



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ
ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ**

Τοπικά Ασύρματα Δίκτυα Βασισμένα στα 60GHz
Διπλωματική Εργασία

Ακτύπης – Τρικούπης Χαράλαμπος

Αθήνα, 2017



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ
ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ**

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

**Καμαλάκης Θωμάς (Επιβλέπων)
Επίκουρος Καθηγητής**

**Μιχαλακέλης Χρήστος
Επίκουρος Καθηγητής**

**Δαλάκας Βασίλειος
Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό**

Αθήνα, 2017

Ο Ακτύπης – Τρικούπης Χαράλαμπος

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

- 1) Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.
- 2) Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.

Η παρακάτω εργασία αφιερώνεται στην Κατερίνα ,την Χριστίνα, τον Αλέξη και τον Πάνο.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Κ. Θωμά Καμαλάκη για την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα καθώς και για την υπομονή του. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τους φίλους μου που με στήριξαν και με στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια, χωρίς αυτούς δεν θα ήμουν αυτός που είμαι τώρα και δεν θα είχα καταφέρει τόσα πολλά.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	8
Abstract	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	10
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	12
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	13
ΚΕΦ.1: Εισαγωγή	14
1.1. Εισαγωγή	14
1.2. Σκοπός της Εργασίας	15
1.3. Δομή των Κεφαλαίων	15
ΚΕΦ.2: Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα	17
2.1. Εισαγωγή	17
2.2. WLAN	17
2.3. Στοιχεία Δικτύου	18
ΚΕΦ.3: Ασύρματες Επικοινωνίες στα 60 GHz	21
3.1. Εισαγωγή	21
3.2. Κατανομή Φάσματος	21
3.3. Προτυποποίηση	23
3.3.1. IEEE 802.15.3.C	23
3.3.2. WirelessHD	25
3.3.3. IEEE 802.11.ad	25
3.3.4. Wireless Gigabit Alliance	26
3.4. Χαρακτηριστικά Διάδοσης	26
3.4.1. Απορρόφηση Οξυγόνου	26
3.4.2. Μήκος Κύματος	27
3.4.3. Κάλυψη	27
3.5. Εφαρμογές	29
ΚΕΦ.4: Πομποδέκτες Τεχνολογίας CMOS για τις Ασύρματες Επικοινωνίες στα 60 GHz	32
4.1. Εισαγωγή	32
4.2. Ανάλυση Δομικών Στοιχείων	33
4.2.1. LNA	33
4.2.2. Μίκτης	34
4.2.3. Ταλαντωτής	37
4.3. Υλοποιήσεις	40
4.3.1. Πομποδέκτης CMOS στα 65 nm	40
4.3.2. Πομποδέκτης CMOS στα 90 nm	44

4.3.3. Πομποδέκτης για Συστήματα ROF	47
ΚΕΦ.5: Συστήματα Radio-over-Fiber	49
5.1. Τι είναι το ROF;.....	49
5.2. Πλεονεκτήματα	50
5.2.1. Απώλειες μετάδοσης	50
5.2.2. Bandwidth	51
5.2.3. Ηλεκτρομαγνητική Παρεμβολή	52
5.2.4. Εγκατάσταση και Συντήρηση	52
5.2.5. Δυναμική Κατανομή Πόρων.....	52
5.3. Περιορισμοί – Μειονεκτήματα	53
5.4. Εφαρμογές.....	53
5.5. Αρχιτεκτονική	55
5.6. Προτάσεις – Υλοποιήσεις	57
5.6.1. Συνδυασμός Μονότροπων και Πολύτροπων Οπτικών Ινών.....	57
5.6.2. Επέκταση Καναλιού	58
5.6.3. Διαχείριση Μεταπομπής.....	60
5.6.4. Πρωτόκολλο MAC	62
ΚΕΦ.6: Επίλογος	64
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	66

Περίληψη

Η ολοένα αύξηση των ευρυζωνικών συνδέσεων, σε συνδυασμό με την συνεχή αύξηση των ασύρματων συσκευών, δημιούργησαν την ανάγκη για διεύρυνση μεγαλύτερου διαθέσιμου εύρους ζώνης για την επίτευξη μεγαλύτερων ταχυτήτων στα τοπικά ασύρματα δίκτυα. Η ελεύθερη ζώνη των 60 GHz είναι η λύση στην ανάγκη αυτή. Με διαθέσιμο εύρος που φτάνει τα 9 GHz, τα ασύρματα τοπικά δίκτυα μπορούν να επιτευχθούν ταχύτητες έως 7 Gbit/s.

Σκοπός αυτής της διπλωματικής είναι η ανάλυση της ασύρματης ζώνης των 60 GHz. Η ζώνη των 60 GHz δημιουργεί νέες προκλήσεις και προβλήματα στην σχεδίαση και υλοποίηση των συστημάτων που την χρησιμοποιούν. Λόγω των μεγάλων απωλειών διάδοσης η ζώνη των 60 GHz έχει προταθεί σαν λύση για την ασύρματη επικοινωνία σε κλειστούς χώρους.

Για την δημιουργία ενός τέτοιου ασύρματου δικτύου χρειάστηκε να υλοποιηθούν και να σχεδιαστούν νέα κυκλώματα πομποδεκτών. Η τεχνολογία CMOS λόγω της ευκολότερης ενσωμάτωσης των κυκλωμάτων σε συσκευές του εμπορίου και του χαμηλού κόστους κατασκευής γίνεται η μελλοντική τεχνολογία για την επιλογή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε εφαρμογές στην χιλιοστομετρική ζώνη.

Το κύριο μειονέκτημα της ζώνης των 60 GHz είναι η περιορισμένη εμβέλεια. Για την κάλυψη ενός μεγάλου χώρου, ενός κτιρίου ή ενός σπιτιού θα χρειαστούν πολλά ασύρματα σημεία πρόσβασης (Access Points, AP). Τα συστήματα Radio over Fiber μπορούν να λάβουν τα πλεονεκτήματα της οπτικής ίνας, όπως χαμηλό κόστος, το μικρό βάρος, και το τεράστιο εύρος ζώνης μετάδοσης ώστε να είναι το μέσο διανομής των σημάτων στα 60 GHz.

Abstract

The increase of broadband connections, combined with the continued growth of wireless devices, have created the need to expand higher available bandwidth to achieve faster speeds to wireless local area networks. The unlicensed 60 GHz band is the solution to that need. With available bandwidth of up to 9 GHz, wireless local area networks can achieve speeds of up to 7 Gbit / s.

The aim of this thesis is the analysis of the wireless band of 60 GHz. The band of 60 GHz, is creating new challenges and problems in the design and implementation of systems that use it. Due to the large propagation loss, the 60 GHz band has been proposed as a solution for indoor wireless communication systems.

To create such a wireless local area network, a new transceiver circuit had to be designed and implemented. The CMOS technology due to the feasibility of the integration with digital circuits and the low manufacturing cost is the future technology of choice in implementing millimeter wave integrated circuits.

The main disadvantage of the 60 GHz band is the limited wireless coverage. To cover a large area, such as a building or a house, will need to use many wireless access points (Access Points, AP). The Radio over Fiber systems can take the advantages of optical fiber such as low cost, low attenuation, light weight, and huge transmission bandwidth to be the distribution medium for delivering 60 GHz radio signals.

Keywords: Wireless Local Area Networks, 60 Ghz, RoF, transceiver CMOS

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικ. 1. Σημείο πρόσβασης (access point, AP).....	19
Εικ. 2. Δικτυακές ομαδοποιήσεις (Service Sets).....	19
Εικ. 3. HotSpot.....	20
Εικ. 4. Κατανομή Φάσματος στα 60 GHz.....	22
Εικ. 5. Όρια Εκπομπής στα 60 GHz	22
Εικ. 6. Εξασθένιση Ηλεκτρομαγνητικής Ενέργειας.....	27
Εικ. 7. Ασύρματη Κάλυψη Χώρου στα a) 2.4 GHz και b) 60 Ghz.....	29
Εικ. 8. Low Noise Amplifier τριών-σταδίων Κοινής Πηγής	34
Εικ. 9. Τοπολογία Cascode μονού-σταδίου LNA	35
Εικ. 10. Μίκτης MOSFET διπλής πύλης	36
Εικ. 11. VCO με τοπολογία injection-coupled.....	39
Εικ.12. LNA υψηλής απολαβής	40
Εικ. 13. Τυπωμένο Κύκλωμα LNA.....	41
Εικ. 14. Τυπωμένο Κύκλωμα VCO	41
Εικ. 16. Κύκλωμα VCO	42
Εικ. 17. Τυπωμένο Κύκλωμα down-conversion Μίκτη.....	42
Εικ. 18. Κύκλωμα down-conversion Μίκτη.....	43
Εικ. 19. Κύκλωμα up-conversion IF Μίκτη.....	43
Εικ. 20. Τυπωμένο Κύκλωμα up-conversion IF Μίκτη	44
Εικ. 21. Ολοκληρωμένος Πομποδέκτης στα 65nm.....	44
Εικ. Εικ. 22. Μπλοκ Διάγραμμα Πομποδέκτη	45
Εικ. 23. Ολοκληρωμένος Πομποδέκτης στα 90nm.....	46
Εικ. 24. Μπλοκ Διάγραμμα Πομποδέκτη για Συστήματα ROF.....	47
Εικ. 25. Βασική Δομή ROF.....	49
Εικ. 26. Σύστημα ROF στα 900 MHz	50
Εικ. 27. Μπλοκ Διάγραμμα Δικτύου ROF.....	54
Εικ. 28. Αρχιτεκτονική ROF Συστήματος	56
Εικ. 29. Χρήση Οπτικών Ινών για Ενσύρματη και Ασύρματη Επικοινωνία	56
Εικ. 30. Μπλοκ Διάγραμμα Συστήματος με Χρήση MMF και SMF.....	57
Εικ. 31. Διανομή ROF Σημάτων Συνδυαστικά σε Δίκτυα MMF και SMF	58
Εικ. 32. Επικαλυπτόμενες Περιοχές.....	59
Εικ. 33. ROF Σύστημα με την χρήση EC.....	59
Εικ. 34. ROF Σύστημα με χρήση Συστήματος Εντοπισμού και Συστήματος Πρόβλεψης Κίνησης	61

Εικ. 35. Δομή Υπερπλαισίων	35
----------------------------------	----

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίν. 1. Απώλειες Διάδοσης Υλικών	28
Πίν. 2. Σύγκριση state-of-the-art Μικτών	37
Πίν. 3. Κατανάλωση Κυκλώματος	47
Πίν. 4. Απόδοση Πομποδέκτη	48

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

FTTH	Fiber to the home
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
ROF	Radio-over-Radio
RF	Ραδιοκύματα
WWAN	Wide Wireless Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
ROI	Return of Investment
STA	Station
AP	Access Point
DS	Distribution System
BSS	Basic Service Set
IBSS	Independent Basic Service Set
ESS	Extended Service Set
FCC	Federal Communication Commission
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
UWB	Ultra Wideband
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power
MIMO	Multiple Input, Multiple Output
WiGiz	Wireless Gigabit Alliance
IFE	In-Flight Entertainment
LO	Local Oscillator
VCO	Voltage-Controlled Oscillator
LNA	Low Noise Amplifier
IF	Intermediate Frequency
BB	BaseBand
PLL	Phase-Locked Loop
ESD	Electrostatic Discharge
VGA	Variable Gain Amplifier
ADC	Analog to Digital Converter
RAU	Remote Antenna Units
BS	Base Stations
CS	Central Station
SCM	Sub-Carrier Multiplexing
NF	Noise Figure
DR	Dynamic Range
RIN	Relative Intensity Noise
MMF	Multi-Mode Fiber
SMF	Single Mode Fiber
SFDR	Spurious Free Dynamic Range
DAS	Distributed Antenna System
EC	Extended Cell
HCC	Home Communication Controller
MAC	Medium Access Control

ΚΕΦ.1: Εισαγωγή

1.1. Εισαγωγή

Ζούμε σε έναν ολοένα και αυξανόμενο ψηφιακό κόσμο. Υπάρχει ένας πολλαπλασιασμός των ψηφιακών μέσων σε όλες τις πτυχές της καθημερινότητας - βίντεο υψηλής ευκρίνειας (HD), ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, φορητές συσκευές αναπαραγωγής μουσικής, καθώς και αύξηση σε μέσα αποθήκευσης δεδομένων και πολυμέσων. Με τόσο ψηφιακό περιεχόμενο και τόσες συσκευές, υπάρχει μια ισχυρή επιθυμία να μπορούν να μεταφερθούν αυτά τα δεδομένα γρήγορα και απλά μεταξύ των συσκευών. Καλώδια και διασυνδέσεις υψηλής ταχύτητας είναι το βιομηχανικό πρότυπο για υψηλής ταχύτητας μεταφορά δεδομένων, λόγω της αξιοπιστίας τους με λογικό κόστος.

Ωστόσο, η τοποθέτηση των αντιαισθητικών καλωδίων θέτει περιορισμούς στην φυσική τοποθεσία των συσκευών αυτών. Εάν τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν ασύρματα, τότε αυτό προσφέρει την ευκολία τοποθέτησης και αποφεύγει το κόστος που απαιτούν τα πολλά καλώδια υψηλής ταχύτητας. Έτσι, συνδέοντας ασύρματα τις συσκευές, έννοιες εξοικειωμένες με τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να κάνουν τις συνδέσεις παραμετροποιήσιμες σε πραγματικό χρόνο και να ελέγξουν τις πληροφορίες που ανταλλάσσονται μεταξύ δύο συσκευών, αντικαθιστώντας την λειτουργία point-to-point των καλωδίων.

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί η αύξηση των ευρυζωνικών συνδέσεων χρησιμοποιώντας τεχνολογίες όπως x-DSL ή του FTTH (Fiber to the home). Η χρήση ασύρματων δικτύων βασισμένα στα πρωτόκολλα IEEE 802.11a/b/g/n έκαναν εύκολη την ασύρματη πρόσβαση στις συνδέσεις αυτές. Η φθηνή τεχνολογία των δικτύων αυτών πολλαπλασίασε την εγκατάσταση ασύρματων σημείων πρόσβασης (Access Points) σε διάφορους χώρους όπως σπίτια, αεροδρόμια, επιχειρήσεις κ.α.

Παρά το γεγονός ότι υπάρχει ένα σαφές πλεονέκτημα για την ασύρματη συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας, το εύρος ζώνης που παρέχεται από τα ασύρματα συστήματα του σήμερα απέχουν πολύ από αυτό που απαιτείται για την υποστήριξη αυτών των multi-gigabit / sec εφαρμογών.

Η συνεχής αύξηση της χρήσης ασύρματων συσκευών, όπως τα έξυπνα κινητά, καθώς και η απαίτηση περισσότερων εφαρμογών για μεταφορά όλο και μεγαλύτερου όγκου δεδομένων

δημιούργησε την ανάγκη για περεταίρω διεύρυνση του διαθέσιμου εύρου ζώνης για την επίτευξη μεγαλύτερων ταχυτήτων στα ασύρματα δίκτυα. Η απαίτηση αυτή ανάγκασε τους ερευνητές να δώσουν έμφαση στην ζώνη των 60 GHz. Με διαθέσιμο εύρος που φτάνει τα 9 GHz μπορούν να επιτευχθούν ταχύτητες που φθάνουν έως 7 Gbit/s [1].

1.2. Σκοπός της Εργασίας

Σκοπός αυτής της διπλωματικής είναι η ανάλυση της ασύρματης ζώνης των 60 GHz. Η ζώνη των 60 GHz δημιουργεί νέες προκλήσεις και προβλήματα στην σχεδίαση και υλοποίηση των συστημάτων που την χρησιμοποιούν. Λόγω των μεγάλων απωλειών διάδοσης η ζώνη των 60 GHz έχει προταθεί σαν λύση για την ασύρματη επικοινωνία σε κλειστούς χώρους. Σαν ασύρματο κελί έχει επικρατήσει να είναι το ένα δωμάτιο, με τα σύνορα του κελιού να περιορίζονται από τους τοίχους και το πάτωμα [2,3].

Επίσης, θα αναλυθούν τεχνικές πομποδεκτών για την ενσωμάτωση σε μία ψηφίδα (System-on-a Chip). Το μεγάλο στοίχημα της μικροηλεκτρονικής σε αυτό το τομέα είναι η κατασκευή RFICs σε τεχνολογίες οι οποίες χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ψηφιακών μικροηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Κυρίαρχη τεχνολογία, λόγω της χαμηλής κατανάλωσης και του χαμηλού κόστους συγκριτικά με άλλες υπάρχουσες τεχνολογίες, είναι η λεγόμενη τεχνολογία CMOS (Complimentary Metal-Oxide-Semiconductor).

1.3. Δομή των Κεφαλαίων

Η παρούσα διπλωματική εργασία δομείται ως εξής:

Το Κεφάλαιο 2 αποτελεί ένα γενικό κεφάλαιο για τις ασύρματες επικοινωνίες στα ασύρματα τοπικά δίκτυα παρουσιάζοντας τα στοιχεία τους.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μια αναλυτική περιγραφή της ζώνης των 60 GHz. Αναλύονται επίσης τα πρότυπα που υπάρχουν για την ζώνη καθώς και εφαρμογές της.

Το Κεφάλαιο 4 αναλύει την σχεδίαση και την κατασκευή πομποδεκτών σε τεχνολογία CMOS. Αναφέρονται τα δομικά στοιχεία ενός πομποδέκτη και παρουσιάζονται ολοκληρωμένες προτάσεις που έχουν υλοποιηθεί.

Το Κεφάλαιο 5 αναφέρει μία σημαντική εφαρμογή της ζώνης των 60 GHz, τα συστήματα Radio-over-Radio (ROF). Αναλύει τις προκλήσεις και τις εφαρμογές ενός τέτοιου συστήματος καθώς και τα προβλήματα του. Παρουσιάζει συστήματα τα οποία έχουν υλοποιηθεί σε εργαστηριακό περιβάλλον, καθώς και βελτιώσεις τους.

Τέλος, το Κεφάλαιο 6 συνοψίζει την πτυχιακή και αναφέρει τα συμπεράσματα για τα ασύρματα δίκτυα στα 60 GHz. Επίσης, παρέχει μια πρόγνωση για τον μέλλον των ασύρματων τοπικών δικτύων.

ΚΕΦ.2: Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα

2.1. Εισαγωγή

Σύμφωνα με την Wikipedia, ως ασύρματο δίκτυο χαρακτηρίζεται το δίκτυο, συνήθως τηλεφωνικό ή υπολογιστών το οποίο χρησιμοποιεί, ραδιοκύματα (RF) ως φορείς πληροφορίας [4]. Η ασύρματη επικοινωνία, σε αντίθεση με την ενσύρματη, δεν χρησιμοποιεί ως μέσο μετάδοσης κάποιον τύπο καλωδίου. Στα ασύρματα δίκτυα εντάσσονται τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, οι δορυφορικές επικοινωνίες, τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (WWAN), τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN), τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Area Network, WLAN) και τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN).

2.2. WLAN

Τα WLAN είναι ένα ασύρματο δίκτυο υπολογιστών το οποίο συνδέει δύο ή περισσότερες συσκευές μέσα σε έναν περιορισμένο χώρο. Αυτό επιτρέπει στις συσκευές την ιδιότητα της μετακίνησης μέσα στον χώρο, παραμένοντας συνδεδεμένες στο δίκτυο, το οποίο είναι και το σπουδαιότερο πλεονέκτημα τους. Χρησιμοποιείται ως εναλλακτική ή ως επέκταση με το ενσύρματο τοπικό δίκτυο. Τα WLAN έγιναν δημοφιλή για οικιακή χρήση λόγω της ευκολίας στην εγκατάσταση και την χρήση [4].

Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η ταχύτητα εγκατάστασης ενός τέτοιου δικτύου. Σε ένα νέο κτήριο η δομημένη καλωδίωση απαιτεί προγραμματισμό και αρκετό χρόνο, ενώ παρουσιάζονται και αρκετά προβλήματα και μετά την ολοκλήρωση της.

Σημαντική επίσης είναι η ευελιξία και η επεκτασιμότητα που παρουσιάζουν τα ασύρματα δίκτυα. Η αναδιοργάνωση ενός ενσύρματου δικτύου είναι εξαιρετικά χρονοβόρα και δύσκολή, σε αντίθεση με αυτή ενός WLAN όπου απλώς η μετακίνηση ή η προσθήκη ενός ακόμα σημείου πρόσβασης (Access Point) αλλάζει και την έκταση του καλυπτόμενου χώρου. Μάλιστα η ευελιξία αυτή είναι που έχει οδηγήσει τις περισσότερες επιχειρήσεις στα ασύρματα δίκτυα, αφού στις μέρες μας ολοένα και περισσότερο οι εργασίες αναθέτονται σε ομάδες υψηλής δυναμικότητας και οι εργαζόμενοι αναγκάζονται να μετακινούνται και να αλλάζουν γραφείο αρκετά συχνά.

Τέλος, σύμφωνα με έρευνα που πραγματοποιήθηκε από την Wireless LAN Association η ανταποδοτικότητα επένδυσης (Return of Investment, ROI) των ασυρμάτων δικτύων είναι εντυπωσιακή, αφού σε όποια επιχείρηση χρησιμοποιήθηκε απέδωσε σε 12 μόλις μήνες το κόστος αγοράς και συνέβαλε σημαντικά στην αύξηση της κερδοφορίας.

