

ΕΣΠΑ 2007-2013, Ε.Π. «ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ»  
ΔΡΑΣΗ «ΑΡΙΣΤΕΙΑ II»

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

Κωδικός Έργου : 3525

**COWS**

Παραδοτέο:	Π3.1
Τίτλος:	Αρχιτεκτονική Συστήματος
Ημερομηνία:	
Επιμέρους Δράση:	Π.Ε. 3
Υπεύθυνος Σύνταξης:	Θωμάς Καμαλάκης, Παναγιώτης Κανάκης, Βασίλειος Δαλάκας, Γεωργία Δέδε, Κατερίνα Μαργαρίτη
Είδος:	Τεχνική Αναφορά



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης  
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
Πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

## **1. Περιεχόμενα**

1. Περιεχόμενα .....	2
2. Σκοπός του παραδοτέου .....	3
3. Αρχιτεκτονική Δικτύου COWS .....	3
4. Χρήση πολλαπλών πομπών .....	12
5. Συμπεράσματα.....	17
6. Αναφορές.....	18

## 2. Σκοπός του παραδοτέου

Το παραδοτέο περιγράφει τις αρχιτεκτονικές των επικοινωνιακών συστημάτων στα οποία μπορούν να συμβάλλουν τα σύμφωνα ασύρματα οπτικά συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται αρχιτεκτονικές για τα δίκτυα εξυπηρετητών, τα εταιρικά και τα οικιακά δίκτυα, οι ανάγκες τους, οι προκλήσεις, και το πώς η ανάπτυξη των σύμφωνα ασύρματων οπτικών επικοινωνιών μπορούν να συμβαδίσουν με την ανάπτυξη άλλων τεχνολογιών σε αυτά τα πλαίσια. Επίσης, παρουσιάζεται η λύση των πολλαπλών εισόδων/πολλαπλών εξόδων (MIMO) για τα σύμφωνα ασύρματα οπτικά συστήματα και τα πλεονεκτήματά της.

## 3. Αρχιτεκτονική Δικτύου COWS

Τα οικιακά δίκτυα αναμένονται να παίξουν σημαντικό ρόλο στην περαιτέρω προώθηση των ευρυζωνικών δικτύων και στην εδραίωση του μελλοντικού internet. Για παράδειγμα, τα δίκτυα εσωτερικού χώρου έχουν παραδοσιακά δεκαπλάσια χωρητικότητα από τα σημεία πρόσβασης στο κυρίως τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Δεδομένου ότι το Fiber-To-The-Home (FTTH) υπόσχεται συμμετρικές ταχύτητες τουλάχιστον της τάξης των εκατοντάδων Mbit/s ανά οικία, συνεπάγεται πως τα οικιακά δίκτυα θα πρέπει να υποστηρίξουν ταχύτητες της τάξης των Gbit/s ή και παραπάνω [1]. Η κατανομή τέτοιων ρυθμών μετάδοσης εντός των εσωτερικών χώρων αποτελεί πρόκληση. Θα πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι το πρόβλημα αυτό δεν καθίσταται ιδιαίτερα εμφανές επί του παρόντος επειδή τα modem του ADSL επιτυγχάνουν μέγιστους ρυθμούς της τάξης των 24Mb/s που στην πράξη μειώνονται σε 8-10Mb/s λόγω μεγαλύτερων αποστάσεων από το κεντρικό σημείο διανομής. Επομένως οι ρυθμοί του WiFi που κυμαίνονται στα 50Mb/s μπορούν προς το παρόν να υποστηρίξουν τις ανάγκες της οικιακής δικτύωσης. Ωστόσο όπως αναφέραμε και προηγουμένως, η κατάσταση αυτή θα αλλάξει με την ολοένα και ταχύτερη διείσδυση της οπτικής ίνας στο δίκτυο πρόσβασης.

Η μεγάλη χωρητικότητα των οπτικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων είναι γνωστή από τα δίκτυα μακρινών αποστάσεων και τα μητροπολιτικά δίκτυα [2]. Είναι επόμενο λοιπόν τα οπτικά συστήματα να εξεταστούν για την περίπτωση των εσωτερικών χώρων [3]. Σε αυτήν την περίπτωση, υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν συστήματα ινών κοντινών αποστάσεων για να αξιοποιηθεί όλο το εύρος ζώνης που καταφτάνει. Έτσι όμως, μπορεί να προκληθούν επιπλέον προβλήματα στο χρήστη, όπως η ανάγκη εγκατάστασης οπτικών καλωδίων, που είναι συνυφασμένη με επιπλέον κόστος και αναστάτωση του οικιακού ή εταιρικού περιβάλλοντος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμα και σε εταιρικά περιβάλλοντα, οι χρήστες επιθυμούν μία καλαίσθητη λύση δικτύωσης και πρέπει να αποφεύγονται επιπρόσθετα καλώδια σύνδεσης τερματικών με το υπόλοιπο δίκτυο που πολύ γρήγορα οδηγούν στο φαινόμενο του «σπαγγέτι καλωδίων» που συνεπάγεται σημαντική επιβάρυνση της διαχείρισης των τερματικών και των καλωδίων. Ειδικά δε στο οικιακό περιβάλλον το σπαγγέτι καλωδίων είναι απαγορευτικό σε χώρους όπως οι κρεβατοκάμαρες και το καθιστικό, όπου η διακόσμηση παίζει πολύ σημαντικό ρόλο.

Οι Ασύρματες Οπτικές Επικοινωνίες (OW) παρακάμπτουν τα προβλήματα καλωδίωσης επιτρέποντας τη μετάδοση πληροφορίας στον ελεύθερο χώρο [4]. Είναι ενδιαφέρον να τονιστεί ότι τέτοια συστήματα ήδη εγκαθίστανται σε συνδέσεις εξωτερικού χώρου από σημείο-προς-σημείο στα δίκτυα πρόσβασης [5]. Σε τέτοιου είδους εφαρμογές τα ασύρματα οπτικά συστήματα έχουν το πλεονέκτημα ότι προσφέρουν πολύ υψηλούς ρυθμούς σύνδεσης της τάξης των μερικών Gb/s σε αποστάσεις που μπορούν να ξεπερνούν και το 1Km. Αυτά τα συστήματα βρίσκουνε εφαρμογές σε εταιρικά και ακαδημαϊκά campuses, σε διασύνδεση σταθμών βάσεων κινητής τηλεφωνίας, κτλ. Έχουν ένα μέσο όρο ζωής που ξεπερνά τα δέκα χρόνια και αποτελούν ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα εναλλακτική σε σχέση με την εγκατάσταση οπτικής ίνας κυρίως από άποψη κόστους.

Παράλληλα, έχει ενταθεί το ενδιαφέρον για τη χρήση τους σε εσωτερικούς χώρους, είτε στο υπέρυθρο [6] είτε στο ορατό φάσμα της ακτινοβολίας [7]. Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας OW συμπεριλαμβάνουν το τεράστιο εύρος ζώνης, την ασφάλεια της επικοινωνίας ως προς τις υποκλοπές, και τη μηδαμινή τους αλληλεπίδραση με τα παραδοσιακά ραδιοσυστήματα. Τα συστήματα αυτά είναι φιλικά προς τον ανθρώπινο οργανισμό όταν τηρούνται στοιχειώσις περιορισμοί σε επίπεδο ισχύος. Επιπλέον, πηγές σήματος για τα OW συστήματα είναι οι LEDs, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης ως πηγές φωτισμού, απλοποιώντας

έτσι σημαντικά το κόστος και την πολυπλοκότητα μιας συνολικής εγκατάστασης. Ωστόσο θα πρέπει να τονιστεί ότι οι λαμπτήρες LED είναι πηγές ασύμφωνου φωτός και επομένως κατά την μετάδοση σημάτων δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχήματα διαμόρφωσης φάσης ή δυσδιάστατα εξελιγμένα σχήματα διαμόρφωσης τύπου I/Q που είχαμε δει στο παραδοτέο Π2.1. Η ασύμφωνη δε φύση του φωτός απαγορεύει την χρήση τεχνικών σύμφωνης φάρασης που όπως είδαμε στα Π1.1 και Π1.2 οδηγούν σε μεγάλη βελτίωση των επιδόσεων σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα σύμφωνης φάρασης. Επομένως στα δίκτυα COWS είμαστε αναγκασμένοι να χρησιμοποιήσουμε πηγές laser οι οποίες ενδείκνυνται για σύμφωνες εφαρμογές εξαιτίας της σύμφωνης φύσης της ακτινοβολίας που εκπέμπουν και της πολύ καλύτερης ποιότητας της. Στα πλαίσια του Π2.2 αναδείξαμε τα πλεονεκτήματα της σύμφωνης ακτινοβολίας σε εφαρμογές ασύρματων συστημάτων εσωτερικού χώρου.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε αντίθεση με συμβατικές εφαρμογές στο μητροπολιτικό ή στο δίκτυο κορμού σε εφαρμογές μικρών αποστάσεων και τοπικών δικτύων το κόστος είναι πολύ σημαντική παράμετρος της υλοποίησης. Όσο και αν αυτό προκαλεί έκπληξη, τελικά μία μεγάλη συνιστώσα του κόστους προέρχεται από τα ηλεκτρονικά του δέκτη. Για παράδειγμα ενώ ένας διαμορφωτής  $\text{LiNbO}_3$   $\geq 100\text{Gb/s}$  κοστίζει περίπου 3000€-4000€, χρειάζεται ηλεκτρονικά κυκλώματα οδήγησης (ενισχυτές) οι οποίοι θα πρέπει να παρέχουν τάση με πλάτος  $\geq 6\text{V}$  - $7\text{V}$  ώστε να εκμεταλλευόμαστε με βέλτιστο τρόπο τις δυνατότητες του διαμορφωτή όπως θα δούμε και στα πλαίσια του Π4.2. Το κόστος των εμπορικά διαθέσιμων ενισχυτών τάσης με τόσο υψηλό ζώνης (~20GHz) και τόσο μεγάλο πλάτος εξόδου είναι σημαντικό και συγκρίσιμο του κόστους του διαμορφωτή αφού κυμαίνεται στα 5000€-6000€ ανά ενισχυτή και για την υλοποίηση των εξελιγμένων σχημάτων διαμόρφωσης χρειάζονται δύο ενισχυτές, ένας για την I και ένας για την Q έξοδο του ενισχυτή. Το κόστος των ηλεκτρονικών στοιχείων μπορεί να μειωθεί αν μειωθούν και οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης κάτι που μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την χρήση κατάλληλων σχημάτων διαμόρφωσης και τεχνικών κωδικοποίησης όπως αυτές που εξετάσαμε στο Π2.1 και οι οποίες αντιστοιχούν σε πολύ υψηλές φασματικές αποδόσεις (~4 bit/s/Hz) για σχετικά χαμηλές τιμές ισχύος εκπομπής  $\leq 10\text{mW}$  που σημαίνει ότι το σύστημα χαρακτηρίζεται ως class-1 ως προς την ασφάλεια οφθαλμού και δεν εμπεριέχει κανέναν κίνδυνο για την υγεία. Μία ζεύξη με φασματική απόδοση 4bit/s/Hz χρειάζεται ένα εύρος ζώνης 1GHz για να επιτύχει ρυθμό μετάδοσης 4Gb/s και επομένως τα ηλεκτρονικά που απαιτούνται (π.χ. ηλεκτρονικοί ενισχυτές οδήγησης και λήψης) έχουν χαμηλό κόστος. Συγκριτικά να αναφέρουμε ότι το τυπικό κόστος ενός RF ενισχυτή με εύρος ζώνης 1GHz και πλάτος τάσης εξόδου 8V είναι περίπου 20€-30€ οδηγώντας σε μία υλοποίηση με κόστος ηλεκτρονικών μειωμένο τουλάχιστον κατά δύο τάξεις μεγέθους.

