

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών *Συστήματα
Ασύρματης Επικοινωνίας*

Μεταπτυχιακή Διατριβή



**Μελέτη και Προσομοίωση Επικοινωνιών με Χρήση
Χιλιοστομετρικής Ζώνης Μήκους Κύματος – Millimeter
Waveband (mmWave)**

Γεώργιος Κουγιουμτζίδης

**Επιβλέπων Καθηγητής
Δημοσθένης Βουγιούκας**

Δεκέμβριος 2016

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών Συστήματα

Ασύρματης Επικοινωνίας

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**Μελέτη και Προσομοίωση Επικοινωνιών με Χρήση
Χιλιοστομετρικής Ζώνης Μήκους Κύματος – Millimeter
Waveband (mmWave)**

Γεώργιος Κουγιουμτζίδης

**Επιβλέπων Καθηγητής
Δημοσθένης Βουγιούκας**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου.

Δεκέμβριος 2016

Περίληψη

Η ζώνη συχνοτήτων του χιλιοστομετρικού μήκους κύματος (millimeter wave – mmWave) ή Extremely High Frequency (EHF), αναφέρεται στη φασματική περιοχή από 3 έως 300 GHz. Υπάρχει τεράστιο απόθεμα φάσματος στη συγκεκριμένη συχνοτική περιοχή, πολλές υποζώνες του οποίου παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά αναφορικά με την ασύρματη διάδοση, επιτυγχάνοντας πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Η σχεδίαση συστημάτων επικοινωνιών με χρήση συχνοτήτων mmWave θα πρέπει να υπερκεράσει το βασικό περιορισμό που επιφέρει στη μετάδοση το πολύ μικρό μήκος κύματος, που είναι η μικρή εμβέλεια. Αυτό μεταξύ άλλων, μπορεί να επιτευχθεί με ανάπτυξη δεκτών υψηλής ευαισθησίας, εκπομπή υψηλής κατευθυντικότητας και χρήση κεραιών υψηλής απολαβής. Παρόλα αυτά, το βραχύ μήκος κύματος επιτρέπει σε κεραιές μικρού μεγέθους να επιτύχουν δέσμη εκπομπής πολύ μικρού πλάτους, αυξάνοντας κατά αυτό τον τρόπο τη βέλτιστη χρήση του φάσματος, μέσω της μεγαλύτερης επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων και της ταυτόχρονης αποφυγής παρεμβολών από γειτονικές εκπομπές σημάτων. Για αυτό το λόγο, η χρήση συχνοτήτων mmWave στις ασύρματες επικοινωνίες αποτελεί αντικείμενο που απασχολεί την ερευνητική κοινότητα, ιδίως για την υλοποίηση των δικτύων 5ης γενιάς. Κατά συνέπεια, τα συστήματα mmWave θεωρούνται ως ένα ραγδαία εξελισσόμενο πεδίο των δικτύων νέας γενιάς και η θεωρητική μελέτη και η προσομοίωση τοπολογιών αυτών των συστημάτων θα οδηγήσουν σε μία ολοκληρωμένη αποτύπωση των ζητημάτων της συγκεκριμένης ερευνητικής περιοχής.

Summary

Millimeter wave (mmWave) band or Extremely High Frequency (EHF), refers to the spectral range of 3 to 300 GHz. There is a huge reserve of spectrum in that particular frequency region, many sub-bands of which present very good behaviour with respect to the wireless propagation, achieving very high data rates. The design of communication systems using mmWave frequencies should overcome the main limitation brought about in transmission by the very short wavelength, which is the short range. This impairment can be overcome by developing high sensitivity receivers, high directivity transmissions and using high-gain antennas. However, the short wavelength allows small antennas to achieve very narrow transmit beams, increasing in this way the optimal use of spectrum through greater frequency reuse and simultaneously avoiding interference from neighbouring signal emissions. For this reason, exploiting mmWave frequencies in wireless communication systems is a subject of concern to the research community, especially for the implementation of 5th generation networks. Consequently, mmWave systems are regarded as a rapidly evolving field of next generation networks and the theoretical study and the simulation of topologies of such systems will result in a complete recording of the issues of this research area.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	1
Εισαγωγή	1
1.1 Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας mmWave	1
1.2 Τηλεπικοινωνιακές Εφαρμογές με Συστήματα mmWave	6
1.3 Σχεδιαστικές Προκλήσεις των Συστημάτων mmWave	9
1.4 Σύνομη Περιγραφή των Περιεχομένων των Κεφαλαίων της Διπλωματικής Εργασίας	11
Κεφάλαιο 2	13
Βασικές Αρχές Ασύρματης Επικοινωνίας	13
2.1 Ηλεκτρομαγνητικά Κύματα	13
2.1.1 Ιδιότητες Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων	13
2.1.2 Εξισώσεις Maxwell	14
2.1.3 Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα.....	16
2.2 Παράμετροι Κεραιών	19
2.2.1 Περιοχές Ακτινοβολίας Κεραιών	20
2.2.2 Διάνυσμα Poynting	21
2.2.3 Ένταση Ακτινοβολίας	21
2.2.4 Ισοτροπική Κεραία	22
2.2.5 Διάγραμμα Ακτινοβολίας.....	22
2.2.6 Κατευθυντικότητα	24
2.2.7 Κέρδος Ισχύος	25
2.2.8 Εύρος Ζώνης Κεραίας.....	26
2.3 Κωδικοποίηση Καναλιού.....	27
2.3.1 Κατηγοριοποίηση Τεχνικών Κωδικοποίησης Καναλιού.....	28
2.4 Ψηφιακές Διαμορφώσεις.....	29
2.4.1 Διαμόρφωση Μετατόπισης Πλάτους.....	30
2.4.2 Διαμόρφωση Μετατόπισης Συχνότητας.....	32
2.4.3 Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάσης	34
2.4.4 Τετραγωνική Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάσης	35
2.4.5 Πολυπλεξία Ορθογωνικής Διαίρεσης Συχνότητας.....	36
2.5 Συγχρονισμός και Εκτίμηση Καναλιού	38
2.5.1 Δομή Σήματος για Διευκόλυνση της Επικοινωνίας.....	39
2.5.2 Εκτίμηση Καναλιού	40
2.6 Συστήματα Πολλαπλών Εισόδων - Εξόδων.....	41

2.6.1 Χωρική Πολυπλέξια.....	42
2.6.2 Χωρική Ποικιλομορφία	43
2.6.3 Σχηματισμός Δέσμης.....	44
2.7 Αρχιτεκτονική Ασύρματων Συστημάτων.....	45
2.7.1 Αρχιτεκτονικές Hardware.....	46
2.7.2 Αρχιτεκτονική Συστήματος.....	49
Κεφάλαιο 3	54
Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων στα Συστήματα mmWave	54
3.1 Διάδοση στον Ελεύθερο Χώρο.....	54
3.2 Επίδραση της Ατμόσφαιρας.....	59
3.3 Επίδραση Καιρικών Συνθηκών.....	61
3.4 Βασικοί Τρόποι Διάδοσης στα Συστήματα mmWave.....	63
3.4.1 Περίθλαση.....	63
3.4.2 Ανάκλαση	64
3.4.3 Σκέδαση.....	65
3.5 Διεισδυτικότητα των mmWave Σημάτων	67
3.6 Επίδραση του Φαινομένου Doppler	69
3.7 Διάδοση σε Εξωτερικούς Χώρους.....	71
3.8 Διάδοση σε Εσωτερικούς Χώρους	74
3.8.1 Μοντέλα Ray-Tracing για Εσωτερικούς Χώρους.....	75
3.8.2 Μοντέλα Rayleigh, Rician και Πολυκυματικής Διάλειψης.....	76
Κεφάλαιο 4	78
Κεραίες για Συστήματα mmWave	78
4.1 Κεραίες On-Chip.....	78
4.1.1 Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) Technology.....	79
4.2 Κεραίες In-Package.....	82
4.3 Τοπολογίες Κεραίων για Συστήματα mmWave.....	85
4.4 Προσαρμόσιμες Συστοιχίες Κεραίων για Εφαρμογές mmWave	90
Κεφάλαιο 5	94
Χαρακτηριστικά Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων για Εφαρμογές mmWave	94
5.1 Βασικές Σχεδιαστικές Αρχές Τρανζίστορ για Εφαρμογές mmWave.....	94
5.2 Γραμμές Μεταφοράς και Παθητικά Στοιχεία	99
5.3 Μετατροπείς Αναλογικού Σήματος σε Ψηφιακό.....	103
5.3.1 Pipeline ADC.....	104
5.3.2 Successive Approximation ADCs	105

5.3.3 Time-Interleaved ADC	106
5.3.4 Flash ADC.....	107
5.4 Μετατροπείς Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό.....	109
5.4.1 Current DAC.....	111
5.5 Κωδικοποιητές	113
Κεφάλαιο 6	115
Σχεδιασμός και Εφαρμογές Συστημάτων mmWave	115
6.1 Το Φυσικό Επίπεδο στα Συστήματα mmWave.....	115
6.1.1 Διαμόρφωση, Κωδικοποίηση και Ισοστάθμιση.....	116
6.2 Σχεδιαστικές Προκλήσεις Δικτύων Βασισμένων σε Συστήματα mmWave	119
6.2.1 Κατευθυντικές Κεραίες στο Φυσικό Επίπεδο	119
6.2.2 Device Discovery	121
6.2.3 Ανίχνευση Σύγκρουσης και Αποφυγή Σύγκρουσης	122
6.2.4 Αξιοποίηση Καναλιού και Χωρική Επαναχρησιμοποίηση	124
6.3 Χρήση Συστημάτων mmWave σε Δίκτυα Backhaul	125
6.4 Χρήση Αναμεταδοτών για Αύξηση της Ραδιοκάλυψης	128
6.5 Υποστήριξη Πολυμεσικών Εφαρμογών.....	130
6.6 Κυψελοειδή Δίκτυα με Συστήματα mmWave	134
6.7 Το Πρότυπο IEEE 802.11ad	135
Κεφάλαιο 7	139
Προσομοίωση Συστήματος Επικοινωνίας mmWave	139
7.1 Πηγή Δεδομένων.....	139
7.2 Κωδικοποίηση Πηγής.....	140
7.3 Ψηφιακή Διαμόρφωση	141
7.4 Διάταξη Κεραιών στον Πομπό.....	142
7.5 Κανάλι Μετάδοσης	143
7.6 Διάταξη Κεραιών στο Δέκτη.....	144
Κεφάλαιο 8	148
Επίλογος	148
8.1 Συμπεράσματα από τη Μελέτη των Συστημάτων Επικοινωνίας mmWave	148
8.2 Μελλοντικές Εφαρμογές των Συστημάτων mmWave	151
Βιβλιογραφία.....	153

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας mmWave

Η αναδυόμενη τεχνολογία των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας με λειτουργία στη ζώνη συχνοτήτων χιλιοστομετρικού μήκους κύματος (millimeter wave, mmWave), έρχεται να προστεθεί στον συνεχώς αναπτυσσόμενο κλάδο των ασύρματων επικοινωνιών, ο οποίος με την πάροδο των χρόνων έχει επεκταθεί από τεχνολογίες point-to-point, σε συστήματα ραδιοφωνικών και τηλεοπτικών μεταδόσεων και τέλος, σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών. Με την αλματώδη πρόοδο της τεχνολογίας, η χρήση της ασύρματης επικοινωνίας έχει πλέον γίνει διάχυτη. Η σύγχρονη κοινωνία βασίζεται στην ασύρματη δικτύωση, καθώς όλο και περισσότεροι άνθρωποι χρησιμοποιούν δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Area Network, WLAN) και ασύρματα προσωπικά δίκτυα (Wireless Personal Area Network, WPAN), τα οποία έχουν αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό κατά τα τελευταία είκοσι χρόνια. Η αξιοσημείωτη δημοφιλία αυτών των τεχνολογιών προκαλεί το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας και της βιομηχανίας τηλεπικοινωνιών για αναζήτηση συνεχώς μεγαλύτερου ραδιοφάσματος, προκειμένου να είναι δυνατή η παροχή προηγμένων υπηρεσιών.

Η ασύρματη επικοινωνία είναι ένα μετασηματιστικό μέσο που επιτρέπει τη μετακίνηση της εργασίας, της εκπαίδευσης και της ψυχαγωγίας χωρίς καμία φυσική σύνδεση. Οι δυνατότητες των ασύρματων επικοινωνιών εξακολουθούν να επηρεάζουν την ανθρώπινη παραγωγικότητα και καινοτομία σε πολλούς τομείς. Η επικοινωνία σε συχνότητες λειτουργίας mmWave αποτελεί την πιο πρόσφατη δραστική εξέλιξη των ασύρματων συστημάτων. Το ενδιαφέρον για την τεχνολογία mmWave είναι στα

σπάργανα και καθοδηγείται από την επιθυμία των καταναλωτών για συνεχώς υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και την απαίτηση για μικρότερες καθυστερήσεις και σταθερή συνδεσιμότητα των ασύρματων συσκευών.

Στα συστήματα mmWave το διαθέσιμο φάσμα είναι απaráμιλλο σε σύγκριση με κυψελοειδή συστήματα και ασύρματα συστήματα τοπικών δικτύων (WLAN) που λειτουργούν σε συχνότητες μικρότερες των 10 GHz. Πιο συγκεκριμένα, συστήματα ασύρματης επικοινωνίας με συχνότητα λειτουργίας στα 60 GHz προσφέρουν από 10 έως 100 φορές περισσότερο φάσμα από το φάσμα που είναι διαθέσιμο για τα συμβατικά ασύρματα τοπικά δίκτυα με λειτουργία στις μη αδειοδοτημένες ISM ζώνες ή για χρήστες 4G κυψελοειδών συστημάτων που λειτουργούν με συχνότητα φέροντος μικρότερη από 6 GHz. Περισσότερα από 20 GHz φάσματος είναι διαθέσιμα για χρήση κυψελοειδούς και WLAN κίνησης μόνο στις ζώνες των 28, 38, και 72 GHz, ενώ εκατοντάδες gigahertz ραδιοφάσματος θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για συχνότητες λειτουργίας μεγαλύτερες από 100 GHz. Πρόκειται για εντυπωσιακή ποσότητα διαθέσιμων πόρων φάσματος, ιδιαίτερα αν ληφθεί υπόψη ότι το σύνολο των κινητών τηλεφώνων στον πλανήτη λειτουργούν σήμερα σε λιγότερο από 1 GHz κατανεμημένου φάσματος. Το επιπλέον φάσμα καθιστά δυνατή την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών δεδομένων, ενώ παρέχει επίσης περισσότερους πόρους για διαμοιρασμό μεταξύ μεγάλου αριθμού χρηστών.

Οι ασύρματες επικοινωνίες mmWave είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει την υλοποίηση εφαρμογών τόσο σε υφιστάμενες, όσο και σε νέες υλοποιήσεις ασύρματης δικτύωσης. Ήδη συστήματα mmWave στη ζώνη συχνοτήτων των 60 GHz έχουν εμπορική ανάπτυξη σε καταναλωτικές συσκευές μέσω του προτύπου ασύρματων τοπικών δικτύων IEEE 802.11ad. Επίσης, η βιομηχανία των κυψελοειδών συστημάτων μόλις αρχίζει να συνειδητοποιεί τα πλεονεκτήματα του πολύ μεγαλύτερου εύρους ζώνης για τους χρήστες κινητών τηλεφώνων που προσφέρει η λειτουργία στις ζώνες συχνοτήτων mmWave. Αυτές οι εφαρμογές WLANs, WPANs, αλλά και δικτύων backhaul και κυψελοειδών συστημάτων στη συχνότητα λειτουργίας των 60 GHz είναι μόνο η αρχή, καθώς πρόκειται για τις πρώτες εκδόσεις της επόμενης γενιάς των mmWave και terahertz συστημάτων που θα είναι σε θέση να υποστηρίξουν ακόμη υψηλότερο εύρος ζώνης και περαιτέρω πρόοδο της συνδεσιμότητας.

Παρά το γεγονός ότι οι απαιτήσεις των καταναλωτών και οι μετασχηματιστικές εφαρμογές τροφοδοτούν την ανάγκη για μεγαλύτερο εύρος ζώνης συχνοτήτων στα ασύρματα δίκτυα, η ταχεία ανάπτυξη και η μείωση των τιμών των ολοκληρωμένων αναλογικών κυκλωμάτων, των baseband ψηφιακών μνημών και των επεξεργαστών είναι που έχουν καταστήσει εφικτή αυτή την πρόοδο. Η πρόσφατη ανάπτυξη ολοκληρωμένων πομπών και δεκτών mmWave, με προηγμένα αναλογικά κυκλώματα και κυκλώματα ραδιοσυχνοτήτων (RF) και οι νέες τεχνικές phased array και beamforming, επίσης ανοίγουν το δρόμο για το μέλλον των συστημάτων mmWave. Η λειτουργία συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας στις συχνότητες των συστημάτων mmWave με λογικό κόστος υλοποίησης, είναι σε μεγάλο βαθμό αποτέλεσμα της συνεχούς εξέλιξης των τεχνολογιών CMOS, καθώς και των τεχνολογιών γερμανίου και πυριτίου (SiGe).

Name	Frequency range	Applications
Low frequency (LF)	30 to 300 kHz	Navigation, time standards
Medium frequency (MF)	300 kHz to 3 MHz	Marine/aircraft navigation, AM broadcast
High frequency (HF)	3 to 30 MHz	AM broadcasting, mobile radio, amateur radio, shortwave broadcasting.
Very high frequency (VHF)	30 to 300 MHz	Land mobile, FM/TV broadcast, amateur radio
Ultra high frequency (UHF)	300 MHz to 3 GHz	Cellular phones, mobile radio, wireless LAN, PAN
Super high frequency (SHF), millimeter-wave range	3 to 30 GHz	Satellite, radar, backhaul, TV, WLAN, 5G cellular
Extremely high frequency (EHF)	30 to 300 GHz	Satellite, radar, backhaul, experimental, 5G cellular
Terahertz, tremendously high frequency (THF) or far infrared (FIR)	300 GHz to IR	R & D, experimental

Πίνακας 1.1. Τυποποίηση και εφαρμογές των περιοχών του ραδιοφάσματος

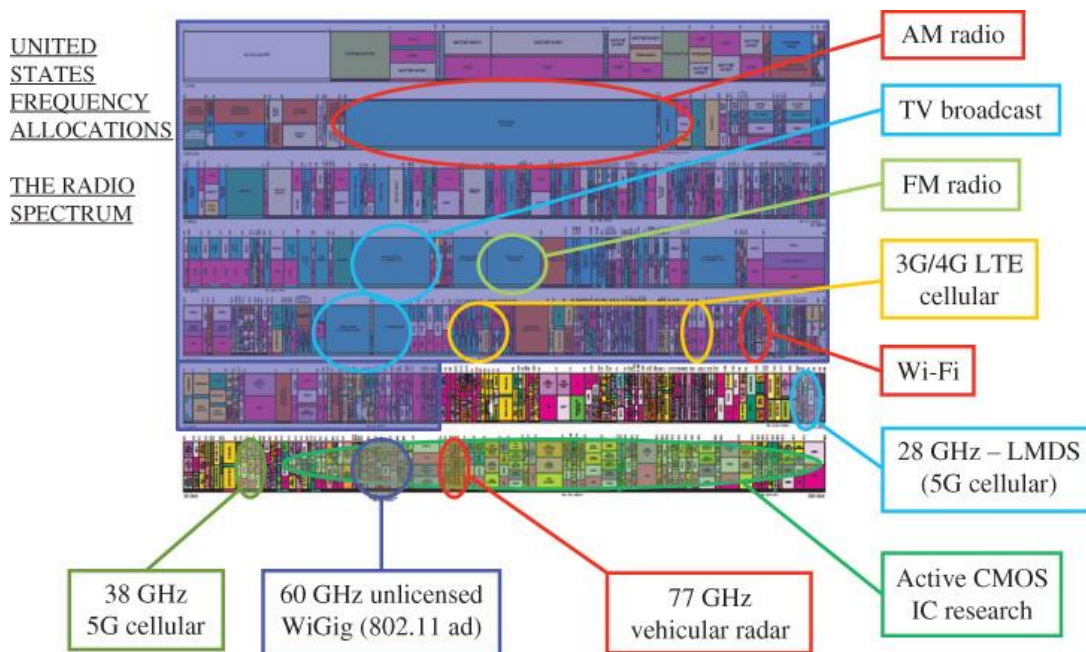
Η κατανομή του φάσματος απορρέει από την παγκόσμια κατανομή ραδιοφάσματος υπό την αιγίδα του World Radiocommunication Conference (WRC) και της International Telecommunication Union (ITU). Τα σημερινά κυψελοειδή και προσωπικά συστήματα επικοινωνίας λειτουργούν ως επί το πλείστον στις UHF συχνότητες και κυμαίνονται από 300 MHz έως 3 GHz, ενώ τα σημερινά παγκόσμια μη αδειοδοτημένα WLANs και

WPANs χρησιμοποιούν τις Unlicensed National Information Infrastructure (U-NII) ζώνες συχνοτήτων των 900 MHz, 2,4 GHz και 5,8 GHz. Η μεγάλη επιτυχία των WLANs οφείλεται στην καθολική διεθνή συμφωνία για χρήση των 2.4 GHz ISM και 5 GHz U-NII συχνοτήτων λειτουργίας, η οποία επέτρεψε στους μεγάλους κατασκευαστές της βιομηχανίας τηλεπικοινωνιών να διαθέσουν σημαντικούς πόρους για τη δημιουργία προϊόντων που θα μπορούσαν να πωλούνται και να χρησιμοποιούνται σε παγκόσμιο επίπεδο.

Band	Frequency range	Applications
L	1 to 2 GHz	Satellite, navigation (GPS, etc.), cellular phones
S	2 to 4 GHz	Satellite, SiriusXM radio, unlicensed (Wi-Fi, Bluetooth, etc.), cellular phones
C	4 to 8 GHz	Satellite, microwave relay, Wi-Fi, DSRC
X	8 to 12 GHz	Radar
K _u	12 to 18 GHz	Satellite TV, police radar
K	18 to 26.5 GHz	Microwave backhaul
K _o	26.5 to 40 GHz	Microwave backhaul, 5G cellular
Q	30 to 50 GHz	Microwave backhaul, 5G cellular
U	40 to 60 GHz	Experimental, radar
V	50 to 75 GHz	New WLAN, 802.11ad/WiGig
E	60 to 90 GHz	Microwave backhaul
W	75 to 110 GHz	Automotive radar
F	90 to 140 GHz	Experimental, radar
D	110 to 170 GHz	Experimental, radar

Πίνακας 1.2. Προσδιορισμός και εφαρμογές των ζωνών συχνοτήτων

Χωρίς την ύπαρξη διεθνών συμφωνιών για τη χρήση του φάσματος δεν είναι δυνατό να υπάρξουν προϊόντα νέων τεχνολογιών που να στοχεύουν στην παγκόσμια αγορά. Για το λόγο αυτό, οι κυβερνήσεις των ΗΠΑ, της Ευρώπης, της Κορέας, την Ιαπωνίας και της Αυστραλίας έχουν ακολουθήσει σε μεγάλο βαθμό τις συστάσεις της ITU, η οποία ορίζει τις συχνότητες μεταξύ 57 και 66 GHz για εφαρμογές επικοινωνιών χωρίς άδεια. Στις ΗΠΑ, η FCC έχει ορίσει τη ζώνη συχνοτήτων 57-64 GHz για χρήση χωρίς άδεια, στην Ευρώπη η CEPT έχει διαθέσει τη ζώνη 59-66 GHz, η Κορέα και η Ιαπωνία έχουν ορίσει τις ζώνες 57-66 GHz και 59-66 GHz, αντίστοιχα, ενώ η Αυστραλία έχει αφιερώσει μια μικρότερη ζώνη των 59,3 - 62,9 GHz. Κατά συνέπεια, υπάρχει περίπου 7 GHz φάσματος διαθέσιμο σε όλο τον κόσμο για συσκευές με συχνότητα λειτουργίας στα 60 GHz.



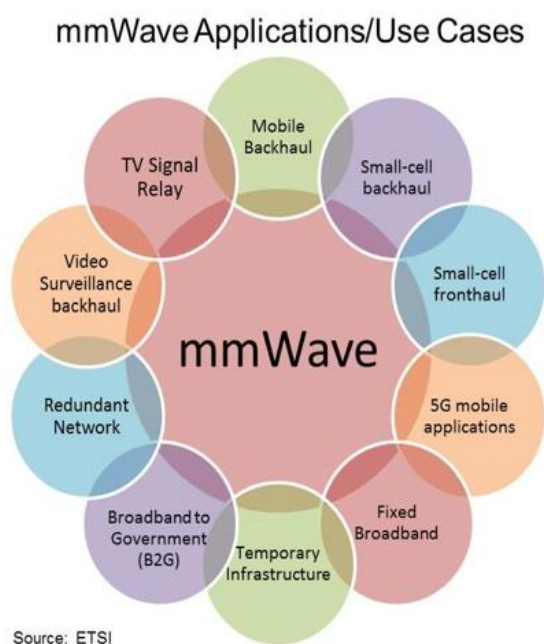
Σχήμα 1.1. Εμπορική χρήση του ραδιοφάσματος στις ΗΠΑ

Τα συστήματα mmWave αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο κατά την ανάπτυξη των δικτύων 5ης γενιάς. Τα κυψελοειδή συστήματα που θα κάνουν χρήση των συχνοτήτων mmWave είναι πιθανό να αναπτυχθούν σε συχνότητες αδειοδοτημένου φάσματος, όπως είναι για παράδειγμα οι συχνότητες των 28, 38 ή 72 GHz, επειδή το αδειοδοτημένο φάσμα εγγυάται καλύτερα την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών. Τα 28 GHz και η ζώνη των 38-39 GHz είναι σήμερα διαθέσιμα και μπορούν να προσφέρουν κατανομή φάσματος εύρους ζώνης μεγαλύτερης του 1 GHz, ενώ η E-Band άνω των 70 GHz διαθέτει περισσότερα από 14 GHz. Οι άδειες των 28 και 38 GHz αρχικά προοριζόταν για συστήματα LMDS στα τέλη της δεκαετίας του 1990 και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν τόσο για κυψελοειδή συστήματα, όσο και για συστήματα backhaul.

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα κυψελοειδή συστήματα βασισμένα σε συχνότητες mmWave έχουν προκαλέσει το ενδιαφέρον μεγάλων εταιρειών τηλεπικοινωνιών. Στη χρήση των συχνοτήτων mmWave για ευρυζωνική πρόσβαση έχει πρωτοπορήσει η Samsung, η οποία έχει αναφέρει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων της τάξης των 400 Mbps έως 2,77 Gbps για εύρος ζώνης 1 GHz και για απόσταση 1 χιλιομέτρου. Επίσης, η Nokia απέδειξε πρόσφατα ότι η συχνότητα των 73 GHz θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παροχή μέγιστων ρυθμών δεδομένων που ξεπερνούν τα 15 Gbps.

1.2 Τηλεπικοινωνιακές Εφαρμογές με Συστήματα mmWave

Η υλοποίηση δικτύων WPAN και WLAN στη συχνότητα λειτουργίας των 60 GHz είναι μόνο το πρώτο βήμα στην επανάσταση που επιφέρουν τα συστήματα mmWave στις τηλεπικοινωνίες. Τα **κέντρα δεδομένων** (data centers) μπορούν να μειώσουν το κόστος λειτουργίας τους με χρήση ζεύξεων mmWave επικοινωνίας για τη διασύνδεση των υπολογιστών, καθώς αυτές παρέχουν μεγάλο εύρος ζώνης, ευελιξία και χαμηλή ισχύ κατανάλωσης. Οι ευρυζωνικές ενσύρματες συνδέσεις στα κέντρα δεδομένων δεν θα είναι σε θέση να υποστηρίξουν τις μελλοντικές ανάγκες σε εύρος ζώνης, λόγω της αύξησης της απώλειας σήματος στο μεταλλικό σύρμα όσο αυξάνεται η συχνότητα. Για αυτό το λόγο, τα κέντρα δεδομένων αναμένεται να κάνουν μετάβαση σε άλλες τεχνολογίες για τη διασύνδεση των υπολογιστών. Μία ασύρματη υλοποίηση επιτρέπει την ευέλικτη σχεδίαση ενός κέντρου δεδομένων, για παράδειγμα με την τοποθέτηση των servers και επιτρέπει την εύκολη αναδιαμόρφωση. Ο πιο ευέλικτος σχεδιασμός και η μείωση του αριθμού των καλωδίων και αγωγών, επιτρέπει την καλύτερη τοποθέτηση των πηγών θερμότητας, που με τη σειρά της οδηγεί σε λιγότερο αυστηρές απαιτήσεις ψύξης και ενέργειας.



Σχήμα 1.2. Εφαρμογές των συστημάτων mmWave

Τα συστήματα mmWave μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την **αντικατάσταση των ενσύρματων συνδέσεων εντός των chips**. Το εύρος ζώνης των χάλκινων διασυνδέσεων που χρησιμοποιούνται στα ολοκληρωμένα κυκλώματα αποτελεί σημαντικό σχεδιαστικό ζήτημα, καθώς όταν αυξηθεί η συχνότητα του ρολογιού, το passband εύρος ζώνης μειώνεται λόγω της αυξημένης αντίστασης που παρουσιάζουν τα μεταλλικά σύρματα. Μια on-chip ή in-package κεραία μπορεί να μετριάσει αυτές τις σχεδιαστικές προκλήσεις, επειδή θα μειώσει το συνολικό μήκος του σύρματος που θα συναντήσει ένα σήμα. Ως εκ τούτου, οι κεραίες που αναπτύχθηκαν για συστήματα με συχνότητα λειτουργίας στα 60 GHz μπορούν να παρέχουν λύσεις σε πολλές μελλοντικές εφαρμογές που θα απαιτούν πολύ υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων μέσα σε ένα chip ή package.

Τα συστήματα mmWave μπορούν να χρησιμοποιηθούν για **εμφάνιση πληροφοριών**, καθώς το μαζικό τους φάσμα σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων καθιστά τη μεταφορά των πληροφοριών πραγματικά διάχυτη (ubiquitous) και σχεδόν απεριόριστη. Η αντικατάσταση των καλωδίων χαλκού με το τεράστιο εύρος ζώνης των ραδιοζεύξεων που μπορούν να τοποθετηθούν για παράδειγμα στις εισόδους κτιρίων, σε διαδρόμους, σε πινακίδες αυτοκινητοδρόμων και φανοστάτες, σύντομα θα επιτρέψει την εμφάνιση ολόκληρων βιβλιοθηκών πληροφοριών σε ανθρώπους που περπατούν ή οδηγούν αυτοκίνητο.

Μία ακόμη εφαρμογή των συστημάτων mmWave θα είναι **στο σπίτι και στο γραφείο του μέλλοντος**, καθώς όσο οι συσκευές και τα προϊόντα mmWave θα εξελίσσονται κατά τις επόμενες δύο δεκαετίες, ο τρόπος με τον οποίο διασυνδέονται ενσύρματα τα σπίτια και τα γραφεία θα αλλάξει ριζικά. Οι απαιτήσεις για εύρος ζώνης τόσο για τις οικιακές εφαρμογές, όσο και για τις επιχειρήσεις θα ανέβουν στα ύψη, ενώ και ο αριθμός των ασύρματων συσκευών θα αυξηθεί δραματικά. Τα σημερινά καλώδια για το Internet θα αντικατασταθούν από το τεράστιο εύρος ζώνης των ραδιοδικτύων mmWave, αποφεύγοντας έτσι την ανάγκη για ενσύρματες θύρες για το Internet και για τηλεφωνικές υπηρεσίες. Πολλές ασύρματες συσκευές μνήμης χαμηλής ισχύος θα αντικαταστήσουν τα βιβλία και τους σκληρούς δίσκους που είναι ογκώδεις και αναποτελεσματικοί. Ακόμα και η καλωδίωση των κτιρίων (π.χ., Cat6 καλώδια Ethernet) θα αντικατασταθεί από ασύρματα συστήματα χαμηλού κόστους, υψηλού εύρους ζώνης,

με δυνατότητα ταχείας ανάπτυξης και με ικανότητα προσαρμόσιμης κάλυψης για οποιοδήποτε όροφο των κτιρίων.

Τα συστήματα mmWave βρίσκουν επίσης πολλές **εφαρμογές στα οχήματα**. Οι ευρυζωνικές επικοινωνίες μέσα σε ένα αυτοκίνητο επιδιώκουν να αφαιρέσουν τις ενσύρματες συνδέσεις των συσκευών των οχημάτων (π.χ. τα καλώδια μεταξύ του DVD player στο ταμπλό και τις οθόνες των πίσω καθισμάτων), καθώς και να παρέχουν συνδεσιμότητα πολυμέσων από φορητές συσκευές μέσα στο όχημα (π.χ. MP3 players, κινητά τηλέφωνα, tablets, φορητούς υπολογιστές). Τα συστήματα mmWave είναι ιδιαίτερα ελκυστικά για τις επικοινωνίες εντός ενός οχήματος, λόγω της αδυναμίας τους να διεισδύουν εύκολα και να παρεμβάλουν με άλλα δίκτυα οχημάτων. Υπάρχουν φυσικά και εφαρμογές εκτός του οχήματος, όπως επικοινωνία οχήματος-οχήματος (Vehicle-to-Vehicle, V2V), η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποφυγή σύγκρουσης ή την ανταλλαγή πληροφοριών για την κίνηση. Επίσης, επικοινωνία οχήματος-υποδομής (Vehicle-to-Infrastructure, V2I), η οποία και αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση πληροφοριών για την κυκλοφορία ή για την παροχή επέκτασης του εύρους κάλυψης των κινητών ευρυζωνικών δικτύων.

Μία ακόμη εφαρμογή των συστημάτων mmWave είναι στα **κυψελοειδή και προσωπικά κινητά δίκτυα**. Αρχίζει να γίνεται αντιληπτό ότι η ραδιοδιάδοση σε συχνότητες mmWave μπορεί όχι μόνο να είναι βιώσιμη, αλλά στην πραγματικότητα μπορεί να έχει μεγαλύτερα οφέλη από τα σημερινά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, αν αναλογιστεί κανείς τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν μικροσκοπικές, υψηλής απολαβής κατευθυνόμενες κεραίες, χωρική πολυπλεξία, νέα ηλεκτρονικά εξαρτήματα χαμηλής ισχύος, προηγμένη επεξεργασία σήματος και αδρανείς ή ελάχιστα χρησιμοποιημένες ζώνες του ραδιοφάσματος που έχουν πολλές δεκάδες gigahertz εύρους ζώνης στη διάθεσή τους. Τα βασικά τεχνολογικά συστατικά πρόκειται σύντομα να ωριμάσουν ώστε να επιτραπεί η επίτευξη ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων για κινητά της τάξης των multi-Gbps. Τα μελλοντικά κυψελοειδή δίκτυα mmWave θα μπορούν να χρησιμοποιήσουν κανάλια εύρους ζώνης 1 ή 2 GHz, έναντι των 40 MHz των καναλιών των συστημάτων LTE και με χρήση Time Division Duplexing (TDD) σε ένα σχετικά μικρό κελί (ακτίνας 200 m), ο τελικός χρήστης θα απολαμβάνει ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων που εύκολα θα μπορούν να αυξηθούν 20 φορές πάνω από τα σημερινά δίκτυα LTE, επιτρέποντας multi-Gbps συνδέσεις κινητών.

Λόγω της σημαντικής απορρόφησης των σημάτων από το οξυγόνο, το φάσμα των 60 GHz είναι ιδανικό για **αεροδιαστημικές εφαρμογές** επικοινωνίας, όπου πρέπει να αποφεύγεται η επίγεια υποκλοπή των σημάτων. Ως εκ τούτου, πολλοί κανονισμοί φάσματος έχουν διαθέσει τη συχνότητα των 60 GHz για intersatellite επικοινωνία. Μία αναδυόμενη εφαρμογή της αεροδιαστημικής στη συχνότητα των 60 GHz είναι η διανομή πολυμέσων μέσα στα αεροσκάφη, προκειμένου να μειωθεί η καλωδίωση εντός της καμπίνας. Η δυνατότητα εντοπισμού των σημάτων στη συχνότητα των 60 GHz και οι τεράστιοι πόροι εύρους ζώνης κάνουν τα 60 GHz ελκυστικά σε σχέση με τις συχνότητες μικροκυμάτων. Δυστυχώς, για την προστασία της intersatellite επικοινωνίας από ασύρματες εφαρμογές εντός του αεροσκάφους, απαγορεύεται αυτή τη στιγμή η ασύρματη επικοινωνία στα 60 GHz στα αεροσκάφη. Αυτοί οι κανονισμοί ωστόσο είναι πιθανό να αλλάξουν μελλοντικά υπό την πίεση της βιομηχανίας και της απόδειξης της εφικτότητας της συνύπαρξης των δικτύων. Επίσης, καθώς τα συστήματα mmWave θα γίνονται πιο ώριμα, επιπλέον ζώνες υψηλής εξασθένισης, όπως αυτές των 183 και 380 GHz θα βρουν χρήση σε εφαρμογές αεροδιαστημικής.

1.3 Σχεδιαστικές Προκλήσεις των Συστημάτων

mmWave

Τα προβλήματα υλοποίησης των επικοινωνιών mmWave εντοπίζονται σε πολλά επίπεδα της στοίβας των συστημάτων επικοινωνίας. Στο hardware επίπεδο του PHY, οι κεραίες αποτελούν σημαντική σχεδιαστική πρόκληση. Για να ελαχιστοποιηθεί το κόστος υλοποίησης, οι κατασκευαστές των mmWave chipsets μπορεί να προτιμήσουν να εκμεταλλευτούν το μικρό μήκος κύματος του φέροντος, με άμεση ενσωμάτωση κεραιών ή συστοιχιών κεραιών on-chip ή in-package. Για τις απλούστερες και χαμηλότερου κόστους υλοποιήσεις, οι υψηλής απολαβής λύσεις μονού chip είναι ελκυστικές. Ωστόσο, Οι λύσεις μονών κεραιών πρέπει να ξεπεράσουν τις προκλήσεις της χαμηλής on-chip απόδοσης, ενώ στις in-package κεραίες πρέπει να ξεπεράσουν τις απώλειες διασύνδεσης του package. Τα συστήματα mmWave μπορεί επίσης να χρησιμοποιούν πολλά μικρά διαστήματα μεταξύ των κεραιών σε packages ή σε πλακέτες κυκλωμάτων, μικρότερα από ένα εκατοστό, ενώ χρησιμοποιούν υλικά υψηλής διαπερατότητας. Οι adaptive ή switched-beam συστοιχίες κεραιών μπορούν να παρέχουν υψηλό κέρδος στις κεραίες εκπομπής και λήψης, αλλά απαιτούν

τροποποιήσεις του πρωτοκόλλου στο επίπεδο επεξεργασίας σήματος του PHY και στο στρώμα ζεύξης δεδομένων για να κατευθύνουν τις δέσμες.