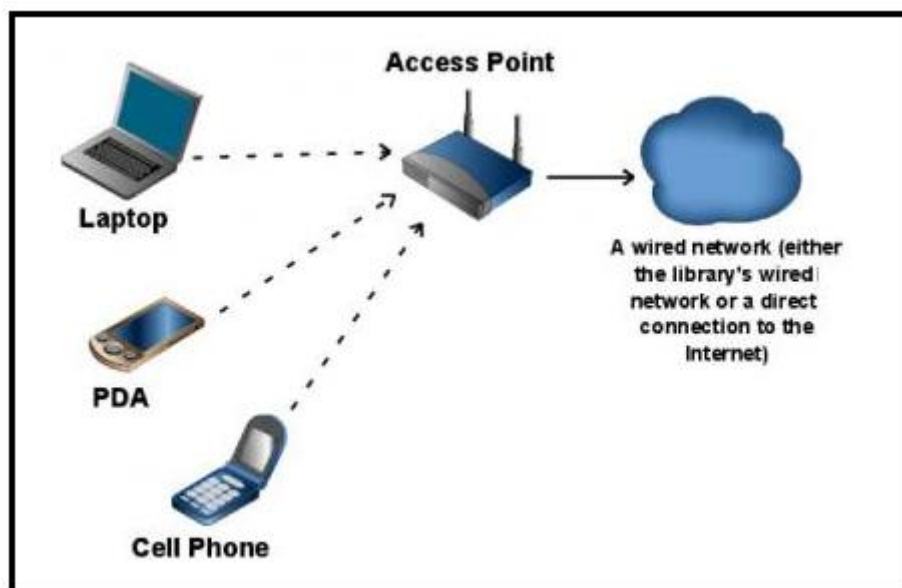
Από την άλλη πλευρά, τα WLAN έχουν και αρκετά μειονεκτήματα. Κύριο μειονέκτημα είναι οι χαμηλές ταχύτητες μετάδοσης που μπορούν να επιτευχθούν σε σχέση με τα ενσύρματα δίκτυα. Επίσης, η κάλυψη όλων των χώρων ενός κτηρίου ή ενός σπιτιού θεωρείται μειονέκτημα. Τέλος, και ίσως αρκετά σημαντικό μειονέκτημα κυρίως σε εταιρικές χρήσεις, είναι η ασφάλεια. Δεδομένου ότι το μέσο είναι εκτεθειμένο χρειάζεται ιδιαίτερη προσπάθεια για να υπάρξει προστασία.

2.3. Στοιχεία Δικτύου

Σύμφωνα με τον Αλεξόπουλο [5], ένα WLAN αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

Σταθμοί (Station, STA). Ως σταθμοί αναφέρονται οι φορητές συσκευές οι οποίες έχουν την δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας μέσω ασύρματων πρωτοκόλλων, όπως κινητά τηλέφωνα (smartphones), ηλεκτρονικοί υπολογιστές, τηλεοράσεις κλπ.

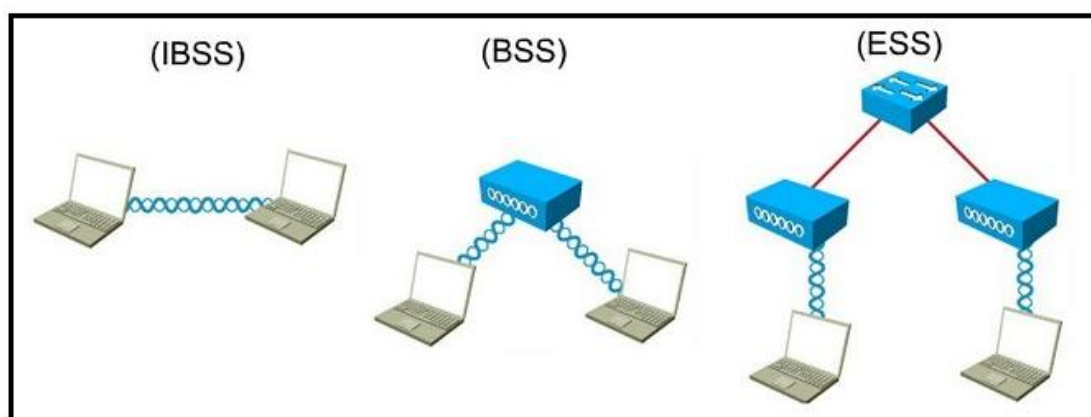
Σημείο πρόσβασης (access point, AP). Το AP είναι ο κεντρικός ασύρματος διανομέας. Σε αυτός συνδέονται οι σταθμοί ασύρματα και συνήθως συνδέεται με το ενσύρματο δίκτυο.



Εικ. 1. Σημείο πρόσβασης (access point, AP)

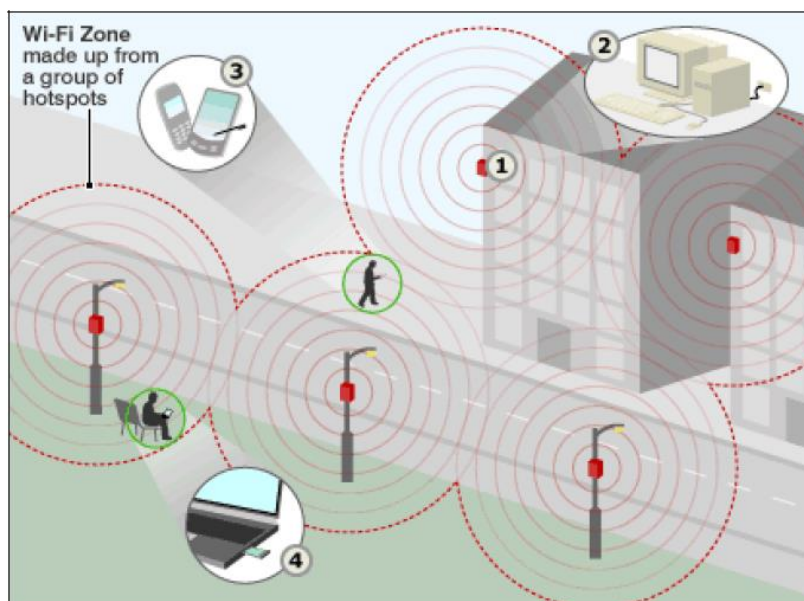
Δίκτυο Διανομής ή Σύστημα Διανομής (Distribution System, DS). Το DS διασυνδέει τα διάφορα AP μεταξύ τους καθώς και με τα υπόλοιπα δίκτυα. Η σύνδεση αυτή μπορεί να είναι και ενσύρματη και ασύρματη.

Δικτυακές ομαδοποιήσεις (Service Sets). Για την επικοινωνία μεταξύ των συσκευών θα πρέπει αυτές να είναι ενταγμένες σε μια ασύρματη ομάδα. Οι σταθμοί που επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους χωρίς την χρήση AP ονομάζεται IBSS (Independent BSS). Το σύνολο των σταθμών που επικοινωνούν με ένα AP λέγεται BSS (Basic Service Set). Ως ESS (Extended Service Set) ονομάζεται ένα εκτεταμένο δίκτυο το οποίο χρησιμοποιεί περισσότερα από ένα AP. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η διαφορά ανάμεσα στις ομαδοποιήσεις.



Εικ. 2. Δικτυακές ομαδοποιήσεις (Service Sets)

Μία εφαρμογή των SS είναι τα HotSpot. Ο όρος Hot Spot αναφέρεται στα τοπικά ασύρματα δίκτυα τα οποία παρέχουν πρόσβαση στο Internet και βρίσκονται σε δημόσιους χώρους. Συνήθως είναι προσβάσιμα δωρεάν ή με κάποιο αντίτιμο. Τέτοιο χώροι είναι τυπικά αεροδρόμια, café ή ακόμα και μεγάλοι κεντρικοί δημόσιοι χώροι σε μια πόλη. Ένα Hot Spot μπορεί να αποτελείται απλά από μια BSS τοπολογία με ασύρματο δρομολογητή που συνδέεται στο Internet ή να απλώνεται σε μεγαλύτερη έκταση με τη χρήση ESS τοπολογίας η οποία περιλαμβάνει και σύνδεση στο Internet (Εικ. 3).



Εικ. 3. HotSpot

ΚΕΦ.3: Ασύρματες Επικοινωνίες στα 60 GHz

3.1. Εισαγωγή

Τα 60 GHz είναι η νέα ανερχόμενη τεχνολογία για ευρυζωνικές εφαρμογές πολυμέσων. Έχοντας οπτικές επικοινωνίες εξωτερικών χώρων που μπορούν να εξασφαλίσουν ταχύτητες της τάξεως των TB/s, τα 60 GHz θεωρούνται ως η υποσχόμενη λύση για τις επικοινωνίες εσωτερικών χώρων με ρυθμούς μεταφοράς της τάξεως των GB/s. Η ζώνη των 60 GHz διαθέτει αρκετά θετικά χαρακτηριστικά ώστε να έχει μεγάλες εμπορικές δυνατότητες τα οποία θα αναπτυχθούν παρακάτω.

3.2. Κατανομή Φάσματος

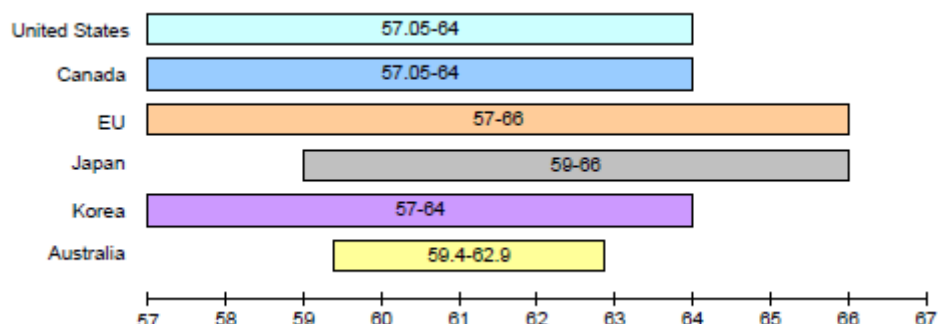
Η ζώνη των 60 GHz είναι ιδανική για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων, λόγω του ότι είναι παγκόσμια διαθέσιμη, έχει μεγάλο συνεχόμενο εύρος ζώνης και υψηλή επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής.

Πολλές περιοχές και χώρες του κόσμου διαθέτουν τους δικούς τους κανονισμούς και περιορισμούς σχετικά με το μη αδειοδοτημένο φάσμα (ελεύθερο) γύρω από την συχνότητα των 60 GHz.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (Federal Communication Commission, FCC) τον Δεκέμβριο του 1995, ελευθέρωσε 5 GHz συνεχόμενου εύρους ζώνης για χρήση χωρίς άδεια στην ζώνη των 60 GHz για χιλιοστομετρικά μήκη κύματος. Το 2001 αποφάσισε να επαναπροσδιορίσει τις συχνότητες στην ελεύθερη ζώνη των 60GHz. Αυτό ήταν συνέπεια των πρόσφατων τεχνολογικών εξελίξεων για την διευκόλυνση της εμπορευματοποίησης της χιλιοστομετρικής ζώνης φάσματος [6].

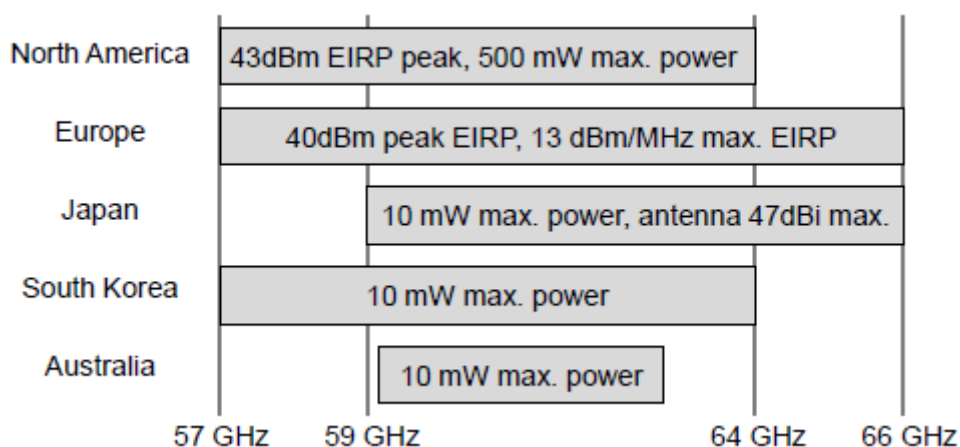
Το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (European Telecommunications Standards Institute, ETSI), έθεσε την βάση για τους μελλοντικούς κανονισμούς της ζώνης των 60GHz το 2007 [9]. Η αλλαγή της παρούσας κατανομής των συχνοτήτων είναι επιθυμητή προκειμένου να επιτραπεί η χρήση Ultra Wideband (UWB) συσκευών μικρής εμβέλειας στη ζώνη

των 60GHz. Θέτοντας σε ισχύ το πρότυπο ETSI EN 302 567 το οποία διαθέτει μία ζώνη συχνοτήτων 9GHz από 57GHz έως 66 GHz για χρήση χωρίς άδεια σε όλη την Ευρωπαϊκή Ένωση. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η κατανομή του φάσματος και στις υπόλοιπες περιοχές.



Εικ. 4. Κατανομή Φάσματος στα 60 GHz

Η μεταδιδόμενη ισχύς έγκειται και αυτή σε περιορισμούς ανάλογα με την περιοχή. Στην Ευρώπη η Ισοδύναμη Ισοτροπική Ακτινοβολούσα Ισχύ (Equivalent Isotropically Radiated Power, EIRP) περιορίζεται στα 57 dBm, ενώ στις ΗΠΑ και τον Καναδά η μέγιστη ισχύς είναι 500 mW (40 dBm EIRP). Η χρήση της ζώνης μεταξύ 57GHz και 64GHz είναι εφικτή, με μέση πυκνότητα ισχύος 9 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ στα 3 m (ισοδυναμεί με 40dBm EIRP) και με μέγιστη πυκνότητα ισχύος ίση με 18 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ στα 3 m (ισοδυναμεί με 43 dBm EIRP) [7, 8]. Η συνολική μέγιστη ισχύς εξόδου του πομπού περιορίζεται στα 500mW, και μειώνεται περαιτέρω εάν το εύρος ζώνης εκπομπής είναι λιγότερο από 100 MHz. Όπως αναφέρει η FCC [8], οι συσκευές θα πρέπει να συμμορφώνονται και με τους κανονισμούς των Ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency, RF), όπως αυτοί έχουν εκδοθεί. Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται τα όρια εκπομπής και στις υπόλοιπες περιοχές.



Εικ. 5. Όρια Εκπομπής στα 60 GHz

Συνοψίζοντας, από τις παραπάνω εικόνες φαίνεται ότι υπάρχει τουλάχιστον 3,5 GHz ελεύθερο φάσμα στην ζώνη των 60 GHz σε όλες τις χώρες. Ενώ η μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς περιορίζεται σε μερικές δεκάδες mW, θα μπορεί να επικεντρωθεί σε μία κατεύθυνση χρησιμοποιώντας μονοκατευθυντικές κεραίες υψηλής απολαβής.

3.3. Προτυποποίηση

Αυτή την στιγμή, πολλοί οργανισμοί προτυποποιούν τις ασύρματες επικοινωνίες μικρής εμβέλειας στην ζώνη των 60 GHz. Τα κυριότερα πρότυπα είναι: IEEE 802.15.3 c, WirelessHD, IEEE 802.11 ad και Wireless Gigabit Alliance.

3.3.1. IEEE 802.15.3.C

Το IEEE 802.15 είναι το πρότυπο για τα Ασύρματα Δίκτυα Προσωπικής Περιοχής (WPAN) [10]. Το πρότυπο αυτό χωρίζεται σε 7 ομάδες. Η τρίτη ομάδα ασχολείται με τα WPAN με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Το πρότυπο 802.15.3 καθορίζει την τυποποίηση της αρχιτεκτονικής του φυσικού επιπέδου (PHY) και του επιπέδου πρόσβασης μέσου (MAC) για τα WPAN. Το πρότυπο αυτό αποσκοπεί στην ενεργοποίηση της ασύρματης επικοινωνίας με γρήγορες ταχύτητες, χαμηλής κατανάλωσης και χαμηλού κόστους. Το 802.15.3a καθορίζει έναν υψηλού ρυθμού UWB PHY, είναι μια ενισχυμένη τροποποίηση του 802.15.3 για εφαρμογές απεικόνισης και πολυμέσων. Το 2006 δημιουργήθηκε το 802.15.3b το οποίο βελτιώνει το 802.15.3 στην υλοποίηση και τη διαλειτουργικότητα του MAC. Παρ' όλα αυτά, κανένα από τα παραπάνω δεν καλύπτει την απαίτηση για πολύ υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς. Έτσι, δημιουργήθηκε το 802.11.3c. Το 802.11.3c δημιούργησε ένα PHY το οποίο σχεδιάστηκε για την ζώνη των 60 GHz.

Τα συστήματα WPAN που λειτουργούν με το πρότυπο στην χιλιοστομετρική ζώνη συχνοτήτων αυτό έχουν τα εξής πλεονεκτήματα. Αρχικά, μπορούν να επιτύχουν ταχύτητες της τάξεως του 1 Gb/s. Αυτό τα κάνει κατάλληλα για εφαρμογές διαδικτύου, video on demand και τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας (HDTV). Δεύτερο πλεονέκτημα είναι η ομαλή συνύπαρξη με ήδη υπάρχοντα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας όπως το Wi-Fi, το Bluetooth, τα 2G/3G/4G δίκτυο λόγω των μεγάλων διαφορών στις συχνότητες.

3.3.2. WirelessHD

Το WirelessHD δημιουργήθηκε από κορυφαίες εταιρείες τεχνολογίας και καταναλωτικών ηλεκτρονικών ειδών όπως οι Intel Corporation, LG Electronics Inc, Panasonic Corporation [11]. Δημιουργήθηκε το 2006 ώστε να αναπτύξει το πρώτο νέας γενιάς βιομηχανικό ασύρματο πρότυπο για φορητές συσκευές, υπολογιστές και καταναλωτικών ηλεκτρονικών ειδών. Κύριος στόχος είναι η ανάπτυξη της ασύρματης μετάδοσης HDMI για streaming εικόνας και ήχου. Το WirelessHD βασίζεται στο 802.11.3 c και μπορεί να επιτύχει ρυθμούς μεταφοράς 10-28 Gb/s. Επίσης υποστηρίζει φορητές συσκευές, χρησιμοποιεί το πρότυπο IP για την δικτύωση και τέλος χρησιμοποιεί το HDCP 2.0 για προστασία.

3.3.3. IEEE 802.11.ad

Το IEEE 802.11 είναι ένα σύνολο προτύπων που δημιουργήθηκαν για τα Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα (WLAN). Τα πρότυπα αυτά δημιουργήθηκαν για εμπορικούς σκοπούς.

Για την ασύρματη ζεύξη μεταξύ σταθμών και AP χρησιμοποιούνται δυο ελεύθερες ζώνες συχνοτήτων, η ζώνη γύρω από τα 2,4GHz και η ζώνη γύρω από τα 5 GHz. Η σημασία των ελεύθερων ζωνών συχνοτήτων είναι ότι οι χρήστες δεν χρειάζεται να αγοράσουν κάποια ακριβή άδεια εκπομπής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του κόστους και επιτρέπει την ευρεία διάδοση και ανάπτυξη των τεχνολογιών.

Τα πρώτα δημοφιλή πρότυπα για ασύρματα τοπικά δίκτυα είναι τα IEEE 802.11a και b. Τα πρότυπα αυτά έχουν σχεδιαστεί κυρίως για να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες ενός φορητού υπολογιστή στο σπίτι και το γραφείο, και αργότερα να επιτρέψει τη σύνδεση "στο δρόμο" σε αεροδρόμια, ξενοδοχεία, Ίντερνετ καφέ, και εμπορικά κέντρα. Η κύρια λειτουργία τους είναι να παρέχουν μια σύνδεση σε ένα ενσύρματο ευρυζωνικό δίκτυο για περιήγηση στο διαδίκτυο ή στο ηλεκτρονικό ταχυδρομείο. Δεδομένου ότι η ταχύτητα των ευρυζωνικών συνδέσεων ήταν ο περιοριστικός παράγοντας, μια ασύρματη σύνδεση χαμηλής ταχύτητας ήταν επαρκής.

Το πρότυπο 802.11b λειτουργεί στην ζώνη των 2,4 GHz και επιτυγχάνει ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 11 Mb/s με εύρος ζώνης 0,097 GHz [13]. Το 802.11b καλύπτει εσωτερικό χώρο ακτίνας 50μ στα 11 Mb/s και 130μ στο 1 Mb/s. Σε εξωτερικό χώρο φτάνει τα 200μ στα 11 Mb/s και τα 400μ στο 1 Mb/s.

Το 802.11a λειτουργεί στην ζώνη των 5 GHz (5.15 – 5.875 GHz). Χρησιμοποιεί διαμόρφωση OFDM και επιτυγχάνει ρυθμούς μετάδοσης 6, 8, 12, 18, 24, 36, 48 και 54 Mb/s χρησιμοποιώντας εύρος ζώνης συχνοτήτων 0,725 GHz. Το 802.11a καλύπτει εσωτερικό χώρο ακτίνας 10μ στα 54 Mb/s και 70μ στο 1 Mb/s [12].

Για να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές από άλλες συσκευές, και τα δυο πρότυπα είναι σε μεγάλο βαθμό κωδικοποιημένα και χρησιμοποιούν μορφές μετάδοσης ευρέως φάσματος.

Μια μεταγενέστερη αναθεώρηση του προτύπου 802.11b είναι το 802.11g το οποίο δημιουργήθηκε το 2003 και ενοποιήθηκε στη ζώνη των 2,4 GHz, επιτυγχάνοντας μέγιστο ρυθμό μετάδοσης στα 54 Mb/s. Εκτός από την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης, αυξήθηκε και η εμβέλεια εκπομπής φθάνοντας σε εσωτερικό χώρο τα 25μ με ρυθμό μετάδοσης 54 Mb/s και τα 90μ με 6 Mb/s. Σε εξωτερικό χώρο τα 75μ με 54 Mb/s και τα 400μ με 6 Mb/s.