Στις επόμενες υποενότητες, θα εξεταστούν πιθανές αρχιτεκτονικές στα δίκτυα εξυπηρετητών, τα εταιρικά δίκτυα και τα οικιακά δίκτυα, όπου οι ασύρματες οπτικές επικοινωνίες μπορούν να συμβάλλουν στην αντιμετώπιση των προκλήσεων που αντιμετωπίζονται.

### 3.1 Δίκτυο Εξυπηρετητών

Τα δίκτυα εξυπηρετών παραδοσιακά θέτουν πολύ μεγάλες απαιτήσεις ως προς το εύρος ζώνης. Τα τελευταία χρόνια, εφαρμογές που στηρίζονται στο νέφος cloud (υπολογιστικό νέφος) είναι ιδιαίτερα δημοφιλείς καθώς επιτρέπουν στον χρήστη να φυλάσσει τα δεδομένα του σε απομακρυσμένους εξυπηρετές ώστε να αυτά να είναι διαθέσιμα από διάφορες τερματικές συσκευές. Τα δεδομένα των χρηστών φυλάσσονται σε μεγάλες φάρμες από εξυπηρετές οι οποίοι πρέπει να είναι σε θέση να επικοινωνούν με μεγάλες ταχύτητες τόσο μεταξύ τους όσο και με το υπόλοιπο διαδίκτυο. Υπολογιστικά συστήματα υψηλών επιδόσεων (high performance computing – HPC) επίσης απαιτούν διασύνδεσεις εξυπηρετών με πολύ υψηλή ταχύτητα. Η επιτάχυνση των παράλληλων υπολογισμών εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις δυνατότητες του δικτύου που υποστηρίζει τους διασυνδεδεμένους υπολογιστικούς κόμβους.

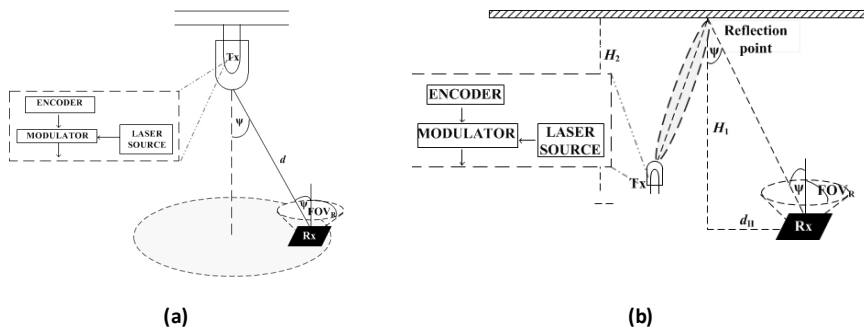
Πρόσφατες οικονομικές και τεχνολογικές εξελίξεις, όπως η εικονικοποίηση (virtualization) αλλά και περιβαλλοντικοί προβληματισμοί έχουν ορίσει νέες απαιτήσεις για τα δίκτυα εξυπηρετητών. Μεγάλες προκλήσεις στον τομέα είναι η βελτίωση των επιδόσεων, ο περιορισμός της κατανάλωσης ενέργειας, η ασφάλεια των δεδομένων, η συμπίεση με την αύξηση των δεδομένων, η αύξηση των αποθηκευτικών δυνατοτήτων, η βελτίωση των επικοινωνιών του σχετικού δικτύου και η μείωση του κόστους. Βασική πρόκληση όμως παραμένει η υποστήριξη της εκθετικής αύξησης στον αριθμό των εξυπηρετητών και της συνεπαγόμενης αύξησης των επικοινωνιακών διασυνδέσεων και της πολυπλοκότητας της καλωδίωσης. Οι παραδοσιακοί μέθοδοι ενδοεπικοινωνιών στα δίκτυα εξυπηρετητών βασίζονται είτε σε δομημένη

καλωδίωση (structured cabling) είτε σε τοπολογία δένδρου τύπου σημείο-προς-σημείο (point-to-point tree structure topology), όπου οι εξυπηρετητές, το εξωτερικό δίκτυο και οι μνήμες συνδέονται με άλτες ίνας (fiber jumpers) και χάλκινη καλωδίωση (twiaxial cabling). Αυτές οι μέθοδοι όμως οδηγούν σε ένα λαβύρινθο καλωδίωσης (εμφανίζεται δηλαδή εκ νέου το φαινόμενο του σπαγγέτι καλωδίων) και αποτυγχάνουν να αντιμετωπίσουν τις προκλήσεις. Όσο αυξάνει ο αριθμός διατάξεων, τόσο μεγαλώνει η μη αυτοποιημένη εργασία που χρειάζεται για τη συλλογή πληροφορίας ανά καλώδιο για την εγκατάσταση, συντήρηση και υποστήριξη του συστήματος. Έτσι, αυξάνει συνολικά το κόστος λειτουργίας. Επίσης, η όγκος της καλωδίωσης μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στον εξαερισμό του συστήματος και αυξάνει τις ανάγκες ψύξης (και, συνεπώς, την κατανάλωση ενέργειας).

Οι ασύρματες οπτικές επικοινωνίες μπορούν να αποτελέσουν ένα νέο τρόπο αντιμετώπισης των παραπάνω κρίσιμων προκλήσεων, λύνοντας το πρόβλημα της καλωδίωσης, προσφέροντας μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, επεκτασιμότητα στον αριθμό των συνδεδεμένων διατάξεων, μειωμένη κατανάλωση ενέργειας, ευελιξία και μείωση του κόστους. Πρόσφατες έρευνες έχουν μελετήσει τις δυνατότητες ενός μερικής ή αμιγώς ασύρματου οπτικού δικτύου εξυπηρετητών με ασύρματους συνδέσμους των 60 GHz [8],[9],[10]. Τα συστήματα 60 GHz έχουν προκαλέσει την προσοχή για εφαρμογές κοντινών αποστάσεων λόγω της “unlicensed” χρήσης τους και των ρυθμών μετάδοσης που υποστηρίζουν (~1 Gbit/s). Οι δυνατότητες όμως των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών επεκτείνονται και σε ταχύτερες πολλών Gbit/s.

Μέχρι σήμερα, οπτικά ασύρματα συστήματα σημείου-προς-σημείο που βασίζονται σε υπέρυθρες συνδέσεις απευθείας οπτικής επαφής (line-of-sight, LOS) μεταξύ πομπού και δέκτη μπορούν να υποστηρίξουν ρυθμούς μετάδοσης 40 Gbit/s όταν συνδυάζονται με πολυπλεξία μήκους κύματος (WDM) [11]. Τέτοια LOS συστήματα προσφέρουν μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης, αλλά υπάρχει και η δυνατότητα συστημάτων διάχυσης όπου δεν είναι απαραίτητη η απευθείας οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Το Σχήμα 3.1.1 δείχνει περιληπτικά διάφορες μεθόδους σύνδεσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τοπικά δίκτυα εσωτερικού χώρου με ασύρματες οπτικές επικοινωνίες.

Το Σχήμα 3.1.1α παρουσιάζει μια σύνδεση LOS στενής δέσμης που επιτρέπει ταχύτερες επικοινωνίες και αποτελεί το κατεξοχήν τύπο ζεύξης που μπορούμε να υλοποιήσουμε με την τεχνολογία COWS. Στα πλαίσια του Π2.2 είδαμε πως σχετίζεται η επιφάνεια κάλυψης με την ισχύ εκπομπής και την επιφάνεια του δέκτη. Το Σχήμα 3.1.1b δείχνει μία εναλλακτική τοπολογία όπου το φως φτάνει στο δέκτη μέσω ανάκλασης και που δεν χρειάζεται απευθείας οπτική επαφή. Ωστόσο θα πρέπει να τονιστεί ότι η ανακλαστική επιφάνεια είναι απαραίτητο να είναι λεία ώστε να μην καταστρέφουμε την συμφωνία της δέσμης κάτι που έχει ως αποτέλεσμα να χρειάζεται ειδική μέριμνα για την στόχευση και την ευθυγράμμιση του δέκτη σε αντίθεση με την περίπτωση της άμεσης φώρασης όπου το σήμα μπορεί να φτάνει στο δέκτη και μέσω διάχυτων ανακλάσεων.



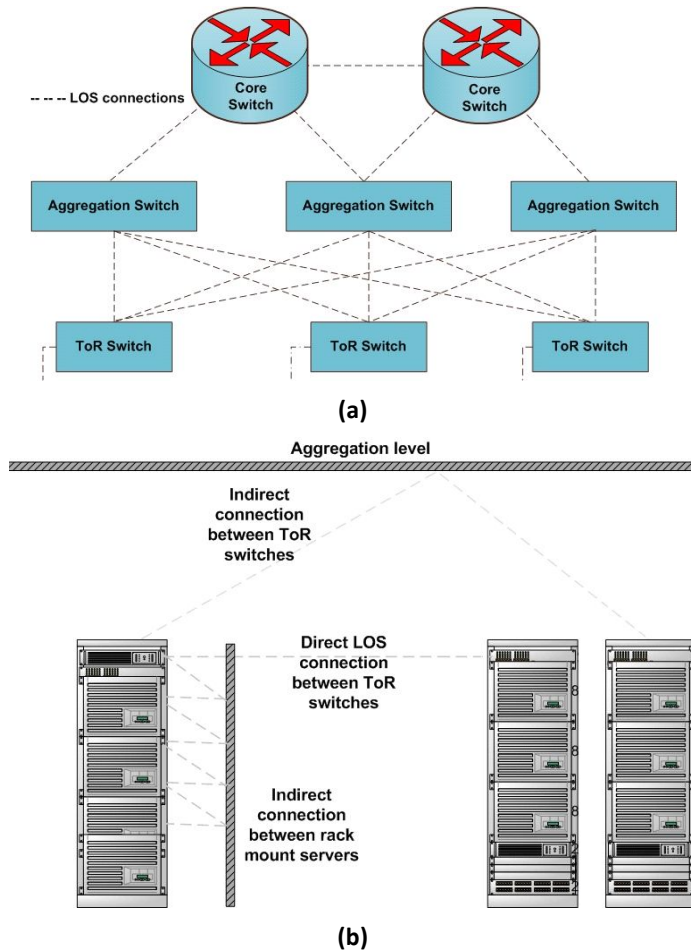
**Σχήμα 3.1.1: Διάφοροι τύποι σύνδεσης ενός οπτικού ασύρματου συστήματος. α) Σύνδεση απευθείας οπτικής επαφής στενής δέσμης (directed LOS connection), β) σύνδεση μέσω ανάκλασης σε μία λεία ανακλαστική επιφάνεια.**

Στα δίκτυα εξυπηρετητών συνυπάρχουν συνδέσεις διαφορετικών απαιτήσεων ως προς τους ρυθμούς μετάδοσης και την αρχιτεκτονική της τοπολογίας. Παραδοσιακά, χρησιμοποιείται τοπολογία ιεραρχίας

δένδρου. Η οπτική είναι η μόνη ασύρματη τεχνολογία που μπορεί να υποστηρίξει τα μεγάλα εύρη ζώνης που απαιτούνται σε αυτήν την περίπτωση.