Ακρογωνιαίος λίθος των κυκλωμάτων mmWave χαμηλού κόστους, είναι η χρήση της CMOS ή SiGe τεχνολογίας. Οι εφαρμογές Silicon on Insulator (SOI) CMOS είναι επίσης ελκυστικές για high-end εφαρμογές, καθώς παρέχουν εντυπωσιακούς συντελεστές ποιότητας (Q), λόγω των μειωμένων τιμών παρασιτικών χωρητικοτήτων και αυτεπαγωγών. Οι εφαρμογές SOI ωστόσο, πάσχουν από αυξημένο κόστος σε σύγκριση με το κοινό CMOS με ενωμένα το κανάλι της συσκευής και το υπόστρωμα. Επειδή οι εφαρμογές CMOS έχουν πλέον επιτύχει συχνότητες διέλευσης της τάξης των εκατοντάδων gigahertz, είναι εφικτές οι υλοποιήσεις single-chip συστημάτων mmWave, ολοκληρωμένων με ψηφιακό baseband και αναλογικό mmWave front end. Η on-chip ολοκλήρωση θα διευκολύνει επίσης τεχνικές όπως η ισοστάθμιση μικτού σήματος, που μπορεί να βελτιώσει την απόδοση των ολοκληρωμένων συστημάτων έναντι των multichip λύσεων.

Η επεξεργασία σήματος επικοινωνίας στα συστήματα mmWave επίσης δημιουργεί νέες προκλήσεις. Αν και οι ασύρματες mmWave ζεύξεις μπορούν να μοντελοποιηθούν με χρήση συμβατικής, γραμμικής, σύνθετης θεωρίας συστήματος baseband, τα χαρακτηριστικά της ασύρματης διάδοσης mmWave, σε συνδυασμό με τις σχεδιαστικές απαιτήσεις του mmWave hardware, παράγουν μοναδικές σχεδιαστικές αποφάσεις στο PHY επίπεδο. Η διαμόρφωση και η επιλογή αλγόριθμου ισοστάθμισης πρέπει να λαμβάνουν υπόψη το παράγωγο tradeoff μεταξύ της πολυπλοκότητας του συστήματος κατευθυντικότητας και της πολυπλοκότητας της ισοστάθμισης. Για παράδειγμα, ένα σύστημα που χρησιμοποιεί mmWave omni κατευθυντικές κεραιές μπορεί να υποφέρει από ισχυρή ISI (Inter Symbol Interference), λόγω των καναλιών πολλαπλών διαδρομών τα οποία προκαλούν την επικάλυψη και αλληλεπίδραση μεταξύ των διαδοχικών συμβόλων που φθάνουν στο δέκτη.

Πάνω από το επίπεδο PHY, το επίπεδο MAC των συσκευών mmWave πρέπει επίσης να εξετάσει μοναδικούς παράγοντες σχεδιασμού. Το μεγαλύτερο μέρος του υπολογιστικού βάρους της κατευθυντικότητας των δεσμών πέφτει στο επίπεδο MAC. Εκτός από τη μείωση της πολυπλοκότητας μέσω του βέλτιστου συν-σχεδιασμού της διεύθυνσης της δέσμης και των αλγορίθμων διαμόρφωσης, η διεύθυνση της δέσμης παρουσιάζει

προβλήματα σχετικά με την ανακάλυψη γείτονα και των κρυφών και εκτεθειμένων κόμβων σε ένα δίκτυο. Η ανακάλυψη γείτονα, η οποία σύμφωνα με το πρωτόκολλο σύνδεσης διαχειρίζεται την ενεργοποίηση και διατήρηση της σύνδεσης, είναι ιδιαίτερα δύσκολη με την κατευθυντικότητα δεσμών και την κίνηση των συσκευών. Το πρόβλημα των κρυφών κόμβων, όπου μια συσκευή συντονισμού δεν είναι σε θέση να αποτρέψει τη μετάδοση από μια συσκευή παρεμβολής, είναι αρκετά δύσκολο σε συστήματα μικροκυμάτων με κατευθυντικές κεραίες. Η προσθήκη των πολύ κατευθυντικών mmWave κεραιών επιδεινώνει αυτό το πρόβλημα. Οι εκτεθειμένοι κόμβοι, οι οποίοι εμποδίζονται από το να διαβιβάσουν λόγω παρεμβολών, είναι πιο πιθανό να παρουσιαστούν με τα συμβατικά πρωτόκολλα MAC στα συστήματα mmWave, λόγω της κατευθυντικότητας των «all clear» μηνυμάτων των κεραιών mmWave.

1.4 Σύντομη Περιγραφή των Περιεχομένων των Κεφαλαίων της Διπλωματικής Εργασίας

Στο **2ο Κεφάλαιο** της διπλωματικής εργασίας γίνεται σύντομη περιγραφή των βασικών αρχών των ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας. Περιγράφονται οι ιδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και αναλύονται οι παράμετροι των κεραιών, ενώ στη συνέχεια εξετάζονται τα δομικά συστατικά των ασύρματων συστημάτων, καλύπτοντας ζητήματα της κωδικοποίησης καναλιού, των ψηφιακών διαμορφώσεων, του συγχρονισμού και της εκτίμησης καναλιού, ενώ τέλος γίνεται αναφορά στα συστήματα MIMO και στην αρχιτεκτονική hardware και συστήματος των ασύρματων συστημάτων.

Στο **3ο Κεφάλαιο** εξετάζεται η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στα συστήματα mmWave. Αναλύεται η διάδοση στον ελεύθερο χώρο και μελετάται η επίδραση της ατμόσφαιρας και των καιρικών συνθηκών. Στη συνέχεια εξετάζονται οι βασικοί τρόποι διάδοσης στα συστήματα mmWave, οι διεισδυτικότητα των σημάτων mmWave, η επίδραση του φαινομένου Doppler και τέλος αναλύεται η διάδοση σε εξωτερικούς και εσωτερικούς χώρους.

Στο **4ο Κεφάλαιο** γίνεται αναφορά στις κεραίες των συστημάτων mmWave, με ανάλυση των κεραιών on-chip, των κεραιών in-package και αναφορά στις τοπολογίες των κεραιών και στις προσαρμόσιμες συστοιχίες κεραιών για εφαρμογές συστημάτων mmWave.

Στο **5^ο Κεφάλαιο** αναλύονται τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων για εφαρμογές mmWave. Αρχικά, γίνεται αναφορά στις βασικές σχεδιαστικές αρχές των τρανζίστορ που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές mmWave και έπειτα εξετάζονται συστατικά στοιχεία των συστημάτων mmWave, όπως γραμμές μεταφοράς και παθητικά στοιχεία, μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό και μετατροπείς ψηφιακού σήματος σε αναλογικό και κωδικοποιητές.

Στο **6^ο Κεφάλαιο** μελετάται ο σχεδιασμός και οι εφαρμογές των συστημάτων mmWave, με αναφορά στο φυσικό επίπεδο, καθώς και στις σχεδιαστικές προκλήσεις των δικτύων που βασίζονται σε συστήματα mmWave. Έπειτα εξετάζεται η χρήση των συστημάτων mmWave σε δίκτυα backhaul, η χρήση αναμεταδοτών για αύξηση της ραδιοκάλυψης, η υποστήριξη πολυμεσικών εφαρμογών και τέλος αναλύονται τα κυψελοειδή δίκτυα με συστήματα mmWave, καθώς και το πρότυπο IEEE 802.11ad.

Στο **7^ο Κεφάλαιο** γίνεται περιγραφή και ανάλυση της προσομοίωσης ενός συστήματος επικοινωνίας mmWave.

Στο **8^ο Κεφάλαιο** περιλαμβάνονται τα συμπεράσματα από τη μελέτη και προσομοίωση των συστημάτων mmWave και γίνεται αναφορά σε πιθανές μελλοντικές εφαρμογές τους.

Κεφάλαιο 2

Βασικές Αρχές Ασύρματης Επικοινωνίας

2.1 Ηλεκτρομαγνητικά Κύματα

Ηλεκτρομαγνητικό κύμα ονομάζεται η ταυτόχρονη διάδοση ενός ηλεκτρικού και ενός μαγνητικού πεδίου. Το αίτιο δημιουργίας ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι η επιταχυνόμενη κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων. Όταν έχουμε ένα σταθερό ηλεκτρικό ή ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο, δηλαδή είτε ακίνητα φορτία, είτε φορτία που κινούνται με σταθερή ταχύτητα, δεν είναι δυνατή η παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Στην περίπτωση όμως που έχουμε ηλεκτρικά φορτία που επιταχύνονται, τα μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Για τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη κάποιου ελαστικού μέσου, καθώς έχουν την ιδιότητα να διαδίδονται και στο κενό. Η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο κενό ισούται με την ταχύτητα του φωτός $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, ενώ η ταχύτητα διάδοσής του σε κάποιο μέσο είναι μικρότερη και εξαρτάται από τη φύση του μέσου.

2.1.1 Ιδιότητες Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων

Από τη μελέτη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων διαπιστώθηκε ότι:

- α) τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι εγκάρσια
- β) τα διανύσματα του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι κάθετα μεταξύ τους και κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος

γ) κάθε στιγμή ο λόγος του μέτρου της έντασης E του ηλεκτρικού πεδίου και B του μαγνητικού πεδίου είναι σταθερός και ίσος με την ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο μέσο διάδοσης ($E/B = c$ στο κενό και $E/B = u$ σε υλικό μέσο διάδοσης)

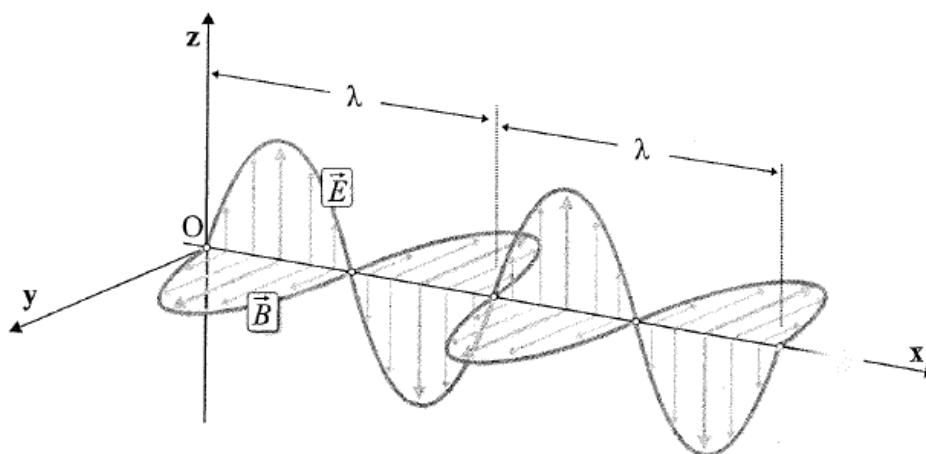
δ) τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ομοίως με τα μηχανικά κύματα, υπακούν στην αρχή της επαλληλίας

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο ενός αρμονικού ηλεκτρομαγνητικού κύματος που διαδίδεται κατά τη διεύθυνση x είναι:

$$E = E_{max} \eta \mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (2.1)$$

$$B = B_{max} \eta \mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (2.2)$$

όπου E_{max} και B_{max} είναι οι μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα.



Σχήμα 2.1. Στιγμιότυπο αρμονικού ηλεκτρομαγνητικού κύματος διαδιδόμενου κατά τη διεύθυνση του άξονα x

2.1.2 Εξισώσεις Maxwell

Η θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού αποτελεί μια από τις πρώτες ενοποιημένες θεωρίες της επιστήμης της Φυσικής. Η ενοποίηση των φαινομένων του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού κατέστη δυνατή με τη διατύπωση ενός ενιαίου συνόλου εξισώσεων από

τον James Maxwell. Η γενική μορφή των εξισώσεων του Maxwell σε διαφορική και ολοκληρωματική μορφή παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα.

Η πρώτη εξίσωση είναι ο νόμος του Gauss για το ηλεκτρικό πεδίο και περιγράφει το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από ηλεκτρικό φορτίο.

Η δεύτερη εξίσωση είναι ο νόμος του Gauss για το μαγνητικό πεδίο και περιγράφει το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από μαγνήτη.

Η τρίτη εξίσωση είναι ο νόμος του Faraday ή νόμος της επαγωγής και περιγράφει το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

Η τέταρτη εξίσωση είναι ο νόμος του Ampere και περιγράφει το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται είτε από ηλεκτρικό ρεύμα, είτε από μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

Η λύση των εξισώσεων του Maxwell πρόσφερε τρία σημαντικά συμπεράσματα:

α) οποιοδήποτε παλλόμενο σωματίδιο με φορτίο δημιουργεί ταυτόχρονα δύο πεδία, ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό και ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό. Κατά αυτόν τον τρόπο εισήχθη η έννοια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου

β) το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και η αντίστοιχη ηλεκτρομαγνητική ενέργεια διαδίδονται στο χώρο με τη μορφή κύματος, ανεξάρτητου από την γενεσιουργό του αιτία

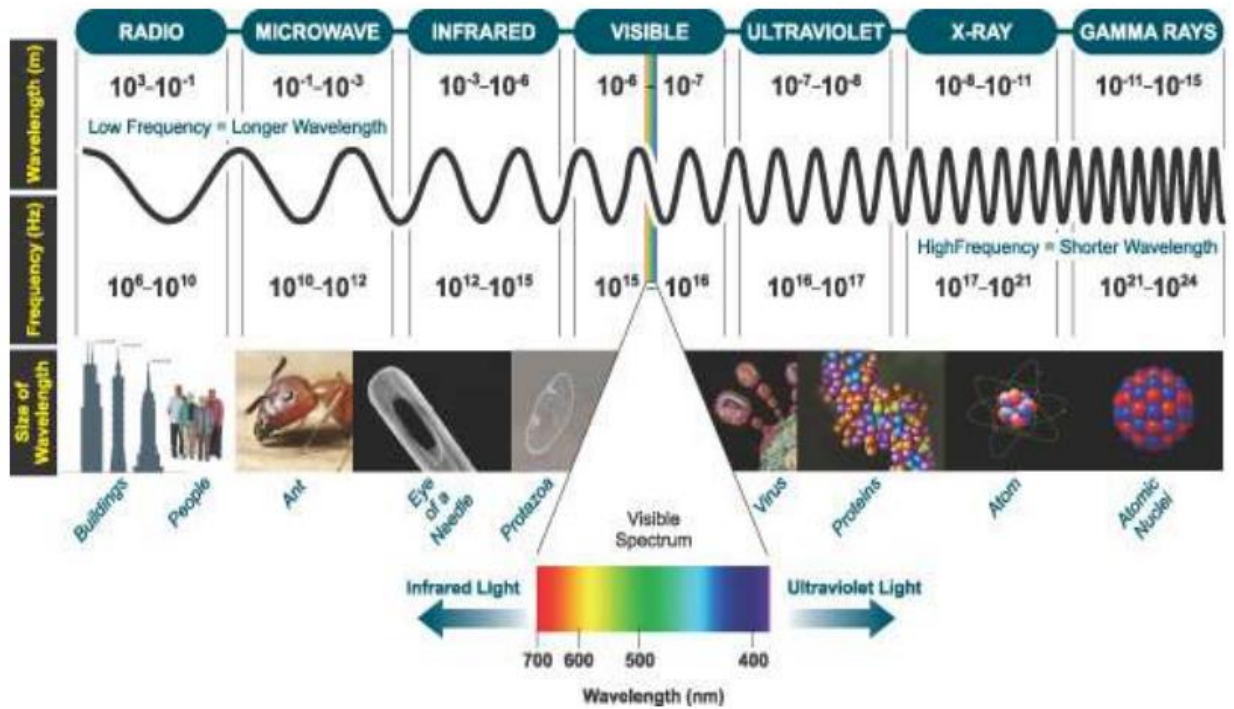
γ) το φως είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα

Διαφορική μορφή (Differential form)	Ολοκληρωματική μορφή (Integral form)	Σημειώσεις
$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$	$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_v \rho_v dv$	Νόμος του Gauss
$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	Μη ύπαρξη απομονωμένου μαγνητικού φορτίου
$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$	Νόμος του Faraday
$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S}$	Νόμος του Ampere

Πίνακας. 2.1 Γενική μορφή των εξισώσεων του Maxwell

2.1.3 Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

Το εύρος της περιοχής συχνοτήτων που καλύπτουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ονομάζεται ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και θεωρητικά εκτείνεται από σχεδόν μηδενικές συχνότητες έως το άπειρο. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χωρίζεται σε επιμέρους ζώνες με βάση κάποιες χαρακτηριστικές ιδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Οι περιοχές αυτές είναι τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, η υπέρυθρη ακτινοβολία, η ορατή ακτινοβολία (φως), η υπεριώδης ακτινοβολία, οι ακτίνες X και οι ακτίνες γ.



Σχήμα 2.2. Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Τα **ραδιοκύματα (RF)** εκπέμπονται από τη Γη, τα κτίρια, τα αυτοκίνητα και άλλα μεγάλα σε μέγεθος αντικείμενα. Πάνω στα ραδιοκύματα έχει βασιστεί η λειτουργία των ραντάρ, τα οποία ανιχνεύουν την παρουσία και την κίνηση σωμάτων που εκπέμπουν αυτού του τύπου την ακτινοβολία. Τα ραδιοκύματα επίσης είναι ευρέως γνωστά για την ικανότητά τους να μεταφέρουν ραδιοφωνικά σήματα, σήματα τηλεόρασης, κινητής τηλεφωνίας κ.ά. Τα ραδιοκύματα έχουν μήκος κύματος που εκτείνεται σε μια αρκετά μεγάλη περιοχή, από ένα εκατοστό έως δεκάδες και εκατοντάδες μέτρα.

Τα **μικροκύματα (MW)** έχουν μήκος κύματος που εκτείνεται από ένα χιλιοστό μέχρι 30 εκατοστά. Ο άνθρωπος εκμεταλλεύτηκε αυτήν την ακτινοβολία για την μετάδοση σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις, όπως για παράδειγμα στην κινητή τηλεφωνία, στη μετάδοση τηλεοπτικού σήματος, στις δορυφορικές επικοινωνίες, για τη λειτουργία των φούρνων μικροκυμάτων κ.ά.

Η υπέρυθη ακτινοβολία (IR) εκτείνεται από εκεί που σταματάει η ορατή ακτινοβολία, δηλαδή περίπου από τα 700 νανόμετρα, μέχρι περίπου το ένα χιλιοστό. Η ακτινοβολία αυτή γίνεται αντιληπτή κυρίως από την θέρμανση που προκαλεί. Έτσι, το δέρμα και τα μάτια απορροφούν την υπέρυθη ακτινοβολία ως θερμότητα. Όλα τα

σώματα εκπέμπουν θερμότητα σε αυτά τα μήκη κύματος ανάλογα με τη θερμοκρασία τους. Οι πιο κοινές χρήσεις της υπέρυθρης ακτινοβολίας έχουν να κάνουν με τη νυχτερινή όραση, τους ανιχνευτές σε δορυφόρους και αεροπλάνα, καθώς και την αστρονομία. Πηγές υπέρυθρης ακτινοβολίας αποτελούν οι φούρνοι, οι ηλεκτρικοί λαμπτήρες θερμότητας και τα λέιζερ IR.

Η **ορατή ακτινοβολία**, δηλαδή η ακτινοβολία που μπορεί να εντοπιστεί από το ανθρώπινο μάτι έχει μήκος κύματος από 400 έως 700 νανόμετρα και αποτελεί ένα πολύ μικρό μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Ο ήλιος είναι η σημαντικότερη πηγή, όπως επίσης σε μικρότερη κλίμακα οι ηλεκτρικοί λαμπτήρες πυρακτώσεως και φθορισμού. Τα μάτια μας αντιλαμβάνονται τις διαφορετικές ορατές συχνότητες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ως διαφορετικά χρώματα.

Η **υπεριώδης ακτινοβολία (UV)** περιλαμβάνει τις συχνότητες λίγο πάνω από αυτές του ορατού φωτός, ωστόσο η έντασή της είναι τέτοια που μπορεί να καταστρέψει ιστούς και κύτταρα, αφού μια περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας ανήκει στις ιονίζουσες. Οι πηγές της UV ακτινοβολίας περιλαμβάνουν τον ήλιο, τα μαύρα φώτα, τις συσκευές οξυγονοκόλλησης και τα UV λέιζερ. Τα φωτόνια της υπεριώδους ακτινοβολίας έχουν υψηλή ενέργεια, λόγω της υψηλής συχνότητάς, καθιστώντας την υπεριώδη ακτινοβολία ιδιαίτερα επικίνδυνη, μη περιοριζόμενη μόνο στη θέρμανση του σώματος που την απορροφά, αλλά προκαλώντας βλάβες στα κύτταρα του δέρματος, που μπορεί να οδηγήσουν ακόμα και σε καρκίνο. Η υπεριώδης ακτινοβολία χρησιμοποιείται ευρέως στον επιστημονικό χώρο σε διάφορα πειράματα, καθώς και από τους αστρονόμους για την παρατήρηση του ηλιακού συστήματος, του γαλαξία μας και άλλων περιοχών του σύμπαντος. Το μήκος κύματος της υπεριώδους ακτινοβολίας εκτείνεται από 50 έως 400 νανόμετρα.

Οι **ακτίνες X** περιλαμβάνουν τις συχνότητες που βρίσκονται μεταξύ των ακτίνων γ και των υπεριωδών ακτίνων. Έχουν τέτοια διατρητική ικανότητα, ώστε να διαπερνούν εύκολα αρκετά υλικά και να καταστρέφουν ιστούς δέρματος. Η ικανότητα της διαφορετικής απορρόφησής της από τους ιστούς ή τα οστά, έχει οδηγήσει τους επιστήμονες στο να χρησιμοποιούν τις ακτίνες X για να παρατηρούν το ανθρώπινο σώμα, όπως συμβαίνει με τις ακτινογραφίες. Τα μήκη κύματος των ακτίνων X εκτείνονται από 1 έως 0.0001 νανόμετρα.

Οι **ακτίνες γ** έχουν τη μεγαλύτερη συχνότητα και εκπέμπονται από ραδιενεργά υλικά, αλλά βρίσκονται και στο διάστημα. Οι ακτίνες αυτές έχουν εκπληκτική διατρητική ικανότητα και μπορούν να διαπεράσουν μια επιφάνεια τσιμέντου με πάχος 3 μέτρα. Τα μήκη κύματος αυτής της ακτινοβολίας εκτείνονται από 0.0001 έως 0.000001 νανόμετρα.

2.2 Παράμετροι Κεραιών

Κεραία ονομάζεται η διάταξη που αποτελείται από σύστημα αγωγών και έχει την ιδιότητα να μετατρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα και αντίστροφα.

Μία σημαντική ιδιότητα των κεραιών είναι η Αρχή της Αμοιβαιότητας (Reciprocity Principle), σύμφωνα με την οποία τα χαρακτηριστικά λειτουργίας μιας κεραίας παραμένουν αμετάβλητα, ανεξάρτητα από το αν η κεραία χρησιμοποιείται για την εκπομπή ή τη λήψη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Συνεπώς σε ένα σύστημα ασύρματης επικοινωνίας, η ίδια κεραία μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο ως κεραία εκπομπής, όσο και ως κεραία λήψης.

Οι διαστάσεις και το σχήμα των κεραιών εξαρτάται άμεσα από το μήκος κύματος των εκπεμπόμενων σημάτων. Η βέλτιστη λειτουργία των κεραιών επιτυγχάνεται όταν το φυσικό τους μήκος αντιστοιχεί σε κάποιο κλάσμα του μήκους κύματος του σήματος εκπομπής (π.χ. $\lambda/2$, $\lambda/4$). Στην περίπτωση αυτή, τα κύματα ταλαντώνονται κατά μήκος της κεραίας και το ενεργό στοιχείο της κεραίας βρίσκεται σε κατάσταση συντονισμού, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η μέγιστη αποδοτικότητα στη λειτουργία της κεραίας. Διαφορετικά, στην περίπτωση που το φυσικό μήκος της κεραίας είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο από το επιθυμητό κλάσμα μήκους κύματος, τότε η κεραία λειτουργεί σαν στοιχείο χωρητικότητας ή σαν στοιχείο επαγωγής, με αποτέλεσμα να αποθηκεύεται μέρος της ενέργειας σε αυτήν και να μην ακτινοβολείται στον ελεύθερο χώρο.

Για να μπορεί η ίδια κεραία να χρησιμοποιηθεί για την εκπομπή και λήψη σημάτων διαφορετικών συχνοτήτων, θα πρέπει κάθε φορά να βρίσκεται σε συντονισμό με την εκάστοτε συχνότητα λειτουργίας. Επειδή όμως δεν είναι πρακτική η μεταβολή των

φυσικών διαστάσεων της κεραίας, πραγματοποιείται η μεταβολή του ηλεκτρικού της μήκους. Αυτό επιτυγχάνεται με τη σύνδεση σε σειρά με την κεραία, είτε ενός πηνίου όταν η κεραία είναι μικρότερη από το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται, είτε ενός πυκνωτή όταν η κεραία είναι μεγαλύτερη από το μήκος κύματος.

2.2.1 Περιοχές Ακτινοβολίας Κεραιών

Ο χώρος που περιβάλλει το ακτινοβολούν σύστημα μιας κεραίας διακρίνεται σε τρεις περιοχές σύμφωνα με τη συμπεριφορά του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που δημιουργεί η κεραία:

α) **η περιοχή κοντινού πεδίου** είναι η περιοχή όπου το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εμφανίζει άεργη συμπεριφορά, δηλαδή δεν ακτινοβολείται ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. Η περιοχή αυτή περιορίζεται χωρικά στο εσωτερικό σφαίρας με ακτίνα που περιβάλλει την κεραία:

$$R_1 = 0.62 \left(\frac{D^3}{\lambda} \right)^{1/2} \quad (2.3)$$

όπου D είναι η μέγιστη διάσταση της κεραίας και λ το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στη συχνότητα λειτουργίας

β) **η περιοχή Fresnel** είναι ενδιάμεση μεταξύ της περιοχής κοντινού και της περιοχής μακρινού πεδίου μιας κεραίας. Στην περιοχή αυτή, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εμφανίζει συμπεριφορά ακτινοβολίας αλλά οι εγκάρσιες συνιστώσες του διατηρούν και ακτινική εξάρτηση. Η περιοχή Fresnel εκτείνεται στο χώρο που περιορίζεται από τις σφαίρες με ακτίνες R_1 και R_2 που περιβάλλουν την κεραία, όπου:

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.4)$$

Στην περίπτωση κεραιών με μικρές διαστάσεις σε σχέση με το μήκος κύματος λειτουργίας, η περιοχή Fresnel δεν υπάρχει

γ) **η περιοχή μακρινού πεδίου** έχει ως χαρακτηριστικό την ανεξαρτησία των εγκάρσιων συνιστωσών του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από την ακτινική συνιστώσα.

Η περιοχή αυτή εκτείνεται συνήθως σε αποστάσεις από την κεραία μεγαλύτερες από την ακτίνα R_2

2.2.2 Διάνυσμα Poynting

Η ισχύς που μεταφέρεται κατά τη μετάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος συνδέεται με το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στο μέσο διάδοσης μέσω του διανύσματος Poynting, το οποίο ορίζεται από τη σχέση:

$$\vec{p}(\vec{r}, t) = \vec{e}(\vec{r}, t) \times \vec{h}(\vec{r}, t) \quad (2.5)$$

όπου $e(r,t)$ και $h(r,t)$ είναι οι στιγμιαίες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, αντίστοιχα.

Το διάνυσμα Poynting εκφράζει σε W/m^2 τη στιγμιαία ροή ηλεκτρομαγνητικής ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας. Η συνολική στιγμιαία ισχύς που ακτινοβολείται από μια κεραία προκύπτει ολοκληρώνοντας την κάθετη συνιστώσα του διανύσματος Poynting πάνω σε μια κλειστή επιφάνεια S που περιβάλλει την κεραία, δηλαδή:

$$W(t) = \oiint_c \vec{p}(\vec{r}, t) \cdot d\vec{s} \quad (2.6)$$

2.2.3 Ένταση Ακτινοβολίας

Η ένταση ακτινοβολίας (radiation intensity) σε μια ορισμένη διεύθυνση είναι η ακτινοβολούμενη ισχύς ανά μονάδα στερεάς γωνίας. Είναι ένα μέγεθος που αφορά το μακρινό πεδίο ακτινοβολίας μιας κεραίας και μαθηματικά ορίζεται από τη σχέση:

$$U(\theta, \varphi) = r^2 \overline{P_{av}}(\vec{r}) \quad (2.7)$$

Η συνολική ισχύς που ακτινοβολεί μια κεραία προκύπτει μέσω της έντασης ακτινοβολίας με ολοκλήρωσή της σε ολόκληρη τη στερεά γωνία Ω που περιβάλλει την κεραία:

$$W_{rad} = \oiint_{\Omega} U(\theta, \varphi) d\Omega = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} d\theta [U(\theta, \varphi) \sin\theta] \quad (2.8)$$

2.2.4 Ισοτροπική Κεραία

Ισοτροπική κεραία ονομάζεται η κεραία εκείνη που ακτινοβολεί εξίσου προς όλες τις διευθύνσεις του χώρου. Τέτοιου είδους ακτινοβολία μπορεί να επιτύχει μόνο μια σημειακή πηγή. Αν και η ισοτροπική κεραία δεν είναι υλοποιήσιμη, αποτελεί την κεραία αναφοράς προς την οποία συγκρίνονται ως προς τις κατευθυντικές τους ιδιότητες όλες οι κεραίες που χρησιμοποιούνται στις διάφορες εφαρμογές. Λόγω της σημειακής φύσης της ισοτροπικής κεραίας, το διάνυσμα Poynting έχει ακτινική διεύθυνση και εξαρτάται μόνο από την απόσταση του σημείου παρατήρησης από την πηγή, δηλαδή ισχύει:

$$\vec{P}_0 \vec{r}_0 = \frac{W_{rad}}{4\pi r^2} \hat{r} \quad (2.9)$$

όπου W_{rad} η ισχύς ακτινοβολίας.

Η αντίστοιχη ένταση ακτινοβολίας της ισοτροπικής κεραίας είναι σταθερή και ίση με:

$$U_0 = \frac{W_{rad}}{4\pi} \quad (2.10)$$

2.2.5 Διάγραμμα Ακτινοβολίας

Διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κεραίας είναι η γραφική παράσταση του τρόπου ακτινοβολίας μιας κεραίας καθώς μεταβάλλεται το σημείο παρατήρησης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Στις περισσότερες περιπτώσεις πρακτικού ενδιαφέροντος, το διάγραμμα ακτινοβολίας προσδιορίζεται για τη μακρινή περιοχή μιας κεραίας και παριστάνεται ως συνάρτηση των συντεταγμένων διεύθυνσης θ και φ ενός κατάλληλου συστήματος σφαιρικών συντεταγμένων με κέντρο, συνήθως, το γεωμετρικό κέντρο της κεραίας.

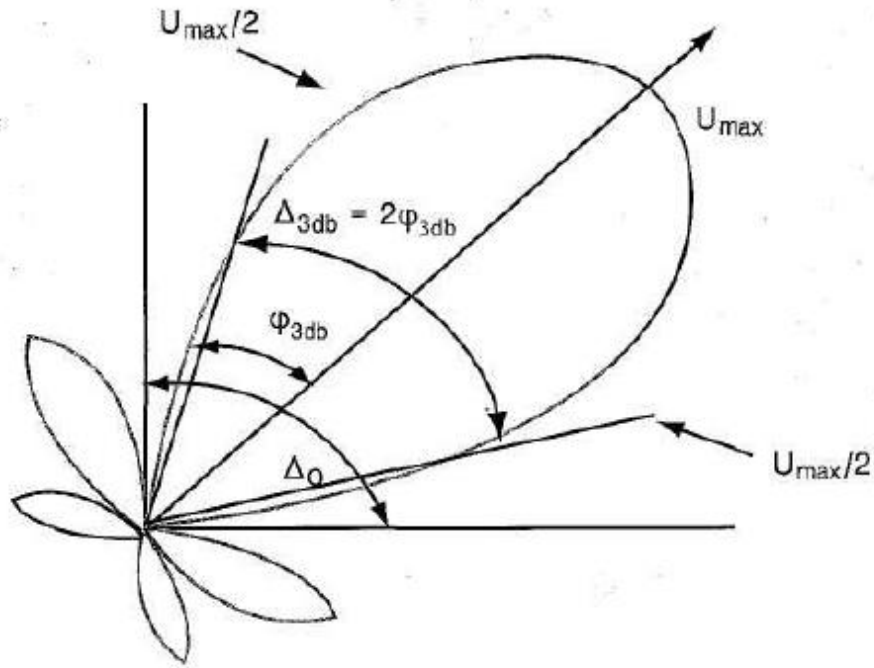
Λοβοί ακτινοβολίας ονομάζονται τμήματα του διαγράμματος ακτινοβολίας που οριοθετούνται από περιοχές μικρής ή και μηδενικής έντασης ακτινοβολίας και

διακρίνονται σε κύριους και δευτερεύοντες. Κύριος λοβός ονομάζεται αυτός που περιέχει τη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας. Δευτερεύων λοβός είναι κάθε λοβός ακτινοβολίας που δεν είναι κύριος. Οι δευτερεύοντες λοβοί διακρίνονται σε πλευρικούς και οπίσθιους. Ως πλευρικοί λοβοί χαρακτηρίζονται οι λοβοί που δεν περιέχουν τη διεύθυνση ενδιαφέροντος της κεραίας, ενώ με τον όρο οπίσθιος λοβός εννοείται ο λοβός που περιλαμβάνει τη διεύθυνση που είναι αντίθετη αυτής του κυρίου λοβού.

Οι δευτερεύοντες λοβοί αντιπροσωπεύουν ακτινοβολία προς ανεπιθύμητες κατευθύνσεις και συνεπώς πρέπει να ελαχιστοποιούνται. Ο λόγος της ισχύος που εμφανίζει ένας δευτερεύων λοβός στη διεύθυνση μεγίστου του προς την αντίστοιχη ισχύ που εμφανίζει ο κύριος λοβός, ονομάζεται στάθμη του πλευρικού λοβού και εκφράζεται σε dB. Ανεκτοί στην πράξη θεωρούνται θεωρούνται πλευρικοί λοβοί με στάθμη χαμηλότερη των -20dB.

Ιδιαίτερη σημασία για την περιγραφή των κατευθυντικών ιδιοτήτων μιας κεραίας έχει το γωνιακό εύρος Δ_0 του κύριου λοβού, δηλαδή η γωνία που σχηματίζουν οι διευθύνσεις μηδενισμών ή ελαχίστων μεταξύ των οποίων περιλαμβάνεται η διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας. Στην πράξη, η περιγραφή του κύριου λοβού γίνεται και μέσω του ανοίγματος μισής ισχύος Δ_{3dB} , δηλαδή της γωνίας που σχηματίζουν οι διευθύνσεις εκατέρωθεν της διεύθυνσης μεγίστου για τις οποίες η ένταση ακτινοβολίας είναι η μισή της μέγιστης τιμής. Η γωνία αυτή ορίζεται σε επίπεδο που περιέχει τη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας.

Το εύρος του κύριου λοβού αποτελεί σημαντική παράμετρο, καθώς μέσω αυτής καθορίζεται το πόσο κατευθυντική είναι μια κεραία. Συνήθως, το εύρος του κύριου λοβού αντισταθμίζεται από τη στάθμη των πλευρικών λοβών, δηλαδή μείωση του εύρους του κύριου λοβού αντισταθμίζεται από αύξηση της στάθμης των πλευρικών λοβών. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι λοβοί ακτινοβολίας, το γωνιακό εύρος και το άνοιγμα μισής ισχύος.



Σχήμα 2.3. Λοβοί ακτινοβολίας, το γωνιακό εύρος και το άνοιγμα μισής ισχύος μιας κεραίας

2.2.6 Κατευθυντικότητα

Ως κατευθυντικό κέρδος $D_g(\theta, \varphi)$ ορίζεται ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας μιας κεραίας προς την ένταση ακτινοβολίας U_0 ιστροπικής κεραίας που εκπέμπει την ίδια ισχύ ακτινοβολίας, δηλαδή:

$$D_g(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_0} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{W_{rad}} \quad (2.11)$$

Κατευθυντικότητα D_m μιας κεραίας είναι η μέγιστη τιμή του κατευθυντικού κέρδους της, δηλαδή:

$$D_m = D_g(\theta, \varphi)|_{max} = \frac{U(\theta, \varphi)|_{max}}{U_0} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)|_{max}}{W_{rad}} \quad (2.12)$$

όπου U_{max} η μέγιστη τιμή της έντασης ακτινοβολίας και W_{rad} η συνολική ισχύς ακτινοβολίας της κεραίας.

Το κατευθυντικό κέρδος είναι συνάρτηση των συντεταγμένων θέσης θ και φ του σημείου υπολογισμού του πεδίου ακτινοβολίας μιας κεραίας. Η κατευθυντικότητα μιας ιστροπικής κεραίας είναι ίση προς τη μονάδα, αφού η ακτινοβολία του είναι η ίδια προς όλες τις διευθύνσεις του χώρου. Σε κάθε άλλη περίπτωση κεραίας, η κατευθυντικότητα είναι μεγαλύτερη από τη μονάδα και αποτελεί ένα μέτρο του πόσο κατευθυντική είναι η κεραία. Το εύρος τιμών που λαμβάνει το κατευθυντικό κέρδος είναι από 0 έως D_m .

