβος ρεύματος (τυπική τιμή rms)	$\leq 10\ \mu\text{A}$
Υποστήριξη ελέγχου θερμοκρασίας	NAI
Δυνατότητα διασύνδεσης με υπολογιστή μέσω USB και απομακρυσμένου ελέγχου στο σύνολο των λειτουργιών	NAI
Υποστήριξη μετρήσεων μέσω τάσεως, ρεύματος ισχύος και θερμοκρασίας μέσω κατάλληλης οθόνης	NAI
Συνοδευτικά	
Να παραδοθεί με όλα τα απαραίτητα καλώδια τροφοδοσίας και ελέγχου	NAI
Να παραδοθεί με το απαραίτητο λογισμικό ελέγχου	NAI
Να παραδοθεί με 4 οπτικά καλώδια (patchcords) FC/PC to FC/PC 1m	NAI
Να παραδοθεί με 4 οπτικά καλώδια (patchcords) FC/PC to FC/PC 2m	NAI
Να παραδοθεί με 4 οπτικά καλώδια (patchcords) FC/APC to FC/APC 1m	NAI
Να παραδοθεί με 4 οπτικά καλώδια (patchcords) FC/APC to FC/APC 2m	NAI
Να παραδοθεί με 4 οπτικούς συζεύκτες ίνας 50/50 στην περιοχή των 1550nm, τύπου σύνδεσης οπτικής ίνας FC/APC	NAI
Να παραδοθεί με 1 οπτικό συζεύκτη ίνας 50/50 διατηρούμενης πόλωσης στην περιοχή των 1550nm, τύπου σύνδεσης οπτικής ίνας FC/APC	NAI
Να παραδοθεί με 8 μετατροπείς για οπτική ίνα FC/PC to FC/PC	NAI
Να παραδοθεί με ένα ζευγάρι ειδικά προστατευτικά γυαλιά με οπτική πυκνότητα ≥ 4 στο φάσμα εκπομπής	NAI
Να παραδοθεί με σετ από 100 ειδικά γάντια χειρισμού	NAI
Να παραδοθεί με φορητό μετρητή οπτικής ισχύος, με μπαταρία, με LCD οθόνη 4",	NAI

LASER πομπού	Απαίτηση
ανάλυσης οθόνης 320×240pixels και υποστηρίζει εισόδους USB, SMA, DB9 female (για τον αισθητήρα), SD κάρτας.	
Να παραδοθεί με αισθητήρα φωτοδιόδου γερμανίου (Ge), με εύρος συχνοτήτων 700nm~1800nm και εύρος οπτικής ισχύος 50mW~40mW ή καλύτερο	NAI
Εγγύηση – Συντήρηση	
Έτη εγγύησης on-site NBD από τον προμηθευτή ή τον κατασκευαστή	≥1

Χειροκίνητος Ελεγκτής Πόλωσης	Απαίτηση
Τεμάχια	4
Χαρακτηριστικά	
Αριθμός πτερυγίων	3
Μέγιστη γωνία περιστροφής πτερυγίων	≤235°
Διάμετρος πτερυγίων	≤31.8mm
Οπτική είσοδος και έξοδος με pigtailed οπτική ίνα	NAI
Τύπος σύνδεσης της οπτικής ίνας εισόδου και εξόδου	FC/APC

Διαμορφωτής Φάσης	Απαίτηση
Τεμάχια	1
Χαρακτηριστικά	
Εγκιβωτισμός	Hermetic Packaging
Υλικό στο οποίο βασίζεται η λειτουργία της διαμόρφωσης	LiNbO ₃
RF Εύρος Ζώνης	≥14GHz
Να διαθέτει δύο βραχίονες με Mach-Zehnder συμβολόμετρα τα οποία να ελέγχονται από ξεχωριστή είσοδο RF	NAI
Συχνотικό εύρος λειτουργίας	1525-1575nm ή ευρύτερο
Ρυθμός σήματος	≥40Gb/s
Απώλεια Εισόδου	≤5dB
Οπτική είσοδος και έξοδος με pigtailed οπτική ίνα	NAI
Τύπος οπτικής εισόδου και εξόδου	FC/PC
Δύο είσοδοι RF διαμόρφωσης	NAI
Τύπος RF εισόδων	GPO ή ισοδύναμος