Το Σχήμα 3.1.2 παρουσιάζει την εσωτερική δομή μιας συμβατικής αρχιτεκτονικής Top-of-Rack (ToR) δικτύου εξυπηρετητών, καθώς και πιθανές συνδέσεις μονής ή πολλαπλής αναπήδησης (single- or multiple-hop connections) μεταξύ διαφόρων διατάξεων αποθήκευσης και δικτύου σε ένα δίκτυο εξυπηρετητών. Συμπεριλαμβάνεται μια σύνδεση LOS στενής δέσμης, όπου το σήμα μεταδίδεται ανεμπόδιτο στην ευθεία μεταξύ των διατάξεων. Διαφορετικά, το σήμα φτάνει στο δέκτη μετά από μια ή περισσότερες ανακλάσεις, οπότε υφίσταται και τις σχετικές απώλειες. Αυτές οι απώλειες είναι ιδιαίτερα σημαντικές, δεδομένου ότι οι εξυπηρετητές είναι από τους κύριους καταναλωτές ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα.

Η σύμφωνη φώραση προσφέρει έναν τρόπο μείωσης της απαιτούμενης ισχύος, σε σχέση με την παραδοσιακή άμεση φώραση, καθώς στη σύμφωνη φώραση το εισερχόμενο σήμα ενισχύεται μέσω της μίξης του με το σήμα ενός τοπικού ταλαντωτή. Επιπλέον, στη σύμφωνη φώραση, ανακτώνται όλες οι ιδιότητες του σήματος, π.χ. φάση, πόλωση και πλάτος. Έτσι, είναι δυνατή η χρήση πιο αποδοτικών μεθόδων πολυπλεξίας και διαμόρφωσης.

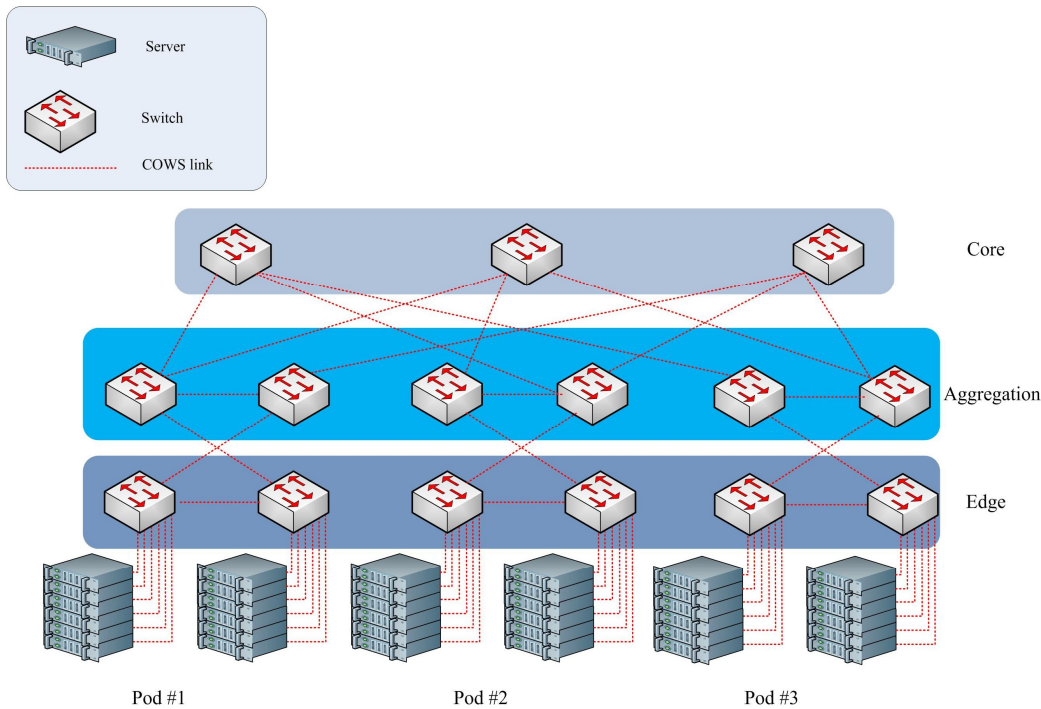


**Σχήμα 3.1.2:** Παράδειγμα διαφορετικών δομών σύνδεσης, βασισμένο σε συμβατική αρχιτεκτονική Top-of-Rack (ToR) δικτύου εξυπηρετητών. α) Απευθείας συνδέσεις σε επίπεδο core-aggregation και σε επίπεδο aggregation-ToR, β) Απευθείας και έμμεσες συνδέσεις μεταξύ διακοπών ToR και εξυπηρετητών rack.

Η σύμφωνη φάραση, μαζί με πρόσφατες προόδους στον τομέα της επεξεργασίας ψηφιακού σήματος, ανοίγει νέες οδούς για την αντιστάθμιση της παραμόρφωσης του σήματος που υποβαθμίζει το bit error rate (BER) του συστήματος [12],[13],[14]. Σε αυτήν τη βάση, αναμένεται βελτίωση της ανεκτικότητας στο φασικό θόρυβο του laser και τη μετατόπιση συχνότητας, όπως επίσης και στην παραμόρφωση πολλαπλών διαδρομών (multipath fading distortion). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα σύμφωνα συστήματα έχουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα σε ότι αφορά τις παρεμβολές από πολλαπλές διαδρομές: εφόσον η πλειονότητα των ανακλάσεων στις διάφορες κοινές επιφάνειες ενός δωματίου είναι διάχυτες, τα σήματα πολλαπλών διαδρομών είναι ασύμφωνα και επομένως δεν ενισχύονται από την μίξη που λαμβάνει χώρα με το πεδίο του τοπικού ταλαντωτή.

Λόγω των ομοιοτήτων μεταξύ του σύμφωνου οπτικού καναλιού με την τεχνολογία ραδιοσυχνοτήτων, και ειδικότερα επειδή διατηρείται η πληροφορία οπτικής φάσης, η σύμφωνη φάραση παρουσιάζει ενδιαφέρουσες δυνατότητες στη χρήση τεχνικών πολλαπλών εισόδων- πολλαπλών εξόδων [15], όσον αφορά στη βελτίωση της χωρητικότητας και της κάλυψης του συστήματος. Οι παραπάνω υποσχέσεις έρχονται σε αντίθεση με τις δυνατότητες των συστημάτων άμεσης φάρασης, όπου η πληροφορία οπτικής φάσης χάνεται.

Η σύμφωνη φάραση στα ασύρματα οπτικά συστήματα μπορεί επίσης να οδηγήσει σε βελτιωμένη συχνοτική/χωρική επιλεκτικότητα, φασματική απόδοση, απόρριψη θορύβου υποβάθρου και ευαισθησία φωρατή. Η απόδοση των σύμφωνων ασύρματων οπτικών συστημάτων είναι καλά τεκμηριωμένη σε ατμοσφαιρικές συνθήκες [16],[17].



**Σχήμα 3.1.3: Αρχιτεκτονική δικτύου εξυπηρετών χρησιμοποιώντας ασύρματα ζεύξεις COWS.**

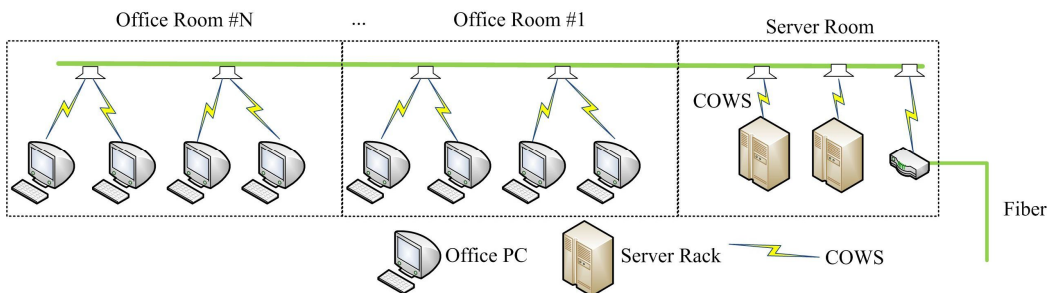
Στο Σχήμα 3.1.3 παρουσιάζουμε την αρχιτεκτονική ενός δικτύου εξυπηρετών που χρησιμοποιεί εν μέρει ή στο σύνολο του ζεύξεις τύπου COWS. Το δίκτυο είναι πολλών επιπέδων όπως δείχνει και το Σχήμα 3.1.2. Στις ζεύξεις του κατώτερου επιπέδου χρησιμοποιούνται είτε ζεύξεις COWS είτε ζεύξεις άμεσης φάρασης αν οι απαιτήσεις σε ρυθμό δεν είναι πολύ μεγάλες. Αν χρησιμοποιήσουμε ζεύξεις COWS τότε είναι καλύτερο να καταφύγουμε σε μία αρχιτεκτονική μέσω ανακλάσεων όπως δείχνει το Σχήμα 3.1.1(b). Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να είμαστε σε θέση να εξυπηρετούμε ζεύξεις με ταχύτητες  $\sim 10\text{Gb/s}$  δεδομένου του ότι το 10GbE αποτελεί ένα πολύ διαδεδομένο πρότυπο δικτύωσης ειδικά μεταξύ διασυνδεδεμένων εξυπηρετών.

Ανάλογα με τις αποστάσεις που χωρίζουν τους εξυπηρετές του κατώτερου επιπέδου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε κατάλληλα οπτικά στοιχεία για τον διαχείριση της οπτικής δέσμης. Στο δεύτερο επίπεδο όπου συνδέονται μεταξύ τους οι μεταγωγείς άκρου και οι συγκεντρωτικοί μεταγωγείς είναι καλύτερο να χρησιμοποιηθούν σύμφωνες ζεύξεις ώστε να μεγιστοποιηθεί η φασματική απόδοση και να μειωθούν οι απαιτήσεις σε ισχύ εκπομπής.

### 3.2 Εταιρικό Δίκτυο

Στο Σχήμα 3.2.1 βλέπουμε την αρχιτεκτονική ενός εταιρικού δικτύου που πιθανώς χρησιμοποιεί ζεύξεις COWS από σημείο-σε-σημείο. Το εν λόγω σενάριο μπορεί να αντιστοιχεί σε μία μικρή εταιρεία ή σε μία μεγαλύτερη ανάλογα με τον αριθμό των τερματικών των χρηστών και το πλήθος των εξυπηρετών που χρησιμοποιούνται. Μία τυπική διαρρύθμιση είναι να τοποθετηθούν οι εξυπηρετές σε ένα ξεχωριστό, ειδικά δωμάτιο ώστε η λειτουργία τους να μην επιβαρύνει την λειτουργία της επιχείρησης. Ανάλογα με το μέγεθος της επιχείρησης, το δωμάτιο αυτό μπορεί να βρίσκεται στο υπόγειο του κτιρίου των γραφείων της εταιρείας ή αν τα γραφεία της εταιρείας εκτείνονται μόνο σε έναν όροφο συχνά επιλέγεται κάποιο κεντρικό δωμάτιο στο οποίο δεν υπάρχουν παράθυρα. Οι εξυπηρετές στεγάζουν είτε τις υπηρεσίες που παρέχει η εταιρεία στους εργαζομένους (collaboration, roaming profiles, mail, file server, κτλ) είτε υπηρεσίες που παρέχονται προς τα έξω (database servers, website, κτλ).