2.2.7 Κέρδος Ισχύος

Μία ακόμη παράμετρος που προσδιορίζει το πόσο αποδοτικά ακτινοβολεί μια κεραία, είναι το κέρδος ισχύος που ορίζεται μέσω της σχέσης:

$$G_g(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{W_{in}} \quad (2.13)$$

όπου W_{in} η ισχύς τροφοδοσίας της κεραίας.

Ο ορισμός της κατευθυντικότητας βασίζεται μόνο στη μορφή του διαγράμματος ακτινοβολούμενης ισχύος και δεν περιγράφει την ικανότητα της κεραίας να ακτινοβολεί την ισχύ που της προσφέρεται. Στο κέρδος ισχύος, εκτός των κατευθυντικών ιδιοτήτων μιας κεραίας, λαμβάνεται υπόψη και πόσο αποδοτικά τροφοδοτείται η κεραία. Στις συνήθεις πρακτικές περιπτώσεις, το κέρδος ισχύος αναφέρεται στη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας, οπότε και ονομάζεται απλώς κέρδος της κεραίας, δηλαδή:

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)|_{max}}{W_{in}} \quad (2.14)$$

Η ισχύς ακτινοβολίας συνδέεται με την ισχύ τροφοδότησης μέσω της σχέσης:

$$W_{rad} = n_r W_{in} \quad (2.15)$$

όπου n_r ο συντελεστής απόδοσης της κεραίας, ο οποίος περιγράφει τις διάφορες απώλειες της κεραίας, χωρίς όμως να συνυπολογίζει τις διάφορες ανακλάσεις λόγω

έλλειψης προσαρμογής. Οπότε προκύπτει η βασική σχέση μεταξύ κατευθυντικότητας και κέρδους μιας κεραίας:

(2.16)

$$G = n_r D_m$$

Η ισχύς ακτινοβολίας δεν εξαρτάται μόνο από τις ωμικές απώλειες και τις απώλειες διηλεκτρικού που περιγράφονται μέσω του συντελεστή απόδοσης, αλλά και από το κλάσμα της ισχύος που ανακλάται από την κεραία προς την πηγή τροφοδοσίας λόγω μη επίτευξης προσαρμογής. Αν W_a είναι η ισχύς που φθάνει στην είσοδο της κεραίας, η ισχύς ακτινοβολίας λαμβάνοντας υπόψη και τις απώλειες και την ανάκλαση ισχύος είναι:

$$W_{rad} = n_r(1 - |\rho|^2)W_a \quad (2.17)$$

όπου,

$$\rho = \frac{Z_a - Z_0}{Z_a + Z_0} \quad (2.18)$$

είναι ο συντελεστής ανάκλασης στην είσοδο της κεραίας, Z_a είναι η αντίσταση εισόδου της κεραίας και Z_0 η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς που τροφοδοτεί την κεραία.

Λόγω των ανακλάσεων, δημιουργούνται στη γραμμή μεταφοράς στάσιμα κύματα. Ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη τιμή του κύματος στη γραμμή ονομάζεται λόγος στάσιμων κυμάτων VSWR και συνδέεται με τον συντελεστή ανάκλασης με την σχέση:

$$VSWR = \frac{U_{max}}{U_{min}} = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} \quad (2.19)$$

2.2.8 Εύρος Ζώνης Κεραίας

Το εύρος ζώνης (bandwidth) μιας κεραίας ορίζεται ως το εύρος συχνοτήτων μέσα στο οποίο ικανοποιεί συγκεκριμένες προδιαγραφές σε σχέση με κάποιο μέγεθος. Συνήθως, ως εύρος ζώνης κεραίας θεωρούμε τη ζώνη συχνοτήτων εκατέρωθεν μιας κεντρικής

συχνότητας όπου ορισμένα χαρακτηριστικά μεγέθη της κεραίας όπως η αντίσταση εισόδου, το κέρδος, η πόλωση ή η στάθμη των πλευρικών λοβών διατηρούν αποδεκτές τιμές σε σχέση με την τιμή που αντιστοιχεί στην κεντρική συχνότητα του εύρους ζώνης.

Για κεραίες ευρείας ζώνης, το εύρος ζώνης εκφράζεται ως ο λόγος των δύο ακραίων συχνοτήτων του, ενώ για κεραίες στενής ζώνης, το εύρος ζώνης εκφράζεται ως ποσοστό της κεντρικής συχνότητας.

Επειδή τα χαρακτηριστικά λειτουργίας μιας κεραίας δεν μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο με τη συχνότητα, δεν υπάρχει ένας μοναδικός ορισμός του εύρους ζώνης. Τα χαρακτηριστικά των οποίων η μεταβολή ως προς τη συχνότητα παρουσιάζουν ενδιαφέρον σε σχέση με το εύρος ζώνης, είναι κυρίως το διάγραμμα ακτινοβολίας και η αντίσταση εισόδου. Έχουμε συνεπώς δύο ορισμούς του εύρους ζώνης, το εύρος ζώνης διαγράμματος ακτινοβολίας (pattern bandwidth) και το εύρος ζώνης αντίστασης εισόδου (impedance bandwidth). Με το πρώτο σχετίζεται το κέρδος, η στάθμη των πλευρικών λοβών, το εύρος δέσμης και η πόλωση, ενώ με το δεύτερο η αντίσταση εισόδου και ο συντελεστής απόδοσης ακτινοβολίας.

2.3 Κωδικοποίηση Καναλιού

Με τον όρο κωδικοποίηση καναλιού (channel coding) αναφερόμαστε στη διαδικασία κατά την οποία το αρχικό σήμα πληροφορίας μετασχηματίζεται σε κωδικοποιημένο σήμα, αποσκοπώντας στη βελτίωση της επίδοσης του συστήματος επικοινωνίας. Μέσω της κωδικοποίησης καναλιού τα μεταδιδόμενα σήματα παρουσιάζουν αυξημένη ανθεκτικότητα στις φθοροποιούς επιδράσεις που εισάγει ο τηλεπικοινωνιακός δίαυλος, όπως ο θόρυβος, οι παρεμβολές και οι διαλείψεις.

Κατά τη διαδικασία της κωδικοποίησης που λαμβάνει χώρα στον πομπό πριν από τη μετάδοση του σήματος, εισάγεται στο σήμα πλεονάζουσα πληροφορία, η οποία χρησιμοποιείται στο δέκτη ώστε να ανιχνευτούν και να διορθωθούν όπου αυτό είναι εφικτό οι αλλοιώσεις που έχει υποστεί το σήμα κατά τη μετάδοση. Η διαδικασία αυτή που συντελείται στο δέκτη, ονομάζεται αποκωδικοποίηση.

Οι τεχνικές κωδικοποίησης αυξάνουν την ποιότητα ενός επικοινωνιακού συστήματος, έχουν όμως το κόστος της αύξησης του απαιτούμενου εύρους ζώνης συχνοτήτων. Συνεπώς, μπορούν να θεωρηθούν ως μέσο για την επίτευξη των απαραίτητων συμβιβασμών (trade-offs) μεταξύ των παραμέτρων λειτουργίας ενός επικοινωνιακού συστήματος, όπως για παράδειγμα η επίδοση ως προς τα σφάλματα έναντι του εύρους ζώνης ή η ισχύς εκπομπής έναντι του εύρους ζώνης.

Σε κάθε περίπτωση, συγκρίνοντας την κωδικοποίηση καναλιού με άλλες τεχνικές βελτίωσης της ποιότητας του συστήματος, όπως για παράδειγμα η χρήση πομποδεκτών μεγαλύτερης ισχύος, μπορεί κανείς να διαπιστώσει ότι η κωδικοποίηση είναι από τις πλέον αποδοτικές και οικονομικές λύσεις, κυρίως λόγω της εξέλιξης στον τομέα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μεγάλης κλίμακας (Large Scale Integration, LSI) και στις τεχνικές επεξεργασίας ψηφιακών σημάτων (Digital Signal Processing, DSP).



Σχήμα 2.4. Η διαδικασία κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης καναλιού

2.3.1 Κατηγοριοποίηση Τεχνικών Κωδικοποίησης Καναλιού

Η πιο γενική μορφή κατηγοριοποίησης μεταξύ των διάφορων τεχνικών κωδικοποίησης καναλιού περιλαμβάνει το διαχωρισμό τους σε κωδικοποιήσεις κυματομορφών (waveform coding) ή σχεδίαση σήματος (signal design) και κωδικοποιήσεις δομημένων ακολουθιών (structured sequences) ή δομημένου πλεονασμού (structured redundancy).

Στην πρώτη κατηγορία, πραγματοποιείται μετασχηματισμός των αρχικών κυματομορφών σε νέες κυματομορφές με στόχο αυτές να καταστούν λιγότερο ευάλωτες στα σφάλματα. Το σύνολο των βελτιωμένων κυματομορφών που προκύπτουν από την κωδικοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρέχει βελτιωμένη πιθανότητα σφάλματος P_B σε σχέση με το αρχικό σύνολο. Παραδείγματα κωδικοποίησης κυματομορφών είναι τα αντίποδα και ορθογώνια σήματα (antipodal and orthogonal signals), η M-αδική σηματοδότηση (M-ary signaling) και η διαμόρφωση με σηματοδότηση Trellis (Trellis-coded modulation).

Στη δεύτερη κατηγορία, πραγματοποιείται προσθήκη επιπλέον bits στα αρχικά bits του σήματος πληροφορίας. Μετά την εισαγωγή με δομημένο τρόπο των επιπλέον bits, παίρνουμε το κωδικοποιημένο μήνυμα που θα είναι και το σήμα που θα μεταδοθεί μέσα από το δίαυλο. Κατά τη διαδικασία αποκωδικοποίησης στο δέκτη, τα επιπλέον αυτά bits συνεισφέρουν στον εντοπισμό ή και τη διόρθωση των σφαλμάτων που έχουν εισαχθεί από το δίαυλο επικοινωνίας. Κοινό σημείο και των δύο κατηγοριών είναι ότι η διαδικασία κωδικοποίησης παράγει κωδικοποιημένα σήματα με καλύτερες ιδιότητες απόστασης ανάμεσά τους σε σχέση με τα αρχικά σήματα.

2.4 Ψηφιακές Διαμορφώσεις

Προκειμένου ένα σύστημα ασύρματης επικοινωνίας να είναι σε θέση να μεταδώσει πληροφορίες αξιόπιστα και αποδοτικά σε μεγάλες αποστάσεις, είναι απαραίτητο να κάνει χρήση κάποιας μεθόδου διαμόρφωσης. Η διαδικασία της διαμόρφωσης περιλαμβάνει δύο σήματα, το προς διαμόρφωση σήμα (σήμα βασικής ζώνης) που αναπαριστά το σήμα πληροφορίας και είναι χαμηλής συχνότητας και το φέρον (σήμα φέροντος) που είναι υψηλής συχνότητας και μπορεί να είναι είτε αναλογικό σήμα, είτε παλμοσειρά, ανάλογα με το είδος διαμόρφωσης (αναλογική ή ψηφιακή) που χρησιμοποιείται.

Ο διαμορφωτής μεταβάλλει συστηματικά τη φέρουσα κυματομορφή σύμφωνα με τις μεταβολές του σήματος διαμόρφωσης, έτσι ώστε το προκύπτον διαμορφωμένο σήμα (ζωνοπερατό σήμα) να περιέχει το σήμα πληροφορίας. Η διαμόρφωση πραγματοποιείται στον πομπό ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος και είναι μία αντιστρεπτή διαδικασία, καθώς η πληροφορία μπορεί να ανακτηθεί από μία συμπληρωματική διεργασία στο δέκτη του συστήματος, που ονομάζεται αποδιαμόρφωση.

Τα συγκριτικά πλεονεκτήματα των ψηφιακών διαμορφώσεων έναντι των αναλογικών, έχουν οδηγήσει στην επικράτηση της χρήσης τους τα τελευταία χρόνια στην πλειονότητα των εφαρμογών. Μεταξύ άλλων, οι ψηφιακές διαμορφώσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή στην επίδραση του θορύβου, επιτυγχάνουν αύξηση της χωρητικότητας των συστημάτων μέσω της δυνατότητας συμπίεσης της φωνής,

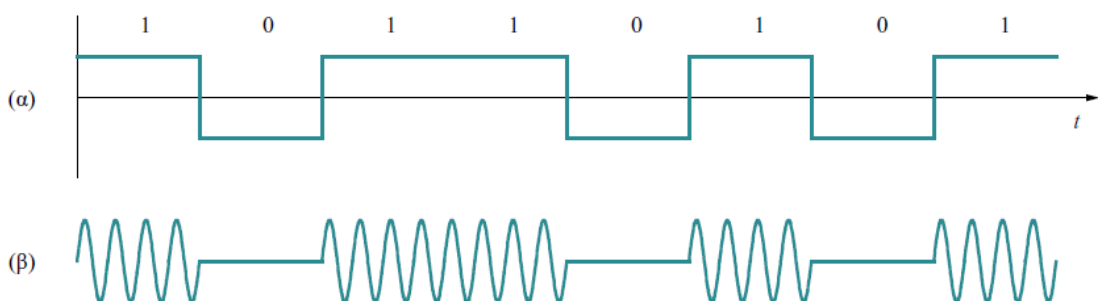
έχουν μικρότερο κόστος υλοποίησης, προσφέρουν βελτιωμένη ασφάλεια μέσω νέων τεχνικών κωδικοποίησης, απαιτούν μικρότερη ισχύ εκπομπής και τέλος, έχουν τη δυνατότητα να αντιμετωπίζουν φωνή και δεδομένα με τον ίδιο τρόπο.

Ιδιαίτερα σημαντικοί παράμετροι για κάθε τύπο ψηφιακής διαμόρφωσης αποτελούν η απόδοση φάσματος (spectrum efficiency) και ο ρυθμός εσφαλμένων bit (Bit Error Rate, BER). Η απόδοση φάσματος η οποία αποτελεί δείκτη ποιότητας ενός τύπου ψηφιακής διαμόρφωσης περιγράφει το πόσο αποδοτικά χρησιμοποιείται το διαθέσιμο εύρος ζώνης και μετριέται σε bps/Hz. Το μέτρο της δίνεται από το πηλίκο του ρυθμού μετάδοσης προς το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Το BER σε μια ψηφιακή διαμόρφωση είναι το ποσοστό των εσφαλμένων bits προς τον συνολικό αριθμό των μεταδιδόμενων ή λαμβανόμενων bits για μια δεδομένη χρονική περίοδο.

2.4.1 Διαμόρφωση Μετατόπισης Πλάτους

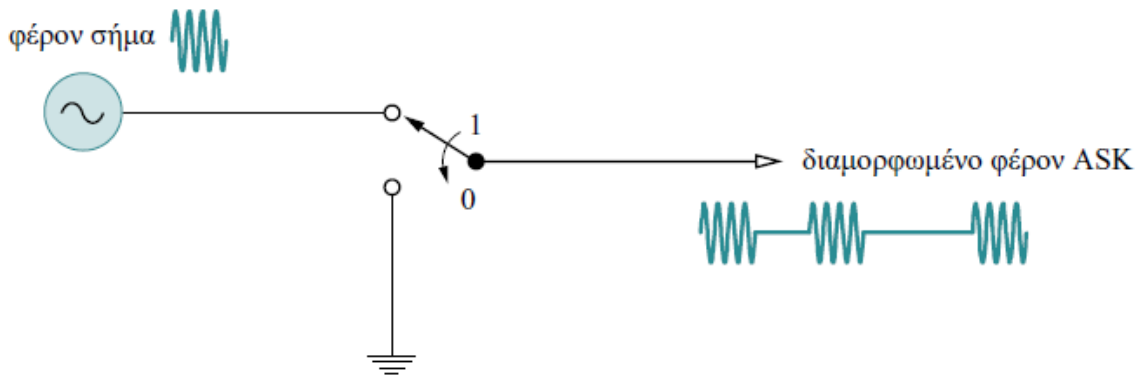
Η διαμόρφωση μετατόπισης πλάτους (Amplitude Shift Keying, ASK) είναι η απλούστερη μορφή ψηφιακής διαμόρφωσης, όπως αντίστοιχα η διαμόρφωση πλάτους (Amplitude Modulation, AM) είναι και η απλούστερη αναλογική. Έστω ότι το φέρον σήμα σε ένα κανάλι επικοινωνίας ζώνης διέλευσης είναι της μορφής $A_c \cos 2\pi f_c t$. Στη διαμόρφωση ASK το τελικό διαμορφωμένο σήμα $x_c(t)$ εκφράζεται ως εξής:

$$x_c(t) = \begin{cases} A_c \cos 2\pi f_c t & \text{για το δυαδικό ψηφίο 1} \\ 0 & \text{για το δυαδικό ψηφίο 0} \end{cases} \quad (2.20)$$



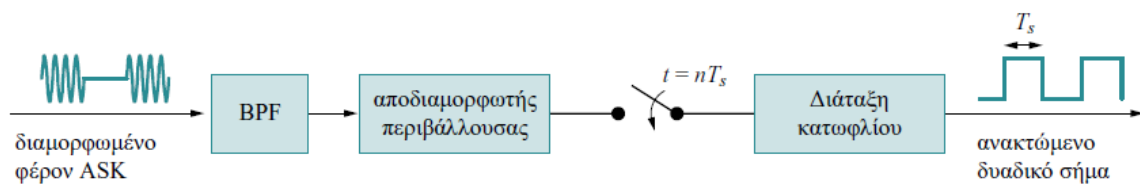
Σχήμα 2.5. Η διαμόρφωση ASK. Στο (α) η προς μετάδοση ακολουθία δυαδικών δεδομένων και στο (β) το διαμορφωμένο σήμα

Συνεπώς, το ψηφίο 1 αναπαρίσταται με την παρουσία του διαμορφωμένου σήματος, ενώ το ψηφίο 0 αναπαρίσταται με την απουσία του. Για το λόγο αυτό, ένα διαμορφωμένο σήμα ASK αναφέρεται συχνά στη βιβλιογραφία και ως σήμα OOK (On Of Keying).



Σχήμα 2.6. Διαμορφωτής σήματος ASK

Για την ανάκτηση της αρχικής ακολουθίας δυαδικών δεδομένων από ένα διαμορφωμένο σήμα ASK μπορούμε να αξιοποιήσουμε και τις δύο τεχνικές που χρησιμοποιούνται στα συστήματα αναλογικής επικοινωνίας AM. Δηλαδή, μπορούμε να εφαρμόσουμε και τη σύγχρονη ή σύμφωνη αποδιαμόρφωση αλλά και τον αποδιαμορφωτή περιβάλλουσας. Ο τελευταίος υπερτερεί στο γεγονός ότι δεν απαιτεί την ύπαρξη σήματος τοπικού ταλαντωτή συγχρονισμένου με το λαμβανόμενο φέρων στο δέκτη.



Σχήμα 2.7. Αποδιαμορφωτής σήματος ASK που εφαρμόζει την τεχνική αποδιαμόρφωσης περιβάλλουσας

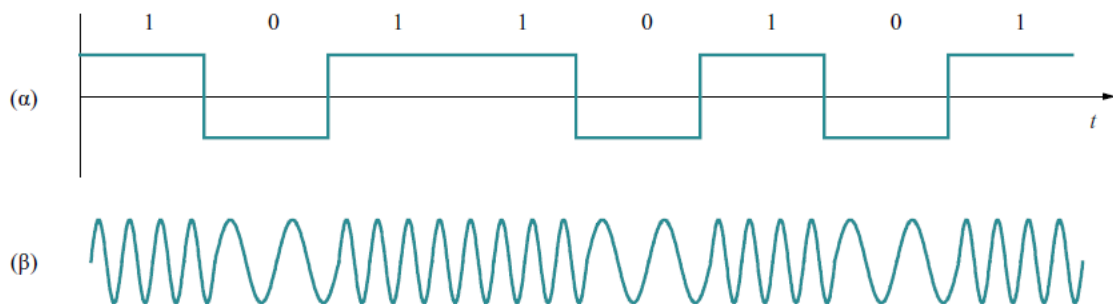
Δεδομένου ότι ο θόρυβος επηρεάζει ουσιαστικά το πλάτος των σημάτων, τα σήματα ASK είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στο θόρυβο και ειδικά στις υψηλές ταχύτητες μετάδοσης. Εξαιτίας αυτού του μειονεκτήματος η ASK δεν θεωρείται αποδοτική

διαμόρφωση και έχει περιορισμένη χρήση σε γραμμές τύπου φωνής μέχρι τα 1200 bps και για μετάδοση δεδομένων σε οπτικές ίνες.

2.4.2 Διαμόρφωση Μετατόπισης Συχνότητας

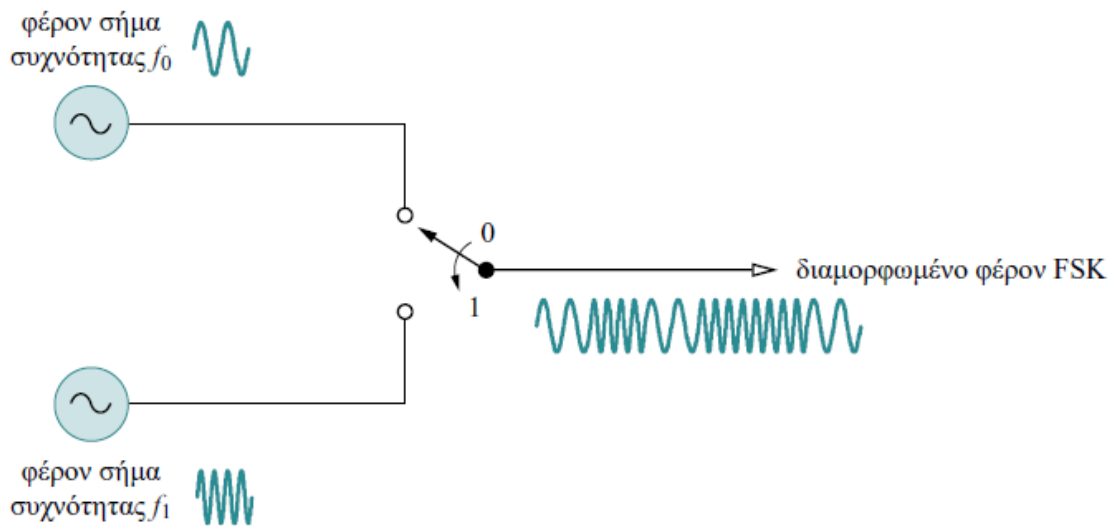
Ομοίως με την περίπτωση της αναλογικής διαμόρφωσης συχνότητας (Frequency Modulation, FM), έτσι και στη διαμόρφωση μετατόπισης συχνότητας (Frequency Shift Keying, FSK) η συχνότητα του ημιτονικού φέροντος σήματος μεταβάλλεται με διακριτό τρόπο ανάλογα με την τιμή του ψηφιακού σήματος πληροφορίας. Στην απλούστερη περίπτωση αυτό σημαίνει μία συχνότητα f_1 για το δυαδικό ψηφίο 1 και μία άλλη συχνότητα f_0 για το δυαδικό ψηφίο 0:

$$x_c(t) = \begin{cases} A_c \cos 2\pi f_1 t & \text{για το δυαδικό ψηφίο 1} \\ A_c \cos 2\pi f_0 t & \text{για το δυαδικό ψηφίο 0} \end{cases} \quad (2.21)$$



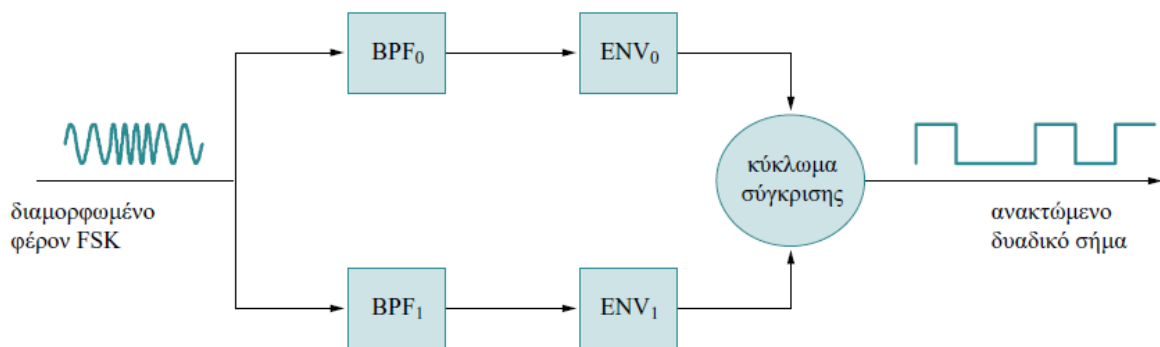
Σχήμα 2.8. Η διαμόρφωση FSK. Στο (α) η προς μετάδοση ακολουθία δυαδικών δεδομένων και στο (β) το διαμορφωμένο σήμα

Το διαμορφωμένο σήμα FSK μπορεί να δημιουργηθεί με χρήση δύο ημιτονικών ταλαντωτών συχνότητας f_1 και f_0 και έναν διακόπτη, ο οποίος ανοιγοκλείνει σύμφωνα με την ακολουθία των μεταδιδόμενων δυαδικών ψηφίων.



Σχήμα 2.9. Διαμορφωτής σήματος FSK

Η αρχική πληροφορία μπορεί να ανακτηθεί από ένα σήμα FSK χρησιμοποιώντας ασύγχρονο αποδιαμορφωτή περιβάλλουσας. Σε έναν ασύγχρονο αποδιαμορφωτή FSK το λαμβανόμενο σήμα περνά παράλληλα από δύο ζωνοπερατά φίλτρα BPF_0 και BPF_1 , τα οποία επιτρέπουν τη διέλευση συχνοτήτων γύρω από τις συχνότητες f_0 και f_1 αντίστοιχα. Μετά από κάθε ζωνοπερατό φίλτρο τοποθετείται ένας αποδιαμορφωτής περιβάλλουσας και οι έξοδοί τους οδηγούνται σε ένα κύκλωμα σύγκρισης, το οποίο αποφασίζει για την τιμή του εξαγόμενου ψηφίου ανάλογα με τις τιμές των εισερχόμενων σημάτων. Αν το σήμα που προέρχεται από τον αποδιαμορφωτή ENV_0 είναι μεγαλύτερο από αυτό του ENV_1 , τότε το εξαγόμενο δυαδικό ψηφίο είναι το 0, διαφορετικά είναι το 1.



Σχήμα 2.10. Ασύγχρονος αποδιαμορφωτής σήματος FSK

Η διαμόρφωση FSK εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή στο θόρυβο σε σχέση με την ASK, ενώ έχει εύρος ζώνης:

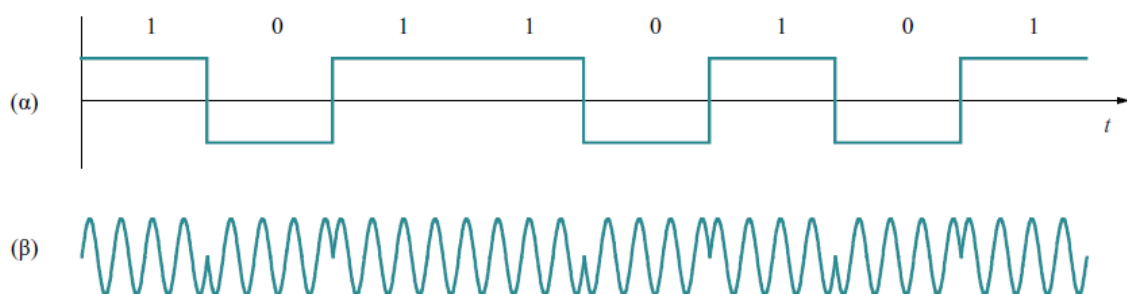
$$B = \text{baud rate} + f_1 - f_0 \quad (2.22)$$

όπου f_0 και f_1 οι δύο τιμές που παίρνει η συχνότητα του ημιτονικού φέροντος ανάλογα με το αν μεταδίδεται 0 ή 1 και baud rate είναι ο αριθμός συμβόλων ανά δευτερόλεπτο ($\text{Baud rate} = \text{bit rate} / \text{αριθμό bits/σύμβολο}$).

2.4.3 Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάσης

Στην περίπτωση της διαμόρφωσης μετατόπισης φάσης (Phase Shift Keying, PSK) μεταβάλλεται η φάση του ημιτονικού φέροντος συναρτήσει του σήματος πληροφορίας. Έτσι, για τη μετάδοση του δυαδικού ψηφίου 1 χρησιμοποιείται φέρον με την ίδια συχνότητα αλλά με αντίθετο πλάτος από ότι για τη μετάδοση του ψηφίου 0:

$$x_c(t) = \begin{cases} A_c \cos 2\pi f_c t & \text{για το δυαδικό ψηφίο 1} \\ A_c \cos 2\pi f_c t + 180^\circ = -A_c \cos 2\pi f_c t & \text{για το δυαδικό ψηφίο 0} \end{cases} \quad (2.23)$$



Σχήμα 2.11. Η διαμόρφωση PSK. Στο (α) η προς μετάδοση ακολουθία δυαδικών δεδομένων και στο (β) το διαμορφωμένο σήμα

Το διαμορφωμένο PSK σήμα μπορεί να δημιουργηθεί με χρήση ενός διακόπτη αντιστροφής της φάσης του φέροντος σήματος. Θεωρώντας πως το δυαδικό ψηφίο 0 αναπαριστάται με την τάση $-1V$ και το ψηφίο 1 με την τάση $+1V$, τότε είναι εύκολο να υλοποιηθεί η δημιουργία ενός PSK σήματος με χρήση ενός αναλογικού πολλαπλασιαστή. Ο πολλαπλασιαστής αυτός έχει δύο εισόδους, έναν ημιτονικό ταλαντωτή συχνότητας f_c και την ακολουθία των δυαδικών ψηφίων. Η έξοδος του είναι το διαμορφωμένο σήμα PSK.

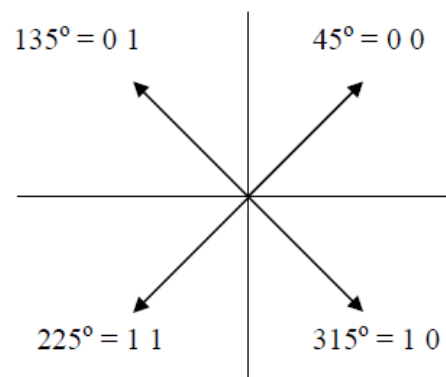
Η αποδιαμόρφωση του σήματος PSK μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο σύγχρονα, δηλαδή απαιτείται στο δέκτη η ύπαρξη ενός τοπικού ημιτονικού σήματος συγχρονισμένου κατά συχνότητα και φάση με το λαμβανόμενο φέρον. Το λαμβανόμενο φέρον σήμα πολλαπλασιάζεται με το τοπικό συγχρονισμένο ημιτονικό σήμα και το γινόμενό τους οδηγείται σε ένα βαθυπερατό φίλτρο το οποίο αποκόβει τις συχνότητες που είναι υψηλότερες της f_c . Αν η έξοδος του φίλτρου είναι θετική, τότε ο δέκτης συμπεραίνει ότι ο λαμβανόμενος παλμός αντιστοιχεί στο δυαδικό ψηφίο 1. Αν η έξοδος του φίλτρου είναι αρνητική, τότε το εξαγόμενο ψηφίο είναι το 0.

2.4.4 Τετραγωνική Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάσης

Η τετραγωνική διαμόρφωση μετατόπισης φάσης (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) επιτυγχάνει αποδοτικότερη κωδικοποίηση, γεγονός που επιτρέπει την επίτευξη bit rate διπλάσιου του baud rate. Στην περίπτωση της QPSK τα ψηφιακά δεδομένα ομαδοποιούνται κατά ζεύγη. Για κάθε ζεύγος, που είναι γνωστό ως dibit, οι τέσσερις πιθανές καταστάσεις του ("00", "01", "10", "11") κωδικοποιούνται με τέσσερα σήματα της ίδιας φέρουσας συχνότητας σε διαφορά φάσης 90° .

Dibit	Ολίσθηση φάσης
0 0	45°
0 1	135°
1 1	225°
1 0	315°

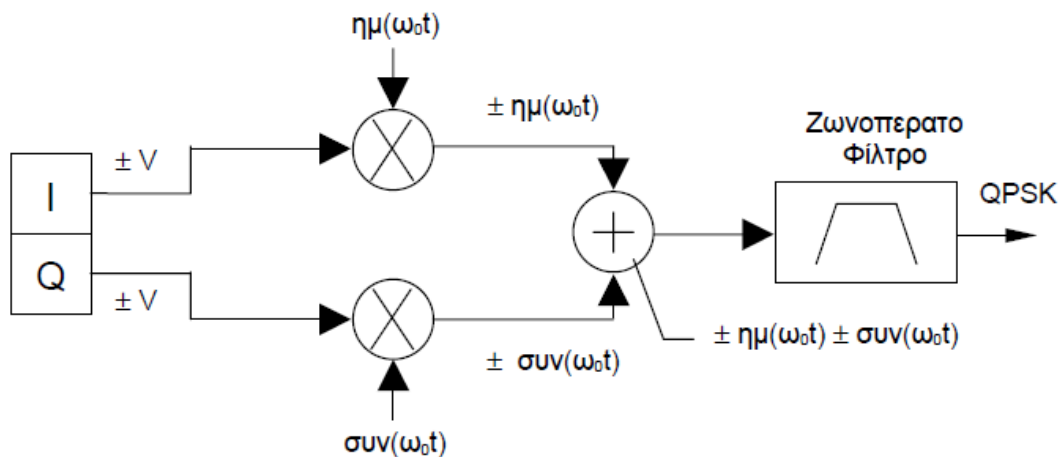
(α)



(β)

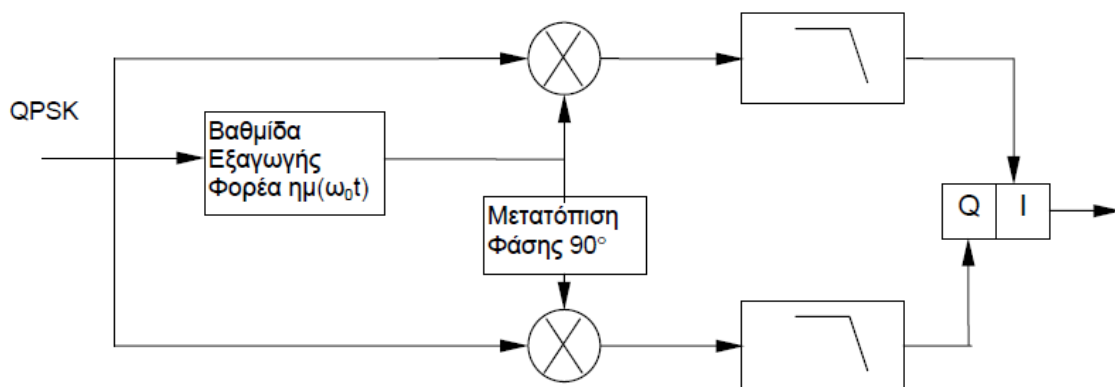
Σχήμα 2.12. (α) Αντιστοίχιση dibit - φάσεων (β) Γωνίες φάσης

Ο διαμορφωτής QPSK αποτελείται από έναν καταχωρητή σειριακής εισόδου και παράλληλης εξόδου, δυο ισοσταθμισμένους διαμορφωτές, έναν αθροιστή και ένα ζωνοπερατό φίλτρο.



Σχήμα 2.13. Διαμορφωτής QPSK

Η αποδιαμόρφωση επιτυγχάνεται με χρήση ισοσταθμισμένων διαμορφωτών, ενώ απαιτείται επίσης βαθμίδα εξαγωγής της φέρουσας συχνότητας και μετατόπιση φάσης κατά 90° .



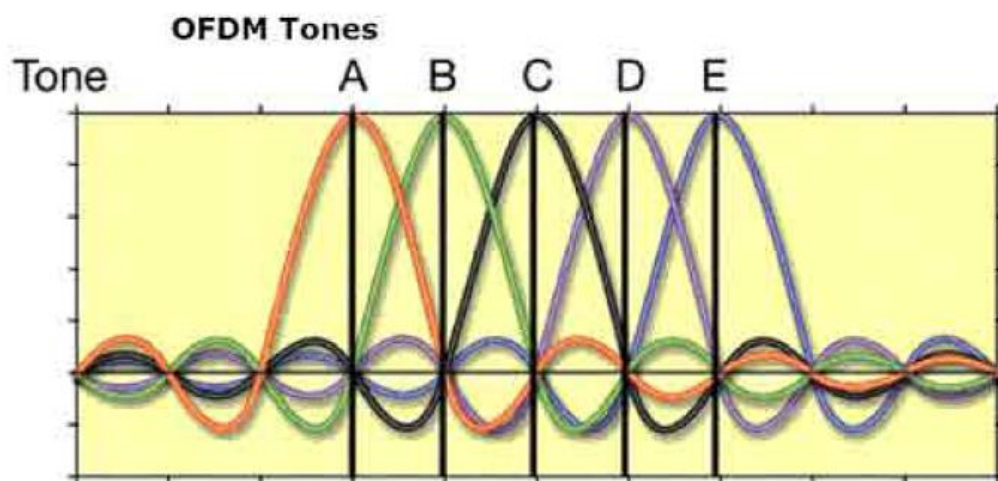
Σχήμα 2.14. Αποδιαμορφωτής QPSK

2.4.5 Πολυπλεξία Ορθογωνικής Διάρεσης Συχνότητας

Η πολυπλεξία ορθογωνικής διάρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) είναι μια μορφή διαμόρφωσης στην οποία για την μετάδοση της πληροφορίας χρησιμοποιούνται περισσότερα του ενός φέροντα. Μεγάλο πλεονέκτημα της OFDM είναι ότι εξαιτίας της ορθογωνιότητας εμφανίζει μεγάλη αντοχή στο θόρυβο και σε παρεμβολές γειτονικών φερόντων, καθώς και ότι αντιμετωπίζει ικανοποιητικά το φαινόμενο των πολλαπλών διαδεύσεων (multipath effect).