Ωστόσο, την ίδια στιγμή έκαναν την εμφάνιση τους νέα μοντέλα χρήσης με την ανάγκη για υψηλότερη ρυθμαπόδοση (throughput). Ένα παράδειγμα του μοντέλου αυτού είναι ο κοινοχρήσιμος μεταξύ των συνδεδεμένων συσκευών στο σπίτι ή ένα μικρό γραφείο ή η ασύρματη εκτύπωση. Γι' αυτό το σκοπό μια μελέτη είχε συσταθεί από την οποία παράχθηκε το 802.11n το 2009. Εκτός από τη βελτίωση του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης ενός καναλιού σε πάνω από 100 Mb/s (μέγιστη τιμή 144 MB/s), αυτό το νέο πρότυπο εισήγαγε την τεχνική πολλαπλών εισόδων- πολλαπλών εξόδων (MIMO multiple input, multiple output), όπου μέχρι και 4 ξεχωριστές φυσικές κεραίες εκπομπής και λήψης μεταφέρουν ανεξάρτητα δεδομένα μέσω διαφορετικών καναλιών. Το 802.11n χρησιμοποιεί και τις δύο ζώνες συχνοτήτων.

Σήμερα, εφαρμογές όπως η ασύρματη απεικόνιση βίντεο υψηλής ευκρίνειας (HD) σε οθόνες, ή η στιγμιαία μεταφορά μεγάλων αρχείων σε κινητές συσκευές δημιούργησαν μεγαλύτερες απαιτήσεις για υψηλότερη ρυθμαπόδοση στα ασύρματα δίκτυα. Για την κάλυψη των νέων αυτών απαιτήσεων συστάθηκε το πρότυπο 802.11ac. Το 802.11ac, το οποίο είναι μια επέκταση του 802.11n, παρέχει μία ελάχιστη ρυθμαπόδοση της τάξεως των 500 Mbit/s σε μονή σύνδεση (single link) και συνολική απόδοση το 1 Gbit/s, στην ζώνη των 5 GHz.

Τα πρότυπα αυτά δεν ικανοποιούν της ανάγκες για εφαρμογές πολυμέσων οι οποίες χρειάζονται πολύ υψηλές ταχύτητες όπως HDTV ή UHDTV. Για τον λόγο αυτό συστάθηκε η ομάδα 802.11 ad ώστε να τροποποιηθούν τα IEEE 802.11 PHY και IEEE 802.11 MAC για να λειτουργούν στην ζώνη των 60 GHz. Το 802.11 ad μπορεί να επιτύχει throughput μέχρι και 6.75 Gb/s. Επίσης το 802.11 ad θα είναι συμβατό με τα υπόλοιπα πρότυπα 802.11 [14].

3.3.4. Wireless Gigabit Alliance

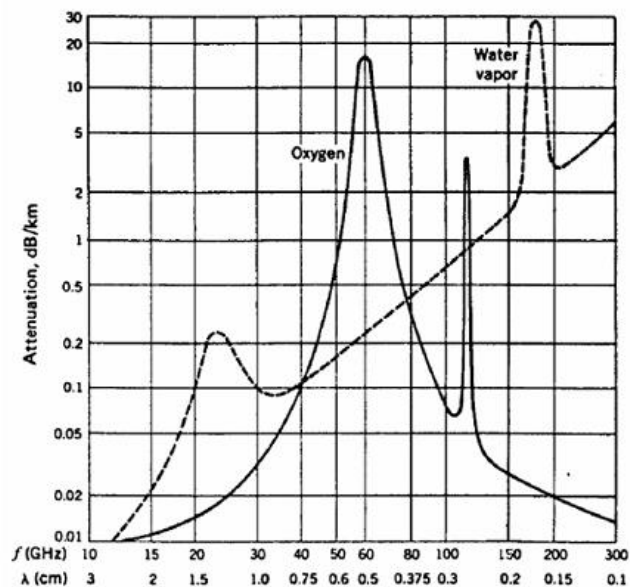
Το Wireless Gigabit Alliance (WiGiz) είναι άλλο ένα βιομηχανικό πρότυπο. Το πρότυπο καθορίζει τα χαρακτηριστικά τα οποία θα επιτρέψουν την ασύρματη επικοινωνία υπολογιστών, φορητών συσκευών και καταναλωτικών ηλεκτρονικών συσκευών σε απόσταση ενός δωματίου σε ρυθμούς της τάξεως των Gb/s. Το πρότυπο αυτό αρχικά κοινοποιήθηκε το 2010 στην πρώτη του έκδοση. Η τελευταία έκδοση του (WiGiz v1.2) έχει τις ίδιες προδιαγραφές με το 802.11 ad [1].

3.4. Χαρακτηριστικά Διάδοσης

Παρά το γεγονός ότι υπάρχει ένα μεγάλο ποσό του φάσματος μεταξύ 5 GHz και 60 GHz, πουθενά κάτω των 60 GHz, δεν υπάρχει τόσο πολύ ελεύθερο φάσμα παγκοσμίως. Αυτό είναι συνέπεια των χαρακτηριστικών διάδοσης.

3.4.1. Απορρόφηση Οξυγόνου

Τα μόρια του οξυγόνου στην ατμόσφαιρα συντονίζονται σε συχνότητες κοντά στα 60 GHz, προκαλώντας σημαντική εξασθένηση στην ηλεκτρομαγνητική ενέργεια σε αποστάσεις μεγαλύτερες μερικών χιλιομέτρων. Αυτό παρουσιάζεται και στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 6).



Εικ. 6. Εξασθένηση Ηλεκτρομαγνητικής Ενέργειας

Έτσι, οι απώλειες διαδρομής (path loss) της ακτινοβολίας των 60 GHz λόγω της απορρόφησης του οξυγόνου είναι σε αναλογία περίπου 15 dB/km και λόγω των υδρατμών 0,2 dB/km. Σε περιβάλλον εσωτερικού χώρου οι απώλειες λόγω της απορρόφησής του οξυγόνου δεν είναι σημαντικό πρόβλημα. Ωστόσο, θα ήταν χρήσιμο ένα μοντέλο διάδοσης σε εσωτερικό χώρο για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός ασύρματου δικτύου με υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς [17].

3.4.2. Μήκος Κύματος

Το μήκος κύματος της ζώνης των 60 GHz κυμαίνεται γύρω στα 5 mm. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την χρήση μικρών κεραιών, οι οποίες θα μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν στις διάφορες ηλεκτρονικές συσκευές, κινητές και μη. Επίσης είναι εφικτές και στοιχειοκεραίες σταθερής μορφοποίησης δέσμης (beamforming).

3.4.3. Κάλυψη

Στην ζώνη των 60 GHz έχουμε πολύ μεγαλύτερες απώλειες από τις ζώνες των 2,4 GHz και 5 GHz. Σύμφωνα με το μοντέλο του Friis [15] για την διάδοση στον ελεύθερο χώρο η σχέση μεταξύ το μήκος κύματος, την εκπεμπόμενη ισχύς και την λαμβανόμενη ισχύς είναι η εξής:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

Όπου G_t και G_r είναι το λαμβανόμενο και εκπεμπόμενο κέρδος των κεραιών και d η απόσταση μεταξύ τους. Από αυτή την σχέση οι απώλειες ελεύθερου χώρου στο 1μ για τα 2,4 GHz , 5 GHz και 60 GHz είναι 40,05 dB 46,42 dB και 68 dB αντίστοιχα.

Ένα άλλο πρόβλημα κάλυψης είναι οι απώλειες λόγω των διάφορων τοίχων. Οι απώλειες διαφέρουν ανάλογα με το υλικό που είναι κατασκευασμένοι οι τοίχοι καθώς και το πάχος τους. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται οι σχετικές απώλειες των υλικών [17].

Material	Loss at 60 GHz	Loss at 2.5 GHz
Drywall	2.4 (dB/cm)	2.1(dB/cm)
Clear Glass	11.3 (dB/cm)	20.0(dB/cm)
Whiteboard	5 (dB/cm)	0.3 (dB/cm)
Mesh Glass	31.9 (dB/cm)	24.1(dB/cm)
Clutter	1.2 (dB)	2.5 (dB)

Πίν. 1. Απώλειες Διάδοσης Υλικών

Οι υψηλές απώλειες διείσδυσης του σήματος μπορούν να θεωρηθούν ως πλεονέκτημα διότι περιορίζουν τις παρεμβολές από άλλα γειτονικά σήματα των 60 GHz. Από την άλλη, αυτό είναι επίσης και μειονέκτημα διότι κάθε αντικείμενο, το οποίο θα παρεμβάλετε, θα μπλοκάρει την οπτική επαφή προκαλώντας υψηλές διαλείψεις σκίασης (shadow fading).

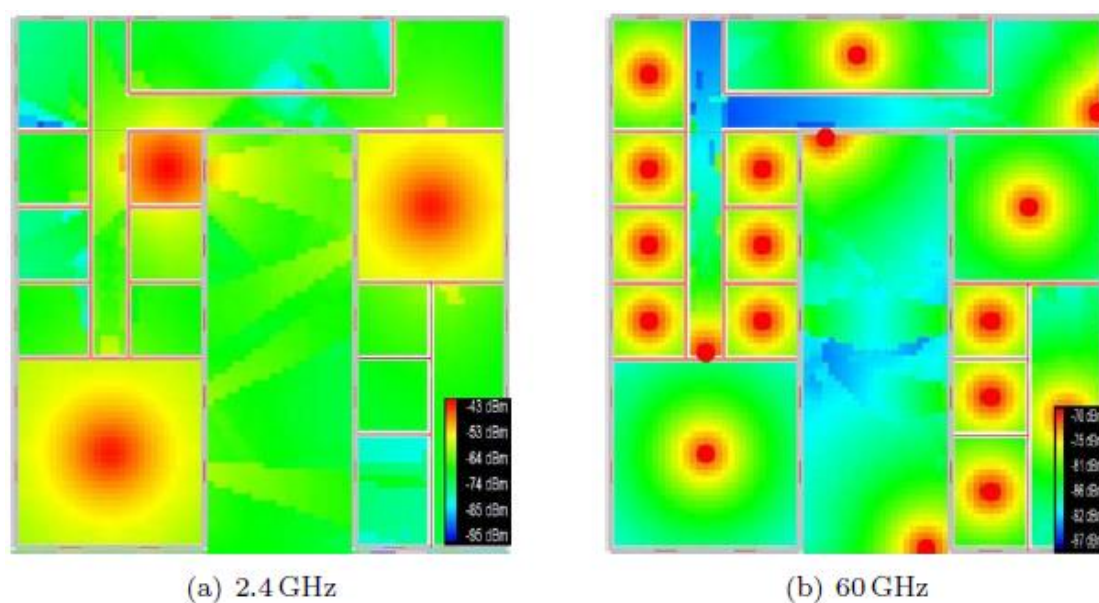
Για τον υπολογισμό της εμβέλειας του καναλιού των 60 GHz θα πρέπει αρχικά η λαμβανόμενη ισχύς να είναι μεγαλύτερη από την ευαισθησία του δέκτη, η οποία ισούται με τον θερμικό θόρυβο N , τις απώλειες σκίασης M και το λόγο σήματος προς θόρυβο SNR . Αυτό περιγράφεται από την εξής σχέση

$$P_r \geq N + M + SNR$$

Συνδυάζοντας τις προηγούμενες εξισώσεις καθώς και τους περιορισμούς στην εκπεμπόμενη ισχύς που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα υπολογίζεται ότι μια κεραία εκπομπής στα 60 GHZ ή ένα access point έχει εμβέλεια περίπου 25μ. Έτσι για να αναπτυχθεί ένα δίκτυο στα 60

GHz, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν αρκετές κεραίες οι οποίες θα λειτουργούν ως access point, κάνοντας το κόστος να είναι μια πρόκληση [17].

Συνοψίζοντας, εξαιτίας των περιορισμών της εκπεμπόμενης ισχύος, του μεγάλου θερμικού θορύβου και της υψηλής απορρόφησης του οξυγόνου, η εμβέλεια της ζώνη των 60GHz είναι μικρή. Επίσης, η διάδοση του σήματος μπορεί εύκολα να παρεμποδιστεί από την κίνηση των ανθρώπων, των επίπλων καθώς και των τοίχων. Αυτό δημιουργεί την ευκαιρία για μερική επαναχρησιμοποίηση των καναλιών. Τα κανάλια σε κλειστούς ή ανοιχτούς χώρους εμφανίζουν πολλαπλή όδευση του σήματος λόγω των ανακλάσεων. Έτσι, η ζώνη των 60 GHz προβλέπεται για χώρους όπου η οπτική επαφή θα είναι εφικτή. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η διαφορά μεταξύ της ζώνης των 2,4 GHz και των 60 GHz για την κάλυψη του ίδιου χώρου.



Εικ.7. Ασύρματη Κάλυψη Χώρου στα a) 2.4 GHz και b) 60 Ghz

3.5. Εφαρμογές

Σύμφωνα με όσο αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες θα παρουσιαστούν συνοπτικά μερικές εφαρμογές οι οποίες θα μπορούν να επωφεληθούν από τα πλεονεκτήματα της ζώνης των 60 GHz.

Ευρυζωνικές ασύρματες επικοινωνίες εσωτερικού χώρου

Ο πολλαπλασιασμός των ψηφιακών μέσων σε όλες τις πτυχές της καθημερινότητας, όπως βίντεο υψηλής ευκρίνειας (HD), ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, φορητές συσκευές αναπαραγωγής μουσικής, σε συνδυασμό με την αύξηση των οικιακών ευρυζωνικών συνδέσεων θα κυριαρχήσουν στην δημιουργία του μελλοντικού ασύρματου οικιακού δικτύου [18]. Το μελλοντικό αυτό ασύρματο δίκτυο θα πρέπει να έχει πολύ υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς. Η ζώνη των 60 GHz μπορεί να το προσφέρει αυτό σε εφαρμογές όπως δίκτυα ad-hoc ή δίκτυα Radio over Fiber (ROF) [19].

Επικοινωνία οχήματος - αυτοκινητόδρομου

Η χρήση ενός συστήματος επικοινωνίας στα 60 GHz θα μπορεί χρησιμεύσει για την επικοινωνία του οχήματος με το δρόμο προσφέροντας στους επιβάτες πληροφορίες για την κίνηση, τυχόν ατυχήματα ακόμα και για βίντεο υψηλής ευκρίνειας και online παιχνίδια. Το σύστημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για επικοινωνία μέσα στο όχημα ή για επικοινωνία με το οχήματος με το περιβάλλον [20].

Σιδηροδρομική επικοινωνία

Σε ένα σύγχρονο σύστημα σιδηροδρομικών μεταφορών είναι ζωτικής σημασίας η αποτελεσματική επικοινωνία των τρενών και του συστήματος ελέγχου της κυκλοφορίας. Οι ανάγκες της εποχής, όμως, έχουν δημιουργήσει και την ανάγκη για την επικοινωνία των επιβατών με τον έξω κόσμο. Το σύστημα θα πρέπει να έχει υψηλές ταχύτητες και μεγάλη πυκνότητα λόγω των πολλών επιβατών. Επίσης απαιτεί μεγάλη ποιότητα της υπηρεσίας (QoS) [21].

Επικοινωνία αεροσκάφους

Η ψυχαγωγία κατά την διάρκεια μιας πτήσης είναι κάτι αρκετά διαδεδομένο στις μέρες μας. Η ανάγκη για την ανάγνωση εφημερίδων, την παρακολούθηση ταινιών καθώς και το παίξιμο βιντεοπαιχνιδιών μεγαλώνει μέρα με την ημέρα, ιδιαίτερα στις πολύωρες πτήσεις. Λόγω της εξαιρετικά υψηλής πυκνότητας χρηστών σε συστήματα ψυχαγωγίας εν πτήση (In-Flight Entertainment, IFE), ο απαιτούμενος ρυθμός δεδομένων θα πρέπει να είναι της τάξης των αρκετών Gbps, τον οποίο δεν μπορούν να παρέχουν τα υφιστάμενα ασύρματα συστήματα. Για την επίτευξη

αυτών των υψηλών ρυθμών δεδομένων, η ζώνη των 60 GHz είναι η καταλληλότερη λόγω των ειδικών πλεονεκτημάτων της [22].

Δορυφορικές ζεύξεις

Η NASA και η ESA έχουν μελετήσει ιδιαίτερα την χρήση της συχνότητας των 60 GHz για ζεύξεις μεταξύ των δορυφόρων. Λόγω ότι οι δορυφόροι βρίσκονται στο διάστημα, τα σήματα υπόκεινται μόνο σε απώλειες διάδοσης ελευθέρου χώρου. Έτσι η ζεύξη στα 60 GHz λειτουργεί καλύτερα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαραγωγή σημάτων μεταξύ των δορυφόρων για την επικοινωνία δύο σταθμών που βρίσκονται στην γη [23].

ΚΕΦ.4: Πομποδέκτες Τεχνολογίας CMOS για τις Ασύρματες Επικοινωνίες στα 60 GHz

4.1. Εισαγωγή

Είναι κοινή πεποίθηση ότι η πολλά υποσχόμενη τεχνολογία των 60 GHz εισήγαγε νέες ευκαιρίες και προοπτικές για πολλές ασύρματες εφαρμογές. Έτσι, ο σχεδιασμός κυκλωμάτων στην χιλιοστομετρική ζώνη επιτυγχάνει αυξανόμενο ενδιαφέρον για συστήματα επικοινωνίας [24]. Παραδοσιακά, οι τεχνολογίες που βασίζονται σε σύνθετους ημιαγωγούς III-V, όπου επιτυγχάνουν μεταβάσεις στην συχνότητα της τάξεως πολλών δεκάδων gigahertz, χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την υλοποίηση κυκλωμάτων στην χιλιοστομετρική ζώνη λόγω των ανώτερων χαρακτηριστικών θορύβου και το χειρισμό ισχύος σε υψηλότερες συχνότητες [25]. Οι τεχνολογίες αυτές προορίζονταν κυρίως για στρατιωτικές εφαρμογές λόγω του πολύ υψηλού κόστους [26]. Επιπλέον, αυτές οι τεχνολογίες παρουσιάζουν χαμηλή απόδοση ισχύος και περιορισμό στην ψηφιακή ένταξη.

Οι εντατικές έρευνες στο σχεδιασμό κυκλωμάτων και συστημάτων στην χιλιοστομετρική ζώνη χαρακτηρίζεται από μια εκτενή έρευνα στην μέγιστης απόδοση με το ελάχιστο κόστος ακολουθώντας τα πρότυπα ασύρματης επικοινωνίας [27]. Η μείωση του κόστους επέρχεται μέσα από την υψηλού επιπέδου ενσωμάτωση των μέγιστων λειτουργιών στο σύστημα ραδιοεπικοινωνίας. Στο πλαίσιο αυτό, η τεχνολογία συμπληρωματικών ημιαγωγών μετάλλου-οξειδίου (CMOS) με βάση το πυρίτιο είναι γενικά το πλέον κατάλληλο για την εφαρμογή αφού το πυρίτιο παραμένει ασύγκριτο τόσο όσον αφορά την ψηφιακή ολοκλήρωση, την παραγωγική ικανότητα και τη συνολική αξιοπιστία του σχεδιασμού και των επιδόσεων.

Σήμερα, χάρη στην μεγάλη πρόοδο της λιθογραφίας, η επεξεργασία CMOS κάτω από τα 130 nm, οδήγησε στην μεγιστοποίηση της συχνότητας λειτουργίας (f_{max}). Η συνεχής πρόοδος της τεχνολογίας CMOS πυριτίου επέτρεψε την εφαρμογή της σε εφαρμογές στην χιλιοστομετρική ζώνη. Η κλιμάκωση των διαστάσεων των τρανζίστορ, μετά από νόμο του Moore [28], έχει την περίεργη ιδιότητα της βελτίωσης του κόστους, της απόδοσης και της κατανάλωσης ενέργειας. Επί του παρόντος, τα τρανζίστορ έγιναν αρκετά μικρά, κατά συνέπεια αρκετά γρήγορα και δείχνουν μια πολύ υψηλή συχνότητα μετάβασης (πάνω από 400 GHz) (Εικ. 4). Ως εκ τούτου, η τεχνολογία CMOS γίνεται η μελλοντική τεχνολογία για την επιλογή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε

εφαρμογές στην χιλιοστομετρική ζώνη λόγω του χαμηλού κόστους κατασκευής και την ευκολία ενσωμάτωσης με ψηφιακά κυκλώματα [29].

Ο σχεδιασμός και η μοντελοποίηση των δομικών στοιχείων ενός πομποδέκτη 60 GHz απαιτεί αρκετές προκλήσεις και τάσεις. Στην πραγματικότητα, η σχεδίαση κυκλωμάτων CMOS στην χιλιοστομετρική ζώνη μπορεί να χαρακτηριστεί από δύο παράγοντες: τα περιβάλλοντα προσομοίωσης και τις σχετικές τεχνικές. Ως παράδειγμα, οι σχεδιαστές αναλογικών RF κυκλωμάτων προτιμούν να χρησιμοποιούν πηνία αντί γραμμών μεταφοράς, οι οποίες χρησιμοποιούνται από τους σχεδιαστές μικροκυμάτων [30]. Πράγματι, αυτές οι επιλογές μπορούν να έχουν αντίκτυπο στην διάταξη, δεδομένου ότι οι γραμμές μεταφοράς καταναλώνουν μια μεγάλη περιοχή, ενώ τα σπειροειδή πηνία καταλαμβάνουν γενικά μια μικρότερη περιοχή [31].