Ένα παρόμοιο παράδειγμα είναι το δίκτυο μίας πανεπιστημιούπολης. Στην περίπτωση βέβαια αυτή τα τερματικά είναι συνήθως περισσότερα από ότι σε μία εταιρεία μεσαίου μεγέθους ενώ χρειάζεται και διασύνδεση μεταξύ διαφορετικών τοπικών δικτύων τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικά κτίρια. Ωστόσο δεδομένου ότι συνήθως τα κτίρια σε μία πανεπιστημιούπολη έχουν οπτική επαφή μεταξύ τους (τουλάχιστον όσο αφορά τα γειτονικά κτίρια), η διασύνδεση με οπτικά ασύρματα συστήματα ελεύθερου χώρου που ενδεχομένως να χρησιμοποιούν και σύμφωνη φάραση έχει πρακτικό ενδιαφέρον. Ειδικά στην περίπτωση πολυπληθών πανεπιστημιακών τμημάτων που έχουν θετική κατεύθυνση (π.χ. τμήματα πληροφορικής, κτλ) και πολλά εργαστήρια πληροφορικής, οι ανάγκες σε εύρος ζώνης είναι αυξημένες δεδομένων και των απαιτήσεων εφαρμογών Web2.0.



**Σχήμα 3.2.1: Αρχιτεκτονική εταιρικού δικτύου χρησιμοποιώντας ασύρματες ζεύξεις COWS.**

Οι μεσαίες-προς-μεγάλες επιχειρήσεις αλλά και τα Πανεπιστημιακά ιδρύματα συνδέονται συχνά απευθείας στο δίκτυο μητροπολιτικό δίκτυο μέσω υπηρεσιών τύπου metro-ethernet με ταχύτητες που μπορεί να ξεπερνάνε συχνά τα 10Gb/s ανάλογα με τη διεπαφή του Ethernet που επιλέγεται. Σε διεθνές επίπεδο, διάφοροι πάροχοι προσφέρουν τέτοιου είδους υπηρεσίες.

Στο Σχήμα 3.2.1 δείχνουμε το πώς διασυνδέονται τα διάφορα hotspots του COWS σε κάθε χώρο του εταιρικού δικτύου. Όπως γνωρίζουμε η οπτική ακτινοβολία δεν μπορεί να διεισδύσει μέσα από τείχους εξαιτίας του μικρού μήκους κύματος και επομένως εφόσον δεν έχουμε οπτική επαφή θα πρέπει να διαμοιράσουμε το σήμα στα διάφορα hotspots με την βοήθεια πολύτροπης ή ακόμα καλύτερα μονότροπης οπτικής ίνας. Κάθε hotspot μπορεί να είναι ενεργό, δηλαδή να λαμβάνει χώρα οπτική/ηλεκτρονική μετατροπή και το οπτικό σήμα στην ίνα να μετατρέπεται σε ηλεκτρονικό και στην συνέχεια να οδηγεί τον I/Q διαμορφωτή ο οποίος θα διαμορφώνει την δέσμη του LASER και με την χρήση κατάλληλων οπτικών στοιχείων αυτή εκπέμπεται στον ελεύθερο χώρο. Η άλλη εναλλακτική η οποία είναι ίσως και η πιο ενδιαφέρουσα από άποψη κόστους υλοποίησης είναι να έχουμε ένα παθητικό hotspot το οποίο στην ουσία είναι ένας απλός διαχωριστής μαζί με κατάλληλες οπτικές διατάξεις (φακούς κτλ). Ο διαχωριστής στην



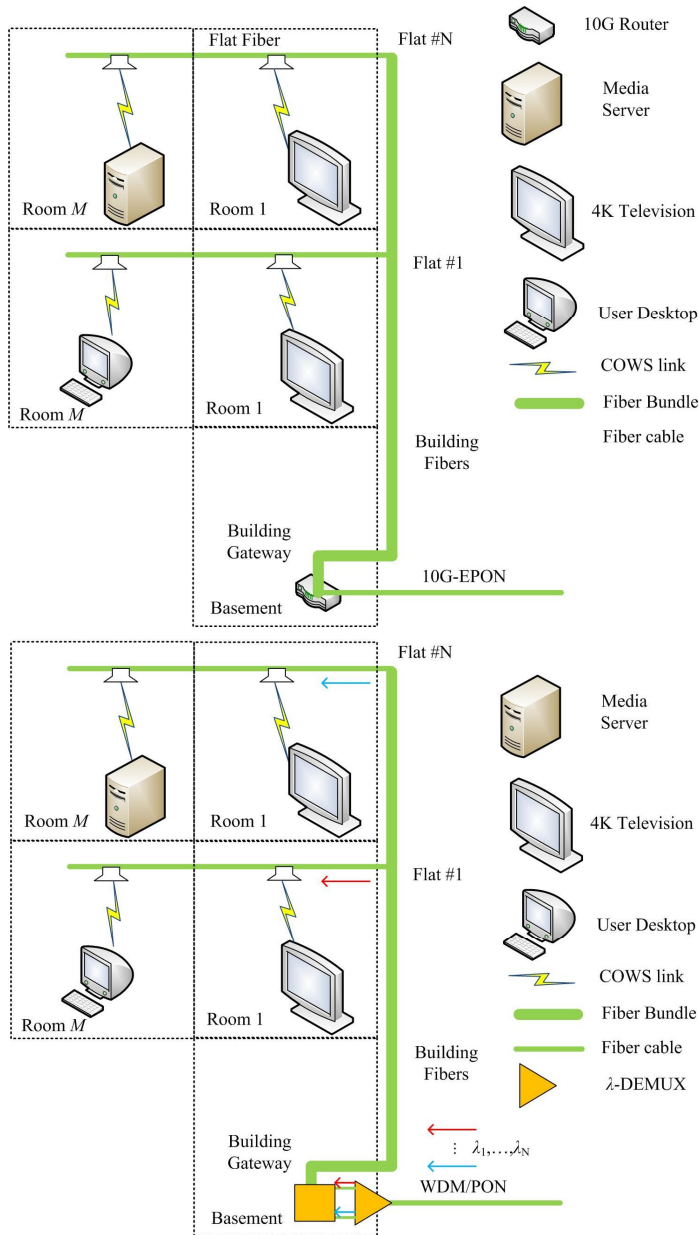
ουσία οδηγεί ένα μικρό μέρος (π.χ. 5%-10%) του οπτικού σήματος εντός της κεντρικής ίνας στην διάταξη φακών και το οπτικό σήμα εκπέμπεται άμεσα στον ελεύθερο χώρο. Φυσικά αυτό προϋποθέτει ότι το σήμα το οποίο φτάνει στην οπτική ίνα του metro-ethernet είναι κατάλληλο για λήψη με σύμφωνο τρόπο, π.χ. θα πρέπει να χρησιμοποιείται κάποιος είδους διαμόρφωση φάσης η οποία είδαμε ότι έχει πολλά πλεονεκτήματα στο Π2.1 καθώς και οπτικές πηγές με κατάλληλα φασματικά χαρακτηριστικά. Η συγκεκριμένη λύση είναι ένα υπόδειγμα παθητικού οπτικού δικτύου (passive optical network) αλλά σε πολύ μικρότερες αποστάσεις που καθορίζονται από τις αποστάσεις καλωδίωσης που συναντούμε στα εταιρικά κτίρια (π.χ. 100m-200m).

### 3.3 Οικιακό Δίκτυο

Το Σχήμα 3.3.1 συνοψίζει δύο εναλλακτικές αρχιτεκτονικές οικιακής δικτύωσης που βασίζονται σε ασύρματες επικοινωνίες με σύμφωνη φάραση. Σε σχέση με το εταιρικό δίκτυο παρατηρούμε ότι αντί για σταθμούς εργασίας υπάρχουν τερματικές συσκευές όπως laptop, σταθεροί gaming υπολογιστές και τηλεοράσεις υψηλής ή πολύ υψηλής ευκρίνειας (4K TVs) ενώ σε κάποιο σημείο του σπιτιού ενδέχεται να υπάρχουν εξυπηρετές πολυμέσων ή δικτυακοί σκληροί δίσκοι. Οι ταχύτητες διασύνδεσης είναι βέβαια μικρότερες από ότι στην περίπτωση του εταιρικού δικτύου αν και η υποστήριξη υπηρεσιών video πολύ υψηλής ευκρίνειας μπορεί να απαιτήσει μέχρι και 10Gb/s αν κανείς λάβει υπόψη του και τις προδιαγραφές του προτύπου HDMI 2.0. Οι αρχιτεκτονικές που παρουσιάζονται στο εν λόγω σχήμα διαφέρουν καταρχήν στο πως καταλήγει το οπτικό σήμα στο κτίριο ή στο διαμέρισμα. Στην πρώτη εναλλακτική ακολουθείται μία προσέγγιση παθητικού δικτύου με διαμοιρασμό στο πεδίο του χρόνου (time domain multiplexing passive optical network – TDM/PON).

Στην περίπτωση της οπτικής ίνας στο σπίτι (FTTH), το σήμα καταλήγει στον οικιακό δρομολογητή μέσω μονότροπης οπτικής ίνας και διαμοιράζεται μέσω ενός ή περισσότερων οπτικών ινών στα διάφορα δωμάτια του σπιτιού. Στο σενάριο της οπτικής ίνας μέχρι το κτίριο (fiber to the building – FTTB) όπου η οπτική ίνα εξυπηρετεί το σύνολο των διαμερισμάτων ενός κτιρίου ο δρομολογητής τοποθετείται σε ένα κεντρικό σημείο (π.χ. στο υπόγειο του κτιρίου) και στη συνέχεια η κίνηση διαμοιράζεται μέσω μίας ή περισσότερων ινών του κτιρίου. Οι ζεύξεις COWS χρησιμοποιούνται για την ασύρματη διασύνδεση των διαφόρων τερματικών συσκευών αλλά και των εξυπηρετών πολυμέσων. Φυσικά και στο σενάριο αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η λογική του τοπικού παθητικού οπτικού δικτύου, τόσο για τον διαμοιρασμό της κίνησης στα διαμερίσματα όσο και για την διασύνδεση των διάφορων hotspots στα δωμάτια του κτιρίου.