Στη διαμόρφωση OFDM το διαθέσιμο φάσμα διαιρείται σε πολλά κανάλια, κάθε ένα από τα οποία διαμορφώνεται από χαμηλού ρυθμού δεδομένα. Τα κανάλια αυτά χωρίζονται σε διαστήματα συχνότητας σχηματίζοντας το φάσμα του μεταδιδόμενου σήματος. Το συνολικό εύρος ζώνης καλύπτεται από δεδομένα που προέρχονται από μία μοναδική πηγή και διαμορφώνονται με παράλληλο τρόπο. Η ομοιότητα της OFDM με την πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης συχνότητας έγκειται στο ότι η πολλαπλή πρόσβαση χρηστών επιτυγχάνεται διαιρώντας το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε πολλά κανάλια, τα οποία στη συνέχεια κατανέμονται στους χρήστες. Ωστόσο, η μέθοδος OFDM χρησιμοποιεί το φάσμα αποτελεσματικότερα, καθώς επιτυγχάνει μικρότερες αποστάσεις μεταξύ των καναλιών.

Η χρήση μεγάλου αριθμού παράλληλων ορθογωνικών υποφερόντων (orthogonal subcarriers) στενής ζώνης από την OFDM, επιτρέπει τη δυνατότητα αποδιαμόρφωσης των υποφερόντων στο δέκτη ακόμα και όταν υπάρχει επικάλυψη (overlapping) μεταξύ των φασμάτων τους και ταυτόχρονα ελαττώνει την επίδραση της διασυμβολικής παρεμβολής (Inter Symbol Interference, ISI). Το γεγονός αυτό καθιστά την OFDM κατάλληλη για εφαρμογές μετάδοσης υψηλού ρυθμού δεδομένων.



Σχήμα 2.15. Φασματική απεικόνιση 5 OFDM φερόντων

2.5 Συγχρονισμός και Εκτίμηση Καναλιού

Το μεταδιδόμενο σήμα σε ένα σύστημα ασύρματης επικοινωνίας συχνά αλλοιώνεται κατά τη μετάδοσή του εξαιτίας μιας σειράς αιτιών, όπως είναι η επίδραση του προσθετικού θορύβου του καναλιού διάδοσης, ο έντονα διασκορπιστικός χαρακτήρας του καναλιού διάδοσης ο οποίος προκαλεί καθυστερημένες ανακλάσεις σήματος, καθώς επίσης και η εμφάνιση του φαινομένου Doppler λόγω ύπαρξης κινητικότητας μεταξύ πομπού και δέκτη. Αυτές οι παραμορφώσεις του σήματος οδηγούν στην δημιουργία τόσο διασυμβολικής όσο και διακαναλικής παρεμβολής (Co-Channel Interference). Επομένως, προκειμένου να είναι δυνατή η σωστή ανίχνευση της μεταδιδόμενης πληροφορίας στο δέκτη, επιβάλλεται η χρήση κατάλληλων αλγορίθμων συγχρονισμού, με σκοπό αρχικά την εκτίμηση και κατόπιν την εξάλειψη αυτών των παραμορφώσεων του ωφέλιμου σήματος.

Το πρόβλημα του συγχρονισμού μπορεί να χωρισθεί σε δύο επιμέρους κατηγορίες:

(α) Συγχρονισμός πλαισίου (frame synchronization), ο οποίος εντοπίζει την αρχή της κυματομορφής και κάνει εκτίμηση της απόκλισης του χρονισμού δειγματοληψίας. Ισοδύναμα, ο συγχρονισμός πλαισίου περιλαμβάνει εκτίμηση και διόρθωση για άγνωστη μετατόπιση χρονισμού. Ο συγχρονισμός πλαισίου συνήθως πραγματοποιείται πριν από το συγχρονισμό μετατόπισης συχνότητας, αλλά μπορούν να πραγματοποιηθούν και ταυτόχρονα. Ένα μαθηματικό μοντέλο για μετατόπιση χρονισμού σε διακριτό χρόνο είναι το ακόλουθο:

$$y(n) = e^{j2\pi\epsilon n} \sum_{l=0}^L h(l)s(n-l-\Delta) + u(n) \quad (2.24)$$

όπου Δ είναι η άγνωστη ακέραια μετατόπιση.

(β) Συγχρονισμός μετατόπισης συχνότητας (frequency offset synchronization), περιλαμβάνει την εκτίμηση της μετατόπισης συχνότητας και την παρακολούθηση του θορύβου φάσης. Η μετατόπιση συχνότητας οφείλεται σε διαφορές των ταλαντωτών σε πομπό και δέκτη. Ακόμη και πολύ μικρή διαφορά στη συχνότητα έχει μεγάλη επίδραση στον παρατηρούμενο ρυθμό σφαλμάτων στον δέκτη του συστήματος επικοινωνίας. Υψηλής ποιότητας RF εξαρτήματα και μονάδες αναλογικού ελέγχου χρησιμοποιούνται για να διατηρήσουν τη μετατόπιση συχνότητας σε όσο πιο χαμηλά επίπεδα γίνεται.

Ακολουθως, εφαρμόζονται ψηφιακοί αλγόριθμοι στο δέκτη προκειμένου να εκτιμηθεί και να διορθωθεί η εναπομείνασα μετατόπιση.

Ένα μαθηματικό μοντέλο για λαμβανόμενο σήμα με μετατόπιση συχνότητας φέροντος είναι το εξής:

$$y(t) = e^{j2\pi f_0 t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(n)h_g(t - nT_s) + u(t) \quad (2.25)$$

όπου ο πρώτος όρος περιλαμβάνει τη μετατόπιση συχνότητας $f_0 = f_c - f_c'$.

2.5.1 Δομή Σήματος για Διευκόλυνση της Επικοινωνίας

Εφόσον η δομή του σήματος εκπομπής είναι εκ των προτέρων γνωστή στο δέκτη, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση διάφορων μορφών αβεβαιότητας που υπεισέρχονται στην ασύρματη μετάδοση.

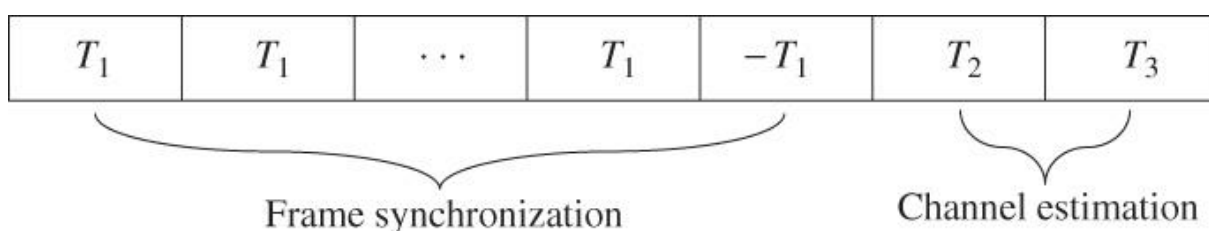
Το πλαίσιο του φυσικού επιπέδου (PHY) σε ένα σύστημα ασύρματης μετάδοσης συχνά περιλαμβάνει ένα προοίμιο (preamble), το οποίο εισάγεται στον πομπό αλλά είναι εκ των προτέρων γνωστό στο δέκτη, ώστε να διευκολυνθεί η ανίχνευση πακέτων, ο συγχρονισμός πλαισίου, ο συγχρονισμός συχνότητας, ο αυτόματος έλεγχος κέντρου (Automatic Gain Control, AGC), ο συγχρονισμός χρονισμού, η εκτίμηση καναλιού και η διαμόρφωση δέσμης (beamforming).

Ο δέκτης μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει γνωστά σήματα, όπως είναι τα πιλοτικά σήματα (pilot signals) και άλλα περιοδικά σήματα ή ειδικής κατασκευής εκπομπές, που επιτρέπουν στο δέκτη να πραγματοποιήσει εκτίμηση καναλιού και να συγχρονίσει το χρονισμό του πλαισίου και τη μετατόπιση του φέροντος.

Το προοίμιο μπορεί να χρησιμοποιήσει μία επαναλαμβανόμενη δομή κατάρτισης (training structure), μέσα στην οποία η ακολουθία κατάρτισης επαναλαμβάνεται πολλές φορές. Η χρήση πολλαπλών συνόλων επαναλαμβανόμενων ακολουθιών είναι επίσης πολύ συχνή. Οι επαναλαμβανόμενες ακολουθίες κατάρτισης εισάγουν δομή

περιοδικής συσχέτισης στο σήμα μετάδοσης. Η περιοδική δομή είναι χρήσιμη για την ανίχνευση πλαισίου, τον συγχρονισμό πλαισίου και την εκτίμηση της μετατόπισης συχνότητας.

Αντιστροφές πρόσημων όπως για παράδειγμα $T, T, T, -T$, ή χρήση συμπληρωματικών ακολουθιών, βοηθούν στην όξυνση των αλγορίθμων συγχρονισμού πλαισίου. Επίσης, κυκλικά προθέματα (cyclic prefixes) μπορούν να εφαρμοστούν στα δεδομένα κατάρτισης ώστε να διευκολυνθεί η εκτίμηση καναλιού στο πεδίο της συχνότητας, διεργασία ιδιαίτερα χρήσιμη για διαμορφώσεις όπως η OFDM.



Σχήμα 2.16. Τυπική δομή προοιμίου με πολλαπλές επαναλαμβανόμενες ακολουθίες

2.5.2 Εκτίμηση Καναλιού

Μετά το συγχρονισμό πλαισίου και τη διόρθωση της μετατόπισης συχνότητας, το επόμενο μεγάλο ζήτημα για τον δέκτη είναι η ισοστάθμιση. Το ληφθέν σήμα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως εξής:

$$y(n) = \sum_{l=0}^L h(l)s(n-l) + u(n) \quad (2.27)$$

Το αντικείμενο της εκτίμησης καναλιού είναι η παραγωγή μιας εκτίμησης $\{\hat{h}(l)\}$ εφόσον είναι γνωστές πληροφορίες για το μεταδιδόμενο σήμα. Υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι για την εκτίμηση των συντελεστών του καναλιού. Ίσως η πιο δημοφιλής προσέγγιση είναι αυτή των ελάχιστων τετραγώνων (least squares), η οποία συγκεντρώνει τις περισσότερες πιθανότητες εκτίμησης όταν έχουμε λευκό και Gaussian προσθετικό θόρυβο.

Για το σχηματισμό του εκτιμητή, υποθέτουμε ότι $\{t(n)\}_{n=0}^{N_t-1}$ είναι μια ακολουθία από γνωστά δεδομένα κατάρτισης και υποθέτουμε ότι $s(n) = t(n)$ για $n = 0, 1, \dots, N_t - 1$.

Μία γενική προσέγγιση είναι να γραφεί η σχέση μεταξύ εισόδου και εξόδου σε μορφή πίνακα matrix αγνοώντας τον θόρυβο:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y(L) \\ y(L+1) \\ \vdots \\ y(N_t-1) \end{bmatrix}}_y = \underbrace{\begin{bmatrix} t(L) & \dots & t(0) \\ t(L+1) & \dots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t(N_t-1) & \dots & t(N_t-1-L) \end{bmatrix}}_T \underbrace{\begin{bmatrix} h(0) \\ h(1) \\ \vdots \\ h(L) \end{bmatrix}}_h \quad (2.28)$$

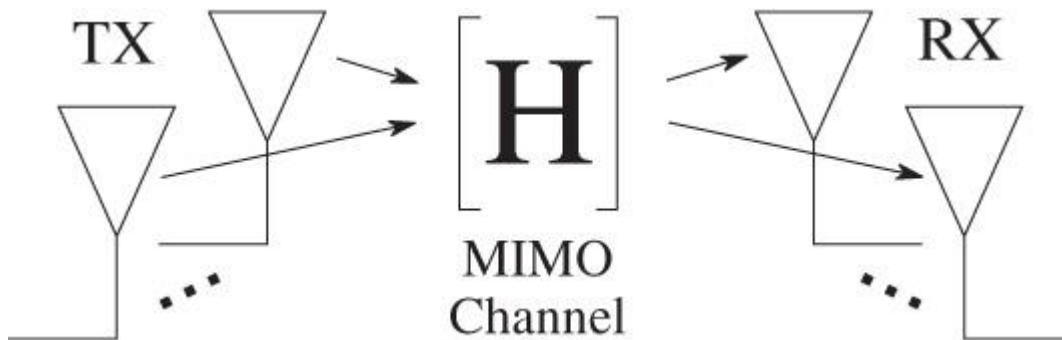
Οι παρατηρήσεις ξεκινούν από το $y(L)$ από τη στιγμή που οι τιμές για $s(n)$ και $n < 0$ μπορεί να μην είναι γνωστές. Το matrix T είναι το matrix κατάρτισης. Συνήθως, επιλέγεται τέτοιο N_t ώστε το T να έχει αρκετό ύψος για να αποδώσει τα μέγιστα. Η εκτίμηση καναλιού με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων δίνει λύση στο ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\hat{h} = \arg \min_a \|y - Ta\|^2 \quad (2.29)$$

Υποθέτοντας ότι το matrix κατάρτισης είναι πλήρους κατάταξης, κάτι που μπορεί να επιτευχθεί για παράδειγμα με χρήση μιας ακολουθίας κατάρτισης με καλές ιδιότητες συσχέτισης, έχουμε την εξής απλή μορφή στην εκτίμηση ελαχίστων τετραγώνων: $\hat{h} = (T^*T)^{-1}T^*y$. Το τετραγωνικό λάθος της εκτίμησης ελαχίστων τετραγώνων δίνεται: $y^*y - y^*T(T^*T)^{-1}T^*y$. Η πράξη T^*y είναι μία συσχέτιση μέρους των δεδομένων κατάρτισης με τα δεδομένα παρατήρησης. Εάν τα δεδομένα κατάρτισης έχουν καλές ιδιότητες συσχέτισης, τότε ισχύει $T^*T \approx I$ και ως εκ τούτου η διεργασία των ελαχίστων τετραγώνων μπορεί να εξηγηθεί ως η έξοδος της συσχέτισης με ένα γνωστό σήμα κατάρτισης.

2.6 Συστήματα Πολλαπλών Εισόδων - Εξόδων

Τα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας τα οποία χρησιμοποιούν πολλαπλές κεραίες σε πομπό και δέκτη είναι ευρέως γνωστά ως συστήματα πολλαπλών εισόδων και εξόδων (Multiple Input Multiple Output, MIMO), λόγω των πολλαπλών εισόδων που αποτελούν για το κανάλι διάδοσης οι πολλαπλές κεραίες του πομπού και των πολλαπλών εξόδων που αποτελούν αντίστοιχα οι πολλαπλές κεραίες του δέκτη. Τα συστήματα MIMO προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα στην επικοινωνία, συμπεριλαμβανομένων της ποικιλομορφίας (diversity) έναντι των διαλείψεων μικρής κλίμακας, υψηλότερων ρυθμών δεδομένων και την δυνατότητα ακύρωσης των παρεμβολών.

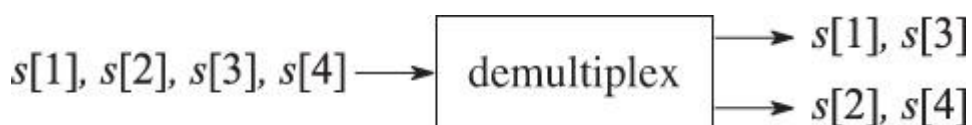


Σχήμα 2.17. Ένα γενικό σύστημα επικοινωνίες MIMO με κανάλι MIMO

Τα χαρακτηριστικά εκπομπής των συστημάτων MIMO περιλαμβάνουν τη χωρική πολυπλεξία (spatial multiplexing), η χρήση της οποίας προσφέρει υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων με αποστολή πολλαπλών ροών συμβόλων πάνω σε μία συχνότητα φέροντος. Επίσης την ποικιλομορφία, η οποία χρησιμοποιείται για να παρέχει υψηλότερη αξιοπιστία μέσω της αποστολής πλεονάζουσας πληροφορίας διαμέσου των κεραιών. Ακόμη το σχηματισμό δέσμης (beamforming), ο οποίος χρησιμοποιείται για την προσαρμογή του σχήματος της διάταξης των κεραιών σε πομπό και δέκτη, ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα της επικοινωνίας μέσω της αύξησης του κέρδους κεραιών ή του κέρδους ποικιλομορφίας.

2.6.1 Χωρική Πολυπλεξία

Η χωρική πολυπλεξία είναι μία τεχνική εκπομπής στα συστήματα MIMO, στην οποία η πληροφορία αποπολυπλέκεται κατά μήκος των κεραιών εκπομπής και στη συνέχεια από κοινού αποκωδικοποιείται από τις πολλαπλές κεραιές του δέκτη. Υπό ορισμένες υποθέσεις σχετικά με τον πλούτο του περιβάλλοντος διάδοσης, είναι δυνατόν να αυξηθεί η φασματική απόδοση, ο ρυθμός δηλαδή δεδομένων ανά μονάδα εύρους ζώνης γραμμικά, με το μικρότερο αριθμό είτε των κεραιών εκπομπής είτε των κεραιών λήψης. Ουσιαστικά, η χωρική πολυπλεξία επιτρέπει σε πολλαπλά σύμβολα να μεταδοθούν ταυτόχρονα με το ίδιο φέρον και με την ίδια συνολική ισχύ, σαν να είχε σταλεί ένα σύμβολο.



Σχήμα 2.18. Παράδειγμα MIMO χωρικής πολυπλεξίας που στέλνει δύο ροές δεδομένων

Θεωρώντας ένα MIMO σύστημα επικοινωνίας με N_t κεραιές εκπομπής και N_r κεραιές λήψης και υποθέτοντας ότι το $s_p(n)$ δηλώνει το σύμβολο που στέλνει η p^{th} κεραιά πομπού, τότε το $s_p(n)$ μπορεί να ληφθεί με αποπολύπλεξη μιας ροής συμβόλου $s(n)$ ώστε να δημιουργηθεί το $s_p(n) = s(N_t n + p - 1)$. Αν το $s^T(n) = [s_1(n), s_2(n), \dots, s_{N_t}(n)]^T$ δηλώνει το διάνυσμα των συμβόλων εκπομπής και το $\{H(l)\}_{l=0}^L$ δηλώνει το matrix της κρουστικής απόκρισης του καναλιού, τότε κάθε είσοδος της απόκρισης του καναλιού, $\{h_{m,p}(l)\}_{l=0}^L$, είναι η κρουστική απόκριση της p^{th} κεραιάς του πομπού και της m^{th} κεραιάς του δέκτη. Εάν $y(n)$ είναι το διάνυσμα των δειγματοληφθέντων παρατηρήσεων από κάθε κεραιά, τότε η σχέση εισόδου-εξόδου για τη χωρική πολυπλεξία δίνεται:

$$y(n) = \sum_{l=0}^L H(l)s(n-l) + v(n) \quad (2.30)$$

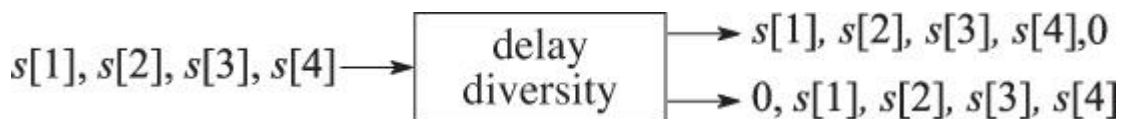
Όλες οι τεχνικές γραμμικής εξισορρόπησης, εξισορρόπησης στο πεδίο της συχνότητας, εξισορρόπησης απόφασης ανάδρασης και η μέγιστη πιθανότητα ανίχνευσης ακολουθίας μπορεί να επεκταθεί στα συστήματα MIMO. Επειδή η κρουστική απόκριση του συστήματος είναι ένα matrix, η εξισορρόπηση είναι γενικά πιο σύνθετη διαδικασία σε ένα σύστημα MIMO. Το αποτέλεσμα είναι ότι οι τεχνικές στο πεδίο των συχνοτήτων έχουν λάβει την μεγαλύτερη έμφαση, καθώς οι διακριτοί μετασχηματισμοί Fourier (Discrete Fourier Transformations, DFTs) είναι εύκολο να υλοποιηθούν στο hardware της επεξεργασίας σήματος και η συνέλιξη στο πεδίο του χρόνου είναι απλός πολλαπλασιασμός στο πεδίο της συχνότητας.

2.6.2 Χωρική Ποικιλομορφία

Μια άλλη εφαρμογή των πολλαπλών κεραιών σε ένα ασύρματο σύστημα είναι η αξιοποίηση του πλεονεκτήματος ποικιλομορφίας έναντι της παρουσίας διαλείψεων μικρής κλίμακας. Το ζητούμενο είναι να αξιοποιηθεί η παρουσία πολλαπλών διαδρομών διάδοσης μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Τέτοιες διαδρομές μπορούν να δημιουργηθούν μέσω της παρουσίας πολλαπλών κεραιών είτε εκπομπής είτε λήψης. Για

παράδειγμα, με μία μόνο κεραία εκπομπής, πολλαπλές κεραίες λήψης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ληφθούν διαφορετικές όψεις του ίδιου σήματος. Αυτές οι παρατηρήσεις μπορούν να συνδυαστούν για καλύτερη ανίχνευση των μεταδιδόμενων συμβόλων. Με πολλαπλές κεραίες λήψης, η ποικιλομορφία μπορεί να επιτευχθεί μέσα από διάφορες συνδυαστικές τεχνικές.

Με πολλαπλές κεραίες εκπομπής, η επίτευξη ποικιλομορφίας είναι πιο περίπλοκη. Μία προσέγγιση είναι η εξάπλωση των συμβόλων με έξυπνο τρόπο σε όλες τις κεραίες εκπομπής με χρήση καθυστερήσεων, κωδίκων Trellis χώρου-χρόνου ή κωδίκων block χώρου-χρόνου, με πιο συνηθισμένο εκ των οποίων τον κώδικα Alamouti. Μια άλλη προσέγγιση είναι να γίνει χρήση ανάδρασης μέσω του ελέγχου των δεδομένων από το δέκτη στον πομπό, ώστε να κατευθυνθεί το εκπεμπόμενο σήμα προς κατευθύνσεις οι οποίες αξιοποιούν τα πλεονεκτήματα των πολλαπλών διαδρομών του σήματος.



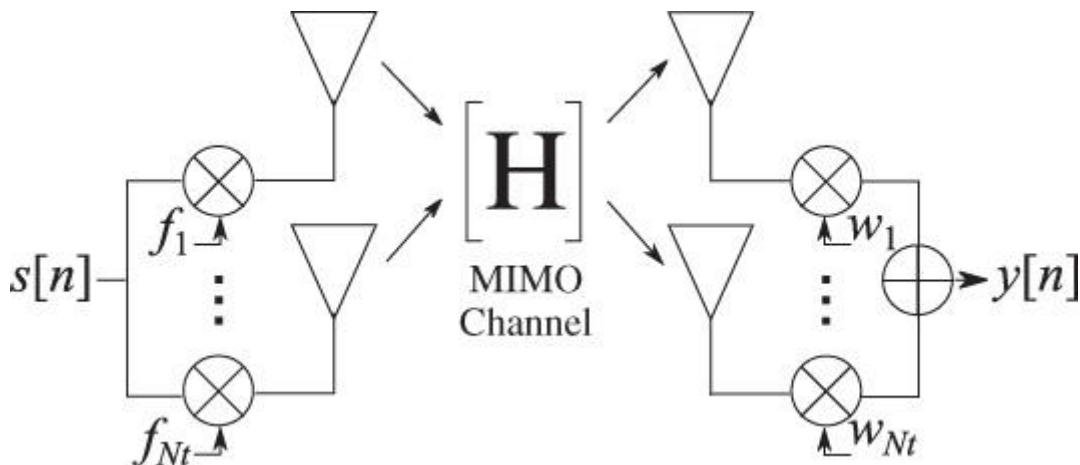
Σχήμα 2.19. Πομπός που χρησιμοποιεί ποικιλομορφία με καθυστέρηση

2.6.3 Σχηματισμός Δέσμης

Οι κλασικές τεχνικές beamforming χρησιμοποιούν πολλαπλές κεραίες στον πομπό ή και στο δέκτη. Η βασική ιδέα του beamforming είναι η αποστολή των ίδιων πληροφοριών σε κάθε κεραία, αλλά με διαφορετικό πλάτος ή και φάση του σήματος για κάθε κεραία. Το beamforming ουσιαστικά αποτελεί μια μορφή χωρικού φιλτραρίσματος. Μεταβάλλοντας το πλάτος ή τη φάση του σήματος, το ενεργό διάγραμμα ακτινοβολίας της συνολικής συστοιχίας κεραιών μπορεί να διαμορφωθεί και να κατευθυνθεί. Για παράδειγμα, το διάγραμμα της κεραίας μπορεί να στραφεί προς την κατεύθυνση της ευνοϊκότερης διαδρομής διάδοσης. Σε πιο πολύπλοκες προσεγγίσεις beamforming, όπως αυτές εφαρμόζονται στις έξυπνες κεραίες, τα διαγράμματα των συστοιχιών κεραιών μπορούν επίσης να προσαρμοστούν ώστε να κατευθυνθούν μακριά από κοντινές παρεμβολές. Η ακύρωση των παρεμβολών βελτιώνει περαιτέρω την απόδοση του συστήματος.

Για να εξηγηθεί καλύτερα η έννοια του beamforming μπορούμε να θεωρήσουμε ένα σύστημα επικοινωνίας MIMO, όπου το f δηλώνει το beamforming διάνυσμα μετάδοσης και το $s[n]$ το σύμβολο που πρέπει να μεταδοθεί. Εάν το w δηλώνει το beamforming διάνυσμα λήψης, γνωστό και ως συνδυαστικό διάνυσμα, τότε ένα σύστημα MIMO στενής ζώνης με beamforming, έχει την εξής σχέση εισόδου-εξόδου:

$$y(n) = w^* H f s(n) + w^* v(n) \quad (2.31)$$



Σχήμα 2.20. Ένα σύστημα MIMO με beamforming σε πομπό και δέκτη

Το ενεργό κανάλι περιλαμβάνει τις επιδράσεις του καναλιού, του μορφοποιητή δέσμης και των συνδυαστικών διανυσμάτων στο $w^* H f$. Η κατάλληλη επιλογή των f και w αποδίδει μεγάλο κέρδος καναλιού $|w^* H f|$. Η μέγιστη απόδοση κέρδους επιτυγχάνεται με τοποθέτηση του f στο κυρίαρχο μοναδικό δεξιό διάνυσμα του H και του w στο κυρίαρχο μοναδικό αριστερό διάνυσμα του H . Το διάνυσμα f του beamforming του πομπού εξαρτάται από το κανάλι H , το οποίο συνήθως μετράται μόνο στο δέκτη. Κατά συνέπεια, μπορεί να χρειαστούν κάποιες πληροφορίες ανάδρασης από το δέκτη ώστε να βοηθηθεί ο πομπός να επιλέξει το καλύτερο διάνυσμα beamforming. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως περιορισμένη ανατροφοδότηση και χρησιμοποιείται ευρέως στα εμπορικά ασύρματα συστήματα.

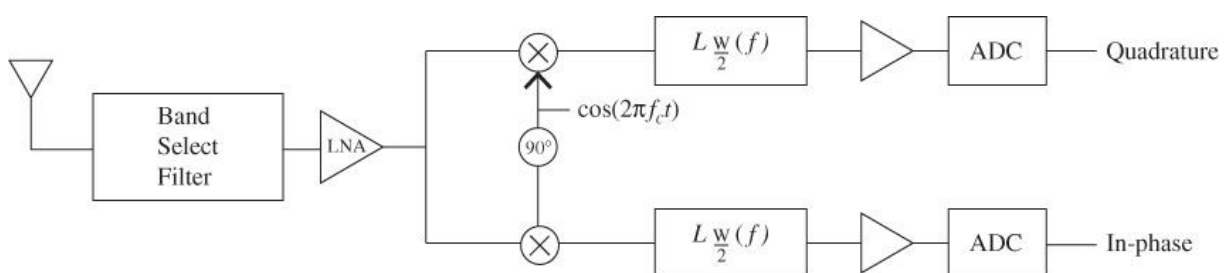
2.7 Αρχιτεκτονική Ασύρματων Συστημάτων

Οι πρακτικές υλοποιήσεις ασύρματων συστημάτων πολλές φορές μπορεί να διαφέρουν εξαιτίας παραγόντων που σχετίζονται με τη μη ιδανικότητα των εξαρτημάτων των

ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, όπως για παράδειγμα η δυσκολία στην υλοποίηση φίλτρων με πολύ στενή ζώνη αποκοπής συχνοτήτων. Όταν τα φίλτρα είναι μη-ιδανικά, σήματα παρεμβολών, όπως σήματα που καταλαμβάνουν συχνότητες άλλων φερόντων δεν εξαλείφονται εντελώς και μπορούν να αλλοιώσουν το επιθυμητό σήμα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μίξης. Για το λόγο αυτό, υπάρχουν διάφορες αρχιτεκτονικές υλισμικού (hardware) για την πραγματοποίηση ανύψωσης (upconversion) και υποβιβασμού (downconversion) συχνότητας από τη σκοπιά των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

2.71 Αρχιτεκτονικές Hardware

Ουσιαστικά, η διαδικασία του downconversion περιλαμβάνει τη μίξη του λαμβανόμενου σήματος με ένα συνημίτονο ή ημιτόνο και το φιλτράρισμά τους, προκειμένου να απορριφθούν τα προϊόντα υψηλότερης συχνότητας. Η πιο απλή hardware αρχιτεκτονική του downconversion είναι ο ομόδυνος δέκτης (homodyne receiver), ο οποίος επίσης ονομάζεται δέκτης άμεσης μετατροπής. Σε αυτόν το δέκτη, το λαμβανόμενο σήμα οδηγείται σε ένα φίλτρο επιλογής ζώνης συχνοτήτων που ακολουθείται από έναν ενισχυτή χαμηλού θορύβου. Το προκύπτον σήμα αναμιγνύεται σε τετραγωνισμό με ένα κύμα συνημίτονου και ένα κύμα ημίτονου. Το ημιτονοειδές κύμα δημιουργείται με μετατόπιση φάσης του συνημίτονου. Στη συνέχεια, το λαμβανόμενο σήμα φιλτράρεται από ένα χαμηλοπερατό φίλτρο για την απόρριψη των παρεμβολών, ενισχύεται και δειγματοληπτείται από έναν μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (Analog to Digital Converter, ADC).

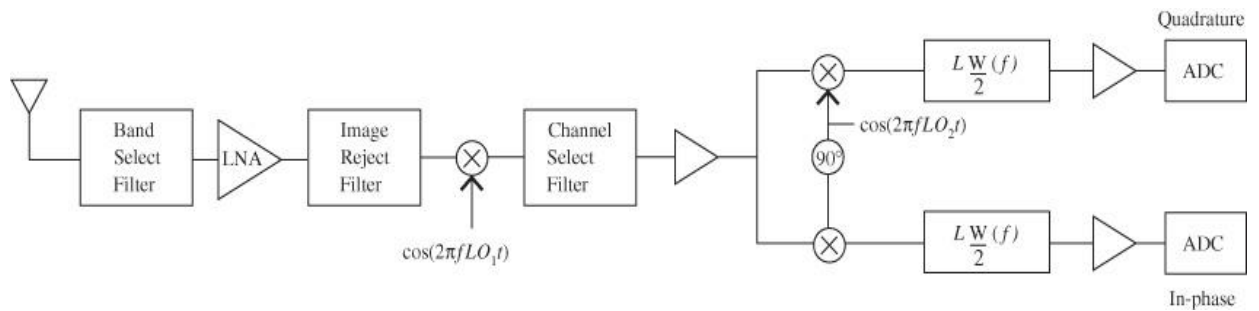


Σχήμα 2.21. Απεικόνιση ενός ομόδυνου δέκτη

Δύο σημαντικοί περιορισμοί ενός ομόδυνου δέκτη είναι η μετατόπιση τάσης (DC offset) και η αναντιστοιχία σε φάση/τετραγωνισμού (in-phase/quadrature, IQ). Το DC offset απαιτεί είτε ένα ειδικό zero-DC σήμα μετάδοσης, είτε κάποιου είδους κύκλωμα διόρθωσης δέκτη. Αιτία δημιουργίας του DC offset μπορεί να είναι η ατελής απομόνωση κάποιων πόρτας, εξαιτίας της οποίας μέρος του φέροντος οδηγείται στην είσοδο του

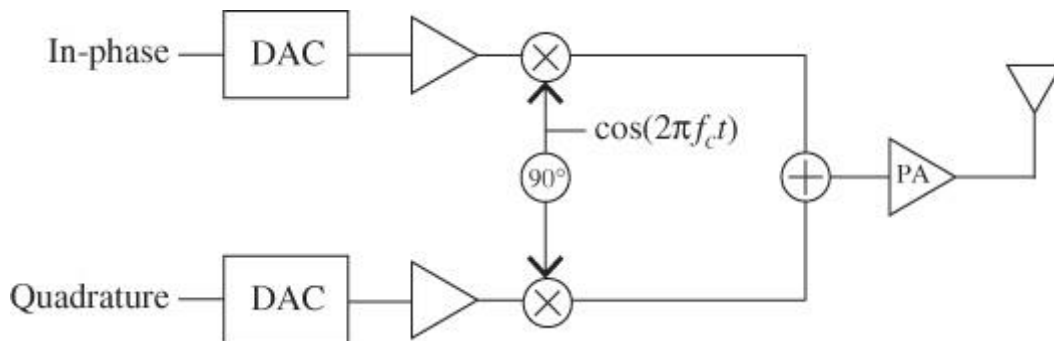
ενισχυτή χαμηλού θορύβου. Αυτό το σήμα υποβιβάζεται συχνωτικά σε 0Hz (DC). Η IQ αναντιστοιχία διαστρεβλώνει τους ληφθέντες αστερισμούς με διαμορφώσεις SC και αν είναι έντονη, απαιτεί πιο σύνθετη επεξεργασία του σήματος στο δέκτη προκειμένου να αντισταθμιστεί η πρόσθετη παραμόρφωση. Η αναντιστοιχία IQ δημιουργεί παρεμβολές μεταξύ των φερόντων σε συστήματα OFDM, οι οποίες προκαλούν παραμόρφωση θορύβου που μειώνει την απόδοση του συστήματος μέσω της αύξησης του ρυθμού σφαλμάτων bit. Η αναντιστοιχία IQ δημιουργείται από τις διαφορές φάσης και κέρδους στις διάφορες διαδρομές διάδοσης ανάμεσα στις in-phase και quadrature διακλαδώσεις του σήματος. Άλλα μειονεκτήματα των ομόδυνων δεκτών περιλαμβάνουν το θόρυβο τρεμοπαίγματος (flicker noise) και τις διαρροές τοπικών ταλαντωτών.

Ο ετερόδυνος δέκτης (heterodyne receiver) είναι μία από τις πιο κοινές αρχιτεκτονικές downconversion. Η βασική ιδέα του ετερόδυνου δέκτη είναι το διαδοχικό φιλτράρισμα και μίξη του σήματος μέσω πολλαπλών ενδιάμεσων συχνοτήτων (Intermediate Frequencies, IFs) ώστε να μετατραπεί σε σήμα βασικής ζώνης (baseband signal). Σε έναν δέκτη με μία IF, το σήμα αρχικά υποβιβάζεται από τη συχνότητα φέροντος f_c σε συχνότητα $f_c - f_{LO}$. Το φέρον f_{LO} είναι η πρώτη IF συχνότητα. Το φιλτραρισμένο σήμα στη συνέχεια μετατρέπεται σε σήμα βασικής ζώνης από έναν αποδιαμορφωτή τετραγωνισμού (quadrature demodulator), ο οποίος το πολλαπλασιάζει με ένα φέρον συχνότητας $f_{LO2} = f_c - f_{LO}$. Σε σύγκριση με τον ομόδυνο δέκτη, το πρόβλημα του DC offset αποφεύγεται επειδή το πρώτο στάδιο του downconversion δεν είναι σε DC και το επίπεδο του σήματος στο δεύτερο στάδιο είναι πολύ υψηλότερο, καθιστώντας την ανατροφοδότηση του φέροντος λιγότερο σημαντική. Η επίδραση της IQ αναντιστοιχίας είναι λιγότερο σοβαρή, διότι οι διαφορές κέρδους και φάσης είναι πολύ μικρότερες στα ισχυρότερα και χαμηλότερης συχνότητας σήματα. Μια βασική πρόκληση στο σχεδιασμό ενός ετερόδυνου δέκτη είναι η επιλογή του φίλτρου απόρριψης εικόνας και των συχνοτήτων IF. Μετά από κάθε μίξη με μία συχνότητα IF, τα σήματα που βρίσκονται στη συχνότητα φέροντος $2f_{LO}$, τα οποία ονομάζονται εικόνες, αναμειγνύονται στο λαμβανόμενο σήμα. Το φίλτρο απόρριψης εικόνας προσπαθεί να μετριάσει αυτά τα σήματα όσο το δυνατόν περισσότερο, αλλά φίλτρα με πολύ στενή ζώνη απόρριψης συχνοτήτων είναι δύσκολο να υλοποιηθούν, ωθώντας έτσι το f_{LO} να είναι χαμηλότερο σε συχνότητα.



Σχήμα 2.22. Απεικόνιση ετερόδυνου δέκτη με μία IF

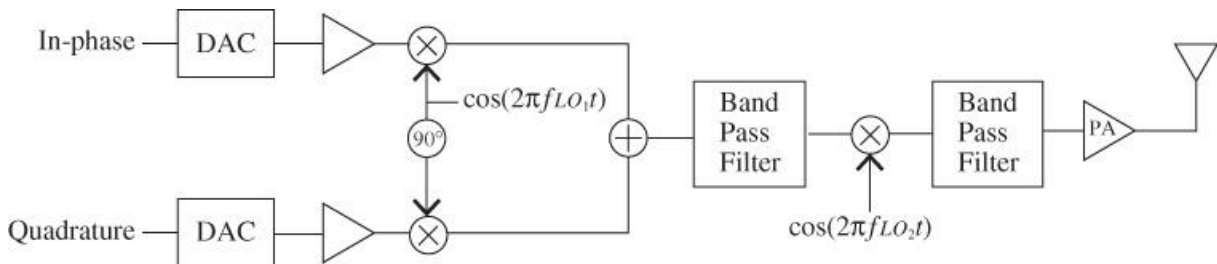
Η διαδικασία του upconversion περιλαμβάνει τη μίξη του σήματος βασικής ζώνης με ένα συνημίτονο ή ημίτονο και την ενίσχυση κατόπιν του σήματος εκπομπής με έναν ενισχυτή ισχύος (Power Amplifier, PA). Η πιο κοινή αρχιτεκτονική hardware για upconversion είναι ο πομπός άμεσης μετατροπής. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η διαρροή του ενισχυμένου σήματος πίσω στο φέρον μίξης, ένα φαινόμενο γνωστό ως έλξη τοπικού ταλαντωτή (local oscillator pull). Υπάρχουν διάφορες τεχνικές για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης πολλαπλών ταλαντωτών για διατήρηση της επιθυμητής συχνότητας, ανεξάρτητα από την επίδραση της έλξης.