Επιπλέον, σε συχνότητες στην χιλιοστομετρική ζώνη, ο σχεδιασμός των ενεργητικών και παθητικών συσκευών και διασυνδέσεων γίνεται πιο περίπλοκος, δεδομένου ότι οι συνέπειες των παρασιτικών στοιχείων δεν μπορούν να αγνοηθούν, διαφορετικά θα προκύψει μεγάλη διαφορά ανάμεσα των αποτελεσμάτων προσομοίωσης και των αποτελεσμάτων μέτρησης [32]. Κατά συνέπεια, η ακριβής μοντελοποίηση των ενεργητικών και παθητικών συσκευών θεωρείται συνήθως ως προϋπόθεση της επιτυχίας του σχεδιασμού σε κυκλώματα στην χιλιοστομετρική ζώνη [33].

4.2. Ανάλυση Δομικών Στοιχείων

Αυτή η ενότητα περιγράφει τους σχεδιαστικούς συμβιβασμούς των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων CMOS με βάση το state-of-the-art. Η μελέτη θα επικεντρωθεί σε τρία από τα πιο κρίσιμα δομικά στοιχεία: LNA (Ενισχυτής χαμηλού θορύβου), Mixer και VCO (Voltage-Controlled-ταλαντωτής) που χρησιμοποιείται ως LO (Local Oscillator).

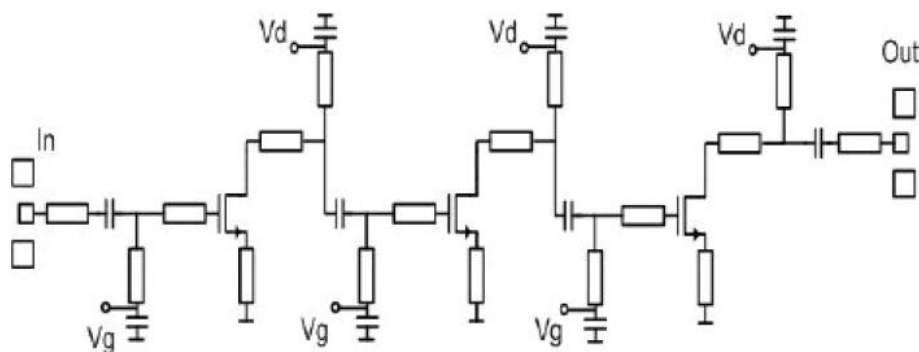
4.2.1. LNA

Ο ενισχυτής χαμηλού θορύβου (Low Noise Amplifier, LNA) είναι το πλέον κρίσιμο δομικό στοιχείο στον πομποδέκτη, δεδομένου ότι φέρει την απόδοση θορύβου του δέκτη σύμφωνα με τον τύπο του Friis [34].

Πράγματι, το πρώτο στάδιο ενός LNA υποστηρίζει την εικόνα θορύβου του δέκτη. Εκτός από την χαμηλή εικόνα θορύβου κύριοι παράμετροι ενός υψηλής απόδοσης LNA είναι η υψηλή απολαβή, η καλή απομόνωση, το μεγάλο εύρος ζώνης και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

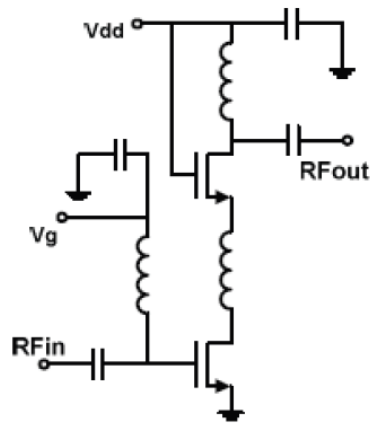
Στη βιβλιογραφία, υπάρχουν αρκετές αναφορές στον σχεδιασμό CMOS LNA στη ζώνη των 60 GHz. Το σχέδιο που παρουσίασαν οι Doan et al το 2005 είναι το πρώτο για ενισχυτή CMOS στα 60 GHz, όμως αυτό το σχέδιο είναι περισσότερο ένας ενισχυτής γενικής χρήσης παρά ένας LNA [35].

Ένας LNA τριών-σταδίων κοινής πηγής αναφέρεται από τους Kai Kang et al. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το σχηματικό αυτού του LNA (Εικ. 8). Το μέγεθος των MOSFETs είναι $32 \times 1 \mu\text{m} \times 90\text{nm}$. Το πλάτος των γραμμών μικροταινίας είναι είτε $5 \mu\text{m}$ ή $9 \mu\text{m}$ και $V_D = 1,2 \text{ V}$. Αυτό το σχέδιο υλοποιείται σε 90 nm CMOS και επιτυγχάνει ένα κέρδος 18,6 dB και επίπεδο θορύβου 5,7 στα 57 GHz. Ωστόσο, καταναλώνει 24 mA από μια τάση 1,2 V τροφοδοσίας (Kai Kang et al., 2010).



Εικ. 8. Low Noise Amplifier τριών-σταδίων Κοινής Πηγής

Η τοπολογία cascode αντιπροσωπεύει την πιο διαδεδομένη λύση κυκλωμάτων για την υλοποίηση LNA σταθερούς και με υψηλή απολαβή. Ωστόσο, για την επίτευξη υψηλών επιδόσεων σε cascode LNA χρειάζεται μια νέα τεχνική κυκλωμάτων. Μία λύση είναι οι τοπολογίες interstage matching. Οι Tao et al παρεμβάλλουν ένα πηνίο σε σειρά μεταξύ της κοινής πύλης και της κοινής πηγής πηγής. Η τοπολογία αυτή απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα (Εικ.9) όπου φαίνεται το σχέδιο ενός μονού-σταδίου ενισχυτή χαμηλού θορύβου που λειτουργεί στην περιοχή των 57-64 GHz. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις που έγιναν το κέρδος τάσης είναι ίση με 18,7 dB και η εικόνα θορύβου 4,2 dB, ενώ η DC ισχύς είναι ίση με 4,9 mW [36].



Εικ. 9. Τοπολογία Cascode μονού-σταδίου LNA

4.2.2. Μίκτης

Ο μετατροπέας συχνότητας (μίκτης) είναι ένα βασικό συστατικό στους ασύρματους πομποδέκτες για τη μετάφραση της συχνότητας, ο οποίος απαιτεί υψηλό κέρδος μετατροπής, χαμηλό συντελεστή θορύβου, και υψηλή γραμμικότητα. Πολλές μελέτες έχουν γίνει σχετικά με την αρχιτεκτονική τους στην χιλιοστομετρική ζώνη και ιδιαίτερα για WPAN εφαρμογές.

Σύμφωνα με τους Motlagh et al, οι αντιστατικοί μίκτες μίξερ δείχνουν μια υψηλή γραμμικότητα, ανώτερες ιδιότητες ενδοδιαμόρφωσης και ουσιαστικά μηδενική κατανάλωση ενέργειας. Πράγματι, η απόδοση των αντιστατικών μικτών παραμένει ανεπηρέαστη από τη χαμηλή τάση τροφοδοσίας επιτρέποντας την περεταίρω σμίκρυνση τους, κάτω του μικρομέτρου, στην τεχνολογία CMOS [37]. Ωστόσο, αυτοί οι μίκτες έχουν απώλεια στην μετατροπή αντί για κέρδος [37].

Η αρχιτεκτονική bulk-driven (οδήγησης τρανζίστορ από το υπόστρωμα), σύμφωνα με τους Wang & Tsai, που χρησιμοποιεί το τρανζίστορ ως συσκευή τεσσάρων τερματικών μπορεί να παρέχει χαμηλής τάσης και χαμηλής ισχύος για το σχεδιασμό μικτών [39]. Ένας bulk-driven μίκτης έχει σχεδιαστεί χρησιμοποιώντας τεχνολογία CMOS στα 130 nm [39]. Παρά το ότι έχει υψηλή εικόνα θορύβου ίση με 23 dB, αυτός ο μίκτης παρουσιάζει ένα κέρδος μετατροπής 1 dB και κατανάλωση ισχύος 3 mW στα 60 GHz.

Σύμφωνα με τον Razavi, ένας παθητικός μίκτης στην χιλιοστομετρική ζώνη ακολουθούμενος από έναν ενισχυτή IF μπορεί να φτάσει περίπου το ίδιο ποσοστό του θορύβου και το κέρδος μετατροπής, όπως μια ενεργή τοπολογία κάνει [38]. Ωστόσο, το πρόβλημα του

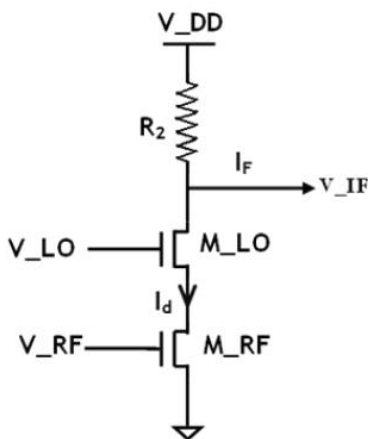
παθητικού μίκτη είναι η μικρότερη αντίσταση εισόδου από ό,τι του ενεργού μίκτη, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα τη δύσκολη τροφοδότηση του LNA [40].

Το 2007 οι Tsai et al. παρουσίασαν έναν μίκτη Gilbert-cell down-conversion που λειτουργεί στα 60 GHz [41]. Αυτός ο μίκτης έδειξε καλή απομόνωση μεταξύ RF και LO συνδεδεμένη με υψηλή κατανάλωση ρεύματος με αποτέλεσμα να κριθεί ακατάλληλος για εφαρμογές χαμηλής ισχύος και τάσης [39].

Σε αντίθεση, οι διπλά ισορροπημένοι μίκτες εμφανίζουν χαμηλή τάση τροφοδοσίας και χαμηλή κατανάλωση ρεύματος, κατά τους Lien et al [42]. Τα πλεονεκτήματά τους είναι η χαμηλή ισχύς LO, η χαμηλή εικόνα θορύβου και το υψηλό κέρδος μετατροπής, και έχουν καλύτερη απομονώσεις από τους μίκτες μονής ισορρόπησης.

Το σχέδιο του Emami παρουσιάζει έναν quadrature μίκτη μονής πύλης στα 60 GHz εφαρμοσμένο στην τεχνολογία CMOS στα 130nm [43]. Αυτό το σχέδιο μπορεί να θεωρηθεί ως η πρώτη υλοποίηση μίκτη στο εύρος των 60 GHz. Αυτός ο μίκτης εμφανίζει απώλεια μετατροπής μικρότερη των 2 dB και η επιστρεφόμενη απώλεια στο RF και LO είναι μεγαλύτερη από 15 dB, ενώ καταναλώνει 2.4 mW.

Ως εναλλακτική επιλογή στις παραπάνω τοπολογίες μπορεί να θεωρηθεί η τοπολογία που παρουσίασαν το 2009 οι El Oualkadi et al. Παρουσίασαν έναν μίκτη MOSFET διπλής πύλης [44]. Στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 10) φαίνεται η αρχιτεκτονική αυτού του μίκτη. Το σήμα RF σήμα εφαρμόζεται στην πύλη του τρανζίστορ M_RF και το σήμα LO εφαρμόζεται στην πύλη του δευτέρου τρανσίστορ M_LO.



Εικ. 10. Μίκτης MOSFET διπλής πύλης

Η αρχιτεκτονική του μίκτη αποτελείται από δύο τρανζίστορ σε cascade. Το πλεονέκτημα της τοπολογίας cascode είναι ότι επιτρέπει την είσοδο RF και το σήμα LO να τροφοδοτούνται σε δύο διαφορετικές πύλες MOSFET, αποφεύγοντας την ανάγκη για συνδυαστές ισχύος.

Ο μίκτης MOSFET διπλής πύλης των 60 GHz έχει σχεδιαστεί και βελτιστοποιηθεί σε τεχνολογία CMOS στα 65 nm [44]. Ο μίκτης δείχνει ένα κατάλληλο κέρδος μετατροπής θεωρώντας ότι η τάση τροφοδοσίας δεν υπερβαίνει τα 1,2 V με την κατανάλωση ενέργειας των 8,5 mW.

Ο Πίνακας συγκρίνει όλες τις τοπολογίες που αναφέρθηκαν. Συνοψίζοντας, ο μίκτης MOSFET διπλής πύλης παρουσιάζει ένα καλό συμβιβασμό μεταξύ της απλότητας και των καλών επιδόσεων.

	(Emami et al., 2005)	(Lai et al., 2006)	(Wang & Tsai, 2009)	(El Oualkadi et al, 2009)	(Lien et al., 2010)
Approach	Single-gate	Cascode	Bulk-driven	Dual-gate	Double-balanced
Process	130nm CMOS	90nm CMOS	130nm CMOS	65nm CMOS	130nm CMOS
Freq (GHz)	54-61	60	51-61	60	
Conversion Gain (dB)	-1 @ 60 GHz	-1.2	1 @ 60 GHz	0.4	-3~0
Input P _{1dB} (dBm)	-3.5	0.2	-19	1.264	-8
Supply Voltage (V)	1.2	-	1	1.2	-
Power consumption (mW)	2.4	29.4	3	8.5	14

Πίν. 2. Σύγκριση state-of-the-art Μικτών

4.2.3. Ταλαντωτής

Ο ελεγχόμενος ταλαντωτής από τάση (Voltage-Controlled Oscillator, VCO) είναι ένα κύκλωμα που δημιουργεί μια τετραγωνική ή τριγωνική κυματομορφή της οποίας η περίοδος, άρα και συχνότητα, ρυθμίζεται από μια DC τάση (ελέγχου).

Ένα ακόμα βασικό δομικό στοιχείο ραδιοφωνικού πομποδέκτη είναι ο ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση που χρησιμοποιείται ως τοπικό ταλαντωτή LO για τη διασφάλιση της διαμόρφωσης/αποδιαμόρφωσης.

Σύμφωνα με τον Regimbal, μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν στο σχεδιασμό των ολοκληρωμένων πομποδέκτες στα 60 GHz είναι η εφαρμογή των VCO στην τεχνολογία CMOS [45].

Πράγματι, οι περιορισμένες ταχύτητες των τρανζίστορ και οι μακριές διασυνδέσεις προκαλούν κάποια κρίσιμα ζητήματα που σχετίζονται με την παραγωγή των φάσεων I και Q του LO στα 60 GHz. Σύμφωνα με τον Razani, η ορθογώνια λειτουργία (quadrature) υποβαθμίζει το θόρυβο φάσης σημαντικά [45]. Επίσης, η διαίρεση της συχνότητας LO θέτει ένα πρόβλημα, δεδομένου ότι ο σχεδιασμός διαιρετών υψηλής ταχύτητας απαιτούν πολλές προκλήσεις στα 60 GHz [38].

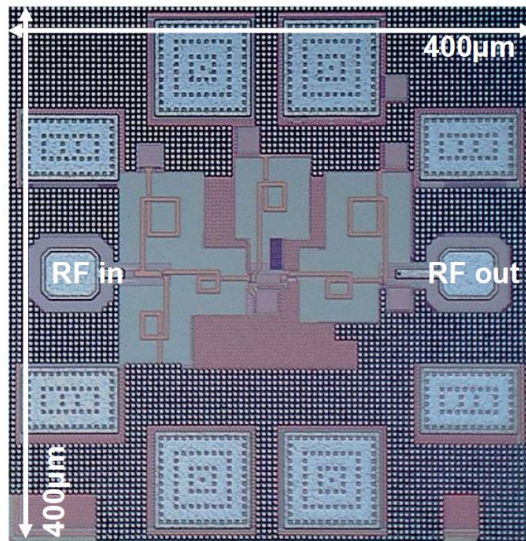
Εκτός από αυτές τις προκλήσεις, μια σειρά από απαιτητικές επιδόσεις πρέπει να πληρούνται για να κάνει έναν VCO κατάλληλο για εφαρμογές WPAN στα 60 GHz. Η απαίτηση για χαμηλό θόρυβο φάσης είναι η πιο σημαντική, ώστε να αποφευχθεί η καταστροφή σήματος από παρεμβολές. Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και η ορθότητα είναι επίσης δύο σημαντικές πτυχές που καθορίζουν την απόδοση ενός VCO [47].

Οι ταλαντωτές δακτυλίου και τα παθητικά δίκτυα RC-CR είναι δύο από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες λύσεις για την παραγωγή quadrature. Οι ταλαντωτές δακτυλίου χρησιμοποιούνται ευρέως για ψηφιακές εφαρμογές, αντιθέτως, τα παθητικά δίκτυα υποφέρουν από μεγάλες απώλειες και ανακρίβεια. Οι LC ταλαντωτές διασταυρωμένης σύζευξης (cross-coupled oscillators) και οι ταλαντωτές Colpitts είναι οι πλέον κατάλληλοι για εφαρμογές RF και στην χιλιοστομετρική ζώνη λόγω της εξαιρετικής απόδοσης του θορύβου φάσης [48]. Ωστόσο σύμφωνα με τον Liang, η χρήση αρκετών επαγωγικών πηνίων στους LC VCO οδηγεί σε δυσκολίες στη διάταξη. Πράγματι, η απώλεια του υποστρώματος επηρεάζει άμεσα τις παραμέτρους ποιότητας των επαγωγικών πηνίων και των varactors στην χιλιοστομετρική ζώνη [33]. Ως εκ τούτου, οι συμβιβασμοί μεταξύ του θορύβου φάσης, το εύρος ρύθμισης, και την κατανάλωση ισχύος γίνονται πολύ πιο σοβαροί [38].

Ένα παράδειγμα ενός LC VCO βασισμένο σε cross-coupled τοπολογία προτείνεται από τον Borremans [50]. Αυτό το σχέδιο υλοποιείται στα 130 nm CMOS και παρουσιάζει ενδιαφέροντες επιδόσεις στα 60 GHz. Ο μετρούμενος θόρυβος φάσης είναι κάτω από -90 dBc/Hz με κατανάλωση ισχύος ίση με 3,9 MW στο 1 V. Αυτές οι επιδόσεις μπορούν να επιτρέψουν αυτόν τον VCO να είναι μια ενδιαφέρουσα λύση για εφαρμογές WPAN.

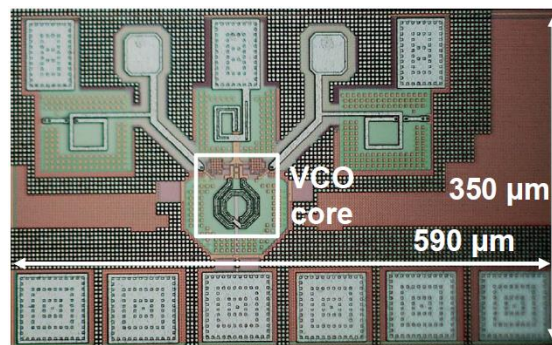
Εικ. 11. VCO με τοπολογία injection-coupled

Οι μετρήσεις δείχνουν ένα εύρος ρύθμισης των 5.6 GHz (57,5 - 63,1 GHz), θόρυβο φάσης ίσο με -95,3 dBc / Hz σε συχνότητα offset 1 MHz και την κατανάλωση ενέργειας στα 36 mW. Παρά τις πρόσθετες προκλήσεις και τους περιορισμούς που επιβάλλονται από την quadrature τοπολογία, οι επιδόσεις είναι συγκρίσιμες με την τεχνολογία αιχμής ενός μονοφασικού VCO.



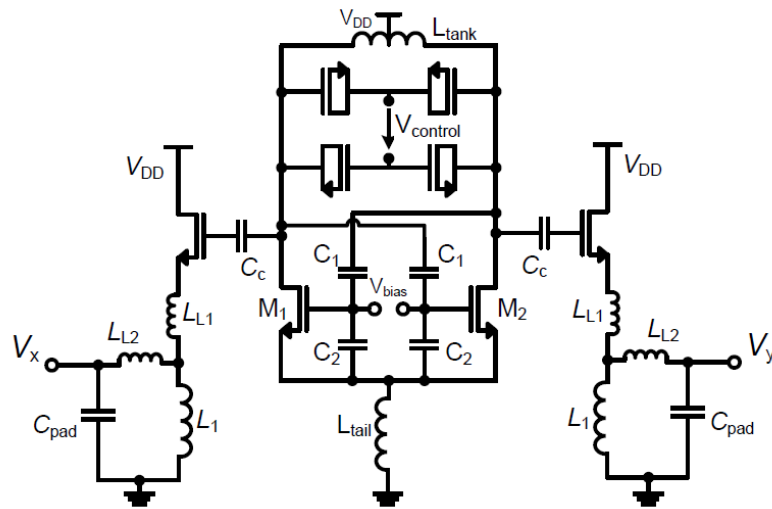
Εικ. 13. Τυπωμένο Κύκλωμα LNA

Ο VCO που χρησιμοποιήθηκε επιτυγχάνει αποδοτικότητα της τάξεως των 4,9% σε εύρος ζώνης από 57.58 GHz to 60.80 GHz.. Η κατανάλωση του ανέρχεται στα 16,5 mW, ενώ καταλαμβάνει $0,35 \times 0,59 \text{ mm}^2$.



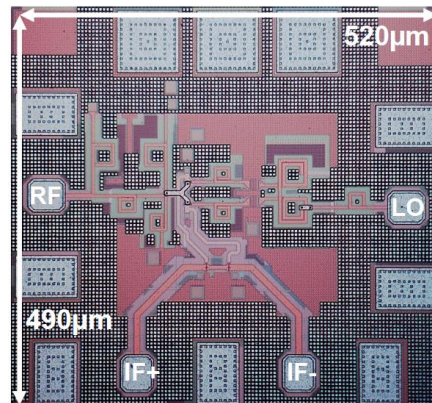
Εικ. 14. Τυπωμένο Κύκλωμα VCO

Ο ελάχιστος θόρυβος φάσης ανέρχεται στα -90,3 dBc/Hz με μετατόπιση (offset) 1 MHz με φέρον στα 60,77 GHz. Σε αυτή την διάταξη εφαρμόστηκε για πρώτη φορά αρχιτεκτονική Colpitts κοινής πηγής στα 60 GHz [53].