Σύμφωνος Δέκτης	Απαίτηση
Τεμάχια	1
Χαρακτηριστικά	
Ολοκληρωμένη μορφή	NAI
Εγκιβωτισμός	Surface mount package
Περιλαμβάνει ένα τουλάχιστον υβρίδιο 90° και ισοσταθμισμένους φωτοδέκτες για την μίξη και φάραση του οπτικού σήματος και του τοπικού ταλαντωτή	NAI
Ρυθμός συμβόλων	≥ 12 Gbaud
Εύρος ζώνης	≥ 10 GHz
Ελάχιστο μήκος κύματος λειτουργίας	≤ 1530 nm
Μέγιστο μήκος κύματος λειτουργίας	≥ 1570 nm
Ρυθμός δεδομένων	≥ 40 Gb/s
Οπτική είσοδος σήματος και τοπικού ταλαντωτή με pigtailed οπτική ίνα.	NAI
Τύπος οπτικής εισόδου σήματος και τοπικού ταλαντωτή	FC/APC
Τάσης τροφοδοσίας	≥ 3.0 V
Τυπος οπτικού σήματος τοπικού ταλαντωτή	Continuous wave
Τυπικό είδους διαμόρφωσης	DP-QPSK
Ελάχιστη τυπική ισχύ σήματος εισόδου	≤ -20 dBm
Ελάχιστη τυπική ισχύ σήματος εισόδου	$\geq +6$ dBm
Ενσωματωμένος ενισχυτής διαγωγιμότητα (transimpedance amplifier, TIA)	NAI
Έλεγχος του δέκτη	
Να παραδοθεί με βοηθητικό κύκλωμα ελέγχου	NAI
Τύπος διάταξης ελέγχου	PCB (printed circuit board)
Να υποστηρίζει τα ανωτέρω χαρακτηριστικά τάσεων τροφοδοσίας	NAI
Οκτώ RF έξοδοι	NAI
Τύπος RF εξόδου	GPPO ή ισοδύναμος
Εγγύηση – Συντήρηση	
Έτη εγγύησης on-site NBD από τον προμηθευτή ή τον κατασκευαστή	≥ 1

Οπτική Πύλη Ίνας (Fiber Port)	Απαίτηση
Τεμάχια	1
Χαρακτηριστικά	
Τυπικό μήκος κύματος λειτουργίας	1550nm
Τύπος οπτικού φακού	Ασφαιρικός (Aspheric)
Καθαρό άνοιγμα φακού (clear aperture, CA)	4.4mm
Αριθμητικό άνοιγμα φακού (NA)	0.20
Συχνотική περιοχή της αντανάκλαστικής επίστρωσης	από 1050 έως 1620nm ή ευρύτερο
Σύνδεση με οπτική ίνα	NAI
Τύπος σύνδεσης ίνας	FC/PC
Ενσωματωμένος μηχανισμός ευθυγράμμισης (6 βαθμών ελευθερίας)	NAI
Εστιακό μήκος (focal length)	11mm
Συνοδευτικά	
Να παραδοθεί με τεσσερις (4) κάρτες ανίχνευσης υπέρυθρων ακτινών στα 1550nm	NAI

Οπτική Διόπτρα Τριπλού Φακού (Collimator)	Απαίτηση
Τεμάχια	1
Χαρακτηριστικά	
Τυπικό μήκος κύματος λειτουργίας	1550nm
Ενσωματωμένος οπτικός φακός	NAI
Πλήθος ενσωματωμένων οπτικών φακών	3
Διάμετρος δέσμης εξόδου (στα 2 μέτρα) στο $1/e^2$	3.5mm
Καθαρό άνοιγμα (CA)	10mm
Συχνотική περιοχή της αντανάκλαστικής επίστρωσης	από 1050nm έως 1650nm ή ευρύτερο
Σύνδεση με οπτική ίνα	NAI
Τύπος σύνδεσης ίνας	FC/APC

Οπτική Διόπτρα με Φακό GRIN	Απαίτηση
Τεμάχια	1
Χαρακτηριστικά	

Οπτική Διόπτρα με Φακό GRIN	Απαίτηση
Κεντρικό μήκος κύματος	1550nm
Εύρος μηκών κύματος λειτουργίας	$\pm 30\text{nm}$
Διάμετρος οπτικής δέσμης	0.5mm
Απόκλιση δέσμης	0.25°
Ενσωματωμένη οπτική ίνα	NAI
Τύπος ενσωματωμένης οπτικής ίνας	SMF-28e ⁺
Τύπος σύνδεσης ίνας	FC/APC
Μήκος pigtailed οπτικής ίνας	$\geq 1\text{m}$
Μέγιστη οπτική ισχύς (CW)	$\geq 300\text{mW}$