Σχήμα 2.23. Απεικόνιση ενός πομπού άμεσης μετατροπής

Επίσης, είναι δυνατή μια μετατροπή πολλαπλών σταδίων στον πομπό. Η χρήση πολλαπλών σταδίων αποφεύγει τα μειονεκτήματα των πομπών άμεσης μετατροπής. Σε μία μετατροπή δύο σταδίων, το φίλτρο πριν από τη δεύτερη διεργασία μίξης απορρίπτει τις αρμονικές από την πρώτη μίξη και μειώνει το θόρυβο. Το φίλτρο μετά τη δεύτερη διεργασία μίξης εξαλείφει τις εικόνες που αυτή προκαλεί. Το δεύτερο φίλτρο πρέπει να είναι υψηλής ποιότητας ώστε να αποφευχθεί η ενίσχυση των εικόνων και η δημιουργία

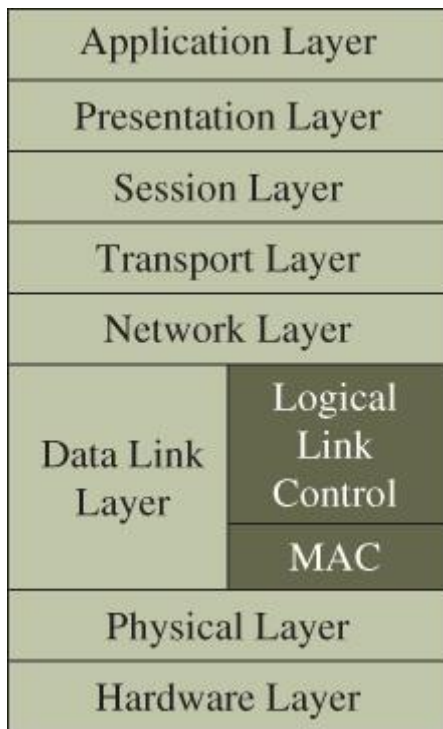
ανεπιθύμητων παρεμβολών σε άλλες ζώνες συχνοτήτων, προς γειτονικές συσκευές επικοινωνίας.



Σχήμα 2.24. Απεικόνιση ενός πομπού μετατροπής δύο βημάτων

2.7.2 Αρχιτεκτονική Συστήματος

Η αρχιτεκτονική του συστήματος αναφοράς που χρησιμοποιείται σε δίκτυα επικοινωνίας βασίζεται στο μοντέλο Ανοικτής Διασύνδεσης Συστημάτων (Open Systems Interconnection, OSI) και αναπτύχθηκε από το Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (International Standards Organization, ISO). Το μοντέλο OSI αποτελεί μια αφαίρεση των λειτουργιών δικτύου και χρησιμοποιείται για να βοηθήσει στο σχεδιασμό και την κατανόηση των δικτύων επικοινωνίας. Το μοντέλο OSI κατηγοριοποιεί την επικοινωνία σε επτά επίπεδα. Στο συμβατικό μοντέλο OSI, τα επίπεδα ορίζονται με όρους πρωτοκόλλων επικοινωνίας και διεπαφής. Το πρωτόκολλο ρυθμίζει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων κόμβων ενός δικτύου. Το επίπεδο ενός κόμβου επικοινωνεί με το ίδιο επίπεδο ενός άλλου κόμβου. Η διεπαφή καθορίζει τον έλεγχο και τις πληροφορίες δεδομένων που κοινοποιούνται μεταξύ των επιπέδων. Ένα επίπεδο n ζητά μία υπηρεσία από το επίπεδο $n-1$. Το επίπεδο n σε αντάλλαγμα, προσφέρει υπηρεσία στο επίπεδο $n+1$. Με αυτόν τον τρόπο αφαίρεσης, ο σχεδιασμός των επιπέδων μπορεί να πραγματοποιηθεί ανεξάρτητα, χωρίς την προϋπόθεση το ένα επίπεδο να γνωρίζει τις λεπτομέρειες του άλλου επιπέδου. Επίσης, πολλά από τα επίπεδα μπορούν να χωριστούν σε υποεπίπεδα. Στα ασύρματα συστήματα, η διαίρεση του επιπέδου διασύνδεσης δεδομένων σε επίπεδο ελέγχου λογικής διασύνδεσης και ελέγχου πρόσβασης μέσου είναι πολύ συνηθισμένη.



Σχήμα 2.25. Αρχιτεκτονική συστήματος αναφοράς για δίκτυα επικοινωνίας

Το **επίπεδο εφαρμογής (application layer)** είναι το 7^ο επίπεδο, το υψηλότερο επίπεδο στο μοντέλο OSI. Δεν είναι το ίδιο το επίπεδο η εφαρμογή, όπως είναι για παράδειγμα ένα πρόγραμμα λογισμικού, αλλά είναι το πρωτόκολλο επικοινωνίας που εξυπηρετεί την εφαρμογή. Το επίπεδο εφαρμογής διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ των εφαρμογών. Κοινά παραδείγματα πρωτοκόλλων στο επίπεδο εφαρμογής περιλαμβάνουν το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, το Hypertext Transfer Protocol (HTTP), το Session Initiated Protocol (SIP), και το πρωτόκολλο μεταφοράς αρχείων (File transfer Protocol, FTP).

Το **επίπεδο παρουσίασης (presentation layer)** είναι το 6^ο επίπεδο στο μοντέλο OSI. Μία από τις κύριες λειτουργίες του επιπέδου παρουσίασης είναι η μορφοποίηση ή μετάφραση των δεδομένων, έτσι ώστε τα δεδομένα να μπορούν να εναλλάσσονται μεταξύ των διαφορετικών τύπων συστημάτων. Άλλες λειτουργίες του επιπέδου παρουσίασης είναι η κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση, οι οποίες εξασφαλίζουν ασφαλή μετάδοση των πληροφοριών και συμπίεση δεδομένων. Ένα παράδειγμα πρωτοκόλλου που ενσωματώνει αυτές τις διαφορετικές λειτουργίες είναι το πρωτόκολλο Multipurpose Internet Mail Extensions (MIME), το οποίο προσθέτει κεφαλίδες για να αναγνωρίσει το περιεχόμενο προγραμμάτων ηλεκτρονικού

ταχυδρομείου, όπως το είδος του περιεχομένου, το σύνολο των χαρακτήρων και το είδος της κρυπτογράφησης.

Το **επίπεδο συνόδου (session layer)** είναι το 5^ο επίπεδο στο μοντέλο OSI. Ασχολείται κυρίως με τις συνδέσεις, οι οποίες αποτελούν την ένωση μεταξύ δύο τερματικών σημείων επικοινωνίας, καθώς και των συνόδων, που είναι οι συνομιλίες μεταξύ των δύο τερματικών σημείων που έχουν ως αποτέλεσμα την ανταλλαγή πολλαπλών μηνυμάτων. Το επίπεδο συνόδου είναι επιφορτισμένο με τη δημιουργία, το συντονισμό, το κλείσιμο και γενικότερα, τη διαχείριση των συνεδριών και των αντίστοιχων συνδέσεών τους. Παραδείγματα πρωτοκόλλων του επιπέδου συνόδου περιλαμβάνουν το πρωτόκολλο Remote Procedure Call (RPC), το σύστημα Network Basic Input Output System (NetBIOS) και το πρωτόκολλο Session Control Protocol (SCP).

Το **επίπεδο μεταφοράς (transport layer)** είναι το 4^ο επίπεδο του μοντέλου OSI. Τα πρωτόκολλα μεταφοράς παρέχουν διαφανείς από άκρη σε άκρη (end-to-end) επικοινωνίες. Το επίπεδο μεταφοράς είναι υπεύθυνο για την παροχή αξιοπιστίας, ελέγχου ροής και παραγγελία. Ένα παράδειγμα της αξιοπιστίας είναι ο έλεγχος ότι τα δεδομένα δεν είναι αλλοιωμένα, μέσω χρήσης κωδικών ανίχνευσης σφάλματος και ζητώντας να αναμεταδοθούν όσα δεδομένα είναι απαραίτητα. Ο έλεγχος της ροής αναφέρεται στην διαχείριση του συνολικού ποσοστού της σύνδεσης, για παράδειγμα για την αποφυγή υπερχειλίσις του απομονωτή στο δέκτη. Η παραγγελία είναι ένας μηχανισμός για την επανασυναρμολόγηση των δεδομένων από το επίπεδο δικτύου, το οποίο μπορεί να παρέχει πακέτα που ελήφθησαν με διαφορετική σειρά από αυτή που είχαν αποσταλεί. Παραδείγματα πρωτοκόλλων επιπέδου μεταφοράς περιλαμβάνουν το πρωτόκολλο ελέγχου μετάδοσης (Transmission Control Protocol, TCP), το πρωτόκολλο User Datagram Protocol (UDP), και το πρωτόκολλο Stream Control Transmission Protocol (SCTP).

Το **επίπεδο δικτύου (network layer)** είναι το 3^ο επίπεδο στο μοντέλο OSI. Το επίπεδο δικτύου έχει γνώση για πολλαπλούς κόμβους του δικτύου. Τα πρωτόκολλα δικτύου περιλαμβάνουν λειτουργίες όπως η δρομολόγηση (ή μεταγωγή), η προώθηση, η διευθυνσιοδότηση, η αλληλουχία, και ο έλεγχος συμφόρησης. Η δρομολόγηση περιλαμβάνει την επιλογή της βέλτιστης διαδρομής μεταξύ της πηγής και του προορισμού. Προώθηση είναι η λειτουργία που λαμβάνει ένα πακέτο και το στέλνει

στον επόμενο κόμβο της διαδρομής. Η διευθυνσιοδότηση δίνει μοναδικές διευθύνσεις στους κόμβους του δικτύου, μία πολύ χρήσιμη διεργασία για τη δρομολόγηση. Η αλληλουχία είναι η επισήμανση των πακέτων, έτσι ώστε να μπορούν να αποσταλούν κατά μήκος διαφορετικών διαδρομών στο δίκτυο. Ο έλεγχος συμφόρησης αφορά τη διαχείριση της κυκλοφορίας στις συνδέσεις μεταξύ των κόμβων, ώστε να αποφευχθεί η υπερβολική καθυστέρηση ή η απόρριψη πακέτων. Ένα παράδειγμα πρωτοκόλλου επιπέδου δικτύου είναι το Internet Protocol (IP).

Το **επίπεδο διασύνδεσης δεδομένων (data link layer)** είναι το 2^ο επίπεδο του μοντέλου OSI. Τα πρωτόκολλα διασύνδεσης δεδομένων διευκολύνουν την επικοινωνία μεταξύ κόμβων άμεσα συνδεδεμένων σε ένα δίκτυο. Είναι σύνηθες το επίπεδο διασύνδεσης δεδομένων να διαιρείται σε δύο υποεπίπεδα. Το μεγαλύτερο από τα δύο υποεπίπεδα είναι γνωστό ως έλεγχος λογικής διασύνδεσης (logical link layer). Ο έλεγχος λογικής διασύνδεσης είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο ροής και τον έλεγχο σφαλμάτων. Έλεγχος ροής είναι η διαδικασία ελέγχου του ρυθμού μετάδοσης, για την αποτροπή υπερβολικής μετάδοσης από τον κόμβο εκπομπής προς τον κόμβο λήψης. Ο έλεγχος σφαλμάτων περιλαμβάνει τη χρήση ενός κώδικα ελέγχου σφάλματος για την ανίχνευση σφαλμάτων στα πακέτα και αναγνώρισης πακέτων. Για παράδειγμα, το πρότυπο IEEE 802.2 αποτελεί μια ιδιαίτερη περίπτωση ελέγχου λογικής διασύνδεσης, η οποία χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τα πρότυπα 802.15.3c IEEE και IEEE 802.11ad.

Το υποεπίπεδο MAC ασχολείται με τη φυσική διευθυνσιοδότηση και πρόσβαση στο κανάλι επικοινωνίας. Μία διεύθυνση MAC συνδέεται με ένα φυσικό κομμάτι hardware, όπως ένας σειριακός αριθμός. Η πρόσβαση καναλιού επιτρέπει σε πολλαπλές φυσικές συσκευές να έχουν πρόσβαση στο ίδιο φυσικό μέσο επικοινωνίας. Το πρωτόκολλο MAC συντονίζει την πρόσβαση καναλιού είτε με κεντρικό είτε με καταναμημένο τρόπο, ανάλογα με το είδος του δικτύου. Σε ένα κεντρικό πρωτόκολλο, ένας κόμβος ελεγκτής μπορεί να διερευνήσει εάν οι γειτονικοί κόμβοι επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν το μέσο, ενώ σε ένα καταναμημένο πρωτόκολλο, οι κανόνες καθορίζουν τον τρόπο επίλυσης διαμαχών και συγκρούσεων όταν πολλαπλοί κόμβοι θέλουν να έχουν πρόσβαση στο ίδιο κανάλι. Στο πρωτόκολλο IEEE 802.11, η συνάρτηση συντονισμού σημείου (Point Coordination Function, PCF) είναι ένα παράδειγμα κεντρικού πρωτοκόλλου, ενώ η συνάρτηση καταναμημένου συντονισμού (Distributed Coordination Function, DCF) είναι ένα παράδειγμα καταναμημένου πρωτοκόλλου.

Το **φυσικό επίπεδο (physical layer)** είναι το 1^ο επίπεδο στο μοντέλο OSI. Το κύριο καθήκον του πρωτοκόλλου PHY είναι να μεταφέρει ψηφιακές πληροφορίες (bits) σε μια φυσική σύνδεση επικοινωνίας. Το επίπεδο PHY περιγράφει τη διεπαφή με το μέσο επικοινωνίας και τον τρόπο δημιουργίας της φυσικής κυματομορφής. Για παράδειγμα, ένα πρωτόκολλο PHY μπορεί να προσδιορίσει χαρακτηριστικά γνωρίσματα της επικοινωνίας όπως η φέρουσα συχνότητα, το εύρος ζώνης, ο αστερισμός συμβόλου, ο τύπος της διαμόρφωσης, η τοποθεσία και το είδος των δεδομένων κατάρτισης και η κωδικοποίηση ελέγχου σφάλματος.

Το **επίπεδο υλισμικού (hardware layer)** είναι το επίπεδο 0, το χαμηλότερο επίπεδο στο μοντέλο OSI. Σε μία παραδοσιακή περιγραφή του μοντέλου OSI, το PHY είναι το χαμηλότερο επίπεδο. Στην πράξη όμως, υπάρχει ένα ακόμη χαμηλότερο επίπεδο, που μπορεί να ονομαστεί επίπεδο 0. Το επίπεδο 0 περιγράφει τις φυσική εφαρμογές και δυνατότητες του hardware. Το πρωτόκολλο PHY δεν προσδιορίζει τα ακριβή στοιχεία του hardware, τουλάχιστον στα ασύρματα συστήματα, σε αντίθεση με τα ενσύρματα συστήματα όπου μπορεί να υπάρχουν λεπτομερείς προδιαγραφές σχετικά με την καλωδίωση. Για παράδειγμα, ο τύπος της κεραίας, η τεχνολογία ημιαγωγών, η υλοποίηση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ή η διαμόρφωση του αναλογικού εμπρόσθιο άκρου (analog front end), δεν περιλαμβάνονται στο επίπεδο PHY. Επιπλέον, κάποιος μπορεί να παρατηρήσει ότι η τεχνογνωσία που σχετίζεται με τη μηχανική του φυσικού επιπέδου (επεξεργασία σήματος, ψηφιακή επικοινωνία και θεωρία ελέγχου) είναι εντελώς διαφορετική από αυτή που απαιτείται για την υλοποίηση του hardware επιπέδου (ηλεκτρομαγνητισμός, σχεδιασμός κεραιών, κυκλώματα RF, μίξη σήματος).

Κεφάλαιο 3

Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων στα Συστήματα mmWave

3.1 Διάδοση στον Ελεύθερο Χώρο

Η μελέτη της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στον ελεύθερο χώρο (free space propagation), είναι απαραίτητη προκειμένου να είναι δυνατή η εκτίμηση των χαρακτηριστικών του ασύρματου καναλιού επικοινωνίας. Στη διάδοση ελεύθερου χώρου, η απώλεια διάδοσης (propagation loss) της ακτινοβολούμενης ισχύος του σήματος έχει άμεση εξάρτηση από την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, η οποία μπορεί να εκτινεται από μερικά μέτρα, έως εκατοντάδες ή και χιλιάδες μέτρα.

Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στον ελεύθερο χώρο με απουσία εμποδίων εντός του καναλιού διάδοσης, δηλαδή χωρίς ανακλάσεις ή σκεδάσεις, μοντελοποιείται μαθηματικά από την εξίσωση απώλειας διαδρομής ελεύθερου χώρου (free space path loss equation), όπως αυτή έχει διατυπωθεί από τον Harold T. Friis. Η θεωρία της διάδοσης στον ελεύθερο χώρο του Friis, περιγράφει πώς η ενεργός ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς (Effective Isotropic Radiated Power, EIRP) ενός πομπού προκύπτει από το γινόμενο της μεταδιδόμενης ισχύος P_t και του κέρδους της κεραίας του πομπού G_t , όπου το κέρδος κεραίας καθορίζεται σε σχέση με έναν ιστροπικό ακτινοβολητή.

Η πυκνότητα ροής ισχύος, η οποία μετράται σε μονάδες Watt/τετραγωνικό μέτρο, είναι το ποσό της ενέργειας ανά επιφάνεια που ακτινοβολείται στον ελεύθερο χώρο. Η πυκνότητα ροής ισχύος ενός εκπεμπόμενου σήματος, το οποίο διαδίδεται σε μια απόσταση d στον ελεύθερο χώρο, δίνεται από τη διαίρεση της EIRP με την επιφάνεια σφαίρας με ακτίνα d .

Το κέρδος μιας κεραίας μπορεί να εκφραστεί με όρους ενεργούς περιοχής και συχνότητας λειτουργίας, όπου η ενεργός επιφάνεια της κεραίας εκτιμάται με βάση το φυσικό μέγεθος της κεραίας και η συχνότητα λειτουργίας σύμφωνα με τη μέγιστη ενεργή επιφάνειά της ή την επιφάνεια ανοίγματός της:

$$G_{max} = e_{max} A_{max} \left(\frac{4\pi}{\lambda^2} \right) \quad (3.1)$$

όπου e_{max} είναι η μέγιστη απόδοση της κεραίας, η οποία είναι πάντα μικρότερη από 1, λ είναι το μήκος κύματος λειτουργίας και A_{max} είναι το μέγιστο ενεργό άνοιγμα. Το μέγιστο ενεργό άνοιγμα έχει μονάδα το m^2 . Δηλαδή, το A_{max} αντιπροσωπεύει τη φυσική περιοχή της κεραίας που συλλαμβάνει και αποδίδει χρήσιμη ενέργεια. Επειδή το κέρδος της κεραίας G_{max} δηλώνει την κατευθυντικότητα της κεραίας στη μέγιστη κατεύθυνση, σε σύγκριση με μια πανκατευθυντική ιστροπική κεραία αναφοράς, γίνεται σαφές ότι οι κεραίες αποκτούν πολύ μεγαλύτερη κατευθυντικότητα και κέρδος, είτε όταν το μήκος κύματος του φέροντος μειώνεται, είτε όταν το άνοιγμα της κεραίας αυξάνεται. Η απολαβή της κεραίας αυξάνει επίσης με τη συχνότητα για ένα σταθερό άνοιγμα κεραίας, όπου το κέρδος αυξάνει με το τετράγωνο της συχνότητας.

Η λαμβανόμενη ισχύς στον ελεύθερο χώρο, είναι ανάλογη με το γινόμενο της EIRP και της ενεργούς περιοχής $A_{eff} = e_{max} A_{max}$ της κεραίας του δέκτη και αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης διάδοσης d :

$$P_r = \frac{EIRP}{4\pi d^2} (A_{eff}) = \frac{P_t G_t G_r}{L} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3.2)$$

όπου P_r και P_t είναι η λαμβανόμενη και εκπεμπόμενη ισχύς αντίστοιχα, G_r και G_t είναι τα γραμμικά κέρδη των κεραιών πομπού και δέκτη αντίστοιχα και λ είναι το μήκος κύματος λειτουργίας της μετάδοσης. Ο αδιάστατος συντελεστής απωλειών L αντιπροσωπεύει όλες τις απώλειες που συνδέονται με τις κεραίες και τα συστατικά στοιχεία τους. Επειδή η απώλεια διαδρομής είναι το αντίστροφο του κέρδους

διαδρομής, αυξάνεται όσο αυξάνεται η απόσταση εκπομπής ή όσο μειώνεται το μήκος κύματος. Επειδή η συχνότητα και το μήκος κύματος ενός διαδιδόμενου κύματος σχετίζονται με την ταχύτητα του φωτός ($c = \lambda f$), από την εξίσωση 3.2 εξάγεται το συμπέρασμα ότι για μία σταθερή απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη και σταθερό κέρδος κεραιών σε πομπό και δέκτη, η απώλεια διαδρομής ελεύθερου χώρου είναι ανάλογη με το τετράγωνο της συχνότητας λειτουργίας.

Για να φανεί η επίδραση της συχνότητας στην απώλεια διαδρομής, θα γίνει σύγκριση των απωλειών διαδρομής ελεύθερου χώρου μεταξύ των παραδοσιακών συχνοτήτων των ασύρματων συστημάτων στα 460 MHz (πρώιμα κυψελοειδή συστήματα), στα 2.4GHz (πρώιμα WLAN συστήματα και σύγχρονα πρότυπα συνδεσιμότητας όπως Bluetooth και BLE), στα 5 GHz (σύγχρονα WLAN συστήματα) και μιας συχνότητας λειτουργίας συστημάτων mmWave στα 60 GHz. Υποθέτοντας ότι έχουμε ίδια επίπεδα ισχύος εκπομπής, πανκατευθυντικές κεραιές και ότι δεν υπάρχουν απώλειες συστήματος ($L = 1$), η απώλεια διαδρομής για αποστάσεις $d = 1, 10, 100,$ και 1000 m (δεδομένου ότι $\lambda = \frac{c}{f_c}$ με $c = 3 \times 10^8$), παρουσιάζεται στον πίνακα 3.1. Αυτοί οι υπολογισμοί δείχνουν ότι η αύξηση της συχνότητας στα συστήματα mmWave έχει μεγάλη επίδραση στην απώλεια διαδρομής εάν χρησιμοποιούνται μη κατευθυντικές κεραιές. Στην περίπτωση αυτή, θα πρέπει να αντισταθμιστεί απώλεια 20 έως 40 dB στην ισχύ λήψης σε σύγκριση με τα σημερινά περιβάλλοντα UHF και μικροκυματικών επικοινωνιών.

	$f_c = 460$ MHz	$f_c = 2.4$ GHz	$f_c = 5$ GHz	$f_c = 60$ GHz
$d = 1$ m	-25.7 dB	-40 dB	-46.4 dB	-68 dB
$d = 10$ m	-45.7 dB	-60 dB	-66.4 dB	-88 dB
$d = 100$ m	-65.7 dB	-80 dB	-86.4 dB	-108 dB
$d = 1,000$ m	-85.7 dB	-100 dB	-106.4 dB	-128 dB

Πίνακας 3.1. Υπολογισμός απώλειας διαδρομής στον ελεύθερο χώρο για διαφορετικές συχνότητες ασύρματων επικοινωνιών

Υπάρχει όμως ένα πλεονέκτημα για τη διάδοση στις mmWave συχνότητες, το οποίο μπορεί να αντισταθμίσει, ή ακόμη και να μειώσει τη μεγαλύτερη απώλεια διαδρομής σε σύγκριση με τις UHF και μικροκυματικές συχνότητες. Το πλεονέκτημα αυτό είναι ότι το πολύ μικρό μήκος κύματος των mmWave συχνοτήτων επιτρέπει τη χρήση

κατευθυντικών κεραιών με πολύ μικρές φυσικές διαστάσεις. Συστοιχίες τέτοιων κεραιών είναι σε θέση να προσφέρουν σημαντική αύξηση κέρδους στις mmWave συχνότητες. Προσαρμόσιμες συστοιχίες κεραιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχηματισμό στενών δεσμών με πολύ μικρές φυσικές διαστάσεις. Αυτές οι υψηλής απολαβής, κατευθυνόμενες, προσαρμόσιμες κεραιές, επιτρέπουν στα mmWave συστήματα επικοινωνίας να κατευθύνουν τις δέσμες μέσα στο περιβάλλον, έτσι ώστε η ενέργεια εκπομπής να αναπηδά γύρω από τα εμπόδια σκέδασης και ανάκλασης ενός πραγματικού περιβάλλοντος διάδοσης. Κατά αυτόν τον τρόπο, η εκπεμπόμενη ενέργεια επικεντρώνεται μόνο σε εκείνες τις κατευθύνσεις που είναι γόνιμες για την επίτευξη μιας βιώσιμης σύνδεσης εντός του καναλιού διάδοσης. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας τεχνικές MIMO και διασταύρωσης δέσμης, η απώλεια διαδρομής στο κανάλι επικοινωνίας μπορεί να μειωθεί δραματικά με το σχηματισμό ταυτόχρονων δεσμών σε πολλές διαφορετικές κατευθύνσεις. Επίσης, διαφορετικές χωρικές διαδρομές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη συστημάτων MIMO και χωρικής πολυπλεξίας, όπου πολλαπλών ροές δεδομένων στέλνονται παράλληλα ώστε να επιτευχθεί αύξηση της χωρητικότητας.

Σε συχνότητες μεγαλύτερες από 28 GHz, τα μήκη κύματος είναι περίπου 10 mm, επιτρέποντας έτσι στις διπολικές κεραιές μισού κύματος να έχουν μέγεθος μερικών μόνο χιλιοστών όταν κατασκευάζονται από υλικά υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς. Έτσι, μια πολύ μεγάλη συστοιχία από δίπολα θα μπορούσε να υλοποιηθεί με πολύ μικρότερες φυσικές διαστάσεις από τις κεραιές που χρησιμοποιούνται στα σημερινά συστήματα ασύρματων επικοινωνιών.

Θεωρώντας μία προσαρμόσιμη συστοιχία κεραιών η οποία αποτελείται από πανομοιότυπα στοιχεία κεραιών, κάθε ένα εκ των οποίων έχει μέγιστο μήκος D και κέρδος το οποίο δίνεται από την εξίσωση 3.1, το μέγιστο κέρδος για κάθε στοιχείο κεραιάς θα είναι ανάλογο με:

$$G_{max} \propto \frac{4\pi e_{max} D^2}{\lambda^2} \quad (3.3)$$

Εάν έχουμε μια γραμμική διάταξη στοιχείων κεραιάς N , τότε ο παραπάνω υπολογισμός του μέγιστου κέρδους θα εξακολουθεί να ισχύει για κάθε κεραιά, έτσι ώστε το ενεργό

άνοιγμα μιας συστοιχίας κεραιών να είναι η φυσική περιοχή της κάθε κεραίας, πολλαπλασιασμένης με τον αριθμό των κεραιών της συστοιχίας, ο οποίος δίνεται από:

$$D_{array} = ND_{ant} \quad (3.4)$$

Εάν η συστοιχία κεραιών είναι τετράγωνο δύο διαστάσεων, με N^2 στοιχεία και N στοιχεία ανά πλευρά, τότε η μέγιστη γραμμική διάσταση της συστοιχίας που δίνεται από την εξίσωση 3.4 εξακολουθεί να ισχύει, αλλά η ενεργή επιφάνεια και ως εκ τούτου το κέρδος της συστοιχίας, αυξάνει ακόμη περισσότερο, λόγω του μεγαλύτερου αριθμού κεραιών. Για μια γραμμική συστοιχία, η μέγιστη απολαβή είναι:

$$G_{max} = \frac{4\pi e_{max} D_{array}^2}{\lambda^2} \quad (3.5)$$

Εισάγοντας την εξίσωση 3.5 στην εξίσωση απώλειας διαδρομής του Friis και υποθέτοντας ότι οι συστοιχίες κεραιών χρησιμοποιούνται και ως κεραία εκπομπής και ως κεραία λήψης, τότε:

$$P_r = \frac{(P_t e_t e_r (D_r D_t)^2)}{L(\lambda d)^2} \quad (3.6)$$

όπου D_r και D_t αναφέρονται στις συστοιχίες κεραιών δέκτη και πομπού αντίστοιχα.

Στα 60 GHz, το μήκος κύματος στον ελεύθερο χώρο είναι 5 mm και στα 1.000 GHz το μήκος κύματος είναι 0,3 mm. Αυτές οι μικρές διαστάσεις των μηκών κύματος όσο αυξάνεται η συχνότητα των φερόντων, καθιστά δυνατή την υλοποίηση όλο και μεγαλύτερου αριθμού κεραιών εντός πολύ μικρών πλακετών τυπωμένου κυκλώματος, ή εντός ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, με αποτέλεσμα την επίτευξη εκπληκτικού κέρδους κεραιών συγκριτικά με τις σημερινές κεραίες των ασύρματων επικοινωνιών. Με συνδυασμό κατευθυνόμενων κεραιών υψηλής απολαβής, τόσο σε ένα σταθμό βάσης, όσο και σε μια κινητή συσκευή, μπορούν να υπερκεραστούν οι πολύ μεγαλύτερες απώλειες διαδρομής.

Ο λόγος της περιοχής συστοιχίας προς τη συχνότητα λειτουργίας αναδεικνύεται σε μία εντελώς καινούργια σχεδιαστική παράμετρο, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή συσκευών επικοινωνίας για φορητές εφαρμογές πολύ μικρών διαστάσεων. Το κέρδος και το εύρος δέσμης των κεραιών μπορεί να προσαρμοστεί εύκολα με την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση διαφορετικών στοιχείων κεραιών εντός μιας

συστοιχίας και οι μικρές φυσικές διαστάσεις των κεραιών μπορούν να επιτρέψουν την υλοποίηση ενός πολυποίκιλου κατευθυνόμενου συστήματος δέσμης κεραιών μέσω ηλεκτρονικού ελέγχου φάσης.

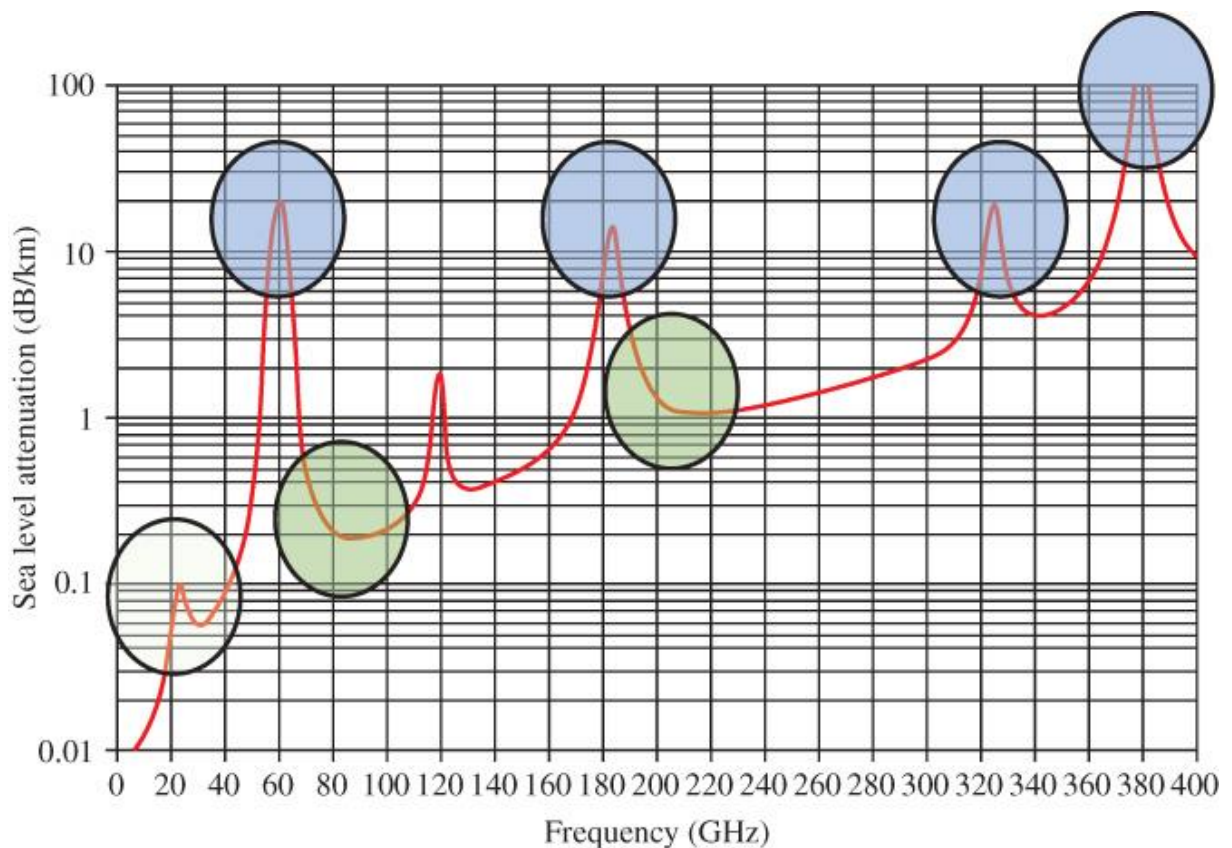
Η αξιοποίηση κατευθυνόμενων, πολύ μικρού μεγέθους και υψηλής απολαβής κεραιών, αποτελεί βασική πτυχή των mmWave επικοινωνιών. Στην πραγματικότητα, το φυσικό μήκος των κεραιών παρέχει μια αύξηση τέταρτης τάξης ως προς τη λαμβανόμενη ισχύ, η οποία μπορεί να ξεπεράσει την απώλεια ισχύος δεύτερης τάξης ως προς την απόσταση στον ελεύθερο χώρο.

3.2 Επίδραση της Ατμόσφαιρας

Η αυξημένη απώλεια διαδρομής που παρατηρείται στις συχνότητες mmWave, δεν είναι αποτέλεσμα που οφείλεται αποκλειστικά στις υψηλότερες συχνότητες μετάδοσης. Χαρακτηριστικά όπως η ατμοσφαιρική εξασθένηση, η εξασθένηση λόγω βροχής και η αποπόλωση διαδρομής, επίσης συμβάλουν στην υποβάθμιση της λαμβανόμενης ισχύος σήματος στα συστήματα mmWave. Η επίδρασή τους είναι πολύ εντονότερη στη συχνότητα των 60 GHz σε σχέση με τη ζώνη συχνοτήτων 28-38 GHz, όπου υπάρχει σχετικά μικρή απορρόφηση από το οξυγόνο, μικρότερη του ενός ντεσιμπέλ ανά χιλιόμετρο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1.

Η ατμοσφαιρική εξασθένηση δημιουργεί πρόσθετη απώλεια διαδρομής, επιπλέον της απώλεια διάδοσης που ορίζεται από τις εξισώσεις 3.2 και 3.7 και είναι πολλαπλασιαστική σε απόλυτους όρους. Η ατμοσφαιρική απώλεια δεν επηρεάζει αποκλειστικά τα συστήματα στη συχνότητα των 60GHz, καθώς όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα απορροφούνται σε κάποιο βαθμό από αέρια μόρια όπως το οξυγόνο και οι υδρατμοί. Ωστόσο, αυτό το φαινόμενο μεγεθύνεται σε ορισμένες mmWave συχνότητες, όπως τα 60 GHz. Υπό τυπικές ατμοσφαιρικές συνθήκες (θερμοκρασία = 20 ° C, ατμοσφαιρική πίεση = 1 atm, και πυκνότητα υδρατμών = 7,5 g/cm³), η ατμοσφαιρική εξασθένηση δεν είναι σημαντική για συχνότητες φέροντος μικρότερες των 50 GHz. Αυτό το φαινόμενο, το οποίο χαρακτηρίζεται από μια λογαριθμική μείωση ισχύος ανά χιλιόμετρο της απόστασης μετάδοσης (dB/km), απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1. Οι κυρίαρχες επιδράσεις της ατμοσφαιρικής εξασθένησης οφείλονται στους υδρατμούς και στο οξυγόνο. Η απορρόφηση του οξυγόνου έχει τιμή

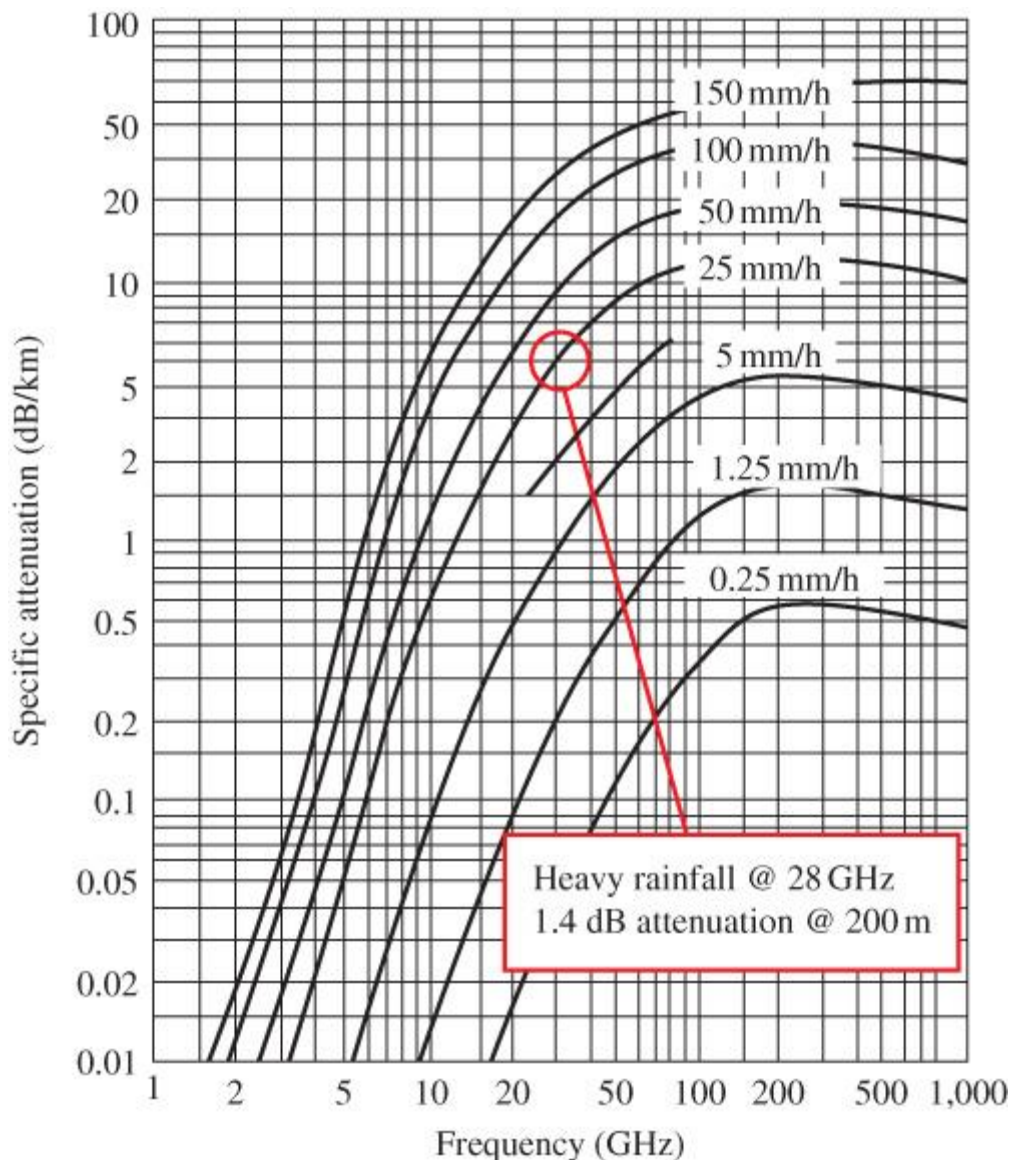
κορυφής στα 60 GHz. Κάτω από κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, η απορρόφηση του οξυγόνου προκαλεί απώλειες στην ισχύ του λαμβανόμενου σήματος της τάξης των 7 έως 15,5 dB/km στην περιοχή των 57-64 GHz.