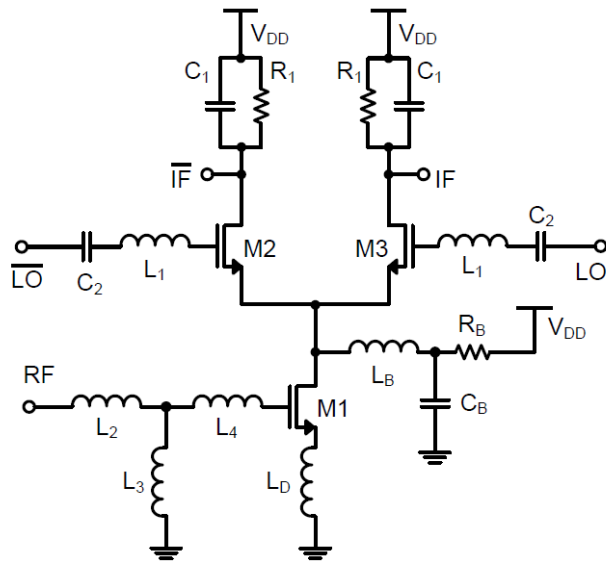
Εικ. 16. Κύκλωμα VCO

Για το κύκλωμα του down-conversion μίκτη επιλέχθηκε ένας μίκτης υψηλής απολαβής με τις λιγότερες απαιτήσεις για ενέργεια. Οι διαστάσεις του είναι $0,49 \times 0,52 \text{ mm}^2$, ενώ το μεγαλύτερο κέρδος είναι 9,1 dB [54].



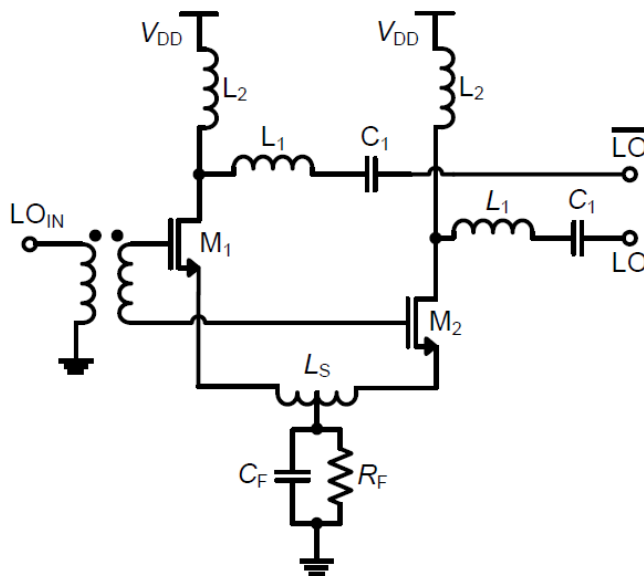
Εικ. 17. Τυπωμένο Κύκλωμα down-conversion Μίκτη

Το κύκλωμα καταναλώνει 16,8 mA με τροφοδοσία 1 V, με μόνο το 2,8 mW να είναι από τους πυρήνες του μίκτη. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το απλοποιημένο σχέδιο του κυκλώματος (Εικ. 18).



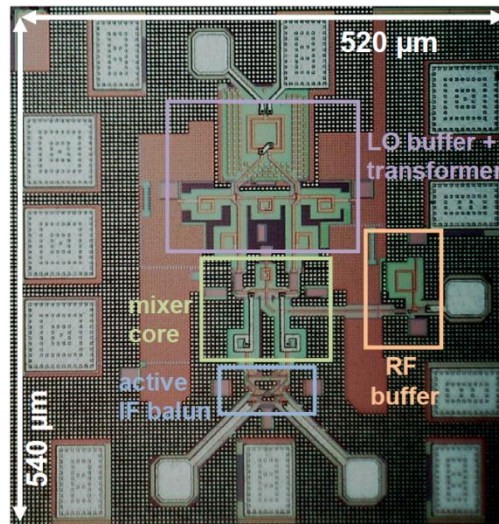
Εικ. 18. Κύκλωμα down-conversion Μίκτη

Το κύκλωμα του up-conversion μίκτη ενδιάμεσης συχνότητας (Intermediate Frequency, IF) είναι η πρώτη υλοποίηση στα 60 GHz με χρησιμοποίηση κυκλώματος διπλής πύλης.



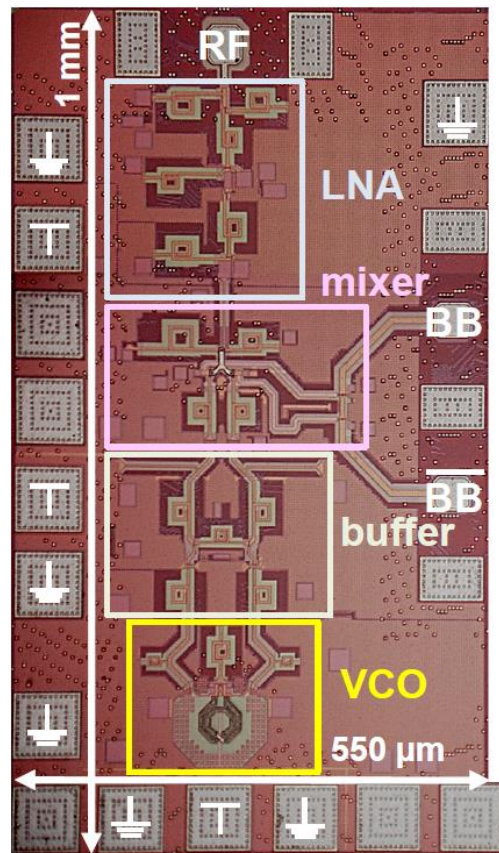
Εικ. 19. Κύκλωμα up-conversion IF Μίκτη

Ο μίκτης έχει μέγιστη απολαβή μετατροπής -2,4 dB και η μέγιστη κατανάλωση του είναι 23 mW. Επίσης, ο μίκτης θεωρείται state-of-the-art για την απόδοση του λόγω των διαστάσεων του, που είναι $0,52 \times 0,54 \text{ mm}^2$.



Εικ. 20. Τυπωμένο Κύκλωμα up-conversion IF Μίκτη

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα του ασύρματου δέκτη στα 60 GHz που παρουσίασε ο Kraemer φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 21), χρησιμοποιώντας τα στοιχεία που αναλύθηκαν παραπάνω.

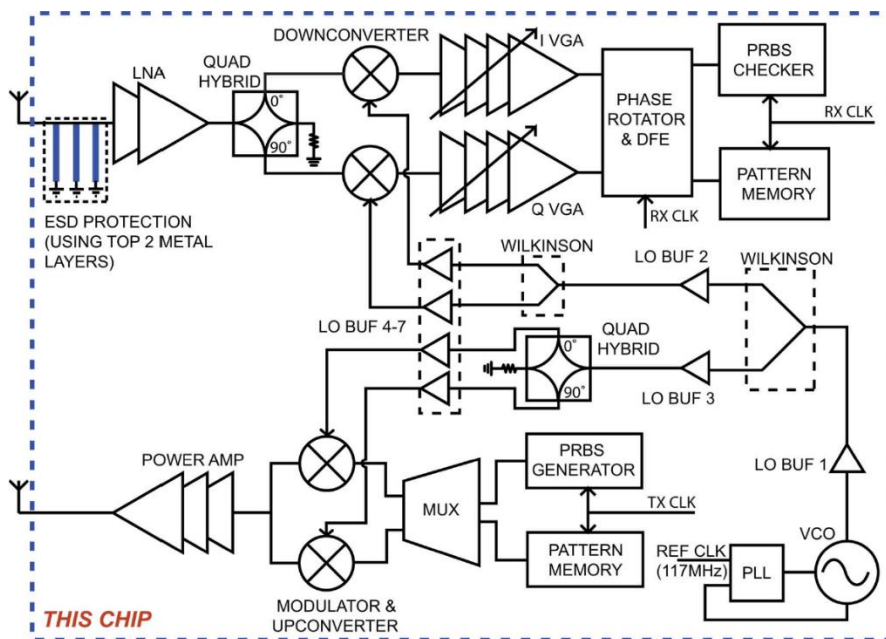


Εικ. 21. Ολοκληρωμένος Πομποδέκτης στα 65nm

Συνοψίζοντας, το κύκλωμα του Kraemer στα 65 nm, καθώς και η μελέτη που έχει κάνει, αποτελεί μια χαμηλής ισχύος, μικρού μεγέθους και κατά συνέπεια χαμηλού κόστους υλοποίηση, όπως ακριβώς απαιτείται από τις εφαρμογές στα 60 GHz. Επίσης σαν μελλοντικό έργο είναι η υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου πομποδέκτη στα 60 GHz.

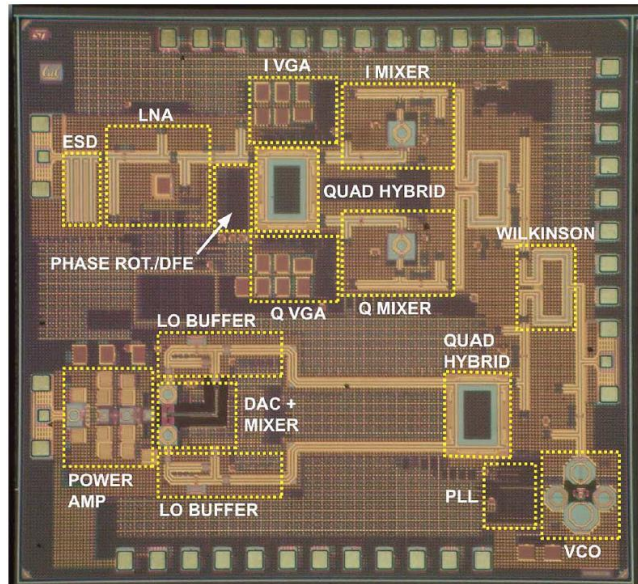
4.3.2. Πομποδέκτης CMOS στα 90 nm

Οι Marcu κ.α παρουσίασαν τον πρώτο ολοκληρωμένο πομποδέκτη με ενσωματωμένο κύκλωμα βασικής ζώνης (baseband) [55]. Ο σχεδιασμός άμεσης μετατροπής (direct conversion) στα 90 nm (Εικ. 22) περιλαμβάνει τις RF και baseband (BB) διαδρομές του σήματος, καθώς και ένα ολοκληρωμένο βρόχο κλειδωμένης φάσης (phase-locked loop, PLL) και το δίκτυο διανομής LO. Ο πομποδέκτης περιλαμβάνει επίσης το κύκλωμα βασικής ζώνης χρησιμοποιώντας τεχνικές μικτού σήματος, παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται σε υψηλής ταχύτητας ηλεκτρικές συνδέσεις, ώστε να μεγιστοποιηθεί η ενεργειακή απόδοση.



Εικ. 22. Μπλοκ Διάγραμμα Πομποδέκτη

Ο πομποδέκτης κατασκευάστηκε στα 90 nm CMOS και οι διαστάσεις του είναι 2,5*2,75 mm². Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το ολοκληρωμένο κύκλωμα.



Εικ. 23. Ολοκληρωμένος Πομποδέκτης στα 90nm

Κατά την διάρκεια των δοκιμών ο μέγιστος ρυθμός που επιτεύχθηκε στην ασύρματη ζεύξη είναι 4 Gb/s. Η απόσταση της ζεύξης ήταν 1μ και χρησιμοποιήθηκαν κεραίες με κέρδος 25 dBi. Το κύκλωμα σχεδιάστηκε με γνώμονα την ενεργειακή απόδοση. Οι τεχνικές μικτού σήματος που χρησιμοποιήθηκαν δημιούργησαν μια διαδρομή του baseband δέκτη που καταναλώνει 12 mW στα 5 GS/s. Στον πομπό, η σχεδίαση με κωνικά τρανζίστορ στον ενισχυτή ισχύος παρέχουν σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε προστασία από την ηλεκτροστατική εκκένωση (Electrostatic Discharge, ESD) και προστέθηκε απώλεια στον δέκτη 0,7 dB. Συνοψίζοντας, ο πομποδέκτης λειτουργεί με τάση τροφοδοσίας 1,2 V και καταναλώνει 170 mW κατά την διάρκεια της εκπομπής και 138 mW κατά την διάρκεια της λήψης [55]. Αναλυτικά η ισχύς που καταναλώνεται ανά στοιχείο του κυκλώματος φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίν. 3).

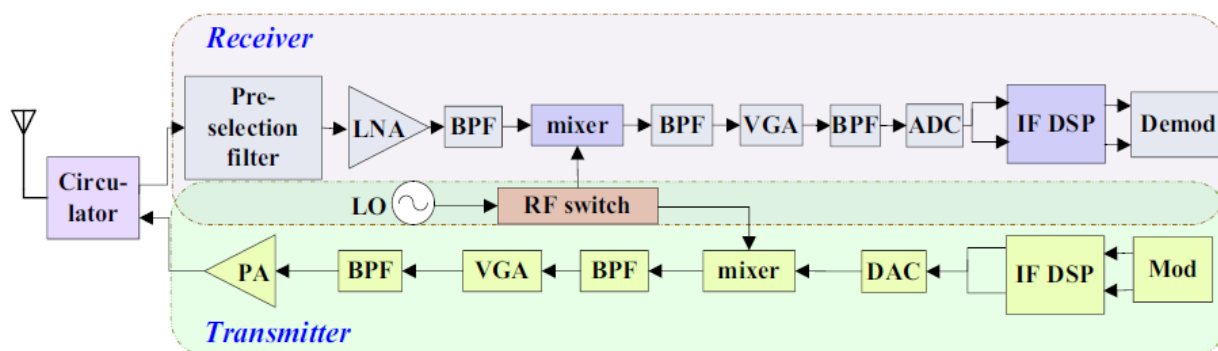
Block	Power (mW)	Block	Power (mW)
LNA	18	TX DAC/Mixer	19.2
Mixers	15.6	PA	82.2
VGAs	23	VCO	9.8
DFE and Phase Rotator	12	Dividers	17.3
VCO	9.8	LO Buffers	36
Dividers	17.3	Bias and Clock Dist.	5
LO Buffers	36	TOTAL TX	169.5
Bias and Clock Dist.	6.3		
TOTAL RX	138.3		

Πίν 3. Κατανάλωση Κυκλώματος

4.3.3. Πομποδέκτης για Συστήματα ROF

Οι Zhang κ.α. παρουσίασαν ένα κύκλωμα πομποδέκτη για συστήματα Radio over Fiber (ROF) [56]. Ένα σύστημα ROF χρησιμοποιεί οπτικές ίνες για να πετύχει υψηλό εύρος ζώνης, χαμηλές απώλειες για απομακρυσμένη επικοινωνία και με την χρήση του χιλιοστομετρικού κύματος μπορεί να πετύχει ταχύτητες της τάξεως των Gbps. Για τα συστήματα ROF θα γίνει ανάλυση σε επόμενο κεφάλαιο. Ο πομπός και ο δέκτης των συστημάτων RoF είναι ένα σημαντικό μέρος του συστήματος πρόσβασης ευρείας ζώνης.

Ο πομποδέκτης που παρουσίασαν οι Zhang κ.α αποτελεί μία νέα προσέγγιση για τα ROF συστήματα. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το μπλοκ διάγραμμα του κυκλώματος (Εικ. 24).



Εικ. 24. Μπλοκ Διάγραμμα Πομποδέκτη για Συστήματα ROF

Στην ανάλυση που έγινε το σενάριο περιλαμβάνει την ασύρματη λήψη ενός σήματος στα 60 GHz και περιέχει δεδομένα προς τον σταθμού βάσης. Το λαμβανόμενο σήμα περνά μέσω ενός κυκλοφορητή στο δέκτη. Στον δέκτη το σήμα περνάει από ένα φίλτρο προεπιλογής για να αφαιρέσει το θόρυβο από το ασύρματο κανάλι. Στη συνέχεια, περνάει μέσω ενός ενισχυτή χαμηλού θορύβου (LNA) για την ενίσχυση των λαμβανόμενων σημάτων και από ένα ζωνοπερατό φίλτρο για να αφαιρέσει το θόρυβο από την ενίσχυση. Στην συνέχεια, μετατρέπεται σε αναλογικά σήματα IF στον μίκτη. Ο LO μετατρέπει την συχνότητα προς τα κάτω (down-convert) ή προς τα πάνω (up-convert) για τον δέκτη ή τον πομπό. Το σήμα, στην συνέχεια, περνάει από ένα ζωνοπερατό φίλτρο, ένα ενισχυτή μεταβλητού κέρδους (variable gain amplifier, VGA) για να κερδίσει τη ισχύ των σημάτων IF, και ένα ζωνοπερατό φίλτρο για το φιλτράρισμα του θορύβου από τον ενισχυτή, μετατρέπεται από αναλογικό IF σήμα σε ψηφιακό με την χρήση ενός μετατροπέα (analog to digital converter, ADC). Στη συνέχεια, με την ψηφιακή επεξεργασία σήματος, δημιουργούνται δύο ορθογώνια σήματα. Με την αποδιαμόρφωση, ανακτώνται τα δεδομένα [56]. Για την αποστολή σήματος από τον σταθμό βάσης ασύρματα, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, απλά αντιστρέφεται η διαδικασία (Εικ. 24).

Το κύκλωμα που παρουσιάστηκε δεν υλοποιήθηκε σε ολοκληρωμένο κύκλωμα. Έγιναν προσομοιώσεις, όμως, και τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίν. 4).

Specification	This work
RF frequency (GHz)	60
LO frequency (GHz)	29.25
CG (dB)	> -15.2
LO leakage to input (dB)	> 20
NF	6.83
Power dissipation (mW)	8.6

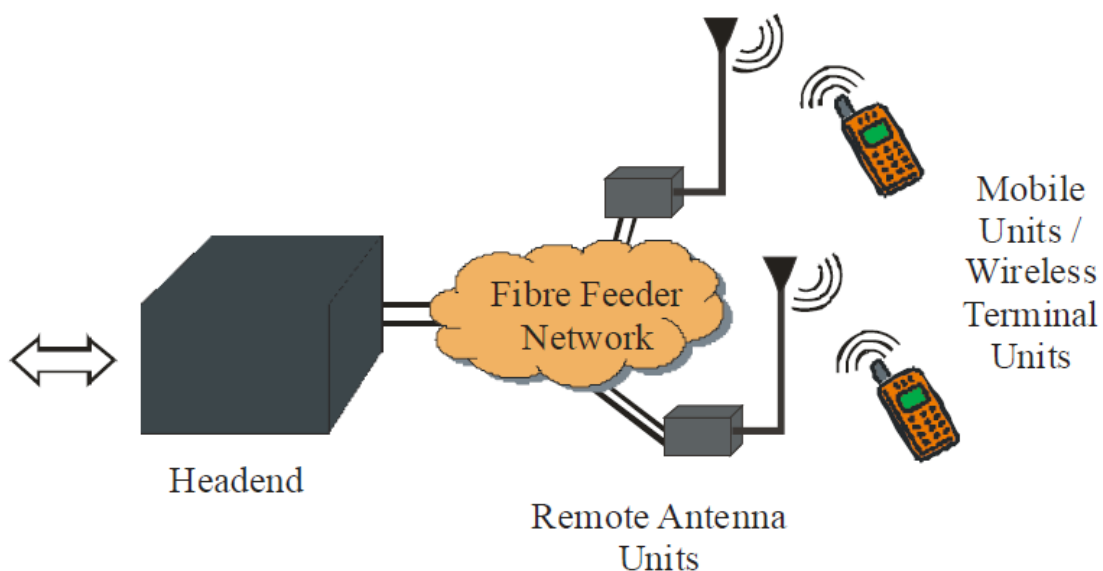
Πίν. 4. Απόδοση Πομποδέκτη

ΚΕΦ.5: Συστήματα Radio-over-Fiber

5.1. Τι είναι το ROF;

Το ROF αναφέρεται στην τεχνολογία όπου τον φως διαμορφώνεται από ένα RF σήμα και διανέμεται μέσα από ένα δίκτυο οπτικών ινών ώστε να διευκολύνει την ασύρματη πρόσβαση μέσω της ίδιας κεραίας. Αυτό σημαίνει ότι μία κεραία μπορεί να λάβει και να στείλει ταυτόχρονα διαφορετικά ραδιοσήματα, όπως Wi-Fi, 3G κα.