Στο σχήμα παρουσιάζουμε επίσης μία πιο εξελιγμένη εναλλακτική δικτύωση που βασίζεται σε ένα παθητικό δίκτυο πρόσβασης με πολυπλεξία μήκους κύματος (wavelength division multiplexing passive optical network – WDM/PON). Στην περίπτωση αυτή κάθε συνδρομητής (δηλαδή κάθε διαμέρισμα) έχει ένα διαφορετικό μήκος κύματος. Πρόκειται για μία λύση στην οποία χρειάζεται μία οπτική ίνα ανά κτίριο η οποία μεταφέρει όμως όλα τα μήκη κύματος των χρηστών οπότε επιτυγχάνεται εξοικονόμηση στην οπτική ίνα όπως στην περίπτωση του FTTB ενώ οι ρυθμοί μετάδοσης είναι συγκρίσιμη με αυτούς του FTTH εφόσον κάθε μήκος κύματος αποτελεί μία «ιδεατή» ίνα που συνδέει τον τελικό χρήστη με το κεντρικό σημείο πρόσβασης του παρόχου. Το δίκτυο αυτό μπορεί να είναι και παθητικό εφόσον οι αποπολυπλέκτες μήκους κύματος όπως τα φράγματα συστοιχίας κυματοδηγών είναι παθητικά στοιχεία (ωστόσο συχνά απαιτείται ένα ενεργό στοιχείο για τον έλεγχο της θερμοκρασίας). Σε αντίθεση με δίκτυα TDM/PON δεν έχουμε απώλειες διακλάδωσης. Θα πρέπει επίσης να τονιστεί ότι η σύμφωνη φάραση παρέχει και ένα φυσικό τρόπο απομόνωσης του επιθυμητού μήκους κύματος καθότι στο σύμφωνο δέκτη ενισχύεται μόνο το μήκος κύματος που ταιριάζει με τον τοπικό ταλαντωτή.



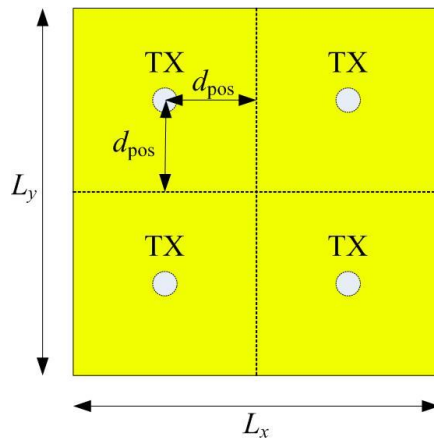
Σχήμα 3.3.1: Αρχιτεκτονική οικιακού δικτύου χρησιμοποιώντας ασύρματες ζεύξεις COWS.

#### 4. Σχεδίαση ενός δικτύου COWS

Η πλήρης σχεδίαση ενός δικτύου COWS από το ένα άκρο στο άλλο, δηλαδή από το κεντρικό σημείο πρόσβασης του παρόχου μέχρι τις τερματικές συσκευές του χρήστη είναι φυσικά μία εξαιρετικά σύνθετη διαδικασία η οποία πρέπει να λάβει υπόψη της τόσο παράγοντες απόδοσης όσο και κοινωνικοοικονομικές παραμέτρους. Επίσης διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το ποιο από τα τρία σενάρια που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα θεωρούμε. Επομένως είναι αδύνατο να προχωρήσουμε την διαδικασία

σχεδίασης σε τόσο μεγάλη λεπτομέρεια και θα αρκεστούμε στην ενότητα αυτή να δείξουμε τις δυνατότητες που παρέχει στην σχεδίαση ενός συστήματος η χρήση πολλαπλών πομπών κυρίως σε ότι αφορά την κάλυψη στο εσωτερικό ενός δωματίου. Η βασική ιδέα είναι αρκετά απλή: Στο Π2.2 είδαμε ότι εφόσον χρησιμοποιούμε απλά οπτικά μέρη (αποκλίνοντες ή συγκλίνοντες φακούς και συστήματα αυτών) το ηθλικό σήμα-προς-θόρυβο (signal-to-noise, SNR) παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές από το μέσο της περιοχής κάλυψης όπου είναι μέγιστο μέχρι την άκρη της περιοχής όπου είναι και ελάχιστο. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα σχεδιασμού που παρουσιάσαμε στο Π2.2 η διακύμανση κυμαινόταν στα 10dB από 30dB στο κέντρο της περιοχής κάλυψης μέχρι 20dB στα άκρα της περιοχής που ήταν ένας κύκλος πάνω στο επίπεδο λήψης με ακτίνα 2m. Η μεγάλη αυτή διακύμανση οφείλεται στην επιλογή των δομικών στοιχείων: πιο ολογραφικά στοιχεία διάχυσης του φωτός (holographic diffusers) θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε πιο ομοιόμορφη κατανομή του SNR ώστε να απαιτείται μικρότερη ισχύ εκπομπής. Ωστόσο οι διατάξεις διάχυτου φωτός καταστρέφουν την συμφωνία του φωτός και επομένως το καθιστούν ακατάλληλο για σύμφωνη φώραση εκτός αν χρησιμοποιηθεί κάποιο χωρικό στοιχείο διόρθωσης φάσης που όμως αυξάνει σημαντικά το κόστος και την πολυπλοκότητα υλοποίησης. Εναλλακτικά μπορούμε να τοποθετήσουμε πολλαπλούς πομπούς στο δωμάτιο σε μία προσπάθεια να μειώσουμε μεν την ισχύ εκπομπής ανά laser (και επομένως το κόστος υλοποίησης) και παράλληλα να βελτιώσουμε την ομοιομορφία της κατανομής του SNR. Στην παρούσα ενότητα θα εξετάσουμε ένα τέτοιο σύστημα και τις επιδόσεις του.

Ξεκινούμε έχοντας ως αφετηρία το σύστημα που παρουσιάσαμε στο Π2.2 του οποίου τις κύριες παραμέτρους αναφέρει ο **Error! Reference source not found.** Όπως και πριν το σύστημα έχει σχεδιαστεί ώστε όταν χρησιμοποιείται ένας και μόνος πομποδέκτης να επιτυγχάνεται μέγιστο ηθλικό σήμα-προς-θόρυβο SNR ίσο με 30dB απουσία του περιβάλλοντος φωτός που προκαλεί θόρυβο βολής στο δέκτη. Το SNR στην περίπτωση ενός και μόνο δέκτη εξασθενεί κατά 10dB στο άκρο της περιοχής κάλυψης όπως και στο Π2.2. Θεωρούμε ωστόσο τώρα 4 πομποδέκτες οι οποίοι εκπέμπουν ταυτόχρονα και πως στο τερματικό του χρήστη, ο δέκτης έχει κατάλληλο προσανατολισμό ώστε να δέχεται ισχύ από τον πλησιέστερο πομπό.



**Σχήμα 4.1: Τοποθέτηση πομποδεκτών στο ταβάνι του δωματίου για την διάταξη 2x2.**

Οι πομπό τοποθετούνται συμμετρικά ως προς το κέντρο του ταβανιού σε μία διαρρύθμιση 2x2 όπως δείχνει το Σχήμα 4.1. με  $d_{pos}$  συμβολίζουμε την κάθετη και οριζόντια απόσταση του κάθε πομπού από το κέντρο του ταβανιού. Φυσικά θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι τοποθέτησης των πομπών και πως το πλήθος τους έχει επιλεγεί ίσο με 4 απλά και μόνο για λόγους συμμετρίας. Με άλλο λόγια θεωρούμε ότι επιθυμούμε μία συμμετρική μεταβολή του ηθλικού σήματος-προς-θόρυβο ως προς το κέντρο του επιπέδου του δέκτη, που θεωρούμε ότι προκύπτει από την προβολή του κέντρου του ταβανιού στο επίπεδο αυτό. Η επιλογή αυτή έχει γίνει με κριτήριο το ότι τα τερματικά του χρήστη θα πρέπει να βιώνουν μία όσο το δυνατόν συμμετρική μεταβολή της απόδοσης καθώς μετατοπίζονται στις δύο διαστάσεις πάνω στο επίπεδο του δέκτη. Ωστόσο σημειώνουμε ότι η απαίτηση αυτή μπορεί να μην είναι τόσο σημαντική ανάλογα με το σενάριο εφαρμογής. Για παράδειγμα στην περίπτωση

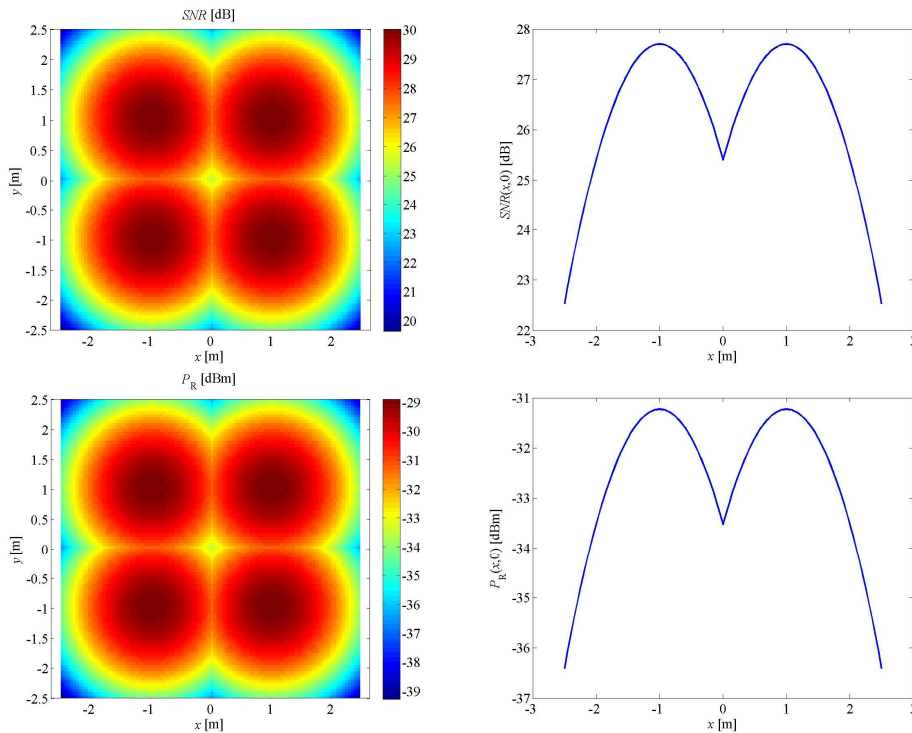
ενός δικτύου εξυπηρετών το οποίο βρίσκεται τοποθετημένο στην άκρη ενός δωματίου, θα πρέπει να υλοποιήσουμε το σύστημα έτσι ώστε το SNR να είναι υψηλό στη θέση αυτή και όχι στο κέντρο του και δεν έχει ιδιαίτερη σημασία να πετύχουμε ομοιόμορφη κατανομή του SNR σε όλο το δωμάτιο παρά μονάχα στις θέσεις που βρίσκονται τοποθετημένοι οι εξυπηρετές.