Σχήμα 3.1. Η εξασθένιση (dB/km) λόγω της απορρόφησης του αέρα στο επίπεδο της θάλασσας κατά τη διάδοση ελεύθερου χώρου

Αν και οι υδρατμοί δεν συμβάλλουν σημαντικά στην εξασθένιση του σήματος σε κανονικές συγκεντρώσεις, τα σταγονίδια βροχής που σχηματίζονται όταν η ατμόσφαιρα έχει κορεστεί, μπορεί να προκαλέσουν περαιτέρω εξασθένιση του σήματος, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.2. Για παράδειγμα, για ένα ποσοστό βροχόπτωσης 50 mm/hr (δυνατή βροχή), διαφορετικά μοντέλα προβλέπουν επιπλέον ατμοσφαιρική εξασθένιση μεταξύ 8 και 18 dB/km. Ως εκ τούτου, εξωτερικά κυψελοειδή ή backhaul συστήματα θα πρέπει να υπερκεράσουν την επίδραση των συνθηκών βροχής με επίτευξη υψηλότερου κέρδους, εφαρμόζοντας τεχνικές προσαρμόσιμης διαμόρφωσης δέσμης. Η επίδραση της βροχόπτωσης δεν περιορίζονται στην εξασθένιση του σήματος, καθώς μπορεί επίσης να προκαλέσει αποπόλωση του σήματος. Αυτό είναι σημαντικό

πρόβλημα για συστήματα που χρησιμοποιούν σήματα διασταυρούμενης πόλωσης (cross-polarized signals) για RF απομόνωση.



Σχήμα 3.2. Εξασθένιση λόγω βροχόπτωσης ως συνάρτηση της συχνότητας και του ρυθμού βροχόπτωσης στο mmWave συχνοτικό φάσμα

3.3 Επίδραση Καιρικών Συνθηκών

Οι καιρικές συνθήκες έχουν δραματική επίπτωση στην εξασθένιση των εκεπεμπόμενων σημάτων στα συστήματα mmWave, επειδή οι φυσικές διαστάσεις των σταγόνων βροχής, του χαλαζιού και των νιφάδων χιονιού, είναι ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος κύματος των συχνοτήτων λειτουργίας. Η επίδραση των καιρικών συνθηκών αποτελεί έναν πρόσθετο παράγοντα απώλειας διαδρομής, ο οποίος προστίθεται στην απώλεια

διάδοσης σε μονάδες ντεσιμπέλ. Η εξασθένηση λόγω των καιρικών συνθηκών είναι συνάρτηση της απόστασης, του ρυθμού βροχόπτωσης και του μέσου μεγέθους ή σχήματος των σταγόνων βροχής. Λόγω της στατιστικής φύσης του ρυθμού των βροχοπτώσεων σε μια συγκεκριμένη περιοχή, διαφορετικές περιοχές θα έχουν διαφορετικές πιθανότητες διακοπής της κάλυψης εξαιτίας βροχόπτωσης

Η βροχή και το χαλάζι προκαλούν απώλειες εξασθένησης διαδρομής, που εξαρτώνται από το ποσοστό βροχόπτωσης. Διαφορετικές περιοχές έχουν διαφορετική μέση τιμή βροχόπτωσης, καθώς και διαφορετικό ρυθμό αιχμών βροχόπτωσης μικρής κλίμακας, η επίδραση των οποίων καθορίζει τη στατιστική διακύμανση των απωλειών διαδρομής. Ως έντονες βροχοπτώσεις ορίζονται γενικά οι βροχοπτώσεις που υπερβαίνουν τα 25 mm/hr. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2, η εξασθένηση εξαιτίας της βροχής στη συχνότητα των 28 GHz είναι περίπου 7 dB/km και είναι μόλις 1,4 dB για την απόσταση των 200 m. Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται επίσης ότι η εξασθένηση γίνεται επίπεδη και είναι σχεδόν σταθερή για συχνότητες μεγαλύτερες των 90 GHz. Για μικρές αποστάσεις, είναι προφανές ότι η εξασθένηση λόγω βροχόπτωσης δεν είναι τόσο έντονη όσο ενδεχομένως θα ανέμενε κάποιος, ιδίως εάν ληφθεί υπόψη ότι είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν κεραίες υψηλού κέρδους για την αντιμετώπιση αυτής της εξασθένησης, τα κέρδη των οποίων μπορούν να μεταβάλλονται ανάλογα με τα στιγμιαία ποσοστά βροχόπτωσης.

Η επίδραση των καιρικών συνθηκών είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για τα υπαίθρια συστήματα mmWave. Η εξασθένηση λόγω βροχόπτωσης είναι εντονότερη στις mmWave συχνότητες λειτουργίας συγκριτικά με τις χαμηλότερες συχνότητες, εξαιτίας του μεγαλύτερου ηλεκτρικού μεγέθους που αποκτούν οι σταγόνες της βροχής. Ως γενικό κανόνα, οι ισχυρές βροχοπτώσεις προκαλούν μία επιπλέον εξασθένηση της τάξης των 15 dB/km, σε ολόκληρο το εύρος ζώνης των συστημάτων mmWave, για αποστάσεις μεγαλύτερες του ενός χιλιομέτρου. Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union, ITU) προσεγγίζει την εξασθένηση λόγω βροχής σύμφωνα με τον ρυθμό βροχής R (mm/h), ως εξής:

$$\lambda_r(f[\text{GHz}], R) = k(f)R^{a(f)} \left[\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right] \quad (3.7)$$

όπου

$$k(f) = 10^{1.203 \log(f) - 2.290}$$

$$a(f) = 1.703 - 0.493\log(f)$$

3.4 Βασικοί Τρόποι Διάδοσης στα Συστήματα

mmWave

Το κλειδί για το μέλλον των συστημάτων mmWave βρίσκεται στον εντοπισμό και την επεξεργασία των ισχυρότερων απευθείας, ανακλώμενων και σκεδασμένων συνιστωσών των πολλαπλών διαδρομών διάδοσης και στην κατάλληλη αξιοποίησή τους προκειμένου να δημιουργηθούν βιώσιμες ασύρματες συνδέσεις σε διαφορετικά περιβάλλοντα λειτουργίας.

3.4.1 Περίθλαση

Περίθλαση (diffraction) ονομάζεται η διάδοση των ραδιοσημάτων γύρω από ένα αντικείμενο και είναι ο μηχανισμός διάδοσης που υποστηρίζει τις ραδιοεπικοινωνίες όταν μια κινητή συσκευή έχει αποκλειστεί ή σκιάζεται από κάποιο εμπόδιο, ή όταν μία κινούμενη ασύρματη τερματική συσκευή περνάει από μία κατάσταση ασύρματης ζεύξης με οπτική επαφή (Line-of-Sight, LOS) σε μία κατάσταση διάδοσης χωρίς οπτική επαφή (Non Line-of-Sight, NLOS). Η περίθλαση αποτελεί έναν ισχυρό μηχανισμό διάδοσης στα σημερινά κυψελοειδή συστήματα με συχνότητες λειτουργίας στην περιοχή των 2 GHz, αλλά παρουσιάζει πολύ μεγάλες απώλειες ακόμη και για μετακινήσεις ασύρματων συσκευών της τάξης μερικών μόνο εκατοστών για συχνότητες στο φάσμα των mmWave συστημάτων, οπότε η συμβολή της στη mmWave διάδοση είναι μικρή.

Η επίδραση της περίθλασης μπορεί να αντιμετωπιστεί με χρήση κατευθυνόμενων κεραιών υψηλής κατευθυντικότητας τόσο στο σταθμό βάσης, όσο και στο δέκτη, καθώς η διεύθυνσή τους μπορεί να στραφεί μακριά από το αρχικό LOS σήμα, βρίσκοντας τις διαδρομές των ανακλάσεων και σκεδάσεων του σήματος από γειτονικά κτίρια ή επιφάνειες. Ομοίως, στη διάδοση των mmWave συστημάτων σε εσωτερικούς χώρους, η εξασθένηση των σημάτων από την περίθλαση είναι ιδιαίτερα υψηλή.

Γίνεται λοιπόν σαφές ότι λόγω των πολύ μικρών μηκών κύματος, η περίθλαση θα είναι ο πιο αδύναμος και λιγότερο αξιόπιστος μηχανισμός διάδοσης για τα κινητά συστήματα mmWave. Συνεπώς, η σκέδαση και η ανάκλαση θα είναι οι κυρίαρχοι μηχανισμοί

διάδοσης. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα σημερινά UHF και μικροκυματικά συστήματα, όπου η σκέδαση αποτελεί τον πιο αδύναμο μηχανισμό διάδοσης, ενώ η περίθλαση προσφέρει αξιόλογη διάδοση σήματος.

3.4.2 Ανάκλαση

Όπως είδαμε, η περίθλαση προκαλεί μεγάλες αλλαγές στο δυναμικό εύρος του επιπέδου των λαμβανόμενων σημάτων στις mmWave συχνότητες κατά τις μετακινήσεις των ασύρματων συσκευών. Παρόλα αυτά, οι ανακλαστικές ιδιότητες πολλών υλικών στις mmWave συχνότητες είναι πολύ καλές, τόσο για διάδοση σε εσωτερικούς χώρους όσο και για διάδοση σε εξωτερικούς χώρους. Εμπόδια όπως άνθρωποι, τοίχοι κτιρίων, φανοστάτες και δέντρα, αποδεικνύονται πολύ ανακλαστικά, επιτρέποντας στα σήματα πολλαπλών διαδρομών να διαδοθούν μέσω της αναπήδησης φυσικών και τεχνητών αντικειμένων. Όμως, παρά τις πολλαπλές διαδρομές διάδοσης, εμπόδια όπως φύλλωμα, μεταλλικά τοιχώματα, φρεάτια ανελκυστήρων, εξωτερικές επιφάνειες κτιρίων, καθώς και φιμέ εξωτερικά παράθυρα, μπορούν να υποβιβάσουν τα επιμέρους συστατικά των πολλαπλών διαδρομών του σήματος περισσότερο από 40 dB στις mmWave συχνότητες, ποσότητα πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με τα σημερινά κυψελοειδή συστήματα με λειτουργία στη συχνοτική περιοχή των 2 GHz.

Σε μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε εσωτερικά και εξωτερικά περιβάλλοντα, βρέθηκε πως φανοστάτες, μεταλλικά δοχεία απορριμμάτων, ανθρώπινα κεφάλια, καθώς και εξωτερικοί τοίχοι κτιρίων παρουσιάζουν υψηλή ανακλαστικότητα. Επίσης, πολλές μελέτες πάνω στις διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης δείχνουν ότι πολλά υπαίθρια αντικείμενα έχουν συντελεστές ανάκλασης που υπερβαίνουν το 0,7. Εναλλακτικές διαδρομές διάδοσης που προκύπτουν από την υψηλή ανακλαστική φύση των καναλιών mmWave, μπορούν να λειτουργήσουν αντισταθμιστικά έναντι της απώλειας διαδρομής και εξασθένησης που προκαλείται από την περίθλαση, υπό την προϋπόθεση ότι χρησιμοποιούνται κατευθυντικές κεραιές, οι οποίες μπορούν να προσφέρουν κέρδη ικανά να ξεπεράσουν την απώλεια διαδρομής στον ελεύθερο χώρο.

Με δεδομένη την αξιοσημείωτη ανακλαστικότητα των εσωτερικών και εξωτερικών καναλιών, μεθοδολογίες site-specific ανίχνευσης ακτινών (ray tracing) αποδεικνύονται ως η καταλληλότερη προσέγγιση μεταξύ των μοντέλων διάδοσης για τον σχεδιασμό και

την ανάπτυξη των υποδομών των μελλοντικών ασύρματων δικτύων mmWave τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους. Για την επίτευξη κατάλληλης απόδοσης κατά τη λειτουργία του δικτύου, είναι απαραίτητο να γίνει χρήση προσαρμόσιμων κατευθυνόμενων κεραιών.

Στον Πίνακα 3.2 περιλαμβάνονται μετρήσεις των ανακλάσεων και απωλειών ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος για διαφορετικά υλικά και υπό διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Από αυτές τις μετρήσεις, είναι δυνατόν να εκτιμηθεί αριθμητικά το διηλεκτρικό, η εφαπτομένη απώλεια και ο συντελεστής εξασθένησης των υλικών στη συχνότητα των 60 GHz. Παρά το γεγονός ότι ο Πίνακας 3.2 εστιάζεται στη συχνότητα των 60 GHz, οι ίδιες βασικές αρχές ισχύουν και για τις υπόλοιπες mmWave συχνότητες.

Material	Thickness (cm)	Roughness (mm)	Refl. 10° (dB loss)	Refl. 40° (dB loss)	Refl. 70° (dB loss)	Trans. 0° (dB Loss)
Granite	3.0	0.6	17.5	11.7	3.4	≥ 30.0
Quartzite	2.0	0	5.8	24.1	4.4	3.4
Marble	1.7	0	3.8	5.5	0.8	5.2
Limestone	3.0	0	6.5	5.1	0.8	5.2
Aerated concrete	5.0	0.2	14.1	11.0	5.1	18.9
Concrete	5.0	0.1	7.5	6.2	2.0	≥ 30.0
Brick	11.0	0.3	14.8	17.5	4.8	16.9
Breeze block	5.0	0.5	17.5	12.7	5.1	≥ 30.0
Tiles	0.5	0.1	4.1	3.8	2.1	≥ 30.0
Plasterboard	1.0	0	23.8	4.5	6.9	2.1
Plasterwork	1.0	1.0	27.9	30.0	6.9	≥ 30.0
Polyfoam	≥ 30.0	≥ 30.0	≥ 30.0	≥ 30.0	22.7	0
Rockwool	3.5	0.9	28.9	≥ 30.0	≥ 30.0	0.5
Wood fiberboard	1.2	0.2	21.0	15.5	5.5	3.4
Pertinax	0.8	0	9.1	9.1	2.6	6.9
Wooden panels	1.2	0	6.4	14.5	4.8	7.6
Wooden chipboard	1.3	0.2	13.4	11.7	5.3	6.2
Acrylic glass	0.4	0	0.2	5.5	13.1	1.7
Glass	0.4	0.3	6.7	3.8	0.8	4.5
Glass	0.4	0	17.6	7.6	2.9	2.4
Glass	0.8	0	8.8	9.1	2.6	3.1

Πίνακας 3.2. Ανάκλαση και απώλεια ισχύος εκπομπής για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης σε υλικά εσωτερικών χώρων για τη συχνότητα των 60.2 GHz

3.4.3 Σκέδαση

Η σκέδαση (scattering) στις mmWave συχνότητες αποτελεί σημαντικό μηχανισμό διάδοσης, αφού αντικείμενα όπως τοίχοι κτιρίων, άνθρωποι και φανοστάτες είναι πολύ

μεγαλύτερα από το μήκος κύματος της συχνότητας λειτουργίας. Λόγω της σκέδασης, η ισχύς διάδοσης στον ελεύθερο χώρο είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης προς d^4 . Επειδή η σκέδαση είναι ένα ασθενέστερο φαινόμενο διάδοσης, είναι αμελητέα στα σημερινά κυψελοειδή και WLAN συστήματα που λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων 1-5 GHz. Αντίθετα, στις mmWave συχνότητες το μεγάλο σχετικό μέγεθος όλων των αντικειμένων εντός του καναλιού διάδοσης, συνεπάγεται ότι λόγω σκέδασης μπορεί να δημιουργηθούν διαδρομές διάδοσης σήματος τόσο σημαντικές όσο και οι διαδρομές που δημιουργούνται λόγω ανάκλασης. Μία μέθοδος για την εκτίμηση της επίδρασης της σκέδασης που προκαλείται από τους τοίχους των κτιρίων και άλλα μεγάλα αντικείμενα σε σχέση με το μήκος κύματος, είναι η εφαρμογή ενός μοντέλου διατομής ραντάρ (Radar Cross Section, RCS). Πολλαπλασιάζοντας το μοντέλο RCS με το πεδίο σκέδασης, είναι δυνατόν να γίνει εκτίμηση της λαμβανόμενης ισχύος.

Τα μοντέλα σκέδασης, όταν συνδυάζονται με τεχνικές ανίχνευσης ακτινών, μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια τις διακυμάνσεις μεγάλης κλίμακας της ραδιοκάλυψης και των παρεμβολών. Οι πιο σημαντικές επιδράσεις της σκέδασης στη διάδοση του σήματος σε ένα εξωτερικό περιβάλλον, είναι το RCS και η τραχύτητα της επιφάνειας των αντικειμένων εντός του καναλιού διάδοσης. Το RCS ενός αντικειμένου περιγράφει πώς τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία σκεδάζονται από αυτό το αντικείμενο και αναπαριστά το αντικείμενο με όρους ενός ανοίγματος που καταλαμβάνει μια συγκεκριμένη περιοχή. Η περιοχή RCS δεν είναι απαραίτητο να σχετίζεται με τη φυσική περιοχή του αντικειμένου.

Η μονοστατική διατομή (monostatic cross section) περιγράφει πώς το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σκεδάζεται στην κατεύθυνση του πομπού, όταν ο πομπός και ο δέκτης καταλαμβάνουν το ίδιο σημείο στο χώρο. Η διστατική διατομή (bistatic cross section) είναι εφαρμόσιμη για mmWave διάδοση σε συστήματα επικοινωνίας και περιγράφει πώς το ηλεκτρικό πεδίο σκεδάζεται στην κατεύθυνση ενός δέκτη που δεν είναι συνεγκατεστημένος με τον πομπό. Η διατομή ενός εμποδίου ορίζεται ως:

$$\sigma_{3D} = \lim_{r \rightarrow \infty} \left[\frac{4\pi r^2 S_s}{S_i} \right] = \lim_{r \rightarrow \infty} \left[\frac{4\pi r^2 |E_s|^2}{|E_i|^2} \right] \quad (3.8)$$

όπου σ_{3D} είναι η 3-διαστάσεων διατομή ραντάρ, S_s είναι η σκεδασμένη πυκνότητα ισχύος στην κατεύθυνση της παρατήρησης, S_i είναι η προσπίπτουσα πυκνότητα ισχύος,

E_s είναι το σκεδασμένο ηλεκτρικό πεδίο, E_i είναι το προσπίπτον ηλεκτρικό πεδίο και r είναι η απόσταση μεταξύ του στόχου και του σημείου παρατήρησης. Το ηλεκτρικό πεδίο είναι ανάλογο προς την τετραγωνική ρίζα της δύναμης και ως εκ τούτου μειώνεται κατά ποσότητα $1/d$ στον ελεύθερο χώρο. Η ακριβής μαθηματική διατύπωση της διατομής σκέδασης εξαρτάται από τη φύση του αντικειμένου και την πόλωση του προσπίπτοντος πεδίου και αποτελεί ανοικτό πεδίο έρευνας για το σχεδιασμό ενός mmWave συστήματος ασύρματης επικοινωνίας.

3.5 Διεισδυτικότητα των mmWave Σημάτων

Όταν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται διαμέσου διαφορετικών υλικών, υφίστανται αλλοιώσεις στο σημείο διασταύρωσης υλικών που διαφέρουν ως προς τη σύνθεση του μέσου πηγής, λόγω της διαφορετικής ηλεκτρομαγνητικής αντίστασης των δύο μέσων. Αν θεωρήσουμε πως το μέσο διάδοσης στον ελεύθερο χώρο είναι ο αέρας, τότε οι διασταυρώσεις των μέσων διάδοσης θα αφορούν υλικά στο φυσικό περιβάλλον. Σε τέτοιες διασταυρώσεις, μπορεί να ειπωθεί ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εν μέρει ανακλώνται και εν μέρει μεταδίδονται. Το ανακλώμενο τμήμα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων αναπηδά στο υλικό διασταύρωσης πίσω προς το μέσο πηγής, ενώ το εκπεμπόμενο τμήμα διαδίδεται μέσω του υλικού διασταύρωσης.

Σε ένα σύστημα ασύρματης επικοινωνίας, κατά κύριο λόγο μας ενδιαφέρει το μέγεθος της ενέργειας που μεταδίδεται και ανακλάται. Για τον υπολογισμό αυτών των μεγεθών χωρίς εμπειρικές μετρήσεις, πρέπει να υπάρχει γνώση του σύνθετου διηλεκτρικού του υλικού $\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$ (όπου $\epsilon', \epsilon'' \in R$), το πάχος του υλικού, η τραχύτητα της επιφάνειας του υλικού, η ηλεκτρομαγνητική πόλωση και η γωνία πρόσπτωσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο υλικό διασταύρωσης.

Αυτό μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητό μέσα από μια σύντομη επισκόπηση των μηχανισμών απώλειας που επηρεάζουν ένα κύμα όταν αυτό ταξιδεύει διαμέσου ενός υλικού. Η απώλεια διείσδυσης μπορεί να γίνει κατανοητή μέσα από την εξέταση των χαρακτηριστικών διάδοσης των κυμάτων σε διηλεκτρικά υλικά, αγωγούς και ημιαγωγούς. Τα διηλεκτρικά υλικά μπορούν να πολωθούν, ώστε να δημιουργηθούν στιγμές διπόλων. Στην περίπτωση αυτή, οι ελεύθερες φορτίσεις των αγωγών θα

βρίσκονται κάτω από την επίδραση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Έτσι, η αρμονική χρονική μορφή της εξίσωσης Αμπέρ μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\nabla \times H = j\omega\varepsilon E + J + P \quad (3.9)$$

όπου H είναι το μαγνητικό πεδίο (A/m), E είναι το ηλεκτρικό πεδίο (V/m), J είναι το ρεύμα αγωγιμότητας (A/m^2), ε είναι το ηλεκτρικό διηλεκτρικό, ω είναι η γωνιακή συχνότητα ($2\pi f$) και P είναι το διάνυσμα πόλωσης (A/m^2) για μία κίνηση αρμονικής χρονικής φόρτισης. Τόσο το J όσο και το P είναι ανάλογα με το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο: $J = \sigma E$, και $P = \chi\varepsilon_0 E$, όπου σ είναι η αγωγιμότητα, ε είναι το διηλεκτρικό του ελεύθερου χώρου και χ είναι η ηλεκτρική ευαισθησία. Αυτά οδηγούν σε μια νέα μορφή για την εξίσωση 3.9:

$$\nabla \times H = j\omega\varepsilon \left(1 - \frac{j}{\omega} \left(\frac{\sigma}{\varepsilon} + \frac{\chi}{\varepsilon_r} \right) \right) E \quad (3.10)$$

όπου $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$. Η εξίσωση αυτή δείχνει ότι το διηλεκτρικό του υλικού όταν λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες υπολογίζεται:

$$\varepsilon_{loss} = \varepsilon_{no_{loss}} \left(1 - \frac{j}{\omega} \left(\frac{\sigma}{\varepsilon} + \frac{\chi}{\varepsilon_r} \right) \right) \quad (3.11)$$

Αυτό οδηγεί σε ένα νέο κυματάριθμο για το ηλεκτρομαγνητικό κύμα που περιέχει τόσο πραγματικό όσο και φανταστικό μέρος:

$$E = E_0 e^{jkx}, \quad k = \omega \sqrt{\varepsilon_{loss} \mu} \quad (3.12)$$

όπου k είναι ο κυματάριθμος και μ είναι η διαπερατότητα, η οποία ισούται με την διαπερατότητα του ελεύθερου χώρου για τα περισσότερα υλικά. Επειδή η εξίσωση 3.11 θα έχει ως αποτέλεσμα μια αρνητική φανταστική συνιστώσα για τον κυματάριθμο k , είναι σαφές ότι το κύμα θα υποστεί εκθετική απόσβεση καθώς διαδίδεται μέσα στο υλικό.

Μετρήσεις στο εσωτερικό κτιρίων και στο περιβάλλον γύρω από τα κτίρια για τη συχνότητα λειτουργίας των 72 GHz, δίνουν μια εικόνα σχετικά με την ικανότητα διείσδυσης των mmWave σημάτων και τα ανακλαστικά χαρακτηριστικά των κοινών οικοδομικών υλικών. Υπαίθρια υλικά όπως φινιρίσματα και τούβλο προκαλούν εξασθένιση της τάξης 28 έως 40 dB στον ελεύθερο χώρο, κάνοντας σαφές ότι η

διείσδυση σε κτίρια θα είναι δύσκολη για τα υπαίθρια mmWave συστήματα. Αυτή η δυσκολία διείσδυσης μπορεί να λειτουργήσει ως μονωτής παρεμβολών, επιτρέποντας σε πολλαπλά εσωτερικά ασύρματα δίκτυα να λειτουργούν ταυτόχρονα, απαλλαγμένα από συν-καναλικές παρεμβολές από εξωτερικά δίκτυα. Στον Πίνακα 3.3 περιλαμβάνονται μετρήσεις στο εσωτερικό κτιρίων για τη mmWave συχνότητα των 73.5 GHz. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι περισσότεροι εσωτερικοί τοίχοι και έπιπλα δεν προκαλούν υψηλή εξασθένιση, επιτρέποντας σχετικά χαμηλές απώλειες της τάξης 2 έως 6 dB ανά χώρισμα και ικανοποιητική διείσδυση. Μεταλλικά αντικείμενα όπως φρεάτια ανελκυστήρων, επιφέρουν μεγάλη εξασθένιση στο σήμα, της τάξης των 40 dB.

RX ID	TX-RX Separation (m)	# of Partitions				Received Power for Free Space (dBm)	Received Power for Test Material (dBm)	Penetration Loss (dB)
		Cubicle Wall	Metal Cabinet	Dry Wall	Wood Door			
1	6.8	1	0	0	0	-34.1	-39.4	5.3
2	8.0	1	1	0	0	-35.6	-52.8	17.2
3	10.1	2	2	0	0	-37.6	-61.4	23.8
4	11.5	1	2	1	1	-38.7	-75.5	36.8
5	8.6	0	2	0	0	-36.2	-50.3	14.1
6	8.1	0	2	0	0	-35.7	-45.4	9.7
7	8.8	1	2	0	0	-36.4	-63.0	26.6
8	14.0	0	2	1	1	-40.4	-55.6	15.2
9	13.0	1	3	0	0	-39.7	-53.0	13.3
10	15.2	1	2	1	0	-41.1	-60.4	19.3
11	15.2	1	2	1	0	-41.1	-59.0	17.9

Πίνακας 3.3. Απώλειες διεισδυτικότητας σε εσωτερικό περιβάλλον για διαφορετικές θέσεις του δέκτη και για συχνότητα λειτουργίας 73.5 GHz

3.6 Επίδραση του Φαινομένου Doppler

Η επίδραση του φαινομένου Doppler ενός οδεύοντος κύματος μπορεί να εξηγηθεί ως εξής. Για ένα δέκτη με ταχύτητα v και έναν πομπό με ταχύτητα v_0 που κινούνται ο ένας προς τον άλλο, η παρατηρούμενη συχνότητα f του οδεύοντος κύματος στο δέκτη δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$f' = \frac{c + v}{c - v_0} f \quad (3.13)$$

όπου f είναι η συχνότητα του μεταδιδόμενου σήματος. Η συχνότητα Doppler, δηλαδή η μεταβολή της συχνότητας στο δέκτη δίνεται:

$$f_d = f' - f = f \left(\frac{c + v}{c - v_0} - 1 \right) \quad (3.14)$$

Η συχνότητα Doppler είναι ανάλογη με την εκπεμπόμενη συχνότητα κυμάτων. Ως εκ τούτου, όσο η συχνότητα φέροντος αυξάνεται στα mmWave συστήματα, τόσο η σχετική κίνηση του δέκτη προς τον πομπό θα προκαλεί μεγεθυμένες επιδράσεις του φαινομένου Doppler. Συνεπώς, το φαινόμενο Doppler αναμένεται να είναι 15-30 φορές μεγαλύτερο στις συχνότητες 28-60 GHz, σε σχέση με τα μικροκυματικά ασύρματα συστήματα. Ένας δέκτης που κινείται με ταχύτητα 1 m/s σε ένα σταθερό, εσωτερικό περιβάλλον, θα παρατηρήσει συχνότητες Doppler της τάξης των 250 Hz για συχνότητα φέροντος 60 GHz.

Για υψηλές ταχύτητες όπως αυτές των τρένων και των αεροπλάνων, οι μετατοπίσεις Doppler θα υπερβαίνουν τα ± 10 KHz για συχνότητα φέροντος 60 GHz. Τα ιστορικά μοντέλα για την εξάπλωση Doppler βασίζονται σε πανκατευθυντικές κεραιές, αλλά η χρήση εξαιρετικά κατευθυντικών κεραιών στις mmWave συχνότητες παρέχουν χαρακτηριστικά διάλειψης που εξαρτώνται ιδιαίτερα από τις γωνίες άφιξης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Οι κεραιές υψηλής κατευθυντικότητας παρέχουν ένα μικρό αριθμό κατοπτρικών διαδρομών σήματος με διάχυτες πολλαπλές διαδρομές, όπως περιγράφεται από τη διανομή δύο κυμάτων με διάχυτη ισχύ (Two Wave with Diffuse Power, TWDP).

Η επίδραση του φαινομένου Doppler έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων προκλήσεων για το σχεδιασμό του φυσικού επιπέδου. Υπάρχει μια κατά προσέγγιση σχέση αναλογίας μεταξύ του φαινομένου Doppler και της χρονικά μεταβαλλόμενης φύσης του ασύρματου καναλιού, αλλά η ακριβής διανομή της περιβάλλουσας διάλειψης του σήματος δεν είναι πλέον Rayleigh, αλλά εξαρτάται από τα συγκεκριμένα εύρη δεσμών και των πεπερασμένων σημάτων πολλαπλών διαδρομών. Οπότε, η διάλειψη και ο χρόνος συνοχής των mmWave καναλιών θα εξαρτηθεί από το εύρος δέσμης, την ταχύτητα, τη συχνότητα και το εύρος ζώνης.

Μία εκτίμηση της επίδρασης της εξάπλωσης Doppler στα mmWave κανάλια με χρήση κατευθυντικών κεραιών, είναι ότι αν η συχνότητα φέροντος και επομένως η συχνότητα Doppler, αυξηθεί κατά έναν παράγοντα 10, τότε το ασύρματο κανάλι αλλάζει 10 φορές πιο γρήγορα και απαιτείται ο χρόνος επανεκπαίδευσης καναλιού (channel retraining

time) και τα μεγέθη πλαισίου να μειωθούν αναλογικά. Ως αποτέλεσμα, η χρονικά μεταβαλλόμενη φύση είναι ταχύτερη για τα mmWave κανάλια, απαιτώντας μικρότερους χρόνους πλαισίου ή διάρκεια πακέτου στα μελλοντικά ασύρματα συστήματα. Οι μικρότεροι χρόνοι συγχρονισμού δεν αναμένεται να αποτελέσουν ανυπέβλητο πρόβλημα, καθώς οι χρόνοι συμβόλων στα μελλοντικά mmWave συστήματα θα είναι μικρότεροι από ό,τι ισχύει σήμερα και η εξάπλωση Doppler σε mmWave συχνότητες εξακολουθεί να είναι αργή για τις δυνατότητες των σύγχρονων υπολογιστικών συστημάτων επεξεργασίας σήματος. Επιπλέον, η αντίστοιχη χαμηλή καθυστέρηση που προσφέρουν οι μικρότερες χρονοθυρίδες και πλαίσια, θα αποτελεί απαραίτητο χαρακτηριστικό για τα μελλοντικά mmWave συστήματα. Δηλαδή υπό την επίδραση των κατευθυντικών κεραιών οι οποίες προσφέρουν βελτιωμένο χρόνο συνοχής, οι χρονοθυρίδες και τα πλαίσια θα συρρικνώνονται γραμμικά στο χρόνο όσο αυξάνεται η συχνότητα του φέροντος.

Σε ανάλυση και μοντελοποίηση μετρήσεων διάδοσης μικρής κλίμακας για εξωτερικά και εσωτερικά mmWave κανάλια, η έκταση της εξάπλωσης Doppler ενός καναλιού φαίνεται να διέπει το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το κανάλι εμφανίζεται στατικό. Ο χρόνος συνοχής είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη μετατόπιση Doppler και φαίνεται να υπάρχει μια σχέση εξάρτησης από την απόσταση στο φάσμα Doppler και ως εκ τούτου, στο χρόνο συνοχής για εξωτερικές mmWave εφαρμογές. Το εύρος δέσμης των κεραιών αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη μείωση της διάλειψης του σήματος και την αύξηση του χρόνου συνοχής. Ο καθορισμός των χρονικών διαστημάτων κατά τα οποία το κανάλι είναι στατικό είναι κρίσιμος για τη σωστή διαστασιολόγηση των πλαισίων και την ενημέρωση δεικτών των ισοσταθμιστών, κωδικοποιητών, και μετατοπιστών δεσμών. Συνεπώς, η μετατόπιση Doppler των ασύρματων καναλιών αποτελεί κρίσιμη πληροφορία για την αξιοποίηση της επίδρασης της διάλειψης μικρής κλίμακας και το πολύ μικρότερο μήκος κύματος των mmWave σημάτων έχει ως αποτέλεσμα την πολύ μικρότερο χρόνο συνοχής συγκριτικά με τα συμβατικά ασύρματα συστήματα.

3.7 Διάδοση σε Εξωτερικούς Χώρους

Η έρευνα πάνω στα χαρακτηριστικά του καναλιού διάδοσης των εφαρμογών mmWave σε εξωτερικούς χώρους γίνεται ολοένα και πιο σημαντική, καθώς η βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών επιδιώκει να επωφεληθεί από τις τεράστιες ποσότητες

ανεκμετάλλευτου φάσματος των συστημάτων mmWave, που μπορεί να επιτρέψει την υποστήριξη πολύ υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων για τους χρήστες ασύρματων συσκευών σε εξωτερικά περιβάλλοντα.

Η αύξηση της συχνότητας φέροντος στα συστήματα mmWave επιβάλλει τη χρήση κεραιών υψηλής κατευθυντικότητας, οι οποίες σε συνδυασμό με την πολύ μικρή επίδραση της περίθλασης, έχουν ως αποτέλεσμα την επίτευξη μικρότερης μέσης τετραγωνικής ρίζας (Root-Mean-Square, RMS) εξάπλωσης καθυστέρησης (spread delay), από την οποία προκύπτει μικρότερη επιλεκτικότητα συχνότητας (frequency selectivity). Επιπλέον, σύγχρονες τεχνικές διαμόρφωσης όπως η OFDM, μπορούν να μειώσουν σημαντικά την ευαισθησία απέναντι στην επιλεκτικότητα συχνότητας, μέσω της κατάλληλης επιλογής τμημάτων του καναλιού διάδοσης που δεν έχουν υποστεί υψηλή διάλειαση.

Η πρόσκαιρη διάλειαση (temporal fading) διαφέρει από την επιλεκτικότητα συχνότητας και είναι το αποτέλεσμα της κίνησης του πομπού, του δέκτη ή αντικειμένων εντός του καναλιού διάδοσης. Η μετατόπιση Doppler έχει σχέση με πρόσκαιρες διακυμάνσεις στο κανάλι ανάλογα με το χρόνο συνοχής και ορίζεται ως:

$$T_c \approx \frac{1}{f_d} \quad (3.15)$$

όπου f_d είναι η μέγιστη μετατόπιση Doppler και T_c είναι ο χρόνος συνοχής και δείχνει το μέγιστο διάστημα για το οποίο το κανάλι είναι σχετικά σταθερό στο χρόνο. Το μικρό μήκος κύματος των mmWave σημάτων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μετατόπισης Doppler, δηλαδή αύξηση της πρόσκαιρης διάλειασης. Η πρόσκαιρη διάλειαση γενικά μελετάται με εξέταση των φασματικών αναπαραστάσεων των μεταβολών της λαμβανόμενης ισχύος συναρτήσει του χρόνου. Μία τέτοια αναπαράσταση θα έχει συνιστώσες συχνότητας που εκτείνονται από $-v/\lambda$ έως v/λ , όπου v είναι η ταχύτητα της κίνησης του δέκτη, του πομπού ή αντικειμένων εντός του καναλιού και λ είναι το μήκος κύματος του φέροντος.