Οπτική Διόπτρα με Φακό GRIN	Απαίτηση
Τεμάχια	1
Χαρακτηριστικά	
Κεντρικό μήκος κύματος	1550nm
Εύρος μηκών κύματος λειτουργίας	$\pm 30\text{nm}$
Διάμετρος οπτικής δέσμης	0.5mm
Απόκλιση δέσμης	0.25°
Ενσωματωμένη οπτική ίνα	NAI
Τύπος ενσωματωμένης οπτικής ίνας	SMF-28e ⁺
Τύπος σύνδεσης ίνας	FC/PC
Μήκος ενσωματωμένης οπτικής ίνας	$\geq 1\text{m}$
Μέγιστη οπτική ισχύς (CW)	$\geq 300\text{mW}$

Κυκλικός Διηλεκτρικός Καθρέπτης	Απαίτηση
Τεμάχια	2
Χαρακτηριστικά	
Εύρος μήκους κύματος λειτουργίας	1280~1600nm
Κυκλικό σχήμα	NAI
Ανακλαστικότητα ανεξάρτητη πολώσεως για γωνίες πρόσπτωσης από 0° έως 45°	$>99\%$
Διάμετρος καθρέπτη	50.8mm
Πάχος καθρέπτη	12mm

Κυκλικός Διηλεκτρικός Καθρέπτης	Απαίτηση
Καθαρό άνοιγμα (CA)	$\geq 43\text{mm}$
Υλικό κατασκευής	Fused Silica
Συνοδευτικά	
Να παραδοθεί με σετ από 100 ειδικά γάντια χειρισμού από Latex μεγέθους L	NAI
Να παραδοθεί με σετ εργαλείων κενού μεταχείρισης φακών	NAI
Να παραδοθεί με λαβίδα για οπτικά στοιχεία με άκρα από Carbon-Fiber	NAI
Να παραδοθεί με λαβίδα για οπτικά στοιχεία με άκρα από Polyolefin	NAI
Να παραδοθεί με 200 καθαριστικά μαντηλάκια	NAI

Οπτικός Εξασθενητής Ενσωματωμένης Ίνας	Απαίτηση
Τεμάχια	1
Χαρακτηριστικά	
Τυπικό μήκος κύματος λειτουργίας	1550nm
Εύρος εξασθένησης	1.5~50dB ή ευρύτερο
Ακρίβεια εξασθένησης	$\leq 0.1\text{dB}$
Μέγιστη οπτική ισχύς	$\geq 300\text{mW}$
Οπτική είσοδος και έξοδος με pigtailed οπτική ίνα	NAI
Ευαισθησία στην πόλωση	$\leq 0.2\text{dB}$
να διαθέτει προσαρμοσμένη ίνα και στα δύο του άκρα	NAI
Τύπος σύνδεσης ίνας	FC/PC
Μέγιστη οπτική ισχύς	300mW
Θερμική ευστάθεια	$\leq 0.03\text{dB}/^\circ\text{C}$
Συνολικό μήκος ίνας εισόδου και εξόδου	2m

Όπτικο/μηχανική βάση στήριξης (Optical Breadboard)	Απαίτηση
Τεμάχια	2
Χαρακτηριστικά	
Μήκος βάσης	$\geq 750\text{mm}$
Πλάτος βάσης	$\geq 450\text{mm}$
Πάχος βάσης	$\leq 12.7\text{mm}$
Υλικό κατασκευής	Αλουμίνιο