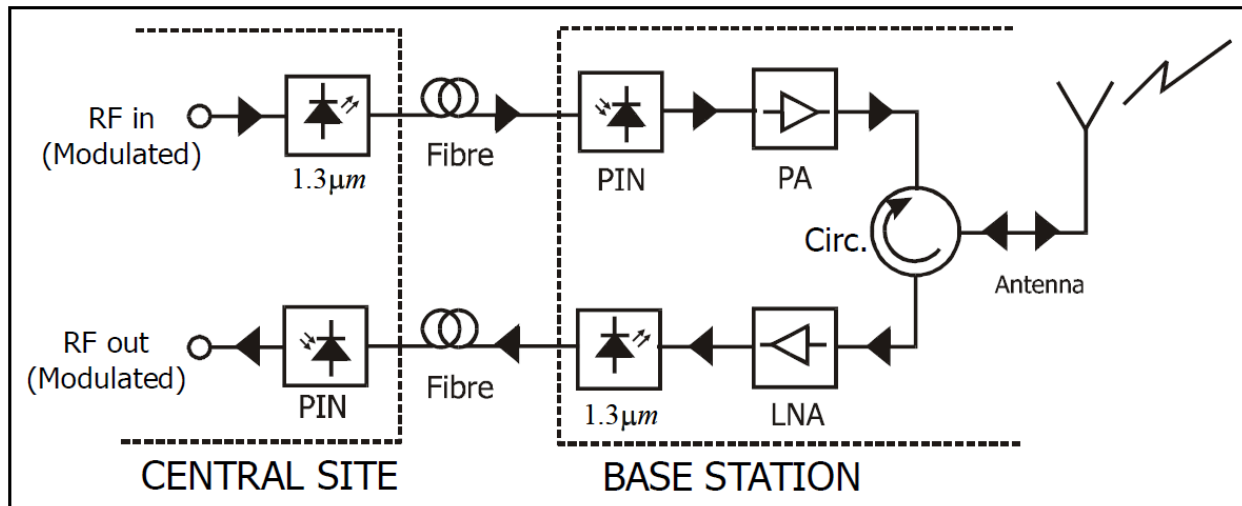
Το ROF περιλαμβάνει τη χρήση οπτικών ινών για την μεταφορά και διανομή RF σημάτων από ένα κεντρικό σταθμό στα συστήματα κεραιών, τα οποία ονομάζονται RAU (Remote Antenna Units). Η βασική δομή ενός ROF φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 25) [57].



Εικ. 25. Βασική Δομή ROF

Η χρήση οπτικών ινών προσφέρει πολύ μικρές απώλειες διάδοσης της τάξεων των 0,2 dB/km έως 0,5 dB/km. Σε αντίθεση με τα συστήματα επικοινωνιών στενής ζώνης (narrowband), όπου η επεξεργασία των σημάτων (διαμόρφωση, πολυπλεξία, κα) γίνεται στους σταθμούς βάσης (Base Stations, BS) ή στα AP, στα ROF συστήματα η επεξεργασία γίνεται στον κεντρικό σταθμό (Central Station, CS) και έπειτα διαμοιράζονται στα αντίστοιχα RAU μέσω οπτικών ινών. Με τον τρόπο αυτό, τα RAU απλοποιούνται και το μόνο που κάνουν είναι η μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό και λειτουργίες ενίσχυσης. Η βασική αυτή λειτουργία φαίνεται και στην επόμενη εικόνα (Εικ. 26). Αποτελεί την πιο απλή υλοποίηση ενός ROF συστήματος και έχει

χρησιμοποιηθεί σε σύστημα διανομής σημάτων GSM. Σε αυτό το σύστημα, το RF σήμα οδηγείται απευθείας στην δίοδο laser, όπου και την διαμορφώνει. Στην συνέχεια στέλνεται μέσω οπτικής ίνας στο RAU. Στο RAU το σήμα ανακτάται μέσω φωτοδιόδου και εκπέμπεται από την κεραία. Το ίδιο συμβαίνει και κατά την διαδικασία της λήψης σήματος, όπου το σήμα εκπέμπεται από την κινητή συσκευή στο RAU και αυτό στέλνεται στον κεντρικό σταθμό. Το τελικώς παραγόμενο σήμα και από το RAU προς την κινητή συσκευή και ανάποδα θα πρέπει να συμφωνεί με κάποιο πρωτόκολλο επικοινωνίας (WLAN, WiMAX, GSM, κλπ.) [57].



Εικ. 26. Σύστημα ROF στα 900 MHz

5.2. Πλεονεκτήματα

Τα συστήματα RoF προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι του κλασσικού τρόπου μετάδοσης πληροφορίας, από τα οποία μερικά παρουσιάζονται παρακάτω.

5.2.1. Απώλειες μετάδοσης

Η μετάδοση μικροκυματικών σημάτων υψηλής συχνότητας είναι προβληματική και δαπανηρή, είτε πρόκειται μετάδοση στον αέρα είτε με γραμμές μεταφοράς [60]. Στην μετάδοση στον αέρα οι απώλειες απορρόφησης και ανάκλασης αυξάνονται δραματικά με την συχνότητα. Αντίστοιχα και στις γραμμές μεταφοράς, η σύνθετη αντίσταση αυξάνεται με την συχνότητα, δημιουργώντας μεγάλες απώλειες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να χρειάζεται ακριβός εξοπλισμός και χρήση αναμεταδοτών για την μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις [57]. Εκτός αυτού, και για

μικρές αποστάσεις η μετάδοση σημάτων με μήκος κύματος της τάξεως των mm θεωρείται αδύνατη. Μία λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η μετάδοση των σημάτων στην βασική ζώνη ή σε ενδιάμεσης συχνότητας (IF), αυξάνοντας όμως το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος [61].

Λόγω των παραπάνω προβλημάτων η λύση της ROF θεωρείται ιδανική. Η χρήση οπτικών ινών ελαχιστοποιεί τις απώλειες λόγω εξασθένησης σε σχέση με άλλου είδους καλωδίων [63]. Ένα τυπικό καλώδιο οπτικής ίνας έχει απώλειες λόγω εξασθένηση μικρότερες από 0.2 dB/km και 0.5 dB/km σε μήκη κύματος 1550nm και 1300nm αντίστοιχα. Αντιθέτως ένα ομοαξονικό καλώδιο RG 214 έχει απώλειες μεγαλύτερες 500dB/km για συχνότητες μεγαλύτερες των 5 GHz.

Επομένως η μετάδοση μικροκυμάτων σε οπτική μορφή μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερες αποστάσεις μετάδοσης και απαιτεί μικρότερη ενέργεια εκπομπής.

5.2.2. Bandwidth

Ένα ακόμα πλεονέκτημα των οπτικών ινών είναι το τεράστιο εύρος ζώνης που μπορούν να προσφέρουν. Το συνολικό εύρος ζώνης που μπορούν να προσφέρουν ξεπερνάει τα 50 THz [62]. Ωστόσο τα εμπορικά συστήματα μπορούν να αξιοποιήσουν μόνο ένα μέρος από το συνολικό εύρος, της τάξεως των 1,6 THz.

Το μεγάλο εύρος ζώνης προσφέρει, εκτός από την μεγάλη χωρητικότητα για μετάδοση σημάτων, τη δυνατότητα για πολύ γρήγορη επεξεργασία σήματος σε ταχύτητες οι οποίες είναι σχεδόν ακατόρθωτες να επιτευχθούν από ηλεκτρονικά συστήματα. Κάποιες απαραίτητες μικροκυματικές λειτουργίες όπως το φιλτράρισμα, η μίξη των σημάτων, η μετατροπή συχνότητας θα μπορούν, δηλαδή, να γίνονται κατευθείαν σε οπτική συχνότητα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την χρήση φθηνότερων υλικών, όπως διόδους και διαμορφωτές laser, τα οποία μπορούν να αποκριθούν σε ευρυζωνικά, για τα δεδομένα του ηλεκτρικού, σήματα [57].

Το πρόβλημα του μεγάλου εύρους ζώνης είναι η σύνδεση των οπτικών ινών με τα ηλεκτρονικά συστήματα. Η σύνδεση αυτή δημιουργεί το λεγόμενο «electronic bottleneck», δηλαδή τον περιορισμό του εύρους ζώνης από τα ηλεκτρονικά συστήματα σε σχέση με τις δυνατότητες των οπτικών ινών. Σε ψηφιακά συστήματα αντιμετωπίζεται με την χρήση πολυπλεξίας, όπως OTDM και DWDM. Στα ROF συστήματα, τα οποία είναι αναλογικά,

χρησιμοποιείται η Πολυπλεξία με φέρουσες (Sub-Carrier Multiplexing SCM). Η SCM πολυπλέκει - διαμορφώνει πολλά υποφέρονται σήματα μικρού εύρους ζώνης σε ένα, το οποίο στην συνέχεια μεταδίδεται μέσω μιας ίνας μεγαλύτερου εύρους ζώνης. Αυτό κάνει και το RoF αποδοτικό ως προς το κόστος [57].

5.2.3. Ηλεκτρομαγνητική Παρεμβολή

Ανοχή στην ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες, ιδιαίτερα στην μετάδοση μικροκυματικών σημάτων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το σήμα μεταδίδεται σε οπτική μορφή μέσα στην ίνα. Σαν αποτέλεσμα αυτής της ιδιότητας είναι η χρησιμοποίηση οπτικών ινών ακόμα και για μετάδοση μικροκυματικών σημάτων σε μικρές αποστάσεις [58].

5.2.4. Εγκατάσταση και Συντήρηση

Στα συστήματα ROF ο σύνθετος και ακριβός εξοπλισμός βρίσκεται στον κεντρικό σταθμό, απλουστεύοντας τα RAU. Ένα RAU στην πιο απλή του μορφή χρειάζεται μια φωτοδίοδο για την ανίχνευση και αποστολή του σήματος, έναν RF ενισχυτή και μία κεραία. Η διάταξη αυτή οδηγεί σε μικρότερα και ελαφρύτερα RAU, μειώνοντας το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Αυτό είναι σημαντικό πλεονέκτημα διότι στα ROF συστήματα για μετάδοση μικροκυματικών σημάτων χρειάζονται αρκετά RAU [57]. Ως επακόλουθο των απλοποιημένων RAU είναι και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, σε εφαρμογές όπου τα RAU δεν είναι εύκολα προσβάσιμα, η μείωση των αναγκών συντήρησης και ενέργειας, θα οδηγήσει σε μείωση του λειτουργικού κόστους του δικτύου [64].

5.2.5. Δυναμική Κατανομή Πόρων

Στα συστήματα ROF είναι εύκολη η διαχείριση των πόρων και η διάθεση τους ανάλογα με τις ανάγκες του συστήματος [66]. Αυτό είναι δυνατό διότι όλες οι επεξεργασίες του σήματος είναι συγκεντρωμένες στον κεντρικό σταθμό, και αυτός με την σειρά του καθορίζει την διανομή της χωρητικότητας του δικτύου στα RAU. Η διανομή γίνεται προσαρμοστικά με τέτοιο τρόπο ώστε τα RAU με πολλούς χρήστες να έχουν μεγαλύτερο μέρος της χωρητικότητας [65].

5.3. Περιορισμοί – Μειονεκτήματα

Τα συστήματα ROF θεωρούνται ως αναλογικά συστήματα μετάδοσης. Αυτό οφείλεται στο ότι περιλαμβάνουν την αναλογική διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση του φωτός. Επομένως επηρεάζονται από τα προβλήματα των αναλογικών συστημάτων. Τα προβλήματα επηρεάζουν αρνητικά την εικόνα θορύβου (noise figure, NF) και την δυναμική περιοχή τους (Dynamic Range DR). Η DR είναι σημαντικός παράγοντας στα κυψελωτά συστήματα όπου η ισχύς του σήματος που λαμβάνεται στον σταθμό βάσης από τις κινητές συσκευές ποικίλει [57].

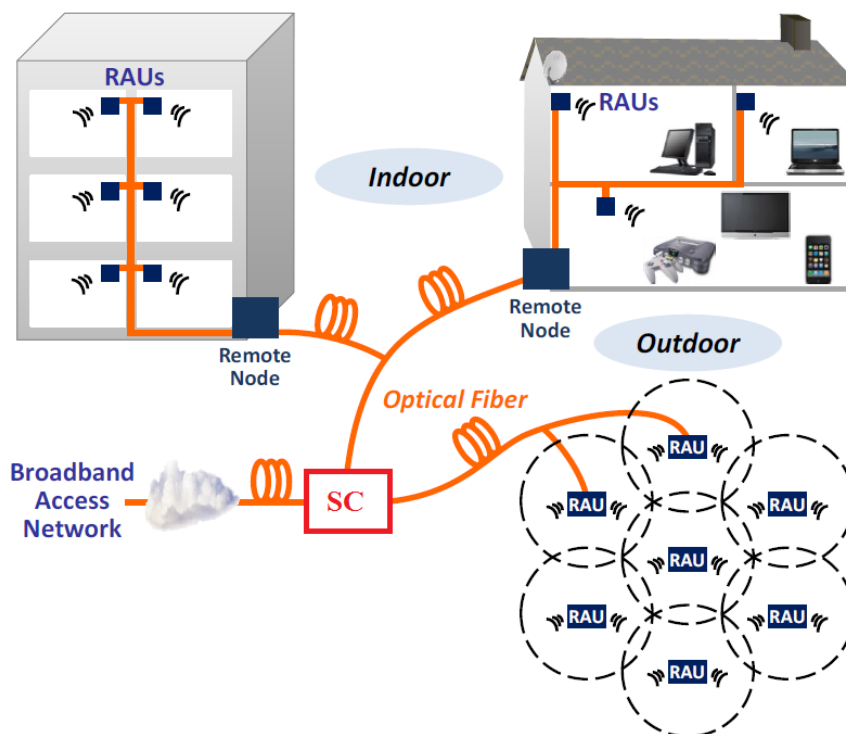
Μερικοί παράγοντες που επηρεάζουν την NF είναι ο θόρυβος RIN (Relative Intensity Noise) και ο θόρυβος φάσης του laser, ο θόρυβος βολής της φωτοδιόδου, ο θερμικός θόρυβος του ενισχυτή και η διασπορά της ίνας. Η διασπορά διακρίνεται στους δύο τύπους ινών που υπάρχουν τις πολύτροπες (Multi-Mode Fiber, MMF) και τις μονότροπες (Single Mode Fiber, SMF). Στις SMF, η χρωματική διασπορά που παρουσιάζεται μειώνει το μέγιστο μήκος μετάδοσης, ενώ στις MMF, η διασπορά παρουσιάζεται λόγω των διαφορετικών ρυθμών κυματοδήγησης και επηρεάζουν το εύρος του καναλιού καθώς και την απόσταση του [57, 66].

Θα πρέπει να ξεκαθαριστεί ότι παρόλο που τα ROF συστήματα είναι αναλογικά τα RF σήματα που μεταφέρουν δεν είναι απαραίτητο να είναι αναλογικά, όπως στις περιπτώσεις των WLAN.

5.4. Εφαρμογές

Λόγω του περιορισμένου DR, η τεχνολογία ROF θεωρείται ακατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν υψηλό SFDR (Spurious Free Dynamic Range). Το SFDR ορίζει την μέγιστη ισχύ του σήματος εξόδου για την οποία η ισχύς του 3ης τάξης γινομένου ενδοδιαμόρφωσης γίνεται ίσο με το συνολικό θόρυβο. Αυτό ισχύει σε συστήματα κινητής τηλεφωνίας ευρείας κάλυψης όπως το GSM όπου το SFDR πρέπει να είναι μεγαλύτερο των 70dB. Αντιθέτως σε εφαρμογές εσωτερικού χώρου δεν χρειάζεται υψηλό SFDR [68]. Επομένως, ένα σύστημα ROF μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα για μετάδοση δεδομένων σε εσωτερικούς χώρους, πχ σαν σύστημα WLAN. Η παρακάτω εικόνα μας δείχνει πως ένα σύστημα ROF μπορεί να χρησιμοποιήσει οπτική σε αρχιτεκτονικές οικιακών χώρων για ασύρματες και ενσύρματες εφαρμογές (Εικ. 27) [67]. Σε μία

τέτοια εφαρμογή για την μείωση του κόστους κατασκευής και συντήρησης μπορεί να εγκατασταθούν πολύτροπες ίνες για την τροφοδότηση των RAU.



Εικ. 27. Μπλοκ Διάγραμμα Δικτύου ROF

Μία ακόμα πιθανή εφαρμογή των RoF συστημάτων είναι στα λεγόμενα Επικοινωνιακά Συστήματα Σταθερής Ασύρματης Πρόσβασης (Fixed Wireless Access Systems), όπως το WiMAX στο οποίο μια RoF υποδομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά οπτικών σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις, φέρνοντας κοντά στον τελικό χρήστη απλοποιημένες RAU, οι οποίες επιτυγχάνουν τη δημιουργία ασύρματων διασυνδέσεων με έναν πολύ οικονομικό τρόπο [66].

Οι πιο πολλές εφαρμογές της τεχνολογίας RoF αναφέρονται στην επέκταση της κάλυψης και της χωρητικότητας κινητών συστημάτων εσωτερικών χώρων με χρήση DAS. Για εφαρμογές που λειτουργούν σε υψηλή συχνότητα όπως το WPAN και το IEEE 802.11ad που δουλεύει στα 60GHz, η ακτίνα της κυψέλης είναι μικρή εξαιτίας των μεγάλων απωλειών διάδοσης μέσα από τοίχους και εκεί φαίνονται τα πλεονεκτήματα του DAS [68].

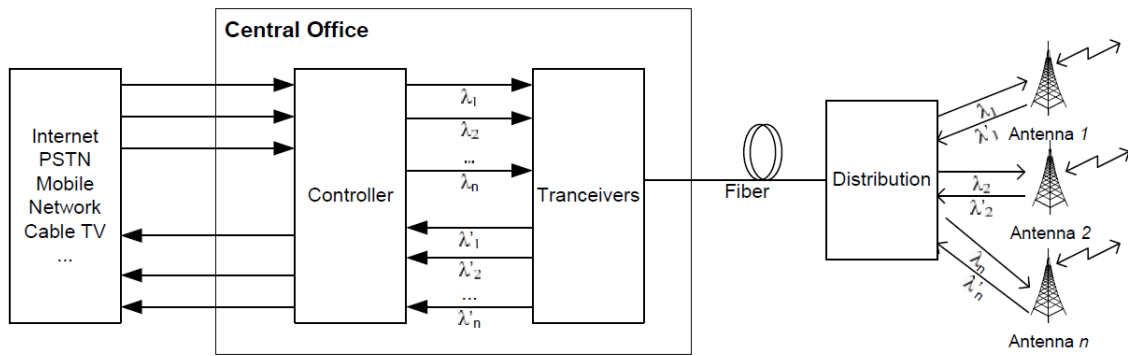
5.5. Αρχιτεκτονική

Ένα απλό σύστημα ROF περιλαμβάνει τρία κύρια μέρη: τον κεντρικό σταθμό, τις κεραιές και το οπτικό δίκτυο [17].

Ο κεντρικός σταθμός (Central Station, CS) ασχολείται με όλη την επεξεργασία του σήματος, έχοντας παράλληλα ένα κεντρικό έλεγχο στους πόρους του συστήματος. Εκμεταλλευόμενος όλα τα πλεονεκτήματα της οπτικής ίνας (ταχύτητα και εύρος ζώνης), ο CS εκτελεί όλες τις λειτουργίες που στα δίκτυα τρίτης γενιάς κάνει ο σταθμός βάσης. Λειτουργίες όπως πολυπλεξία, αποπολυπλεξία, καταχώρηση φάσματος και επεξεργασία σήματος γίνονται κεντρικά δίνοντας μια πιο δυναμική χρήση του δικτύου. Ένα πλεονέκτημα της κεντρικής επεξεργασίας είναι ότι οι σταθμοί μπορούν εύκολα να αναβαθμιστούν. Επίσης, μπορεί εύκολα να παρακολουθηθεί η κίνηση του δικτύου καθώς είναι δυναμική λόγω της κινητικότητας των χρηστών. Βασισμένοι σε αυτή την πληροφορία, μπορούν να εκτελεστούν διάφοροι αλγόριθμοι κατανομής του εύρους ζώνης ώστε να επιτευχθεί βελτίωση στην αποδοτικότητα των πόρων. Ωστόσο στην κατασκευή συστημάτων ROF θα πρέπει να μειωθεί το κόστος των CS διότι για την υλοποίησή τους θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας πολύ μεγάλος αριθμός κεραιών [70].

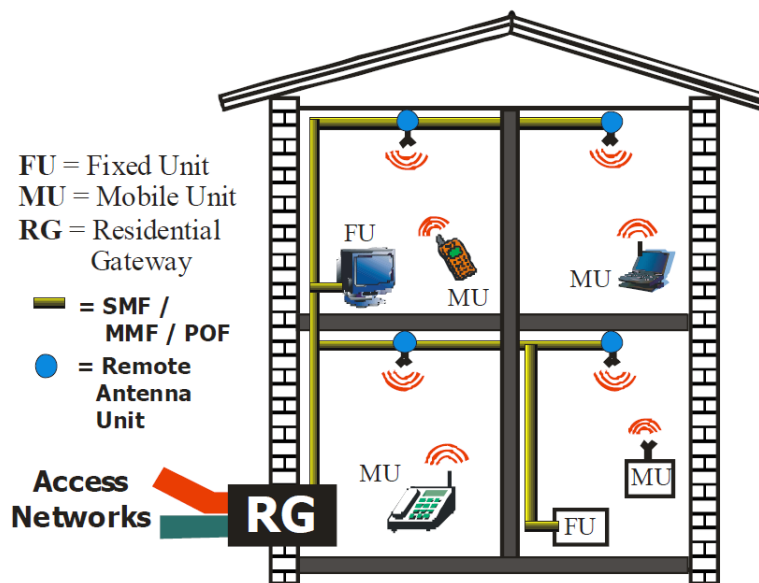
Το σύστημα των κεραιών (Remote Antenna Units, RAU) χρησιμοποιείται μόνο για την ασύρματη μετάδοση του σήματος καθώς και για την μετατροπή του από ηλεκτρικό σε οπτικό και το αντίθετο. Κάθε RAU έχει δύο μέρη: ένα για την κατερχόμενη ζεύξη (downlink) και ένα για την ανερχόμενη (uplink). Το κομμάτι του downlink περιλαμβάνει ένα κύκλωμα φωτοδιόδου και ένα ενισχυτή ισχύος RF. Το uplink κομμάτι περιλαμβάνει ένα κύκλωμα με δίοδο laser και έναν ενισχυτή χαμηλού θορύβου (LNA) [57, 58, 70].