**Πίνακας 1: Παράμετροι του συστήματος με τέσσερις πομπούς**

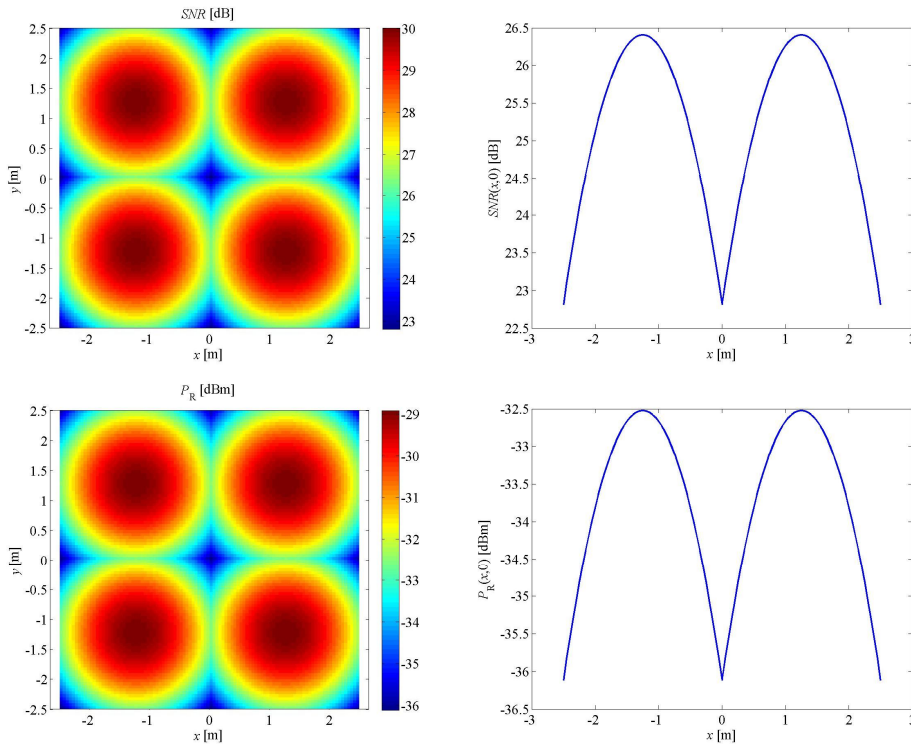
<b>Διαρρύθμιση χώρου</b>	
<i>Χαρακτηριστικό</i>	<i>Τιμή</i>
Μήκος δωματίου $L_x$	5m
Πλάτος δωματίου $L_y$	5m
Ύψος δωματίου $h$	3.5m
Αριθμός πομποδεκτών $N_T$	4 (2x2)
Θέση πομπών $\mathbf{r}_T$	$[d_{pos}, d_{pos}, 3.5]$ $[d_{pos}, -d_{pos}, 3.5]$ $[-d_{pos}, d_{pos}, 3.5]$ $[-d_{pos}, -d_{pos}, 3.5]$
Θέση δέκτη $\mathbf{r}_R$	$[x_R, y_R, 0.5]$
Προσανατολισμός πομπού $\mathbf{n}_T$	$[0, 0, -1]$
Προσανατολισμός δεκτών $\mathbf{n}_R$	στραμμένοι προς τον δέκτη με την μικρότερη απόσταση
<b>Παράμετροι πομπού</b>	
<i>Χαρακτηριστικό</i>	<i>Τιμή</i>
Ισχύς εκπομπής $P_T$ κάθε πομπού	1mW
Μήκος κύματος	$\lambda=1550\text{nm}$
Εύρος γραμμής $\Delta\nu_T$	100kHz
Διαμόρφωση	Εξωτερική QPSK
Εύρος δέσμης $w_0$	$\sim 5\mu\text{m}$
Πλήθος φακών πομπού	2
Απόσταση μεταξύ φακών $d_i$	$\sim 13\text{mm}$
Διάμετρος φακών	$\sim 20\text{mm}$
Εστιακή απόσταση φακών	$f=1\text{cm}$
<b>Παράμετροι δέκτη</b>	
<i>Χαρακτηριστικό</i>	<i>Τιμή</i>
Ισχύς τοπικού ταλαντωτή $P_{LO}$	1mW
Εύρος γραμμής $\Delta\nu_R$	100kHz
Αποκρισιμότητα δέκτη $R$	$\cong 1\text{A/W}$ ( $\lambda=1550\text{nm}$ )
Φασματική πυκνότητα θερμικού θορύβου $S_{TH}$	$\sim 10^{-23}\text{A}^2/\text{Hz}$
Φασματική πυκνότητα θορύβου βολής $S_{SH}$	$\sim 10^{-22}\text{A}^2/\text{Hz}$
Εύρος ζώνης δέκτη $B$	$\sim 1\text{GHz}$
Εύρος ζώνης οπτικού φίλτρου $\Delta\lambda$	10nm
Μέγιστο SNR ανά σύμβολο	25dB
Επιφάνεια φακού λήψης $A_R$	$\sim 75\text{cm}^2$
Αριθμός $F_R$ του φακού του δέκτη	$\sim 1.3$
Διάμετρος φακού λήψης $D_R$	$\sim 10\text{cm}$
Εστιακή απόσταση $f_R$	$\sim 13\text{cm}$

Στο Σχήμα 4.2, 4.3 και 4.4 παρουσιάζουμε την ισχύ λήψης και το SNR στην περίπτωση όπου η παράμετρος προς είναι ίση με 1m, 1.25m και 1.5m αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι σε κάθε περίπτωση επιτυγχάνουμε διαφορετική κατανομή του SNR μέσα στο δωμάτιο. Για παράδειγμα για  $d_{\text{pos}}=1\text{m}$  λαμβάνουμε μία κατανομή του SNR η οποία φτάνει στα  $\sim 26\text{dB}$  στο κέντρο της περιοχής κάλυψης το οποίο μεγιστοποιείται όπως είναι λογικό σε οριζόντια ή κάθετη απόσταση 1m από το κέντρο του της περιοχής κάλυψης και φτάνει στα  $\sim 30\text{dB}$ . Θα πρέπει να τονιστεί η πολύ καλύτερη ομοιομορφία του SNR από την περίπτωση του ενός πομποδέκτη όπου η διακύμανση έφτανε τα 10dB ενώ σε αυτή την περίπτωση είναι  $<5\text{dB}$  εντός της περιοχής κάλυψης (η οποία όπως και πριν ορίζεται ως ένας κύκλος με ακτίνα  $\rho=2\text{m}$ ). Η συγκεκριμένη κατανομή του SNR είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή στην περίπτωση όπου έχουμε τοποθετήσει ένα δίκτυο εξυπηρετών στο κέντρο του δωματίου οι οποίοι επικοινωνούν ασύρματα με ένα COWS hotspot το οποίο βρίσκεται στο ταβάνι του δωματίου. Η ελάχιστη τιμή του SNR στο επίπεδο του δέκτη είναι 19.6dB.

Στο Σχήμα 4.3 εξετάζουμε μία διαφορετική διαρρύθμιση η οποία συνίσταται στην τοποθέτηση των πομπών σε απόσταση  $d_{\text{pos}}=1.25\text{m}$ , κάθετα και οριζόντια από το κέντρο του δωματίου. Ας σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή, οι θέσεις των πομπών διαιρούν το ταβάνι του δωματίου σε τέσσερα ιδίων διαστάσεων τετράγωνα με κέντρο τις εκάστοτε θέσεις των πομπών αυτών. Επομένως αναμένουμε ότι το επίπεδο του δέκτη χωρίζεται σε τέσσερις μικροκυψέλες οι οποίες έχουμε συμμετρική κατανομή του SNR. Αυτό όντως επιβεβαιώνεται από το Σχήμα 4.3. Η ελάχιστη τιμή του SNR είναι τώρα ίση με 22.8dB.



Σχήμα 4.2: Επιδόσεις του συστήματος θεωρώντας ότι  $d_{\text{pos}}=1.0\text{m}$ .



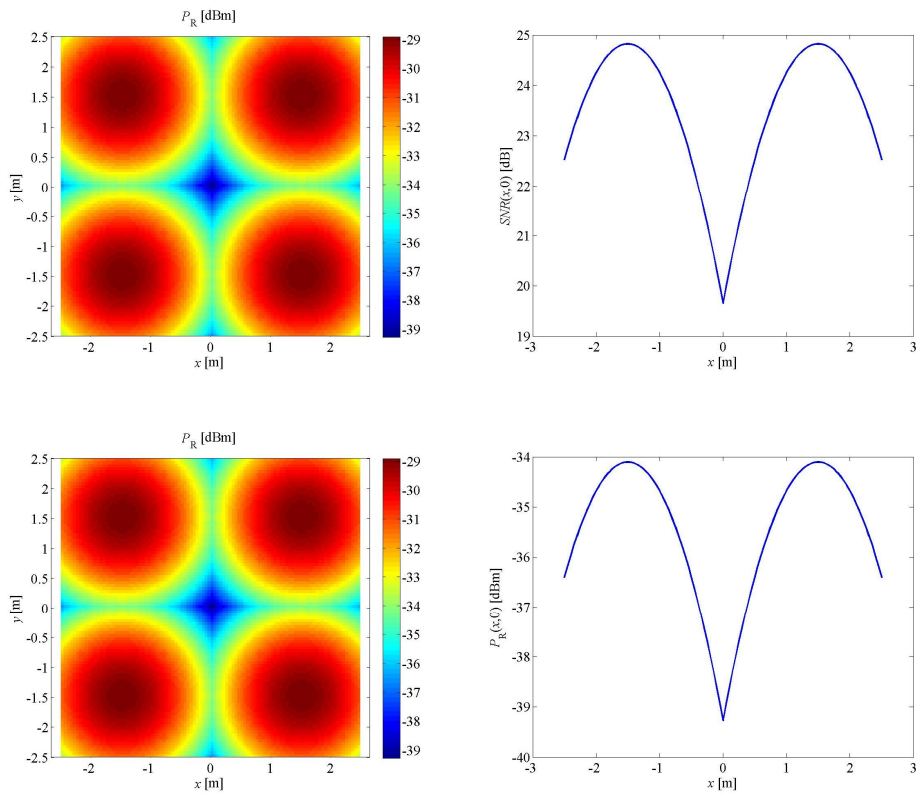
**Σχήμα 4.3: Επιδόσεις του συστήματος θεωρώντας ότι  $d_{\text{pos}}=1.25\text{m}$ .**

Formatted: Greek

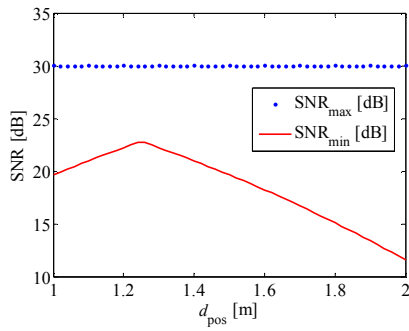
Τέλος στο Σχήμα 4.4 έχουμε παραστήσει γραφικά τις επιδόσεις του συστήματος όταν έχουμε τοποθετήσει τους πομπούς σε κάθετη και οριζόντια απόσταση  $d_{\text{pos}}=1.5\text{m}$ . Παρατηρούμε ότι το σύστημα οδηγεί σε μικρό SNR στο κέντρο του δωματίου και μεγαλύτερο στις άκρες του δωματίου. Επομένως η επιλογή αυτή αντιστοιχεί σε ένα σενάριο οικιακής ή εταιρικής δικτύωσης όπου οι τερματικοί σταθμοί είναι τοποθετημένοι στους τοίχους του δωματίου.