Οπτικο/μηχανική βάση στήριξης (Optical Breadboard)	Απαίτηση
Οπές με σπείρωμα σε όλη την έκταση της βάσης για σταθερή στήριξη διατάξεων	NAI
Πλήθος οπών με σπείρωμα	≥ 540
Απόσταση μεταξύ των οπών	$\leq 25\text{mm}$
Παρελκόμενα	
Να παραδοθεί με οκτώ (12) πόδια ύψους 25mm και με κατάλληλο σπείρωμα ώστε να βιδώνει στην ανωτέρω οπτικο/μηχανική βάση στήριξης	NAI
Να παραδοθεί με επτά (7) μεταλλικά κυλινδρικά στηρίγματα (post) μήκους 5cm και διαμέτρου 12.7mm, με σπείρωμα (τύπου 8-32 ή ισοδύναμο) στο ένα άκρο	NAI
Να παραδοθεί με επτά (7) μεταλλικά κυλινδρικά στηρίγματα (post) μήκους 10cm και διαμέτρου 12.7mm, με σπείρωμα (τύπου 8-32 ή ισοδύναμο) στο ένα άκρο	NAI
Να παραδοθεί με επτά (7) μεταλλικές κυλινδρικές βάσεις (post holder) για υποστηρίζει τα ανωτέρω στηρίγματα (post) μήκους 5cm και διαμέτρου 12.8mm, με την δυνατότητα να βιδωθούν σε breadboard και με την δυνατότητα ρύθμισης του στηρίγματος (post) κατά ύψος (7 τμχ.)	NAI
Να παραδοθεί με επτά (7) μεταλλικές κυλινδρικές βάσεις (post holder) για υποστηρίζει τα ανωτέρω στηρίγματα (post) μήκους 10cm και διαμέτρου 12.8mm, με την δυνατότητα να βιδωθούν σε breadboard και με την δυνατότητα ρύθμισης του στηρίγματος (post) κατά ύψος (7 τμχ.)	NAI
Να παραδοθεί με βίδες με κεφαλή (τύπου M6 ή ισοδύναμη) με μήκη 10mm, 12mm, 16mm, 20mm, 25mm, 30mm, 35mm και 45mm (>1000 τμχ.)	NAI
Να παραδοθεί με μετατροπέα σχήματος L ύψους 41.1mm, μήκους 38.9mm και πλάτους 38.1mm ώστε να υποστηρίζει την στήριξη του οπτικού κατευθυντήρα (fiber port) και με εσοχή με σπείρωμα (τύπου 8-32 ή ισοδύναμο) ώστε να βιδώνει στο ανωτέρω post (1 τμχ.)	NAI
Να παραδοθεί με μετατροπέα κυκλικής διατομής εσωτερικής διαμέτρου 12mm με εξωτερικό σπείρωμα (τύπου SM1 ή ισοδύναμο) για στήριξη του οπτικού κατευθυντήρα τριπλού φακού (collimator) (1 τμχ.)	NAI
Να παραδοθεί με μετατροπέα κυκλικής διατομής με εσωτερικό σπείρωμα (τύπου SM1RR ή ισοδύναμο) ώστε να βιδώνει ο παραπάνω μετατροπέας και με εσοχή με σπείρωμα (τύπου 8-32 ή ισοδύναμο) ώστε να βιδώνει στο ανωτέρω post (1 τμχ.)	NAI
Να παραδοθεί με δύο (2) μετατροπείς που να υποστηρίζουν κυκλικό καθρέπτη με διάμετρο 50.8mm και την δυνατότητα μέγιστης ρύθμισης του καθρέπτη $\pm 4^\circ$ στην κάθετη και παράλληλη διεύθυνση (2 τμχ.)	NAI
Να παραδοθεί με δύο (2) μετατροπείς κυκλικής διατομής εσωτερικής διαμέτρου 3.5mm με εξωτερικό σπείρωμα (τύπου SM05 ή ισοδύναμο) για στήριξη του οπτικού κατευθυντήρα με φακό GRIN (2 τμχ.)	NAI
Να παραδοθεί με δύο (2) μετατροπείς με σπείρωμα (τύπου SM05RR ή ισοδύναμο) για την στήριξη του παραπάνω μετατροπέα του οπτικού κατευθυντήρα με φακό GRIN με εσοχή με σπείρωμα ώστε να βιδώνει στο ανωτέρω post και την δυνατότητα μέγιστης ρύθμισης του κατευθυντήρα $\pm 4^\circ$ στην κάθετη και παράλληλη διεύθυνση (2 τμχ.)	NAI
Να παραδοθεί με δέκα (10) μετατροπείς βίδας με εξωτερικό σπείρωμα που να μετατρέπει σπείρωμα τύπου 8-32 ή ισοδύναμου σε σπείρωμα τύπου 4-40 ή ισοδύναμου (10 τμχ.)	NAI
Να παραδοθεί με δέκα (10) μετατροπείς βίδας που να μετατρέπει εσωτερικό σπείρωμα τύπου 8-32 ή ισοδύναμου σε εξωτερικό σπείρωμα τύπου M6 ή ισοδύναμου (10 τμχ.)	NAI

8. Αναφορές

1. R. Paschotta et al., “Optical phase noise and carrier–envelope offset noise of mode-locked lasers”, *Appl. Phys. B* 82 (2), 265 (2006)
2. S. Karna and A. Yeates, *Nonlinear Optical Materials: Theory and Modeling*, Washington, DC: American Chemical Society 1996, pp. 2–3, ISBN 0-8412-3401-9.
3. A. Miki and J. Novak, “Superachromatic air-spaced triplet,” *Applied Optics*, vol. 53, pp. 6930-6937 (2014).
4. Μία πηγή περισσότερων από 100 άρθρων γύρω από τους φακούς μεταβλητού δείκτη διάθλασης GRIN, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στις παρακάτω ενότητες του περιοδικού *Applied Optics*, GRIN I (April 1 , 1980) , GRIN II (March 15 , 1982), GRIN III (Feb . 1 , 1983) , GRIN IV (June 1 , 1984) , GRIN V (December 15 , 1985) , GRIN VI (October 1 , 1986), GRIN VII (February 1 , 1988) , GRIN VIII (October 1 , 1990 and December 1, 1990), and GRIN IX (September 1 , 1992) .