Η επικοινωνία των χρηστών με τον εξωτερικά δίκτυα, όπως το ίντερνετ, η τηλεφωνία κ.α., γίνεται από το CS, καθώς έχει το ρόλο της πύλης. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται καθαρά η αρχιτεκτονική ενός απλού ROF συστήματος (Εικ. 28).



Εικ. 28. Αρχιτεκτονική ROF Συστήματος

Ωστόσο, λειτουργώντας στην ζώνη των 60 GHz για ασύρματα τοπικά δίκτυα, η ακτίνα της κυψέλης είναι αρκετά μικρή. Σε αυτή την περίπτωση αρκετά πλεονεκτήματα έχει ένα σύστημα καταναμημένων κεραιών (Distributed Antenna System, DAS). Το DAS είναι ένα σύστημα αρκετά οικονομικό στην υλοποίηση μικροκυψελών και πικοκυψελών και παρέχει αποδοτικούς τρόπους για την διαχείριση του φάσματος. Συνιστάται για εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους όπως πολυώροφα κτήρια, εμπορικά κέντρα και αεροδρόμια. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα τέτοιο σύστημα [57].



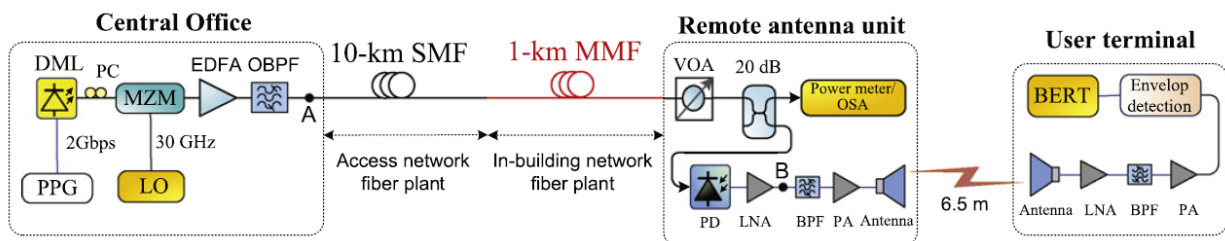
Εικ. 29. Χρήση Οπτικών Ινών για Ενσύρματη και Ασύρματη Επικοινωνία

5.6. Προτάσεις – Υλοποιήσεις

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται μερικές από τις πιο ενδιαφέρουσες υλοποιήσεις για την βελτιστοποίηση των συστημάτων ROF.

5.6.1. Συνδυασμός Μονότροπων και Πολύτροπων Οπτικών Ινών

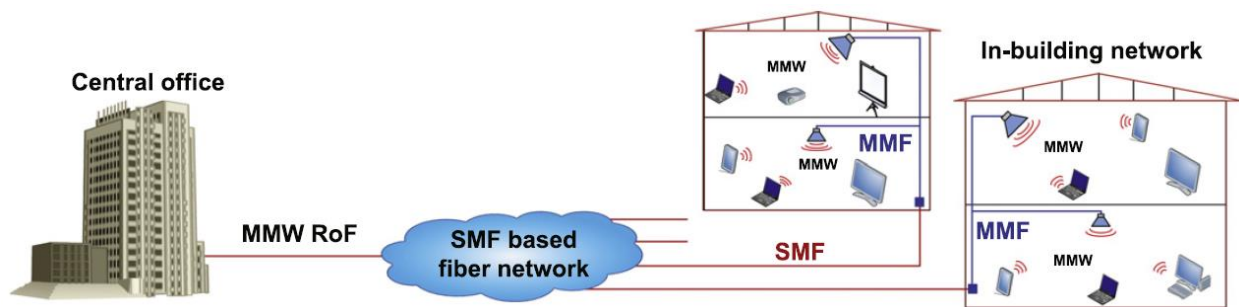
Μία ενδιαφέρουσα πρόταση έκαναν οι Pham κ.α. το 2012 συνδυάζοντας σε ένα σύστημα ROF τα δύο ήδη οπτικών ινών [69]. Στην διάταξη τους χρησιμοποιούν 10χλμ μονότροπης οπτικής ίνας, 1χλμ πολύτροπης οπτικής ίνας και 6,5μ ασύρματης σύνδεσης μέσω κεραιών χοάνης, προσομοιώνοντας έτσι πραγματικές εγκαταστάσεις κτιρίων. Η επόμενη εικόνα μας δείχνει αυτή την διάταξη (Εικ. 30).



Εικ. 30. Μπλοκ Διάγραμμα Συστήματος με Χρήση MMF και SMF

Ο λόγος υλοποίησης μίας τέτοιας διάταξης είναι ότι δίκτυα SMF είναι ευρέως εγκατεστημένα (Metro Ethernet Networks, Access Networks) και αρκετά μελετημένα για συστήματα στην χιλιοστομετρική ζώνη. Ωστόσο, δίκτυα MMF είναι ήδη εγκατεστημένα σε αρκετά κτήρια λόγω του χαμηλού κόστους και της εύκολης εγκατάστασης.

Για την υλοποίηση ενός συστήματος το οποίο να ανταποκρίνεται στην αυξανόμενη ζήτηση για μεγάλο εύρος ζώνης ασύρματης επικοινωνίας, είναι αρκετά ενθαρρυντικό η χρησιμοποίηση της υπάρχουσας εγκατάστασης. Έτσι, η χρήση SMF δικτύου πρόσβασης μαζί με την επαναχρησιμοποίηση MMF δικτύου για την μεταφορά σημάτων στην χιλιοστομετρική ζώνη σε WPAN δίκτυα θα μειώσουν αρκετά το κόστος, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 31).



Εικ. 31. Διανομή ROF Σημάτων Συνδυαστικά σε Δίκτυα MMF και SMF

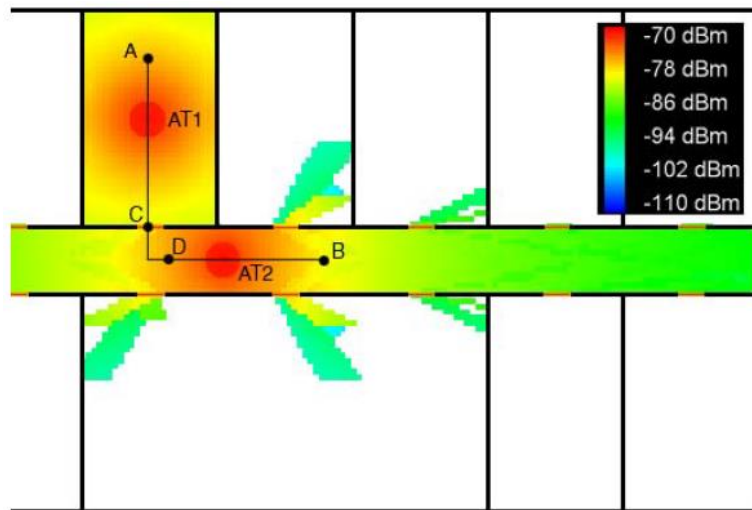
Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης αυτής, είναι η χωρίς λάθη αποστολή ενός σήματος. Η ταχύτητα που επιτεύχθηκε είναι της τάξεως των 2 Gbps. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, αν και απλή, αποδεικνύει την αποδοτική μεταφορά σημάτων σε μεγάλες ταχύτητες χρησιμοποιώντας τα ήδη υπάρχοντα δίκτυα, τροποποιώντας τα ελάχιστα.

5.6.2. Επέκταση Καναλιού

Οι Bang κ.α. το 2006 παρουσίασαν μία ενδιαφέρουσα πρόταση για την επικοινωνία σε κτήρια [70].

Λόγω των πολύ μεγάλων απωλειών μετάδοσης μέσα από τοίχους, οι κυψέλες της χιλοστομετρικής ζώνης συνήθως περιορίζονται σε ένα δωμάτιο. Επομένως για την κάλυψη ενός κτηρίου θα χρειαστεί ένας μεγάλος αριθμός κεραιών. Επομένως, αυξάνεται η πολυπλοκότητα των διαδικασιών επεξεργασίας σήματος για κάθε κεραία. Σαν αποτέλεσμα είναι η αύξηση του κόστους για την κατασκευή του συστήματος και η ανάγκη για απλοποίηση των κεραιών.

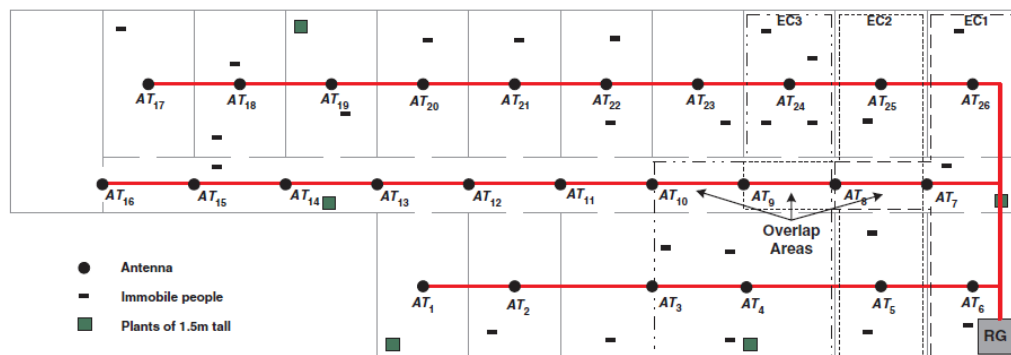
Ένα άλλο πρόβλημα στην χιλοστομετρική ζώνη είναι η επικάλυψη (overlap) περιοχών από γειτονικά κανάλια. Αυτό συμβαίνει συνήθως σε ανοιχτές περιοχές όπως οι πόρτες και τα παράθυρα. Έτσι, σε ένα τέτοιο σύστημα όπου οι χρήστες κινούνται θα πρέπει να εφαρμοστεί μία διαδικασία μεταπομπής (handover) για την εναλλαγή κυψελών. Επίσης, οι επικαλυπτόμενες περιοχές είναι αρκετά μικρές με αποτέλεσμα ο χρήστης να μην έχει τον απαραίτητο χρόνο για να ενεργοποιήσει και να ολοκληρώσει ένα handover. Για το λόγω αυτό θα πρέπει να δημιουργηθούν μεγάλες επικαλυπτόμενες περιοχές.



Εικ. 32. Επικαλυπτόμενες Περιοχές

Ένας χρήστης κινούμενος από το A στο B έχει καλή κάλυψη από την κεραία AT1 έως το σημείο D όπου υπάρχει ακόμα LOS. Επίσης ο χρήστης από το σημείο C δέχεται αρκετή ισχύ σήματος. Οπότε η απόσταση από το C στο D μας δείχνει πόσο χρόνο έχει ο χρήστης για να ενεργοποιήσει και να ολοκληρώσει το handover. Επίσης αν ο χρήστης κάνει πιο απότομη στροφή βγαίνοντας από την πόρτα η απόσταση αυτή μικραίνει δραματικά.

Η λύση που προτείνουν οι Bang κ.α. είναι οι επέκταση των κυψελών (Extended Cell, EC) [70]. Σκοπός ενός EC είναι η ομαδοποίηση γειτονικών κεραιών ώστε να εκπέμπουν το ίδιο περιεχόμενο πάνω στο ίδιο κανάλι. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το EC καθώς και οι επικαλυπτόμενες περιοχές (Εικ 33).



Εικ. 33. ROF Σύστημα με χρήση EC

Το EC υποστηρίχθηκε για τους εξής λόγους:

- Σε ένα περιβάλλον κτηρίου ο χρήστης θα πρέπει να περάσει μέσα από διαδρόμους για να πάει από ένα δωμάτιο σε ένα άλλο. Έτσι μπορεί πολύ εύκολα να υπολογιστούν οι επικαλυπτόμενες περιοχές.
- Λόγω της ευελιξίας του οπτικού δικτύου διανομής, τα κανάλια συχνοτήτων μπορούν να δυναμικά να δεσμευθούν σε μία κεραία.
- Λόγω του μεγάλου εύρους ζώνης των 60 GHz, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερα κανάλια (~100 MHz) για την υποστήριξη μεγάλου αριθμού χρηστών.

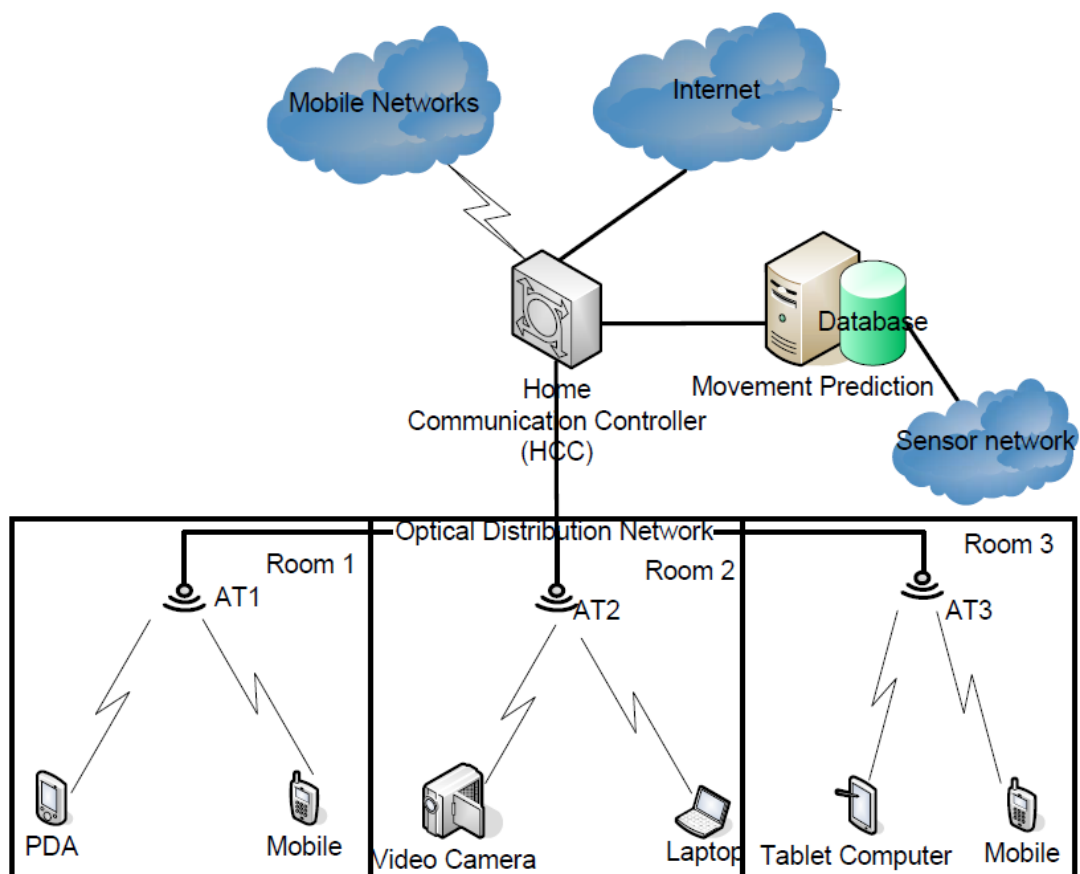
Το κύριο πρόβλημα με αυτή την τοπολογία είναι ότι ο χρήστης λαμβάνει πολλά αντίγραφα του ίδιου σήματος. Αυτό μειώνεται με την χρήση OFDM. Επίσης, με αυτή την τοπολογία μειώνεται σημαντικά ο αριθμός των handovers. Ακόμα, τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας έδειξαν ότι αυξήθηκε η ποιότητα της υπηρεσίας αυξήθηκε καθώς υπήρχαν λιγότερες εγκαταλείψεις κλήσεων (drop calls) με την χρήση του EC. Τέλος με την χρήση της τοπολογίας αυτής βελτιώθηκε η κάλυψη του σήματος [70].

5.6.3. Διαχείριση Μεταπομπής

Αρκετές έρευνες έχουν γίνει ώστε να βρεθεί ένας ικανοποιητικός αλγόριθμος μεταπομπής λόγω των προβλημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Μια αρκετά αναλυτική πρόταση παρουσίασε ο Quang Van Bien το 2014 [17]. Στην πρόταση του παρουσίασε ένα αλγόριθμο διαχείρισης της μεταπομπής χρησιμοποιώντας ένα σύστημα πρόβλεψης της κινητικότητας των χρηστών.

Η τοπολογία που παρουσίασε, όπως φαίνεται και στη εικόνα, είχε σκοπό την παροχή υψηλού ρυθμού δεδομένων με την χρήση συστήματος ROF για εφαρμογές όπως online παιχνίδια, (U)HDTV κ.α (Εικ. 34).



Εικ. 34. ROF Σύστημα με χρήση Συστήματος Εντοπισμού και Συστήματος Πρόβλεψης Κίνησης

Τα στοιχεία της τοπολογίας είναι ο οικιακός ελεγκτής επικοινωνίας (Home Communication Controller, HCC), οι κεραίες, το οπτικό δίκτυο διανομής, το σύστημα εντοπισμού και το σύστημα πρόβλεψης κίνησης.

Το HCC έχει τον ρόλο του CS που αναφέραμε σε προηγούμενη ενότητα. Έχει την διασύνδεση με εξωτερικά δίκτυα και ασχολείται με την επεξεργασία του σήματος. Οι κεραίες έχουν τον ρόλο των RAU και είναι αρκετά απλοποιημένες εφόσον όλες οι επεξεργασίες γίνονται στο HCC. Μια τέτοια κεραία αρκεί για την κάλυψη ενός δωματίου. Το οπτικό δίκτυο διανομής είναι η διασύνδεση των κεραιών με το HCC.

Το σύστημα εντοπισμού θέσης βοηθάει στην βελτίωση της απόδοσης των ασύρματων δικτύων. Καθώς η επικοινωνία με δορυφόρους μέσα σε κλειστά περιβάλλοντα είναι αδύνατη, συστήματα όπως το GPS δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Επίσης οι κλειστοί χώροι είναι πιο πολύπλοκοι διότι υπάρχουν πολλά εμπόδια, όπως τοίχοι, έπιπλα κ.α.. Στην τοπολογία του Quang Van Bien χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα αισθητήρων χρησιμοποιώντας υπέρ ευρεία ζώνη ((Ultra Wide Band, UWB). Το σύστημα λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο και μπορεί να δώσει την θέση

ενός χρήστη με ακρίβεια 99% μέσα σε 30 εκατοστά. Το σύστημα συλλέγει τις πληροφορίες της κίνησης των χρηστών και τις κατηγοριοποιεί.

Η πρόβλεψη της κίνησης που προτάθηκε εκμεταλλεύεται τις πληροφορίες που αποθηκεύονται από το σύστημα εντοπισμού. Η μέθοδος πρόβλεψης είναι βασισμένη στο Hidden Markov Model και περιλαμβάνει τρία στάδια: της συλλογής πληροφορίας για την κίνηση του χρήστη, την ανάλυση και εκμάθηση της κίνησης και της πρόβλεψης της κίνησης. Το αποτέλεσμα του συστήματος αυτού φθάνει μέχρι και το 84,1% της σωστής πρόβλεψης για συχνούς χρήστες.

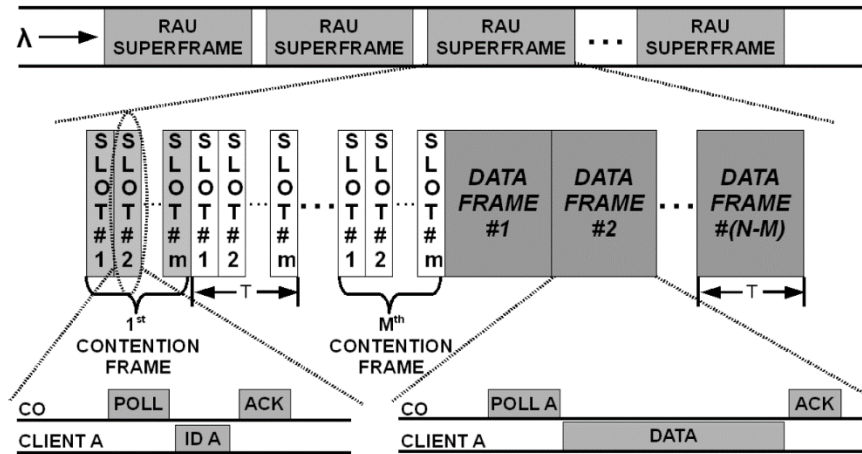
Τέλος στην τοπολογία αυτή προτείνεται ένας αλγόριθμος μεταπομπής χρησιμοποιώντας το σύστημα πρόβλεψης κίνησης και εντοπισμού θέσης. Γνωρίζοντας την θέση και την πιθανή κίνηση του χρήστη ο αλγόριθμος μειώνει τον χρόνο σάρωσης για γειτονικές κεραίες. Έτσι τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν μείωση των άσκοπων μεταπομπών. Αντιθέτως αν το σύστημα δώσει λανθασμένη πρόβλεψη για την κίνηση του χρήστη τότε ο χρόνος της μεταπομπής θα αυξηθεί διότι θα πρέπει να σαρώσει τις γειτονικές κυψέλες για να βρεθεί η πιο κατάλληλη.

5.6.4. Πρωτόκολλο MAC

Ένα διαφανές ως προς το μέσο (medium transparent) πρωτόκολλο υποστρώματος του μέσου διάδοσης (Medium Access Control, MAC protocol) παρουσιάστηκε από τον Κάλφα το 2010 [66].