Η μελέτη των χαρακτηριστικών των διαλείψεων στενής ζώνης αποκάλυψε ότι η διάλειαση επηρεάζεται έντονα από το λόγο της ισχυρότερης ληφθείσας ακτίνας που γενικά προέρχεται από τη LOS διαδρομή του σήματος, προς την επόμενη ισχυρότερη

ακτίνα. Ο λόγος αυτός θα πρέπει να είναι μικρότερος από 5 dB προκειμένου να δημιουργηθούν σημαντικές διαλείψεις. Ως συνέπεια αυτού, η πρόσκαιρη διάλειψη εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την απόσταση του πομπού και του δέκτη από κοντινούς ανακλαστές και από το εύρος δέσμης των κεραιών. Αν ο πομπός και ο δέκτης έχουν μικρή απόσταση μεταξύ τους, τότε η διάλειψη δεν θα είναι πολύ ισχυρή. Αν ο πομπός και ο δέκτης είναι πιο απομακρυσμένοι και βρίσκονται κοντά σε μεγάλους τοίχους ή σε εμπόδια όπως κτίρια, τότε υπάρχει πολύ μεγαλύτερη διάλειψη. Στην περίπτωση που το εύρος ζώνης του σήματος είναι σημαντικά μεγαλύτερο από την εξάπλωση Doppler, η πρόσκαιρη διάλειψη καναλιού θα είναι αμελητέα και το κανάλι μπορεί να θεωρηθεί ως στατικό κατά τη διάρκεια πολλών μεταδιδόμενων συμβόλων.

Η χωρική διάλειψη (spatial fading) οφείλεται στην κίνηση του δέκτη ή του πομπού και συνδέεται στενά με την πρόσκαιρη διάλειψη. Η χωρική διάλειψη προκαλεί διακυμάνσεις της λαμβανόμενης ισχύος στο δέκτη όταν αυτός κινείται σε μικρές αποστάσεις. Συστήματα με πολύ μεγάλο εύρος ζώνης θα υπόκεινται σε μικρότερη χωρική διάλειψη από τα συστήματα στενής ζώνης. Αυτό αποτελεί και ένα από τα πλεονεκτήματα των συστημάτων ευρείας ζώνης. Η αυξημένη μετατόπιση Doppler στις συχνότητες mmWave προσφέρει ένα επιπλέον κίνητρο για τη χρήση πολύ μεγάλου εύρους ζώνης συνδυαστικά με χρήση κεραιών υψηλής κατευθυντικότητας, προκειμένου να αντιμετωπιστεί η αυξημένη πρόσκαιρη και χωρική διάλειψη και η επιλεκτικότητα συχνοτήτων. Οι κεραίες υψηλής κατευθυντικότητας παρέχουν χωρικό φιλτράρισμα, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ελάττωση της επιλεκτικότητας συχνότητας που προκύπτει από την παρεμβολή μεταξύ συνιστωσών πολλαπλών διαδρομών.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για τη μοντελοποίηση της mmWave διάδοσης σε εξωτερικούς χώρους. Μία από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους είναι η ανίχνευση ακτινών (ray tracing), η οποία χρησιμοποιεί γεωμετρική οπτική για την προσομοίωση της διάδοσης και ανάκλασης των κυμάτων σε ένα περιβάλλον. Γενικά, εξετάζονται μόνο δύο έως τέσσερις αντανάκλασεις ανά κύμα και εάν ο πομπός και ο δέκτης είναι στο ίδιο ύψος και περιβάλλονται από πολύ ψηλότερα κτίρια, τότε μπορεί να ακολουθηθεί δισδιάστατη προσέγγιση. Κατά την προσομοίωση της διάδοσης κυμάτων, είναι σημαντικό να εξεταστεί ο εκθέτης απώλειας διαδρομής, ο οποίος περιγράφει τον τρόπο που η λαμβανόμενη ισχύς μειώνεται ως συνάρτηση της απόστασης μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Σε πολλά κυψελοειδή συστήματα χρησιμοποιείται ένα μοντέλο σημείου

ρήξεως (break-point) για την απώλεια διαδρομής LOS, στην οποία ο εκθέτης απώλειας διαδρομής στον ελεύθερο χώρο είναι 2 πριν από την απόσταση σημείου ρήξεως (break-point distance) και 4 μετά από αυτήν. Για ένα πομπό σε ύψος h_t και έναν δέκτη σε ύψος h_r , η απόσταση break-point d_{bp} ορίζεται ως:

$$d_{bp} = \frac{20h_t h_r}{\lambda} \quad (3.16)$$

Η εξίσωση 3.16 δείχνει ότι η απόσταση break-point μειώνεται όσο αυξάνεται η συχνότητα. Για παράδειγμα, εάν ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται 1,5 m πάνω από το έδαφος, τότε για τη συχνότητα των 60 GHz η απόσταση break-point είναι 9 km, πολύ μεγαλύτερη από μία απόσταση ζεύξης που ενδέχεται να εφαρμοστεί στην πράξη. Ως εκ τούτου, για συνδέσεις LOS σε συχνότητες mmWave αναμένεται η απώλεια διαδρομής να είναι σχεδόν πάντα κοντά σε αυτή του ελεύθερου χώρου.

Οι NLOS συνδέσεις είναι συχνά ισχυρότερες, δηλαδή έχουν χαμηλότερους εκθέτες απώλειας διαδρομής όταν γίνεται χρήση κεραιών χαμηλότερου κέρδους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι περισσότερη ενέργεια λαμβάνεται από τις πολλές γωνίες των NLOS συνδέσεων με μία ευρύτερη δέσμη κεραίας, σε σχέση με μία πολύ στενή δέσμη κεραίας. Οι εκθέτες απώλειας διαδρομής υπολογίζονται από τις ισχυρότερες διαδρομές NLOS για συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ πομπού και δέκτη. Οι χαμηλότερες τιμές απωλειών για αυτές τις διαδρομές δείχνουν το μεγάλο όφελος που μπορεί να προκύψει από την έξυπνη διεύθυνση της κεραίας του πομπού και του δέκτη ή την προσαρμογή του κέρδους και του εύρους δέσμης της κεραίας, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί ένα ευρύτερο πεδίο (λιγότερο κέρδος) όταν η σύνδεση έχει επαρκές σήμα και ένα στενότερο πεδίο (περισσότερο κέρδος) όταν η βροχή ή εμπόδια εντός του καναλιού απαιτούν μεγαλύτερη ισχύ από την ασύρματη ζεύξη.

3.8 Διάδοση σε Εσωτερικούς Χώρους

Για τον κατάλληλο σχεδιασμό του προϋπολογισμού ζεύξης (link budget) και χωρητικότητας των συστημάτων επικοινωνίας mmWave, απαιτείται η ανάπτυξη μοντέλων διάδοσης σε εσωτερικούς χώρους. Για την ανάπτυξη και ανάλυση τέτοιων συστημάτων, οι συχνότητες πάνω από τα 5 GHz προσφέρονται για μοντελοποίηση συγκεκριμένου χώρου, όπου υπάρχει μεγάλη ακρίβεια στην εκτίμηση τόσο των λαμβανόμενων επιπέδων σήματος, όσο και των συνιστωσών πολλαπλών διαδρομών

και των γωνιών άφιξής τους. Για την ανάπτυξη των προτύπων ασύρματων δικτύων και για την ύπαρξη μιας ενοποιημένης προσέγγισης για την προσομοίωση ρυθμών σφαλμάτων bit, τη βελτίωση των επιπέδων PHY και MAC, καθώς και τη διεύθυνση δέσμης των κεραιών και τη μεθοδολογία των συνεργατικών επικοινωνιών, είναι επιθυμητό να έχουμε ένα στατιστικό μοντέλο καναλιού, το οποίο θα περιλαμβάνει ταυτόχρονα τις χρονικές υστερήσεις και τις χωρικές πολλαπλές διαδρομές των προσομοιώσεων και δοκιμών των υλικών των συστημάτων.

Δύο είναι τα κύρια χαρακτηριστικά των κεραιών σε εσωτερικά περιβάλλοντα που επηρεάζουν τις πολλαπλές διαδρομές που παρατηρούνται στο δέκτη, η κατευθυντικότητα των κεραιών και η ηλεκτρομαγνητική πόλωση πεδίου. Το πρώτο χαρακτηριστικό, η κατευθυντικότητα των κεραιών, αναφέρεται στην αναλογία της ισχύος που ακτινοβολείται σε μια δεδομένη κατεύθυνση προς τη συνολική ακτινοβολούμενη μέση ισχύ σε όλες τις κατευθύνσεις. Οι κατευθυνόμενες κεραίες εκπομπής ευνοούν ορισμένες κατευθύνσεις, συνεπώς είναι λιγότερος ο χώρος που διεγείρεται. Ομοίως, οι κατευθυνόμενες κεραίες λήψης συλλαμβάνουν ενέργεια από λιγότερο χώρο. Ως εκ τούτου, οι κατευθυνόμενες κεραίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση των εισφορών πολλαπλών διαδρομών μέσω του περιορισμού του χώρου από τον οποίο συλλαμβάνεται ακτινοβολία. Αυτή η επίδραση μπορεί να είναι δραστική, ωστόσο η κατευθυντικότητα παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι πομπός και δέκτης πρέπει να είναι στραμμένος ο ένας προς τον άλλο ώστε να είναι δυνατή η μεταξύ τους επικοινωνία.

3.8.1 Μοντέλα Ray-Tracing για Εσωτερικούς Χώρους

Λόγω της κυριαρχίας της ανάκλασης και της σκέδασης στο mmWave ασύρματο περιβάλλον και της έλλειψης των συνεισφορών της περίθλασης, τα μοντέλα ray-tracing αποτελούν δημοφιλείς και ακριβείς μεθοδολογίες για τον σχεδιασμό των ασύρματων καναλιών διάδοσης. Ο κύριος περιορισμός των μοντέλων ray-tracing είναι η έλλειψη ευελιξίας. Τα μοντέλα ray-tracing μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον και έχουν ντετερμινιστικό χαρακτήρα.

Αυτό σημαίνει ότι είναι δυσκολότερος ο σχεδιασμός των μοντέλων καναλιών για διαφορετικά περιβάλλοντα χωρίς την ύπαρξη ενός ακριβούς φυσικού μοντέλου του

περιβάλλοντος, παρόλο που μία προσέγγιση συγκεκριμένου χώρου είναι ιδιαίτερα επιθυμητή για μεμονωμένες εγκαταστάσεις ασύρματων δικτύων. Μοντέλα στατιστικής βάσης, όπως το μοντέλο διάλειψης Rician και το μοντέλο διασποράς Saleh-Valenzuela παρουσιάζουν μεγαλύτερη αναλυτική προσιτότητα για ερευνητικούς σκοπούς και μπορούν να αναφερθούν σε γενικά σενάρια περιβαλλόντων μέσω στοχαστικής παραμετροποίησης. Τα N-ray tracing μοντέλα, όπου N είναι ο απαραίτητος αριθμός των ακτινών για τη διάδοση από τον πομπό στο δέκτη μέσω του περιβάλλοντος, έχουν σε γενικές γραμμές μικρές αποκλίσεις από τις πραγματικές μετρήσεις στο κανάλι διάδοσης. Για τα περισσότερα σενάρια περιβάλλοντος, μόνο λίγες ανακλάσεις είναι απαραίτητο να συμπεριληφθούν στα ray-tracing μοντέλα, δεδομένου ότι η υψηλή απώλεια διαδρομής μειώνει τις εισφορές των σημάτων πέρα από ένα μικρό αριθμό ανακλάσεων.

3.8.2 Μοντέλα Rayleigh, Rician και Πολυκυματικής Διάλειψης

Το μοντέλο διάλειψης Rayleigh, το οποίο προέρχεται από μια πλούσια απόκριση σκέδασης του καναλιού, κατά την οποία πολλά συστατικά πολλαπλών διαδρομών του σήματος δεν είναι διαχωρίσιμα στο χρόνο ή στο χώρο, περιγράφει στατιστικά τη λαμβανόμενη περιβάλλουσα σήματος, για κάποια μέση τιμή που καθορίζεται από το μοντέλο καναλιού μεγάλης κλίμακας. Τέτοια μοντέλα γενικά αναφέρονται μόνο σε κανάλια στενής ζώνης ή σε συστήματα πανκατευθυντικών κεραιών χαμηλού κέρδους, αφού τέτοια συστήματα δεν αναλύουν τα επιμέρους συστατικά των πολλαπλών διαδρομών και ως εκ τούτου, συνοψίζουν διανυσματικά την ενέργεια του σήματος που φθάνει με τυχαίο τρόπο. Δεδομένου ότι σε καθεμία από τις επιμέρους συνιστώσες πολλαπλής διαδρομής προκαλούνται μικροσκοπικές μετατοπίσεις φάσης, η λαμβανόμενη περιβάλλουσα σήματος υφίσταται ένα Rayleigh χαρακτηριστικό. Στην περίπτωση μίας κυρίαρχης, LOS συνιστώσας σήματος πολλαπλών διαδρομών χωρίς διάλειψη, η περιβάλλουσα σήματος υποβάλλεται σε διανομή Rician, στην οποία το κυρίαρχο σήμα χωρίς διάλειψη παρέχει μια βάση για το χαρακτηριστικό γνώρισμα του λαμβανόμενου σήματος. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Function, PDF) της τυχαίας μεταβλητής r της λαμβανόμενης τάσης περιβάλλουσας σήματος μικρής κλίμακας, στα κανάλια στενής ζώνης, με παρουσία διάλειψης Rayleigh και με σήμα λήψης ισχύος μεγάλης κλίμακας P_r , δίνεται:

$$p_R(r) = \left(\frac{2r}{P_r}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{P_r}\right) \text{ for } 0 \leq r \leq \infty \quad (3.17)$$

Το μοντέλο διάλειψης Rayleigh δεν περιλαμβάνει κατοπτρική συνιστώσα LOS σήματος. Το μοντέλο διάλειψης Rician για τη λαμβανόμενη τάση περιβάλλουσας γενικεύει το μοντέλο διάλειψης Rayleigh ώστε να περιλαμβάνει μια συνιστώσα LOS, τέτοια ώστε:

$$p_R(r) = \left(\frac{2r}{P_{r,NLOS}} \right) \exp\left(-\frac{(r^2 + P_{r,LOS})}{P_{r,NLOS}} \right) I_0\left(\frac{2r\sqrt{P_{r,NLOS}}}{P_{r,NLOS}} \right) \text{ for } 0 \leq r \leq \infty \quad (3.18)$$

όπου $P_{r,LOS}$ είναι η μέση λαμβανόμενη ισχύς σήματος της LOS συνιστώσας, $P_{r,NLOS}$ είναι η μέση λαμβανόμενη ισχύς του σήματος στη NLOS συνιστώσα και I_0 είναι η συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης. Για την ποσοτικοποίηση του στατικού βαθμού των LOS συνιστωσών στο λαμβανόμενο σήμα, ορίζεται ο Rician συντελεστής K:

$$K_R = \frac{P_{r,LOS}}{P_{r,NLOS}} \quad (3.19)$$

τέτοιος ώστε αν $K_R = 0$ δεν υπάρχει LOS συνιστώσα, οπότε $P_{r,NLOS} = P_r$ και η λαμβανόμενη ισχύς σήματος έχει Rayleigh διανομή.

Με τη χρήση κατευθυντικών κεραιών στις mmWave συχνότητες, μία νέα κατηγορία διάλειψης διανομής γίνεται υπολογίσιμη. Αυτή η διανομή ονομάζεται δικυματική με διάχυτη ισχύ (Two Wave with Diffuse Power, TWDP) και μοντελοποιεί κατάλληλα τη διάλειψη που προκαλείται από το συνδυασμό μερικών ισχυρών κατοπτρικών συστατικών πολλαπλών διαδρομών πάνω σε διάχυτη ισχύ ή τυχαίο θόρυβο. Οι συναρτήσεις διανομής TWDP εξετάζουν τη διανομές διάλειψης Rayleigh και Rician ως ειδικές περιπτώσεις μιας γενικότερης οικογένειας διανομών και προβλέπουν σωστά τις λειτουργίες διπλής μορφής πυκνότητας. Η διανομή TWDP έχει ιδιαίτερη εφαρμοσιμότητα σε mmWave κανάλια, όπου συχνά υπάρχουν λίγες ισχυρές συνιστώσες πολλαπλής διαδρομής λόγω της χρήσης κεραιών υψηλής κατευθυντικότητας.

Κεφάλαιο 4

Κεραίες για Συστήματα mmWave

4.1 Κεραίες On-Chip

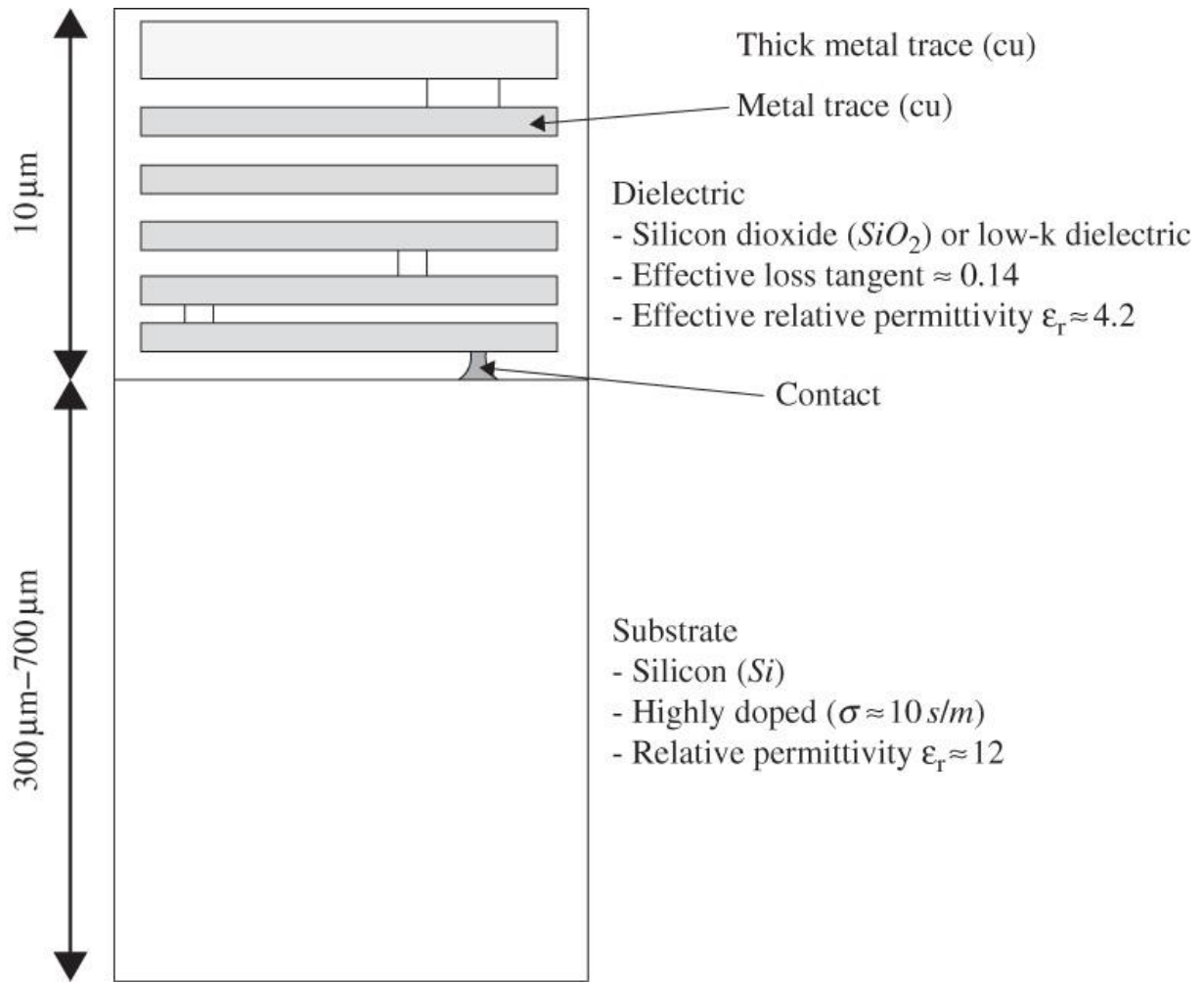
Τα εξαιρετικά μικρά μήκη κύματος των σημάτων mmWave προσφέρουν τεράστιες δυνατότητες ανάπτυξης προσαρμόσιμων συστοιχιών κεραιών υψηλής απολαβής, με μικρό κόστος κατασκευής και ενσωμάτωσης στη μαζική παραγωγή ηλεκτρονικών προϊόντων. Η πολύ υψηλή ολοκλήρωση κεραιών με μικρό φυσικό μέγεθος, προσφέρει πλεονεκτήματα τόσο όσον αφορά το κόστος υλοποίησης, όσο και την απόδοση των συστημάτων. Από άποψη κόστους υλοποίησης, οι κεραίες mmWave μπορούν να ενσωματωθούν απευθείας με άλλα τμήματα ενός πομποδέκτη και μπορούν να κατασκευαστούν είτε με τεχνολογίες συσκευασίας (in-package) ή τεχνολογίες παραγωγής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (Integrated Circuit, IC). Αυτό αποτελεί έντονη απόκλιση από τα ασύρματα συστήματα που έχουν υλοποιηθεί έως σήμερα, τα οποία βασίζονται σε ομοαξονικά καλώδια, γραμμές μεταφοράς και τυπωμένα κυκλώματα για τη σύνδεση των κεραιών με τα κυκλώματα του πομπού ή του δέκτη.

Οι κεραίες για συστήματα mmWave που κατασκευάζονται σε ένα chip με χρήση της τεχνολογίας παραγωγής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, βρίσκονται στο επίκεντρο της έρευνας, καθώς προσφέρουν μεγάλες δυνατότητες μείωσης του κόστους παραγωγής σε σχέση με τις in-package κεραίες, με την προϋπόθεση ότι μπορούν να αντιμετωπιστούν οι βασικές σχεδιαστικές τους προκλήσεις, ώστε να είναι δυνατή η επίτευξη αποδεκτής απόδοσης. Η μεγαλύτερη δυσκολία που αντιμετωπίζουν οι on-chip κεραίες είναι η εξασφάλιση αποδεκτής απόδοσης και κέρδους. Επίσης, μια άλλη βασική πρόκληση η οποία απαιτεί σύνθετη προσέγγιση, είναι η επίδραση των γειτονικών μεταλλικών δομών, όπως οι γραμμές μεταφοράς (Lamminen, Saily, Vimpari, 2008).

4.1.1 Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) Technology

Η τεχνολογία CMOS αποτελεί τη μεθοδολογία υλοποίησης των on-chip κεραιών με το μικρότερο κόστος. Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται η εγκάρσια τομή ενός τυπικού chip CMOS. Το άνω τμήμα του chip καταλαμβάνεται από ένα διηλεκτρικό και περιέχει τα μεταλλικά ίχνη που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση ενεργού κυκλώματος ή για την κατασκευή μιας on-chip κεραίας. Ορισμένες σύγχρονες μεθοδολογίες χρησιμοποιούν low-k διηλεκτρικά αντί διοξειδίου του πυριτίου, προκειμένου να μειωθεί η σύζευξη μεταξύ γειτονικών γραμμών, με μείωση της χωρητικότητας μεταξύ των γραμμών. Το διηλεκτρικό στρώμα του chip που περιέχει τα πολυάριθμα στρώματα των μεταλλικών ιχνών ονομάζεται στρώμα BEOL (Back End of Line), έχει πάχος περίπου 10 μm και εδράζεται πάνω από ένα παχύτερο στρώμα ενισχυμένου πυριτίου, πάχους περίπου 300-700 μm . Στις περισσότερες σύγχρονες μεθοδολογίες, μόνο το ανώτερο στρώμα μετάλλου είναι συνήθως από αλουμίνιο, ενώ τα υπόλοιπα στρώματα είναι από χαλκό. Το ανώτερο στρώμα μετάλλου στις περισσότερες εφαρμογές είναι παχύτερο από τα κατώτερα μεταλλικά στρώματα. Στις σύγχρονες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί για ψηφιακά κυκλώματα υψηλής ταχύτητας, το παχύτερο ανώτερο στρώμα έχει ως αποτέλεσμα το στρώμα αυτό να παρουσιάζει υψηλότερη αντίσταση σε σχέση με τα κατώτερα στρώματα. Προκειμένου να αποφευχθεί ένα πρόβλημα των ψηφιακών κυκλωμάτων που ονομάζεται latch up, το υπόστρωμα (substrate) είναι ιδιαίτερα ενισχυμένο, ώστε να αποφευχθεί η συσσώρευση τάσης που προκαλεί το φαινόμενο αυτό (Zhang, Sun, Chua, Wai, Liu, 2008).

Υπάρχουν τέσσερις βασικές προκλήσεις κατά τη σχεδίαση των on-chip κεραιών, οι οποίες απορρέουν από το υπόστρωμα που χρησιμοποιείται για την υποστήριξη μιας on-chip κεραίας. Πρώτον, το υψηλό διηλεκτρικό του υποστρώματος πυριτίου κάτω από την κεραία αναγκάζει την κεραία να ακτινοβολεί εντός του υποστρώματος αντί μακριά από το chip. Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό από το διάνυσμα Roytting του μακρινού πεδίου μιας κεραίας, το οποίο αποδεικνύεται ανάλογο του $\epsilon_r^{\frac{3}{2}}$, όπου ϵ_r είναι το σχετικό διηλεκτρικό, δηλαδή ο λόγος του διηλεκτρικού προς το διηλεκτρικό ελεύθερου χώρου.



Σχήμα 4.1. Η εγκάρσια τομή ενός τυπικού CMOS chip

Η ακτινοβολία μακρινού πεδίου μιας κεραίας είναι ανάλογη με τον κυματάριθμο του μέσου:

$$(E_{ff}) \propto K \left(\frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \right) \quad (4.1)$$

όπου E_{ff} είναι το ηλεκτρικό πεδίο μακρινού πεδίου, k είναι ο κυματάριθμος και r είναι η απόσταση μεταξύ της κεραίας και του σημείου παρατήρησης. Ο κυματάριθμος ισούται:

$$k = 2\pi f \sqrt{\epsilon\mu} \quad (4.2)$$

όπου ϵ και μ είναι το διηλεκτρικό και η διαπερατότητα του σημείου του χώρου ενδιαφέροντος αντίστοιχα και f είναι η συχνότητα λειτουργίας. Το διάνυσμα Poynting στο μακρινό πεδίο είναι:

$$H = \frac{j(\hat{k} \times E)}{\eta} \quad (4.3)$$

όπου \hat{k} είναι η διανυσματική μονάδα που υποδεικνύει την κατεύθυνση της διάδοσης. Το μέγεθος του διανύσματος Poynting, το οποίο δείχνει την πυκνότητα ισχύος σε ένα σημείο στο χώρο, δίνεται από:

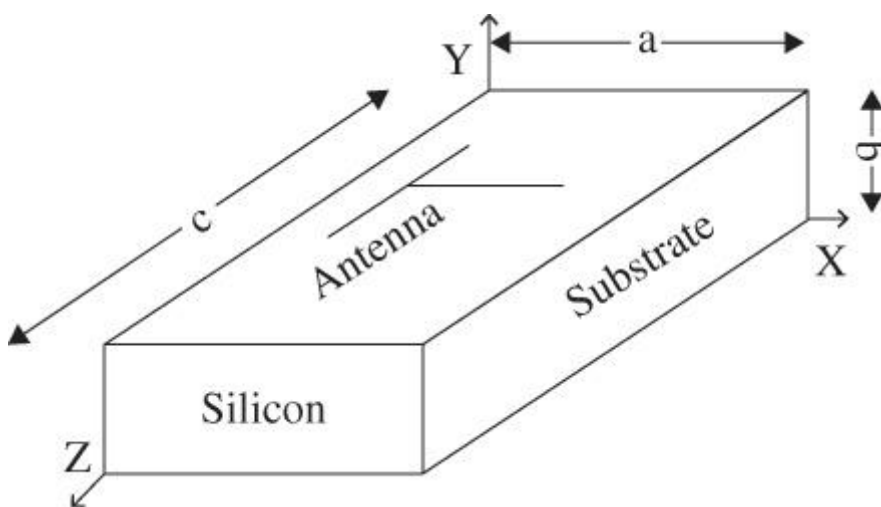
$$|S| = |E \times H^*| = \frac{|E|^2}{2\eta} = \frac{f^2 \varepsilon \mu}{8 \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} r^2} \propto \varepsilon^{\frac{3}{2}} \quad (4.4)$$

Η εξίσωση 4.4 δείχνει ότι η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας μέσα στο chip αποκλείοντας την παρουσία δομών θωράκισης ή άλλων δομών πάνω από την κεραία, θα πρέπει να είναι πολύ υψηλότερη στο υπόστρωμα από ό, τι στην περιοχή του chip ακριβώς πάνω από την κεραία. Αυτή η ακτινοβολία δεν θα αποτελούσε τόσο σημαντική πρόκληση αν τα κύματα που εισέρχονται στο υπόστρωμα μπορούσαν να εξέλθουν χωρίς μεγάλη εξασθένηση, έτσι ώστε να εξακολουθήσουν να εξυπηρετούν την ωφέλιμη διάδοση. Όμως, η δεύτερη βασική πρόκληση του on-chip περιβάλλοντος, το ενισχυμένο υπόστρωμα που χρησιμεύει στην πρόληψη της εμφάνισης του φαινομένου latch up στα ψηφιακά κυκλώματα, προκαλεί μεγάλη εξασθένηση στην ακτινοβολία που εισέρχεται στο υπόστρωμα. Η τρίτη βασική δυσκολία του περιβάλλοντος των κεραιών on-chip οφείλεται στη δομή του υποστρώματος, το οποίο μπορεί να αντιμετωπιστεί ποιοτικά ως ένα ορθογώνιο αντηχείο. Εάν θεωρήσουμε τις πλευρές του υποστρώματος ως κατά προσέγγιση τέλειους ηλεκτρικούς αγωγούς, τότε διαπιστώνουμε ότι η χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού της γεωμετρίας του Σχήματος 4.2, δίνεται:

$$f_{cutoff} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\varepsilon_{r,si}}} \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2} \quad (4.5)$$

Η τέταρτη βασική πρόκληση των on-chip κεραιών οφείλεται στην ευκολία με την οποία το υπόστρωμα του chip μπορεί να υποστηρίξει τα επιφανειακά κύματα. Ένα επιφανειακό κύμα είναι ένα είδος καθοδηγούμενου κύματος που ταξιδεύει κατά μήκος του άξονα του υποστρώματος. Κατά τη σχεδίαση των on-chip κεραιών θα πρέπει να επιδιώκεται η καταστολή αυτών των επιφανειακών κυμάτων όσο το δυνατόν περισσότερο, δεδομένου ότι μειώνουν την ισχύ που ακτινοβολείται στο επιθυμητό πεδίο ακτινοβολίας της κεραίας και επίσης αυξάνουν τη σύζευξη μεταξύ της κεραίας και των παρακείμενων δομών, συμπεριλαμβανομένων κοντινών κεραιών. Κάθε

επιφανειακό κύμα έχει ένα ενεργό ύψος υποστρώματος, το οποίο αντιπροσωπεύει το πάχος του υποστρώματος συν ένα φαινομενικό βάθος διείσδυσης των ακτινών πάνω και κάτω από την κεραία, στην περίπτωση που δεν υπάρχει επίπεδο γείωσης ακριβώς κάτω από την κεραία. Αυτό το ενεργό ύψος εμφανίζεται πάντα στον παρονομαστή της εξίσωσης που προβλέπει πόση ισχύ θα συζευχτεί σε κάθε τρόπο λειτουργίας για μία δεδομένη συχνότητα, διηλεκτρική σταθερά και φυσικό πάχος υποστρώματος, υποδηλώνοντας ότι η λέπτυνση του υποστρώματος θα μειώσει την ποσότητα της συζευγμένης ισχύς στο υπόστρωμα.



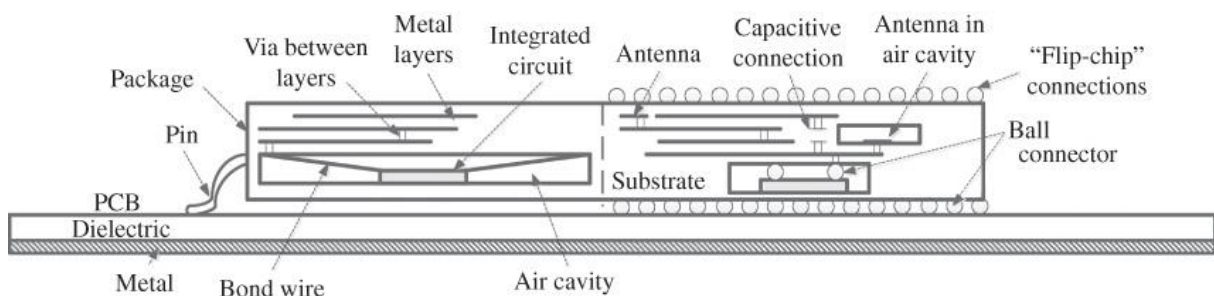
Σχήμα 4.2. Γεωμετρία του υποστρώματος

Η μοντελοποίηση όλων των μηχανισμών απωλειών που ευθύνονται για τη χαμηλή αποδοτικότητα των on-chip κεραιών, προϋποθέτει την εξέταση της συχνότητας λειτουργίας σε σχέση με τις διαστάσεις του υποστρώματος και το διηλεκτρικό, ώστε να καθοριστεί ποιες λειτουργίες του υποστρώματος διεγείρονται. Η γνώση της αγωγιμότητας του υποστρώματος είναι επίσης απαραίτητη για να καθοριστεί πόση ενέργεια χάνεται σε ρεύματα αγωγιμότητας.

4.2 Κεραίες In-Package

Οι in-package κεραίες κατασκευάζονται σύμφωνα με τις διαδικασίες παραγωγής ολοκληρωμένων συσκευασιών. Μία τυπική συσκευασία αποτελείται από πολλές στρώσεις συνεπιπέδων μεταλλικών δομών όπως γραμμές μεταφοράς, baluns, υβριδικά στοιχεία και κεραίες. Οι ηλεκτρικές συνδέσεις εντός του package δημιουργούνται διαμέσου των σειρών επιπέδων χρησιμοποιώντας είτε ενδιάμεσα σημεία (vias), τα

οποία αποτελούνται από κάθετους μεταλλικούς κυλίνδρους που διατρέχουν τα διαφορετικά μεταλλικά επίπεδα, είτε ηλεκτρομαγνητικές χωρητικές συνδέσεις. Η σύνδεση μεταξύ του package και του τσιπ μπορεί να γίνει με χρήση χωρητικών, ball-grid, ή flip chip συνδέσεων. Από πλευράς θεωρίας κυκλωμάτων, οι νίσις ομοιάζουν με πηνία, ενώ οι χωρητικές συνδέσεις ομοιάζουν με πυκνωτές. Ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα συστήματος mmWave, συνήθως τοποθετείται μέσα σε μια μικρή κοιλότητα αέρα εντός του package. Μικρά μεταλλικά εξογκώματα ή πολύ λεπτές συνδέσεις καλωδίων συνδέουν το ολοκληρωμένο κύκλωμα με το υπόλοιπο package. Οι μεταλλικές υποδομές του package συνδέουν το chip με το εξωτερικό περιβάλλον, συγκολλώντας το πάνω σε πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων.



Σχήμα 4.3. Η τυπική δομή ενός package

Οι in-package mmWave κεραίες επιτυγχάνουν υψηλότερο κέρδος και αποδοτικότητα από τις on-chip κεραίες. Πολλές έρευνες έχουν δείξει ότι οι in-package κεραίες μπορούν να επιτυγχάνουν σταθερά κέρδη της τάξης των 10 dBi και βαθμό αποδοτικότητας μεγαλύτερο από 80%. Με το σημερινό επίπεδο ανάπτυξης των on-chip κεραιών, για mmWave εφαρμογές σε αποστάσεις μεγαλύτερες του ενός μέτρου, θα απαιτηθεί η χρήση in-package κεραιών. Οι in-package κεραίες μπορούν να επιτύχουν υψηλότερο κέρδος και αποδοτικότητα, διότι είναι απομονωμένες από το απωλεστικό υπόστρωμα του ολοκληρωμένου κυκλώματος που είναι υπεύθυνο για τη χαμηλή αποδοτικότητα των on-chip κεραιών. Το μειονέκτημα των in-package κεραιών είναι το υψηλότερο κόστος παραγωγής σε σχέση με τις on-chip κεραίες. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στην περίπτωση όπου η χρήση των in-package κεραιών αναγκάζει το ολοκληρωμένο σύστημα ενός πομποδέκτη να χρησιμοποιήσει ακριβότερη διαδικασία κατασκευής package από αυτή που θα απαιτούνταν σε διαφορετική περίπτωση. Για παράδειγμα, οι χρήσιμες in-package κεραιών μπορεί να οδηγήσει στο σχεδιασμό ενός συστήματος package με τέσσερα μεταλλικά στρώματα αντί δύο, ώστε να επιτραπεί μεγαλύτερη

σχεδιαστική ευελιξία, εξυπηρετώντας το πολύ μικρό μέγεθος των νιαι των δομών του package.

Υπάρχουν πολλοί δημοφιλείς τύποι διεργασίας συσκευασιών στην παραγωγή in-package κεραίων, συμπεριλαμβανομένων των Teflon, των κεραμικών σύνκαυσης χαμηλής θερμοκρασίας (Low Temperature Cofired Ceramic, LTCC), του τηγμένου πυριτίου και των πολυμερών υγρών κρυστάλλων (Liquid Crystal Polymer, LCP). Κατά την επιλογή της κατάλληλης package τεχνολογίας, τα σημαντικότερα ζητήματα για την ανάπτυξη των in-package κεραίων πέρα από το κόστος, το οποίο πάντοτε αποτελεί το σημαντικότερο κριτήριο για τη μαζική παραγωγή συσκευών, είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά του package, το ελάχιστο μέγεθος διαστάσεων, η δυνατότητα κατασκευής με ακρίβεια, ο αριθμός των διαθέσιμων μεταλλικών στρωμάτων και η απόσταση μεταξύ τους, ο τύπος των τεχνολογιών διασύνδεσης και η συμβατότητά τους με τη διαδικασία συσκευασίας και το αν η διαδικασία κατασκευής του package θα επιτρέψει τη δημιουργία κοιλότητας αέρα μεταξύ της κεραίας και του υποστρώματος του package (Sun, Zhang, Guo, Chua, Wai, 2009).