Στο Σχήμα 4.5 έχουμε απεικονίσει την μεταβολή του μέγιστου και του ελάχιστου SNR μέσα στο δωμάτιο σε συνάρτηση με την κάθετη και οριζόντια απόσταση  $d_{\text{pos}}$  από το κέντρο του ταβανιού. Παρατηρούμε ότι όντως η βέλτιστη θέση ως προς την ομοιομορφία του SNR είναι η  $d_{\text{pos}}=1.25\text{m}$  όπου η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής του SNR σε όλο το δωμάτιο γίνεται ίση με περίπου 7.2dB.

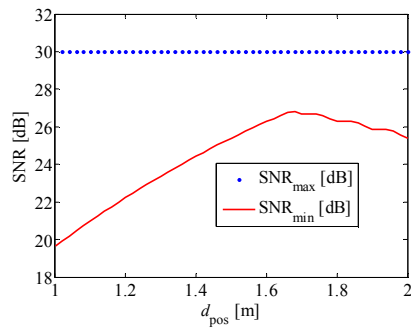
Στο Σχήμα 4.6 έχουμε απεικονίσει την μεταβολή του μέγιστου και του ελάχιστου SNR μέσα στο δωμάτιο στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούμε μία διάταξη  $3 \times 3$  η οποία εικονίζεται στο Σχήμα 4.7. Για την εν λόγω διαρρύθμιση των πομποδεκτών επιτυγχάνουμε ακόμα μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του SNR πάνω στο επίπεδο του δέκτη. Για  $d_{\text{pos}}=1.66\text{m}$  επιτυγχάνουμε την βέλτιστη ομοιομορφία του SNR και η διαφορά μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής του SNR είναι  $\sim 3.2\text{dB}$ .



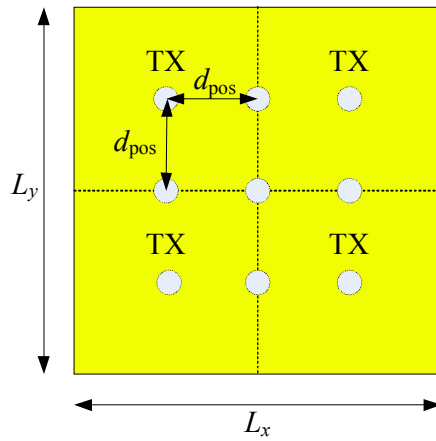
Σχήμα 4.4: Επιδόσεις του συστήματος θεωρώντας ότι  $d_{pos}=1.5m$ .



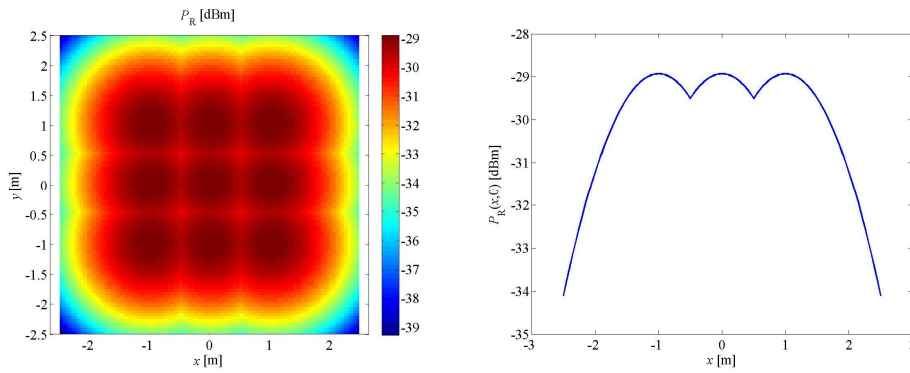
Σχήμα 4.5: Μέγιστο και ελάχιστο SNR του δέκτη σε συνάρτηση με την απόσταση  $d_{pos}$  για το σύστημα  $2 \times 2$ .



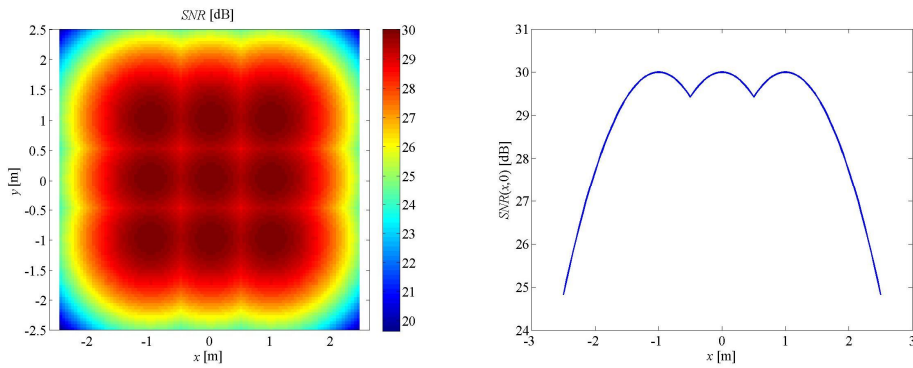
Σχήμα 4.5: Μέγιστο και ελάχιστο SNR του δέκτη σε συνάρτηση με την απόσταση  $d_{pos}$  για το σύστημα 3x3.



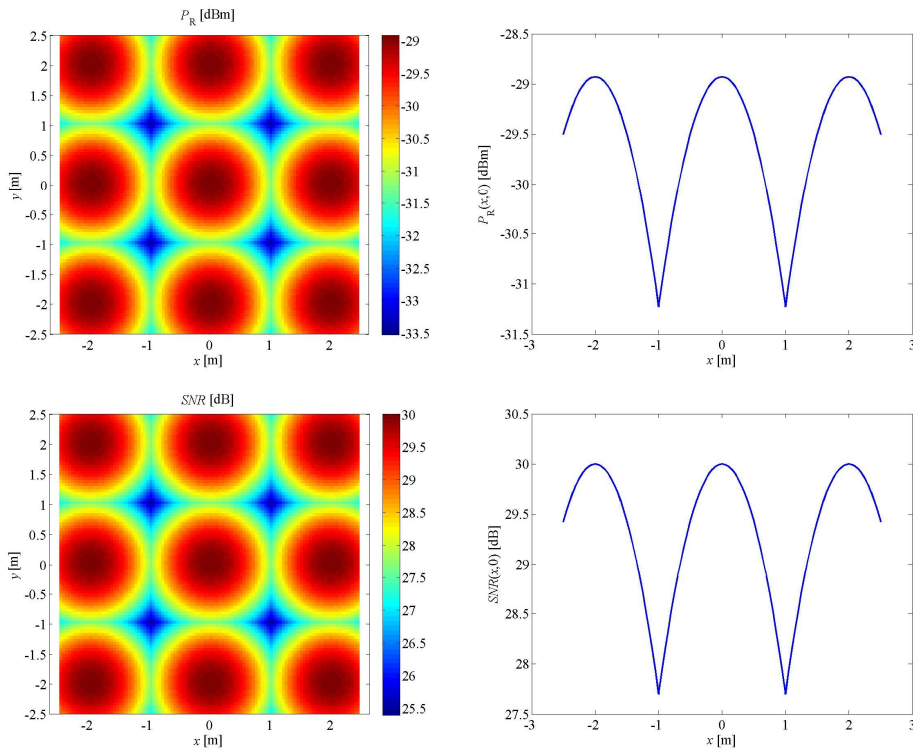
Σχήμα 4.6: Τοποθέτηση πομποδεκτών στο ταβάνι του δωματίου για την διάταξη 3x3.



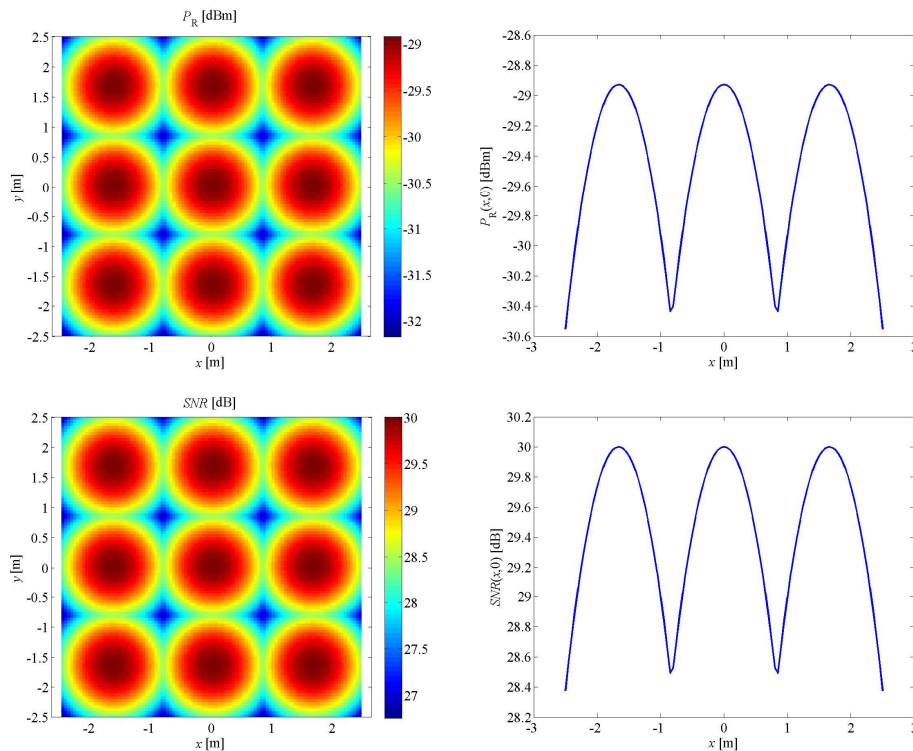




Σχήμα 4.2: Επιδόσεις του συστήματος θεωρώντας ότι  $d_{pos}=1.0m$ .



Σχήμα 4.2: Επιδόσεις του συστήματος θεωρώντας ότι  $d_{pos}=2.0m$ .



Σχήμα 4.2: Επιδόσεις του συστήματος θεωρώντας ότι  $d_{pos}=1.66$ m.