Το MAC πρωτόκολλο παρουσιάστηκε για μια ενιαία και δυναμική ανάθεση πόρων του οπτικού και του ασύρματου δικτύου σε ένα ROF σύστημα στα 60 GHz. Η διαφάνεια του μέσου επιτυγχάνεται διαμέσου παραλληλισμού μεταξύ δύο περιόδων ανταγωνισμού καθώς επίσης και μέσω της ενσωμάτωσης πλαισίων δεδομένων του ασύρματου μέσου σε οπτικά υπερπλαίσια (superframes) μέσα σε κάθε RAU. Η πρώτη περίοδος είναι υπεύθυνη για την συλλογή αιτημάτων και ανάθεση μηκών κύματος από και προς τις RAU ενώ η δεύτερη αναλαμβάνει τη διαίτησία του φόρτου μεταξύ των χρηστών που βρίσκονται στην ίδια RAU.

Τα υπερπλαίσια προορίζονται για κάθε RAU. Το κάθε υπερπλαίσιο περιλαμβάνει πολλαπλά και χρονικά διαμοιραζόμενα πολυπλεγμένα πλαίσια δεδομένων τα οποία σε κάθε RAU μετατρέπονται από οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό και μεταδίδονται στον κάθε χρήστη προορισμού. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η δομή των υπερπλαισίων.



Εικ. 35. Δομή Υπερπλαισίων

Το MAC πρωτόκολλο που παρουσιάστηκε υποστηρίζει και απευθείας επικοινωνία μεταξύ των χρηστών και του CS, με αποτέλεσμα οι RAU να είναι αρκετά απλοποιημένες και να ασχολούνται μόνο με την εναλλαγή του σήματος από οπτικό σε ηλεκτρικό και το αντίθετο. Επίσης, το προτεινόμενο σχήμα διαμορφώνει τοπικά δίκτυα εκτεταμένης εμβέλειας πρόσβασης για όλους τους χρήστες ακόμα και όταν είναι συνδεδεμένοι σε διαφορετικό RAU αλλά στο ίδιο CS. Έτσι μπορούν να επικοινωνούν δύο χρήστες χωρίς να έχουν οπτική επαφή όπως χρειάζεται στα πρωτόκολλα 802.15TG3c και WirelessHD [66].

Εν κατακλείδι, το πρωτόκολλο που παρουσιάστηκε από τον Κάλφα είναι ικανό για την δυναμική ανάθεση τόσο της οπτικής όσο και της ασύρματης χωρητικότητας και των πόρων.

ΚΕΦ.6: Επίλογος

Στην παρούσα εργασία αναλύθηκε η ζώνη των 60 GHz για την χρήση σε Τοπικά Ασύρματα Δίκτυα. Η ζώνη των 60 GHz μπορεί να προσφέρει ταχύτητες της τάξεως των Gbps. Αναλύθηκαν τα πρωτόκολλα τα οποία έχουν δημιουργηθεί για τα WLAN. Επίσης, αναφέρθηκε το κύριο πρόβλημα το οποίο είναι οι μεγάλες απώλειες διάδοσης. Λόγο των μεγάλων απωλειών διάδοσης και την χρήση πολλών AP για την κάλυψη ενός κτιρίου ή σπιτιού είναι απαραίτητη η εφαρμογή ενός συστήματος ελέγχου. Η λύση που προτείνουν οι Bao Linh Dang et al. με την χρήση των Extended Cells αποτελεί μια αρκετά αισιόδοξη λύση για την αντιμετώπιση των προβλημάτων διάδοσης. Σε συνδυασμό με το multi band σύστημα του Lily Yang, θεωρείτε ένα αξιόπιστο σύστημα για την κάλυψη ενός χώρου. Τα πλεονεκτήματα θα είναι η πιο γρήγορη η αναγνώριση μιας συσκευής για επικοινωνία στα 60 GHz, η συνεχής σύνδεση μιας κινητής συσκευής χωρίς να επηρεάζεται από εμπόδια εναλλάσσοντας αν χρειαστεί τις μπάντες σύνδεσης και τέλος η ταυτόχρονη σύνδεση συσκευών σε περισσότερα από ένα δίκτυα (WLAN, WPAN).

Για την δημιουργία ενός τέτοιου ασύρματου δικτύου υλοποιήθηκαν και σχεδιάστηκαν νέα κυκλώματα πομποδεκτών. Στην παρούσα εργασία, έγινε ανάλυση πομποδεκτών στην τεχνολογία CMOS. Επιλέχθηκε η τεχνολογία CMOS λόγω της ευκολότερης ενσωμάτωσης των κυκλωμάτων σε συσκευές του εμπορίου και για το χαμηλό κόστος κατασκευής. Αναφέρθηκαν οι νέες προκλήσεις στον σχεδιασμό. Τέλος, οι λύσεις που παρουσιάστηκαν και έχουν υλοποιηθεί σε ολοκληρωμένα κυκλώματα έχουν ως κύριο προτέρημα την χαμηλή κατανάλωση με μικρή τάση εισόδου.

Τέλος, αναλύθηκαν τα συστήματα ROF. Τα συστήματα αυτά μπορούν να προσφέρουν μια ολοκληρωμένη λύση για τις ασύρματες επικοινωνίες στα 60 GHz σε σπίτια, κτίρια κ.α., συνδυάζοντας τις μηδενικές απώλειες στην μεταφορά σήματος με χρήση οπτικών ινών. Επίσης, παρουσιάστηκαν ολοκληρωμένες βελτιστοποιήσεις των συστημάτων, όπως την επέκταση του καναλιού, ένα νέο σύστημα μεταπομπής καθώς και ένα βελτιωμένο πρωτόκολλο MAC.

Η ασύρματη επικοινωνία χρησιμοποιώντας την ζώνη των 60 GHz προσφέρει μεγάλες ταχύτητες στην μεταφορά δεδομένων. Αυτός είναι και ο λόγος που έχει κινήσει το ενδιαφέρον των ερευνητών. Επίσης, η ζώνη αυτή δημιουργεί νέες προκλήσεις και προβλήματα τα οποία δεν υπήρχαν με τις υπάρχουσες λύσεις ασύρματης επικοινωνίας, μερικά από τα οποία αναφέρθηκαν.

Εν κατακλείδι, η τεχνολογία της ασύρματης επικοινωνίας στα 60 GHz είναι κάτι νέο το οποίο χρειάζεται αρκετή έρευνα τόσο σε θεωρητικό, όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Τα τοπικά ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιώντας τα 60 GHz θεωρούνται ως η υποσχόμενη λύση για τις επικοινωνίες εσωτερικών χώρων με ρυθμούς μεταφοράς της τάξεως των GB/s.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Wireless Gigabit Alliance. http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_Gigabit_Alliance
- [2] P. Smulders, Exploiting the 60 GHz band for local wireless multimedia access: Prospects and future directions, IEEE Communications Magazine 40 (1) (2002) 140–147.
- [3] F. Giannetti, M. Luise, R. Reggiannini, Mobile and personal communications in the 60 GHz band: A survey, Wireless Personal Communications 10 (2) (1999) 207–243.
- [4] Wireless LAN. https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_LAN
- [5] Αλεξόπουλος Α., Λαγογιάννης Γ., Τηλεπικοινωνίες και Δίκτυα Υπολογιστών, (7^η εκδ.), (2010)
- [6] 50.2-71 GHz realignment. US Federal Register, 66(15):p. 7402–7408, 23 January 2001. URL <http://www.gpo.gov>.
- [7] Su-Khiong Yong and Chia-Chin Chong. An overview of multigigabit wireless through millimeter wave technology: Potentials and technical challenges. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2007:10, 2007. 8 – 17
- [8] US Code of Federal Regulation (CFR) - title 47, chapter 1 - part 15.255. Federal Communications Commission (FCC), October 2004. URL <http://www.gpo.gov>.
- [9] Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Technical characteristics of multiple gigabit wireless systems in the 60 GHz range, System Reference Document. ETSI (European Telecommunications Standards Institute), dtr/erm-rm-049 edition, 2007. URL <http://www.etsi.org>
- [10] IEEE 802.15.3c Task Group, IEEE, <http://www.ieee802.org/15/pub/TG3c.html>
- [11] WirelessHD Consortium, www.wirelesshd.org
- [12] IEEE 802.11a-1999, https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11a-1999
- [13] IEEE 802.11b-1999, https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11b-1999
- [14] Agilent Technologies, “Wireless LAN at 60 GHz – IEEE 802.11ad Explained”
- [15] H. T. Friis, “A Note on a Simple Transmission Formula,” Proceedings of the IRE, vol. 34, no. 5, pp. 254–256, 1946.
- [16] P. F. M. Smulders, “Broadband wireless LANs: A feasibility study,” Ph.D. dissertation, Eindhoven Univ., Netherlands, Dec. 1995.
- [17] Quang Van Bien, “Handoff Management in Radio over Fiber 60GHz Indoor Networks”, Technische Universiteit Delft, Netherlands, 2014

- [18] Z. Genc, B. L. Dang, J. Wang, and I. G. Niemegeers, "Home networking at 60 GHz: challenges and research issues," *Annales des Telecommunications*, pp. 501–509, 2008
- [19] B. L. Dang, M. G. Larrode, R. V. Prasad, I. Niemegeers, and A. M. J. Koonen, "Radio-over-Fiber based architecture for seamless wireless indoor communication in the 60GHz band," *Comput. Commun.*, vol. 30, pp. 3598–3613, December 2007
- [20] O. Andrisano, M. Chiani, V. Tralli, and R. Verdone, "Impact of cochannel interference on vehicle-to-vehicle communications at millimeter waves," in *Proc. Singapore ICCS/ISITA '92. 'Communications the Move'*, 1992, pp. 924–928
- [21] B. Lannoo, D. Colle, M. Pickavet, and P. Demeester, "Radio-over-Fiber-based Solution to Provide Broadband Internet Access to Train Passengers [Topics in Optical Communications]," *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 2, pp. 56–62, 2007
- [22] J. Luo, W. Keusgen, A. Kortke, and M. Peter, "A design concept for a 60 ghz wireless in-flight entertainment system," in *Proc. VTC 2008-Fall Vehicular Technology Conf. IEEE 68th*, 2008, pp. 1–5
- [23] G. Anzic, D. Connolly, E. Haugland, H. Kosmahl, and J. Chitwood, "A Study of 60 GHz Intersatellite Link Applications," in *NASA TM-83337*, 1983
- [24] Winkler, W.; Borngraber, J.; Gustat, H. & Korndorfer, F. (2004). "Design of CMOS for 60 GHz applications", *Proceedings of the 30th European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC)*, pp. 83-86, ISBN 0-7803-8480-6, Leuven, Belgium, Sep. 2004
- [25] Reynolds, S.K., "A 60-GHz superheterodyne downconversion mixer in silicongermanium bipolar technology". *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol. 39, No. 11, pp. 2065–2068, 2004
- [26] Floyd, B.A.; Reynolds, S.K.; Pfeiffer, U.R.; Zwick, T.; Beukema, T. & Gaucher, B., "SiGe bipolar transceiver circuits operating at 60 GHz", *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol. 40, No. 1, pp. 156–167, ISSN 0018-9200, 2005
- [27] Hajimiri A., "mm-Wave Silicon ICs: Challenges and Opportunities", *Proceedings of IEEE Custom Intergrated Circuits Conference (CICC 2007)*, pp. 741-748, San Jose, California, USA, Sep. 2007
- [28] Moore, G. E., "Cramming more components onto integrated circuits". *IEEE Proceedings*, Vol. 38, 1965
- [29] Doan C. H.; Emami, S.; Niknejad, A.M. and Brodersen, R.W. (2004). "Design of CMOS for 60 GHz applications", *Proceedings of IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC '04)*, pp. 440-538, ISBN 0-7803-8267-6, San Francisco, California, USA, Feb. 2004

- [30] Leenaerts, D.; Van der Tang, J.; Vaucher C. S., “Circuit Design for RF Transceivers”, pp. 1-344, Kluwer Academic Publishers, ISBN 978-0792375517, USA 2001
- [31] Scheir, K.; Wamback, P.; Rolain, Y. and Vandersteen, G., “Design and analysis of inductors for 60 GHz applications in a digital CMOS technology”. Proceedings of IEEE 69th ARFTG Conference, pp. 1-4, ISBN 978-0-7803-9762-0, Honolulu, Hawaii, USA, June 2007
- [32] Majek, C.; Severino, R.R.; Taris, T.; Deval, Y.; Mariano, A.; Begueret, J.-B. and Belot, D., “60 GHz cascode LNA with interstage matching: performance comparison between 130nm BiCMOS and 65nm CMOS-SOI technologies”, Proceedings of 3rd IEEE International Signals, Circuits and Systems (SCS 2009), pp. 1-5, ISBN 978-1-4244-4397-0, Medenine, Tunisia, Nov. 2009
- [33] Liang, C. and Razavi, B., “Systematic transistor and inductor modeling for millimeter wave design”, IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 44, No. 2, pp. 450-457, 2009
- [34] Friis, H. T., “Noise figures of radio receivers”. Proceedings of the IRE, Vol. 32, No. 7, pp. 419–422, 1944
- [35] Doan, C. H.; Emami, S.; Niknejad, A. M & Brodersen R. W., “Millimeter-wave CMOS design”, IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 40, No. 1, pp. 144–155, ISSN 0018-9200, 2005
- [36] Tao, S.; Rodriguez, S. ; Rusu, A. and Ismail, M., “Device modelling for 60 GHz radio front-ends in 65 nm CMOS”. Proceedings of IEEE NORCHIP, pp. 1-4, ISBN 978-1-4244-4310-9, Trondheim, Norway, Nov. 2009
- [37] Motlagh, B.M.; Gunnarsson, S.E.; Ferndahl, M. and Zirath, H. “Fully integrated 60-GHz single-ended resistive mixer in 90-nm CMOS technology”. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., Vol. 16, No. 1, pp. 25–27, 2006
- [38] Razavi, B. “Design of Millimeter-Wave CMOS Radios: A Tutorial”. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, Vol. 56, No. 1, pp. 4-16, ISSN 1549-8328, 2009
- [39] Wang, C-Y. and Tsai, J-H. “A 51 to 65 GHz Low-Power Bulk-Driven Mixer Using 0.13um CMOS Technology”. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., Vol. 19, No. 8, pp. 521–523, ISSN 1531-1309, 2009
- [40] Razavi, B. “A millimeter-wave circuit technique”. IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 43, No. 9, pp. 2090–2098, ISSN 0018-9200, 2008
- [41] Tsai, J.-H. ; Wu, P.-S.; Lin, C.-S.; Huang, T.-W.; Chern, J. G. J.; Huang, W.-C. and Wang, H. “A 25–75 GHz broadband Gilbert-cell mixer using 90-nm CMOS

- technology". IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., Vol. 17, No. 4, pp. 247–249, ISSN 1531-1309, 2007
- [42] Lien, C-H.; Huang, P-C. ; Kao, K-Y.; Lin, K-Y. and Wang, H. "60 GHz Double-Balanced Gate-Pumped Down-Conversion Mixers With a Combined Hybrid on 130 nm CMOS Processes", IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., Vol. 20, No. 3, pp. 160-162, ISSN 1531-1309, 2010
 - [43] Emami, S.; Doan, C.H.; Niknejad, A.M. and Brodersen, R.W. "A 60-GHz downconverting CMOS single-gate mixer". Proceedings of IEEE Radio Frequency integrated Circuits Symposium (RFIC 2005), pp. 163-166, ISBN 0-7803-8983-2, Long Beach, California, USA, June 2005
 - [44] El Oualkadi, A. ; Faitah, K. & Ouahman, A. A. "mm-Wave CMOS Mixer Design in 65 nm Technology for 60 GHz Wireless Communications", Proceedings of IEEE Mediterranean Microwave Symposium (MMS'09), pp. 1-4, ISBN 978-1-4244-4664-3, Tangier, Morocco, Nov. 2009
 - [45] Regimbal, N.; Deval, Y.; Badets, F. & Begueret, J-B. "Limitations of fractional synthesizers for 60 GHz WPANs: A survey", Proceedings of IEEE North-East Workshop on Circuits and Systems and TAISA Conference, pp. 1-4, ISBN 978-1-4244-4573-8, Toulouse, France, July 2009
 - [46] B. Razavi et al., "A UWB CMOS transceiver," in IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 40, no. 12, pp. 2555-2562, Dec. 2005
 - [47] Razavi, B. "Design of Analog CMOS Integrated Circuits", pp. 1-684, McGraw-Hill, ISBN 978-0072380323, New York, USA 2000
 - [48] Kim, N.; Lee, S. and Rieh, J-S. "A Millimeter-Wave LC Cross-Coupled VCO for 60 GHz WPAN Application in a 0.13- μ m Si RF CMOS Technology". IEEE Journal of Semiconductor Technology and Science, Vol. 8, No. 4, pp. 295–301, ISSN 1598-1657, 2008
 - [49] Farahabadi, P. M.; Naimi, H. M. & Zabihi, M. "An enhanced low phase noise VCO in 130 nm CMOS for 60 GHz applications", Proceedings of 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS), pp. 40-43, ISBN 978-1-4244-4544-8, Shenzhen, China, Fev. 2009
 - [50] Borremans, J.; Dehan, M.; Scheir, K.; Kuijk, M. and Wambacq, P. "VCO design for 60 GHz applications using differential shielded inductors in 0.13 μ m CMOS". Proceedings of IEEE Radio Frequency integrated Circuits Symposium (RFIC 2008), pp. 135-138, ISBN 0-7803-8983-2, Atlanta, Georgia, USA, June 2005

- [51] Sakian, P. v. d.; Heijden, E.; Cheema, H.M.; Mahmoudi, R. and van Roermund, A. "A 57–63 GHz quadrature VCO in CMOS 65 nm". Proceedings of European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC 2009), pp. 120-123, ISBN 978-1-4244-4749-7, Rome, Italy, Sep. 2009
- [52] Michael Kraemer, "Design of a low-power 60 GHz transceiver front-end and behavioral modeling and implementation of its key building blocks in 65 nm CMOS", Micro and nanotechnologies/Microelectronics. INSA de Toulouse, 2010
- [53] Michael Kraemer, Daniela Dragomirescu, and Robert Plana. "A high efficiency differential 60 GHz VCO in a 65 nm CMOS technology for WSN applications". IEEE Microwave and Wireless Components Letters, accepted for publication 2010
- [54] Michael Kraemer, Mariano Ercoli, Daniela Dragomirescu, and Robert Plana. "A wideband single-balanced down-mixer for the 60 GHz band in 65 nm CMOS". In APMC 2010, 2010
- [55] C. Marcu et al., "A 90 nm CMOS Low-Power 60 GHz Transceiver With Integrated Baseband Circuitry," in IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 44, no. 12, pp. 3434-3447, Dec. 2009
- [56] Zhang, Chongfu; Zhang, Qiaoyan; Wang, Ying; Qiu, Kun; Wu, Baojian; Li, Changchun, "Proposal for 60 GHz wireless transceiver for the radio over fiber system", Optics and Laser Technology, Volume 56, p. 146-150, 2014
- [57] Ng'oma, Anthony. "Radio-over-fibre technology for broadband wireless communication systems". Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2005
- [58] Joffray Guillory. "Radio over Fiber (RoF) for the future home area networks". Université Paris-Est, 2012
- [59] Nikos Pleros, Konstantinos Vyrsoinos, Kostas Tsagkaris, and Nikolaos D. Tselikas, "A 60 GHz Radio-Over-Fiber Network Architecture for Seamless Communication with High Mobility", in Journal of Lightwave Technology, vol. 27, no. 12, pp. 1957-1967, June15, 2009
- [60] D. Novak, "Fiber Optics in Wireless Applications", OFC 2004 Short Course 217, 2004
- [61] ITU, "World Telecommunication Development Report 2002: Reinventing Telecoms", March, 2002, available online: <http://www.itu.int/itud/ict/publications/>
- [62] D. K. Mynbaev, L. L. Scheiner, "Fiber Optic Communications Technology", Prentice Hall, New Jersey, 2001
- [63] D. Wake, and K. Beachman, "A Novel Switched Fibre Distributed Antenna System", in Proceedings of European Conference on Optical Communications (ECOC'04), Vol. 5, pp. 132 – 135, 2004

- [64] D. Wake, "Radio over Fiber Systems for Mobile Applications" in Radio over Fiber Technologies for Mobile Communications Networks", H. Al-Raweshidy, and S. Komaki, ed. Artech House, Inc, USA, 2002
- [65] C. Liu, A. Seeds, J. Chadha, P. Stavrinou, G. Parry, M. Whitehead, A. Krysa, and J. Roberts, "Bi-Directional Transmission of Broadband 5.2 GHz Wireless Signals Over Fibre Using a Multiple-Quantum-Well Asymetric Fabry-Perot Modulator/Photodetector", in Proceedings of the Optical Fiber Communications (OFC) Conference. 2003
- [66] Κάλφας Γ., "Ανάπτυξη Πρωτοκόλλου MAC για Δίκτυα Radio over Fiber", Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2010
- [67] Minsu Ko, Myung-Jae Lee, Holger Rucker, and Woo-Young Choi, "Silicon hotonics-wireless interface ICs for micro-/millimeter-wave fiber-wireless networks," Opt. Express 21, 22962-22973, 2013
- [68] Παπαιωάνου Α., "Μελέτη και επίδοση αρχιτεκτονικών μετάδοσης σε συστήματα Radio over Fiber (RoF)", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2014
- [69] Tien-Thang Pham, Alexander Lebedev, Marta Beltrán, Xianbin Yu, Roberto Llorente, Idelfonso Tafur Monroy, Combined single-mode/multimode fiber link supporting simplified in-building 60-GHz gigabit wireless access, Optical Fiber Technology, Volume 18, Issue 4, Pages 226-229, ISSN 1068-5200, July 2012
- [70] B. L. Dang, R. V. Prasad, I. Niemegeers, M. G. Larrode and A. M. J. Koonen, "Toward a Seamless Communication Architecture for In-building Networks at the 60 GHz band," Proceedings. 2006 31st IEEE Conference on Local Computer Networks, pp. 300-307, Tampa, FL, 2006