## 5. Προκλήσεις για την Ανάπτυξη των Δικτύων COWS.

Formatted: Greek

Κλείνοντας το παραδοτέο αυτό, θα είχε ενδιαφέρον να επισημάνουμε τις διάφορες προκλήσεις που θα πρέπει να απαντηθούν σε τεχνολογικό επίπεδο ώστε να επιτραπεί η διείσδυση των οπτικών ασύρματων συστημάτων που βασίζονται στην σύμφωνη φάραση. Παρακάτω παραθέτουμε τα σημαντικότερα στοιχεία:

- *Έλεγχος της οπτικής δέσμης.* Τα οπτικά συστήματα που χρησιμοποιούμε στο πομπό και το δέκτη αποτελούνται από συστήματα φακών που έχουν σκοπό την διεύρυνση της τελικής δέσμης στο επίπεδο του δέκτη ώστε να έχουμε ικανή κάλυψη. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγεθος της ζώνης κάλυψης εξαρτάται από τις αποστάσεις των φακών και την εστιακή απόστασή τους στο οπτικό σύστημα του πομπού. Η πρόκληση είναι να σχεδιαστούν με κατάλληλο τρόπο οι διατάξεις αυτές ώστε αφενός να πετυχαίνουμε αρκετά ευρεία δέσμη στο επίπεδο του δέκτη και παράλληλα οι διαστάσεις τους να παραμένουν σχετικά μικρές ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν σε τερματικά του χρήστη όπως laptop, σταθεροί υπολογιστές ή σε εξυπηρετές. Οι τεχνικές διαχείρισης της οπτικής δέσμης αναλύονται στο Π2.2.
- *Σχεδιασμός ηλεκτρονικών στοιχείων.* Όπως αναλύσαμε και στα προηγούμενα το κόστος των ηλεκτρονικών ενισχυτών που χρησιμοποιούνται τόσο στον οπτικό πομπό για την οδήγηση των διαμορφωτών I/Q όσο και στο δέκτη για την ενίσχυση του σήματος (ενισχυτές διαγωγιμότητας) είναι άμεσα συναρτώμενο με το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται. Για την οικονομική βιωσιμότητα των ασύρματων συστημάτων σύμφωνης φάρασης σε εφαρμογές εσωτερικού χώρου θα πρέπει να χρησιμοποιούνται στοιχεία με μικρότερο εύρος ζώνης ( $\sim 1$ GHz) από ότι συνήθως χρησιμοποιείται σε ενσύρματα οπτικά σύμφωνα συστήματα.

- *Τεχνικές ευθυγράμμισης δέσμης.* Οι απώλειες ζεύξης μεταξύ της εισερχόμενης οπτικής δέσμης και της εισόδου του οπτικού δέκτη (ο οποίος μπορεί να είναι και *rigtailed* με μία μονότροπη ή πολύτροπη οπτική ίνα) εξαρτάται από την ποιότητα της εστίασης της δέσμης στον πυρήνα του κυματοδηγού εισόδου. Θα πρέπει να εξεταστούν τεχνικές μηχανικής αυτόματης μικρο-ρύθμισης ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες σύζευξης και να βελτιωθεί ο ισολογισμός ισχύος μεταξύ πομπού και δέκτη. Οι βασικές εξισώσεις που διέπουν την σχεδίαση του συστήματος ως προς αυτήν την πτυχή παρουσιάζονται στο Π2.2.
- *Έλεγχος και διόρθωση των σφαλμάτων φάσης.* Η σύμφωνη φάραση θέτει σημαντικούς περιορισμούς στον έλεγχο της συμφωνίας της οπτικής συχνότητας και της φάσης του laser του τοπικού ταλαντωτή και του laser του πομπού. Δεδομένης και της απόστασης που χωρίζουν τα δύο laser, ο δέκτης θα πρέπει να είναι σε θέση να απομακρύνει την επίδραση της ασυμφωνίας φάσης με ψηφιακό τρόπο (με την χρήση ψηφιακών κυκλωμάτων επεξεργασίας σήματος – *digital signal processing - DSP*). Στο Π2.2, είδαμε πως μπορούμε να διορθώσουμε την ασυμφωνία φάσης με ένα κύκλωμα ανίχνευσης φέροντος. Ωστόσο θα πρέπει να τονιστεί ότι ενδεχομένως να απαιτείται η δυναμική αυξομείωση της θερμοκρασίας του laser του τοπικού ταλαντωτή ώστε να μειώνεται η συχνотική διαφορά των δύο πηγών.
- *Δυνατότητα διόρθωσης των σφαλμάτων πόλωσης.* Όπως είδαμε και στο Π1.1, η συμφωνία πόλωσης μεταξύ των πηγών laser του σήματος και του τοπικού ταλαντωτή είναι σημαντική ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοση μίξης. Όπως και στην περίπτωση του ελέγχου σφαλμάτων φάσης έτσι και εδώ θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν κυκλώματα DSP και κατάλληλοι ελεγκτές πόλωσης.

## 6. Συμπεράσματα

Στο παραδοτέο περιγράφηκαν οι αρχιτεκτονικές των επικοινωνιακών συστημάτων στα οποία μπορούν να συμβάλλουν τα σύμφωνα ασύρματα οπτικά συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφηκαν αρχιτεκτονικές για τα δίκτυα εξυπηρετητών, τα εταιρικά και τα οικιακά δίκτυα, οι ανάγκες τους. Παρουσιάστηκαν οι ενδείξεις και τα επιχειρήματα για τις μελλοντικές αυξημένες ανάγκες των συστημάτων αυτών. Τέλος, παρουσιάστηκε η λύση των πολλαπλών εισόδων/ πολλαπλών εξόδων (MIMO) -στην περίπτωση 2x2- για τα σύμφωνα ασύρματα οπτικά συστήματα και τα πλεονεκτήματά της. Πιο συγκεκριμένα, η λύση αυτή δείχτηκε να προσφέρει εξαιρετικό SNR για τις ανάγκες των προαναφερθέντων δικτύων.

## 7. Αναφορές

- [1] P. W. Shumate, "Fiber-to-the-home: 1977–2007," J. Lightwave Technol., vol. 26, pp. 1093–1103, 2008.
- [2] G. P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, 4th Ed. (Wiley, 2010).
- [3] R. Gaudino, D. Cardenas, M. Bellec, B. Charbonnier, N. Evanno, P. Guignard, S. Meyer, A. Pizzinat, I. Mollers, and D. Jager, "Perspective in next-generation home networks: Toward optical solutions?" IEEE Commun. Mag., vol. 48, no. 2, pp. 39–47, 2010.
- [4] D. O'Brien and M. Katz, "Optical wireless communications within fourth-generation wireless systems," J. Opt. Netw., vol. 4, pp. 312–322, 2005.
- [5] T. Rokkas, T. Kamalakis, D. Katsianis, D. Varoutas, and T. Sphicopoulos, "Business prospects of wide-scale deployment of free space optical technologies as a last-mile solution: A techno-economic evaluation, J. Opt. Netw., vol. 6, pp. 860-887, 2007.
- [6] J. M. Kahn, W. J. Krause, and J. B. Carruthers, "Experimental characterization of non-directed indoor infrared channels," IEEE Trans. Commun., vol. 43, pp. 1613–1623, 1995.
- [7] T. Komine and M. Nakagawa, "Integrated system of white LED visible-light communication and power-line communication," IEEE Trans. Consum. Electron., vol. 49, pp. 71–79, 2003.
- [8] D. Halperin *et al.*, "Augmenting Data Center Networks with Multi-Gigabit Wireless Links", SIGCOMM'11, Toronto, Ontario, Canada (2011).
- [9] J. Y. Shin *et al.*, "On the feasibility of completely wireless data centers" Proceedings of the eighth ACM/IEEE symposium on Architectures for networking and communications systems, pp. 3-14, [ANCS '12](#).
- [10] X. Zhou, *et al.*, "Mirror Mirror on the Ceiling: Flexible Wireless Links for Data Centers", SIGCOMM'12, August 13–17, Helsinki, Finland (2012).
- [11] K. Wang *et al.*, "4 x 12.5 Gb/s WDM Optical Wireless Communication System for Indoor Applications", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 29, Issue 13, pp. 1988-1996 (2011).
- [12] E. Ip *et al.*, "Coherent detection in optical fiber systems Optics Express, Vol. 16, Issue 2, pp. 753-791 (2008).
- [13] M. G. Taylor, "Phase Estimation Methods for Optical Coherent Detection Using Digital Signal Processing", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 27, NO. 7, APRIL 1 (2009).
- [14] J. C. M. Diniz *et al.*, "Simple feed-forward wide-range frequency offset estimator for optical coherent receivers", Optics Express, Vol. 19, Issue 26, pp. B323-B328 (2011).
- [15] G. Ntogari *et al.*, "Analysis of Indoor Multiple-Input Multiple-Output Coherent Optical Wireless Systems", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 30, Issue 3, pp. 317-324 (2012).
- [16] M. Niu, J. Cheng, J. F. Holzman and L. McPhail, "Performance analysis of coherent free space optical communication systems with  $K$ -distributed turbulence," IEEE International Conference on Communications (ICC'09), pp. 1-5, June (2009)

- [17] H. G. Sandalidis, T. A. Tsiftsis, G. K. Karagiannidis "Optical wireless communications with heterodyne detection over turbulence channels with pointing errors," IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 27, no. 20, pp. 4440-4445 (2009).
- [18] G. Dede, T. Kamalakis, D. Varoutas, 'Towards a Roadmap for Future Home Networking Systems: An Analytical Hierarchy Process Approach' (2011), IEEE Systems Journal, vol. 6, no. 3, pp. 374-384, 2011.
- [19] G. Dede, T. Kamalakis, D. Varoutas, "Evaluation of Optical Wireless Technologies for Home Networking", IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol. 3, no. 11, pp. 850-859, 2011.
- [20] <http://www.ultrahdtv.net/articles/the-ultimate-guide-to-4k-and-8k-ultra-hd/>
- [21] Δείτε, για παράδειγμα, τα σχετικά προϊόντα της Sony και της Samsung: <http://www.sony.co.in/bravia-lcd-tv/range/X-Series-4K-TV/588990?hpid=4K:hub:mainbanner>; <http://www.samsung.com/us/showcase/home-entertainment-televvisions-and-audio/?cid=ppc->
- [22] Rudolf van der Berg, "Developments in fiber technology and investments", Working Party on Communication Infrastructures and Services Policy (CISP), Committee for Information, Computer and Communication Policy (ICCP), Directorate for Science, Technology and Industry (DSTI), OECD, 3 April 2008.
- [23] <http://www.fiercetelecom.com/special-reports/atts-hughes-fttb-were-making-steady-progress>
- [24] Banerjee, Amitabha, *et al.* "Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review [Invited]." Journal of optical networking 4.11 (2005): 737-758.
- [25] Einar In De Betou, Christian-Alexander Bunge, Henrik Åhlfeldt, and Magnus Olson, "WDM-PON is a key component in next generation access", Lightwaveonline, 7 March 2014.
- [26] Keiji Tanaka, Akira Agata, and Yukio Horiuchi, "IEEE 802.3av 10G-EPON Standardization and Its Research and Development Status," J. Lightwave Technol. 28, 651-661 (2010).
- [27] Bruno Clerckx and Claude Oestges, "MIMO Wireless Networks, Second Edition: Channels, Techniques and Standards for Multi-Antenna, Multi-User and Multi-Cell Systems", (Academic Press, 2013).
- [28] «Σχεδιασμός Οπτικών Ασύρματων Συστημάτων Σύμφωνης Φώρασης», παραδοτέο Π2.2. του προγράμματος «Σύμφωνα Ασύρματα Οπτικά Συστήματα ως Δομικά Στοιχεία για την Υλοποίηση Δικτύων Οικίας και Επαγγελματικών Χώρων Επόμενης Γενιάς, (COWS)».
- [29] «Σχήματα Κωδικοποίησης και Διαμόρφωσης Οπτικών Ασύρματων Συστημάτων Σύμφωνης Φώρασης», παραδοτέο Π2.1. του προγράμματος «Σύμφωνα Ασύρματα Οπτικά Συστήματα ως Δομικά Στοιχεία για την Υλοποίηση Δικτύων Οικίας και Επαγγελματικών Χώρων Επόμενης Γενιάς, (COWS)»