Η διηλεκτρική σταθερά στην in-package τεχνολογία είναι απαραίτητη σχεδιαστική πληροφορία, καθώς προσδιορίζει το ηλεκτρικό μέγεθος των in-package κεραίων. Όσο υψηλότερη είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά του υλικού συσκευασίας, τόσο ηλεκτρικά μεγαλύτερα θα εμφανίζονται τα μεταλλικά του περιεχόμενα. Επομένως, οι κεραίες οι οποίες κατασκευάζονται με μεγάλη διηλεκτρική σταθερά, θα απαιτούν λιγότερο χώρο προκειμένου να επιτύχουν το ίδιο κέρδος με άλλες in-package κεραίες, μικρότερης διηλεκτρικής σταθεράς. Ωστόσο, το υψηλό σχετικό διηλεκτρικό οξύνει τα προβλήματα σχεδίασης λόγω ανακρίβειών στις διεργασίες κατασκευής και θα οδηγήσει σε υψηλότερη μεταβλητότητα απόδοσης των συσκευών. Ένα άλλο μειονέκτημα της υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς είναι το μικρότερο διαθέσιμο εύρος ζώνης για τις in-package κεραίες, εξαιτίας του γεγονότος ότι σε ένα package με υψηλή διηλεκτρική σταθερά θα αποθηκευτεί περισσότερη ενέργεια από ότι σε ένα package χαμηλότερης διηλεκτρικής σταθεράς. Η εφαπτομένη απώλειας (tangent loss) του υλικού συσκευασίας θα πρέπει να εξετάζεται παράλληλα με τη διηλεκτρική σταθερά, καθώς η εφαπτομένη απώλειας επηρεάζει το ποσό της ενέργειας που διαχέεται από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία στο package. Το εύρος ζώνης των συντονισμών του package, το οποίο επηρεάζει αρνητικά την απόδοση της κεραίας, θα πρέπει επίσης να

προσδιορίζεται από την εφραπτομένη απώλειας του package. Η εφραπτομένη απώλειας των δημοφιλών τεχνολογιών package καθορίζεται στο 0.0007 για το Teflon, 0.002 για το LTCC, 0.001 για το τηγμένο πυρίτιο και 0.002-0.004 για το LCP.

Το ελάχιστο φυσικό μέγεθος των μεταλλικών δομών, συμπεριλαμβανομένων των νίας, αποτελεί σημαντικό στοιχείο κατά την επιλογή του υλικού package και πρόκειται να αποκτήσει μεγαλύτερη σημασία όσο οι εφαρμογές mmWave αυξάνουν τη συχνότητα λειτουργίας από τα 60 GHz έως τη συχνοτική περιοχή των sub-terahertz και terahertz. Συγκεκριμένα, το μέγεθος των νίας καθορίζει το ελάχιστο μήκος της κατακόρυφης δομής του package. Η απόσταση μεταξύ των μεταλλικών επιπέδων κατά τη διαδικασία κατασκευής του package είναι μείζον μέλημα, καθώς αυτή καθορίζει το μήκος των δομών των νίας και συνεπώς, την αυτεπαγωγή που θα εμφανιστεί σε κάθε νία. Γενικά, καθώς η συχνότητα λειτουργίας αυξάνεται, θα πρέπει σχεδιαστικά να εξετάζεται η εφαρμογή κατασκευαστικών διαδικασιών με χρήση παρεμβλλόμενων επιπέδων μικρότερου πάχους. Η κατασκευαστική ακρίβεια, η οποία καθορίζει το πόσο στενά σύμφωνο με τις προδιαγραφές σχεδιασμού θα είναι το κατασκευασμένο chip, θα πρέπει να εξετάζεται επιπρόσθετα με το ελάχιστο φυσικό μέγεθος. Γενικά, η υψηλή κατασκευαστική ακρίβεια συσχετίζεται με το μικρό φυσικό μέγεθος (Seki, Honma, Nishikawa, Tsunekawa, 2005).

4.3 Τοπολογίες Κεραιών για Συστήματα mmWave

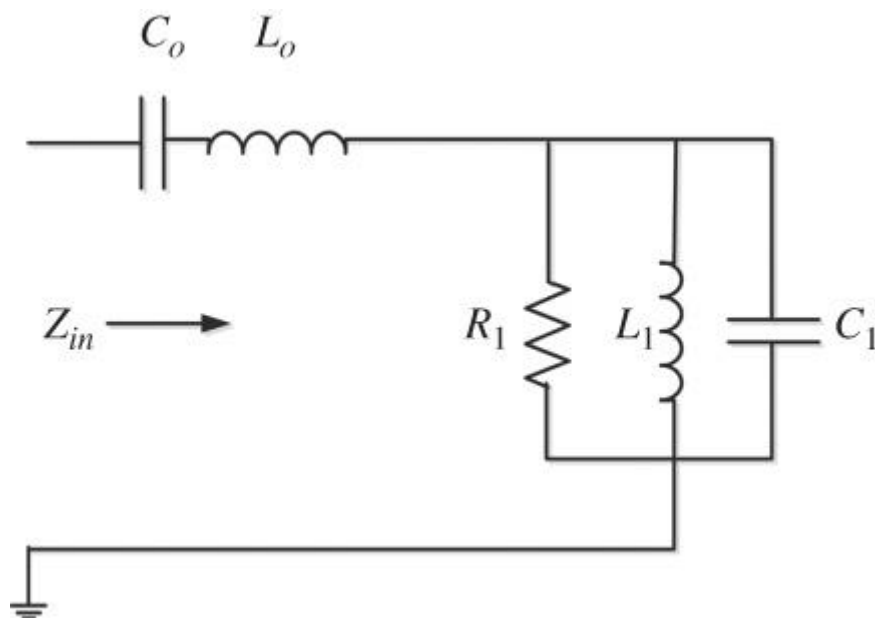
Η επιλογή της κατάλληλης τοπολογίας κεραιών είναι ένα σημαντικό ζήτημα και εξαρτάται από την εφαρμογή για την οποία προορίζονται οι κεραιές, καθώς και από τα κυκλώματα που αλληλεπιδρούν με τις ολοκληρωμένες κεραιές. Για παράδειγμα, η ποικιλομορφία πόλωσης μπορεί να αποτελέσει σημαντική πτυχή των συστημάτων επικοινωνίας mmWave, καθορίζοντας τη δομή των κατευθυντικών κεραιών των ασύρματων συσκευών, οι οποίες μπορεί να προορίζονται για εφαρμογές συνδέσεων ή ανιχνεύσεων πολύ μικρών αποστάσεων, όπου δεν είναι απαραίτητη η επίτευξη πολύ υψηλού κέρδους, αλλά μπορεί να κριθεί ιδιαιτέρως κρίσιμη η ενεργειακή απόδοση και το χαμηλό κόστος υλοποίησης. Σε συνδέσεις μεγαλύτερων αποστάσεων, συμπεριλαμβανομένων εταιρικών WiFi, συστημάτων backhaul ή εξωτερικών κυψελοειδών δικτύων, μπορεί να είναι απαραίτητο να εξασφαλιστεί σχεδιαστικά η αποδοτικότητα των κεραιών, προκειμένου η συγκεκριμένη συστοιχία κεραιών να

καταστεί κατάλληλη για χρήση στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Η σύνθετη αντίσταση εισόδου της κεραίας μπορεί να καθορίσει αν είναι κατάλληλη για χρήση με ένα συγκεκριμένο κύκλωμα οδήγησης.

Η διπολική κεραία είναι ένας απλός τύπος κεραίας που παρέχει τη βάση κατανόησης λειτουργίας και των υπολοίπων τοπολογιών κεραιών. Όταν ένα δίπολο κατασκευάζεται είτε με τη μεθοδολογία on-chip είτε με τη μεθοδολογία in-package, ονομάζεται επίπεδο δίπολο (planar dipole) (Mustafa, Hashim, Parimon, Rhaman, Rahmn, Osman, 2009). Αυτό το είδος κεραίας έχει μελετηθεί και χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε ολοκληρωμένες εφαρμογές και έχει χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με άλλες δομές εκπομπής, όπως οι κυλινδρικοί συντονιστές (cylindrical resonators). Μία κεραία επίπεδου δίπολου αποτελεί ένα είδος ευρύπλευρης κεραίας, με την κύρια δέσμη της να είναι κάθετη προς τον άξονά της. Τα δίπολα είναι εύκολο να κατασκευαστούν και μπορούν εύκολα να διασυνδεθούν με on-chip γραμμές μετάδοσης, όπως οι ομοεπίπεδες γραμμές μετάδοσης. Ένα μεγάλο μειονέκτημα αυτού του τύπου κεραίας για ολοκληρωμένες on-chip εφαρμογές κεραιών, είναι η ευκολία με την οποία εκπέμπει κατευθυνόμενα κύματα στο υπόστρωμα, με αποτέλεσμα τη χαμηλή αποδοτικότητα της λειτουργίας τους. Μία εφαρμογή των on-chip δίπολων, γνωστή ως inter-chip ασύρματη διασύνδεση, μπορεί να επωφεληθεί από τις λειτουργίες του υποστρώματος, καθώς βασίζεται στην επικοινωνία μεταξύ κεραιών στο ίδιο υπόστρωμα αντί να απαιτεί την ακτινοβολία στον ελεύθερο χώρο. Αυτή η προσέγγιση προκρίνεται ως μέσο αντικατάστασης των μεταλλικών διασυνδέσεων, καθώς και για τη διανομή χρονισμού σε μεγάλα ολοκληρωμένα κυκλώματα.

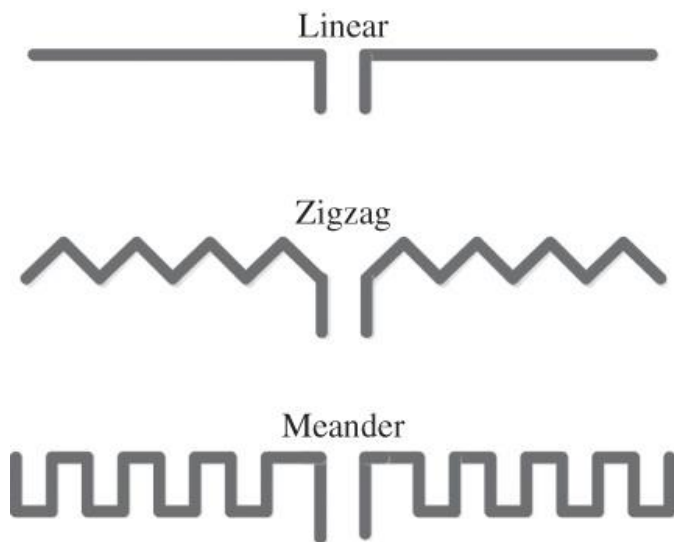
Ένα μοντέλο κυκλώματος που παρήχθη ειδικά για διπολικές κεραίες φαίνεται στο Σχήμα 4.4. Το κύκλωμα αυτό είναι χρήσιμο για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης εισόδου ενός τυπικού δίπολου. Στις συχνότητες mmWave, αυτό το μοντέλο πρέπει να είναι επαυξημένο ώστε να συμπεριλαμβάνει τις επιδράσεις του ολοκληρωμένου περιβάλλοντος. Οι επιδράσεις αυτές περιλαμβάνουν έναν πυκνωτή για τη μοντελοποίηση της σύζευξης του υποστρώματος για τις on-chip κεραίες και ένα μοντέλο δικτύου για το υπόστρωμα, που περιλαμβάνει ωμικά και χωρητικά στοιχεία για τη μοντελοποίηση της απώλειας και της αποθήκευσης ενέργειας του υποστρώματος αντίστοιχα. Το μοντέλο του Σχήματος 4.4 αναπτύχθηκε για την αναπαραγωγή των χαρακτηριστικών εισόδου των διπολικών κεραιών. Τα χαρακτηριστικά αυτά

περιλαμβάνουν έναν πόλο κοντά στη συχνότητα συντονισμού που οδηγεί σε ταχεία αύξηση του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης εισόδου. Τον πυκνωτή C_0 που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση του πόλου στην έκφραση για την πραγματική σύνθετη αντίσταση εισόδου και το πηνίο L_0 που χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση του πυκνωτή στις υπόλοιπες συχνότητες. Οι τιμές των R_1 , L_1 και C_1 χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση των συντονισμών ανώτερης τάξης. Ένα δεύτερο, παράλληλο δίκτυο RLC μπορεί επίσης να προστεθεί. Ένα κύκλωμα συντονισμού LC σε σειρά θα εμφανίζεται ως βραχυκύκλωμα, ενώ ένα παράλληλο κύκλωμα συντονισμού LC θα εμφανίζεται ως ανοικτό κύκλωμα. Ένα κλασικό μισού μήκους κύματος δίπολο στον ελεύθερο χώρο, έχει μια σύνθετη αντίσταση εισόδου $73 + j42.5 \Omega$ στη συχνότητα συντονισμού.



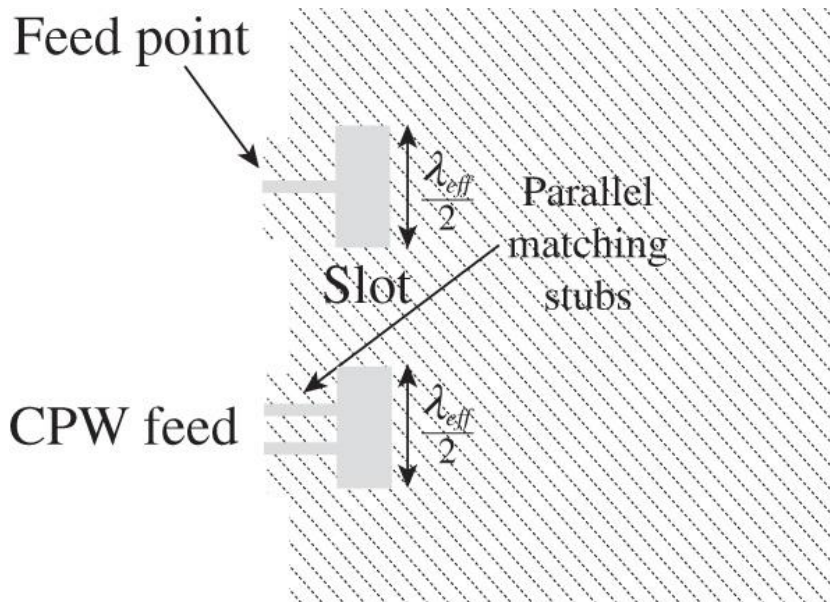
Σχήμα 4.4. Μοντέλο κυκλώματος διπολικών κεραιών

Αρκετές παραλλαγές των on-chip δίπολων έχουν υλοποιηθεί, συμπεριλαμβανομένων γραμμικών, ζιγκ ζαγκ και ελικοειδών τοπολογιών (Cao, Ding, Yang, Lin, Wu, Verma, Lin, Martin, K.K.O., 2008). Οι τοπολογίες ζιγκ-ζαγκ μπορούν να προσφέρουν ελαφρώς καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τα γραμμικά δίπολα, ενώ επιτυγχάνουν και υψηλότερο κέρδος. Διατηρώντας την απόσταση μεταξύ του δίπολου και του υποστρώματος των ζιγκ-ζαγκ κεραιών όσο το δυνατόν μεγαλύτερη, επιτυγχάνεται αντιστάθμιση της μειωμένης σύζευξης των κατευθυνόμενων κυμάτων στο υπόστρωμα, με την ελαφρώς υψηλότερη απώλεια αγωγιμότητας στην κεραία.



Σχήμα 4.5. Διαφορετικές υλοποιήσεις δίπολων για on-chip κεραίες

Οι κεραίες σχισμών (slot antennas) έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό των ολοκληρωμένων κεραιών. Από ηλεκτρομαγνητική άποψη, μια slot κεραία είναι το μαγνητικό ομόλογο του δίπολου και κατά συνέπεια, η ανάλυση καθενός από τα δύο είναι σχεδόν πανομοιότυπη. Το μήκος της σχισμής πρέπει να είναι $\lambda/2$, όπου λ είναι το μήκος κύματος λειτουργίας. Για ολοκληρωμένες κεραίες, πρέπει να χρησιμοποιείται το ενεργό μήκος κύματος, δηλαδή ο μέσος όρος του μήκους κύματος στο διηλεκτρικό και του μήκους κύματος στον ελεύθερο χώρο. Οι διαφορές μεταξύ των ολοκληρωμένων slots και των δίπολων τονίζονται κυρίως λόγω των διαφορών στον τρόπο με τον οποίο οι δύο τοπολογίες αλληλεπιδρούν με το υπόστρωμα ή το package. Σε σύγκριση με τα δίπολα, οι ολοκληρωμένες slot κεραίες εμφανίζονται ελαφρώς λιγότερο ευάλωτες στα επιφανειακά κύματα του υποστρώματος για λεπτά υποστρώματα, αλλά υφίστανται μεγαλύτερη υποβάθμιση από τις επιδράσεις του υποστρώματος για παχύτερα υποστρώματα. Οι slot κεραίες υλοποιούνται ως τρύπες στο επίπεδο γείωσης. Σε σύγκριση με τα δίπολα και τις ολοκληρωμένες κεραίες μικροταινίας (microstrip antennas), οι slot κεραίες έχουν υψηλότερη αποδοτικότητα και είναι ευκολότερο να συζευκτούν, όμως αυτό εξαρτάται και από το είδος του υποστρώματος. Οι slot κεραίες μπορούν επίσης εύκολα να σμικρυνθούν και να εφαρμόσουν dual-mode τεχνικές. Οι τεχνικές σμίκρυνσης για τις slot κεραίες βασίζονται στη φόρτιση μιας μικρής ηλεκτρικής σχισμής με επαγωγικά φορτία στα δυο της άκρα. Η ηλεκτρικά λεπτή εγκοπή θα συντονίζεται σε υψηλότερη συχνότητα και τα φορτία θα βοηθούν στον υποβιβασμό της συχνότητας λειτουργίας.

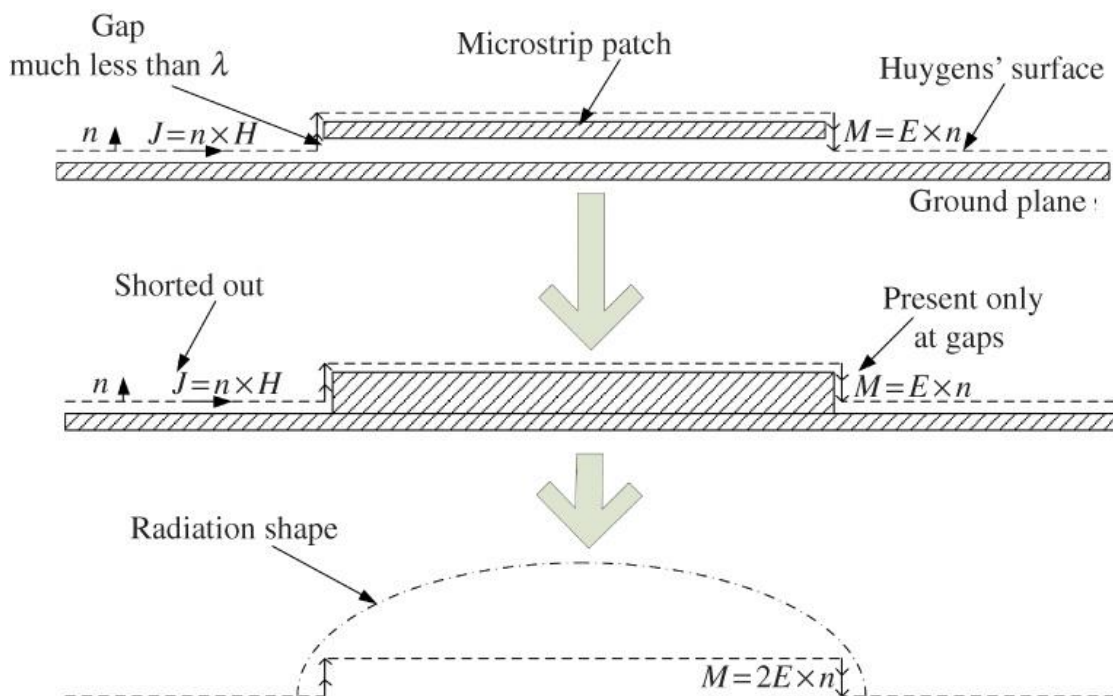


Σχήμα 4.6. Μία βασική slot κεραία, υλοποιημένη ως τρύπα στο επίπεδο γείωσης

Οι microstrip patch κεραίες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές ολοκληρωμένων κεραιών. Από ηλεκτρική άποψη, τα microstrip patches θεωρούνται κοιλότητες που ακτινοβολούν από τις πλευρές τους. Από άποψη ακτινοβολίας, τα patches μπορούν να θεωρηθούν ως συστοιχία δύο στοιχείων μαγνητικού ρεύματος, όπως αποδεικνύεται από την αρχή του Huygens. Τα πλεονεκτήματα των microstrip κεραιών περιλαμβάνουν την ικανότητά τους να προσαρμόζονται εύκολα στις επιφάνειες και τη σχετική ευκολία συντονισμού τους. Τα παραδοσιακά patches χαρακτηρίζονται από χαμηλό εύρος ζώνης και φτωχή αποδοτικότητα, όμως όταν ολοκληρώνονται με τις on-chip μεθοδολογίες, η αποδοτικότητά τους μπορεί να συγκριθεί με αυτή των υπολοίπων on-chip υλοποιήσεων.

Μεταξύ των on-chip υλοποιήσεων χωρίς επεξεργασία υποστρώματος, τα patches κεραιών επιτυγχάνουν υψηλό κέρδος. Το φτωχό εύρος ζώνης των patch κεραιών που χρησιμοποιούνται σε πομποδέκτες εφαρμογών mmWave, μπορεί να απαιτήσει υψηλής αποδοτικότητας διαμόρφωση (σε bits/hertz) ώστε να είναι δυνατή η επίτευξη υψηλού ρυθμού δεδομένων. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, οι πομποδέκτες αυτοί μπορεί επίσης να έχουν την ανάγκη μεγαλύτερης ισχύος από τις υπόλοιπες υλοποιήσεις κεραιών. Τα συστήματα χαμηλού δυναμικού εύρους που επιτυγχάνουν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων μέσω μεγάλου εύρους ζώνης και χαμηλής αποδοτικότητας φάσματος, δεν είναι κατάλληλα για χρήση patch κεραιών. Στην περίπτωση που απαιτείται μεγάλο εύρος ζώνης για ένα patch, τεχνικές όπως η χρήση παρασιτικών παράλληλων μεταλλικών

ταινιών μπορούν να εφαρμοστούν για να αυξήσουν το εύρος ζώνης του patch. Ένα πλεονέκτημα των on-chip patches είναι ότι η περιοχή κάτω από το patch μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ενεργά κυκλώματα, με την προϋπόθεση ότι το επίπεδο γείωσης δεν βρίσκεται στο χαμηλότερο μεταλλικό στρώμα του chip. Ένα άλλο μειονέκτημα των patch κεραιών, είναι το μεγάλο μέγεθός τους σε σύγκριση με άλλες ολοκληρωμένες κεραιές. Αυτό το μεγάλο μέγεθος των on-chip patches απαιτεί την ύπαρξη πολλών slots, ώστε να ικανοποιηθούν οι κανόνες σχεδιασμού κυκλώματος σχετικά με το μέγιστο μέγεθος ενός κομματιού μέταλλου χωρίς τρύπες. Εάν αυτά τα slots είναι πολύ μικρότερα από το μήκος κύματος λειτουργίας και διατηρούνται παράλληλα προς το μήκος της κεραιάς, δεν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την απόδοση της κεραιάς.



Σχήμα 4.7. Απεικόνιση μίας microstrip patch κεραιάς

4.4 Προσαρμόσιμες Συστοιχίες Κεραιών για Εφαρμογές mmWave

Οι ολοκληρωμένες συστοιχίες κεραιών προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα συστήματα μεμονωμένων κεραιών, αλλά χρειάζεται να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις link budget για συχνότητες λειτουργίας μεγαλύτερες των 10 GHz και εμβέλειες συσκευών πολύ μεγαλύτερης από λίγα μέτρα (Roderick, Kirshnaswamy, Newton, Hashemi, 2006). Επιπρόσθετα της βελτίωσης της απολαβής, μια συστοιχία

κεραιών μπορεί να βελτιώσει την ευαισθησία κατά παράγοντα $10\log(n)$, όπου n είναι ο αριθμός των στοιχείων της συστοιχίας. Εάν ένα σήμα με ισχύ M διαμορφωθεί κατά πλάτος στις εξόδους n διαφορετικών κεραιών, τότε η συνολική ισχύς σήματος μετά τη συνεκτική άθροιση των εξόδων, όταν δηλαδή το σήμα φτάνει από την κατεύθυνση της δέσμης, δίνεται από:

$$P_{sig} = Power[M\cos(\omega t) + M\cos(\omega t) + \dots + M\cos(\omega t)] \quad (4.6)$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T (nM\cos(\omega t))^2 dt = \frac{(nM)^2}{2}$$

όπου N είναι ο αριθμός των στοιχείων, T είναι η περίοδος του φέροντος, P_{sig} είναι το σήμα ισχύος και ω είναι η συχνότητα. Οποιοσδήποτε θόρυβος έξω από κάθε αλυσίδα είναι ασυσχέτιστος με το θόρυβο από άλλες αλυσίδες. Η ισχύς των n ασυσχέτιστων τυχαίων σημάτων μπορούν να βρεθούν:

$$P_{noise} \geq N_1^2 + N_2^2 + N_3^2 + \dots + N_n^2 \quad (4.7)$$

Εάν η ισχύς σε κάθε σήμα θορύβου είναι η ίδια, τότε μπορεί να γραφεί ως:

$$P_{noise} = nN^2 \quad (4.8)$$

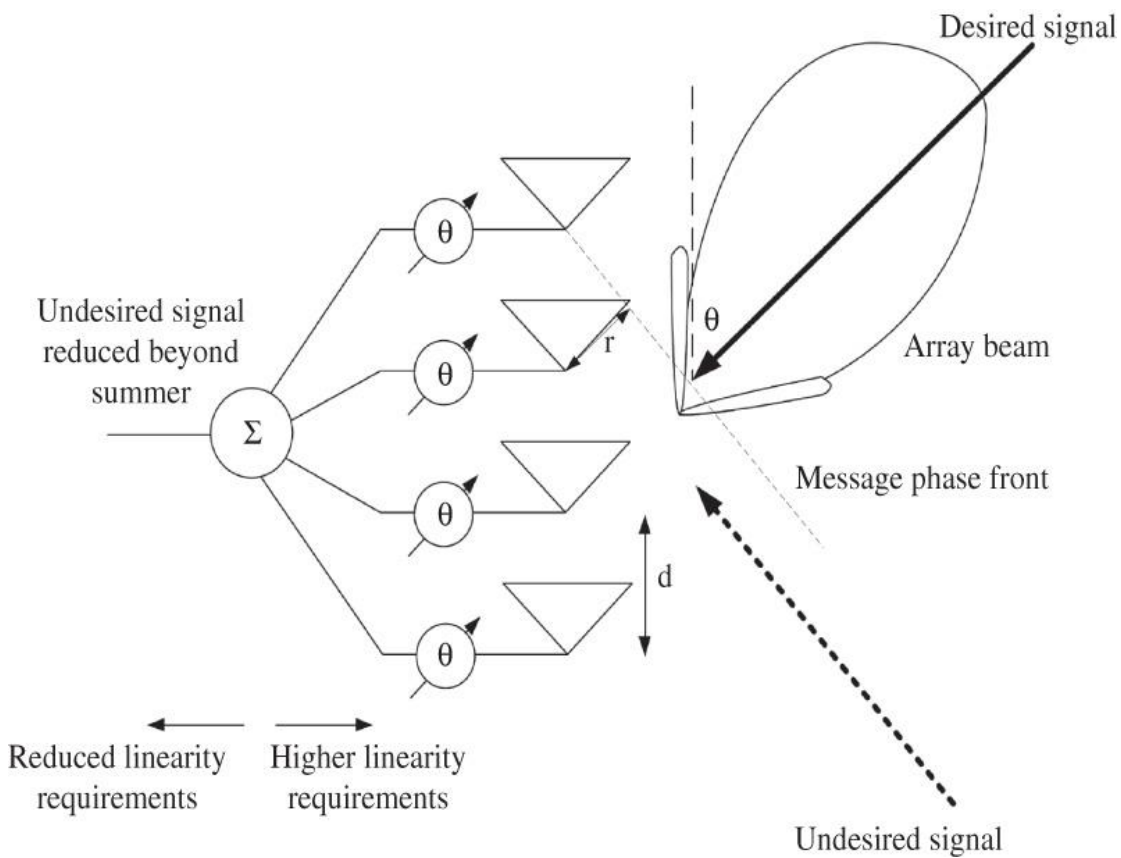
Επομένως, η ισχύς σήματος προς θόρυβο είναι:

$$SNR = \frac{P_{sig}}{P_{noise}} = \frac{(nM)^2}{2} \times \frac{1}{nN^2} = \frac{n}{2} \left(\frac{M^2}{N^2} \right) \quad (4.9)$$

Συνεπώς, ένα σύστημα με n στοιχεία, έχει πλεονέκτημα ως προς το λόγο σήματος προς θόρυβο n φορές σε σχέση με ένα σύστημα μεμονωμένου στοιχείου, όπου το n είναι μονάδα. Πέρα από τη βελτίωση της ευαισθησίας μέσω της βελτίωσης του SNR, μία συστοιχία κεραιών βελτιώνει την ανθεκτικότητα απέναντι σε ισχυρά ανεπιθύμητα σήματα που ενδέχεται να επηρεάσουν ή να αποκλείσουν το επιθυμητό σήμα, υπό την προϋπόθεση ότι το ανεπιθύμητο σήμα προσκρούει στη συστοιχία από διαφορετική κατεύθυνση από την κατεύθυνση της δέσμης. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 4.8 και μπορεί να θεωρηθεί ως μια μορφή χωρικού φιλτραρίσματος από τη συστοιχία. Μια συνέπεια αυτού του χωρικού φιλτραρίσματος είναι η μείωση των γραμμικών απαιτήσεων για τα εξαρτήματα του συστήματος. Αυτή η επίδραση του φιλτραρίσματος μπορεί να εξηγηθεί μαθηματικά αν θεωρούμε ένα επιθυμητό σήμα που φθάνει από τη

γωνία θ_1 και ένα ανεπιθύμητο σήμα που φθάνει από τη γωνία ψ . Ο χρόνος που απαιτείται από το μέτωπο φάσης του μηνύματος ώστε να καλύψει την επιπλέον απόσταση r μεταξύ των διάφορων στοιχείων, θα έχει ως αποτέλεσμα το σήμα να φτάσει στη νιοστή κεραία από την κορυφή, έχοντας τη μορφή:

$$s_n(t) = m\left(t + \frac{nd}{c} \cos\theta\right) \cos\left(\omega\left(t + \frac{nd}{c} \cos\theta\right)\right) + u\left(t + \frac{nd}{c} \cos\psi\right) \cos\left(\omega\left(t + \frac{nd}{c} \cos\psi\right)\right) \quad (4.10)$$



Σχήμα 4.8. Χωρικό φιλτράρισμα ως αποτέλεσμα της διαμόρφωσης δέσμης

όπου m είναι το επιθυμητό μήνυμα, d είναι η απόσταση μεταξύ των στοιχείων, c είναι η ταχύτητα του φωτός, ω είναι η συχνότητα του φέροντος και u είναι το ανεπιθύμητο σήμα. Υποθέτουμε ότι το εύρος ζώνης του σήματος μηνύματος είναι μικρό σε σύγκριση με τη συχνότητα φέροντος, ώστε να ισχύει $m\left(t + \frac{nd}{c} \cos\theta\right) \approx m(t)$. Κατόπιν, όταν μια

μετατόπιση φάσης $-\frac{nd}{c}\cos\theta$ εφαρμόζεται σε κάθε στοιχείο, το αθροισμένο σήμα είναι ίσο προς:

$$\sum s_n = nm(t) + 0 \quad (4.11)$$

όπου το ανεπιθύμητο σήμα είχε μη συνεκτική πρόσθεση και επομένως συνοψίζεται στο μηδέν. Εάν το σήμα μηνύματος δεν είναι στενής ζώνης συγκριτικά με τη φέρουσα συχνότητα, τότε θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα στοιχείο χρονικής καθυστέρησης αντί για έναν μετατοπιστή φάσης.

Η γενική προσέγγιση κατά το σχεδιασμό μιας συστοιχίας κεραιών, περιλαμβάνει την περιοδική συστοίχιση ενός σετ κεραιών σε μία ή δύο διαστάσεις, για την επίτευξη μικρότερου εύρους δέσμης και μεγαλύτερου κέρδους από αυτό που μπορεί να επιτύχει ένα οποιοδήποτε στοιχείο μόνο του. Προκειμένου να επιτευχθεί μια ευρεία γωνία κάλυψης, η δέσμη θα πρέπει να μπορεί να κατευθυνθεί είτε μηχανικά, είτε ηλεκτρονικά. Η μηχανική κατεύθυνση της δέσμης δεν είναι πρακτική σε ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον και ως εκ τούτου, η δεύτερη προσέγγιση, η οποία βασίζεται σε ηλεκτρονικό έλεγχο για την παροχή μιας προσαρμόσιμης δέσμης, είναι πολύ προτιμότερη (Fakharzadeh, Ahmadi, Biglarbegian, Shokouh, 2010).

Κεφάλαιο 5

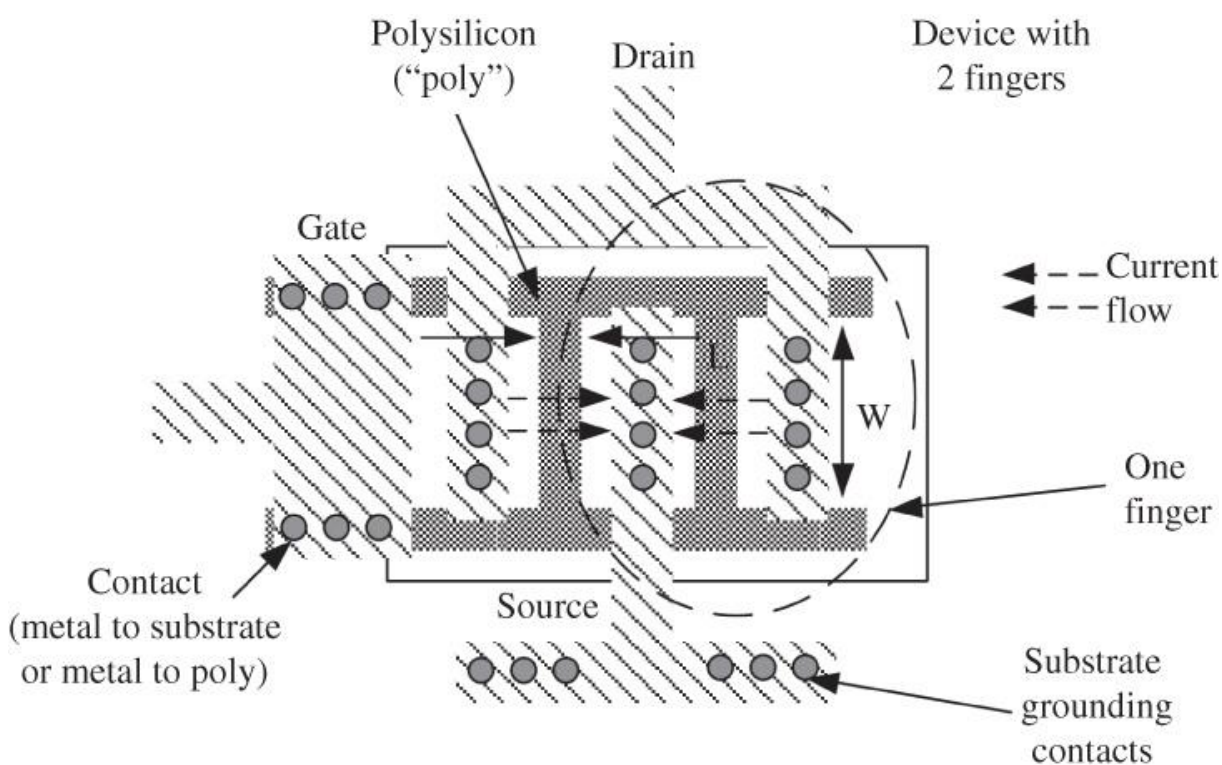
Χαρακτηριστικά Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων για Εφαρμογές mmWave

5.1 Βασικές Σχεδιαστικές Αρχές Τρανζίστορ για Εφαρμογές mmWave

Τα τρανζίστορ των συσκευών mmWave συνήθως αποτελούνται από πολλαπλά «δάχτυλα». Ένα δάχτυλο αντιπροσωπεύει ένα τμήμα του πλάτους W του τρανζίστορ, ενώ το συνολικό πλάτος του τρανζίστορ σχηματίζεται με την προσθήκη αυτών των πολλαπλών δακτύλων, δηλαδή πλήθος μεμονωμένων τρανζίστορ κατασκευάζονται παράλληλα κατά μήκος της σύνδεσης, προκειμένου να σχηματιστεί ένα ενιαίο τρανζίστορ. Η ύπαρξη πλήθους δακτύλων σε παραλληλία προσφέρει μικρότερη αντίσταση και επομένως δυνατότητα μεταφοράς μεγαλύτερης ποσότητας ρεύματος (Streetman, Banerjee, 2005).

Η διάταξη των περισσότερων RF mmWave τρανζίστορ, τα οποία αποτελούνται από πολλαπλά δάχτυλα με μεγάλες αναλογίες διαστάσεων (W/L) και ελάχιστο μέγεθος πύλης, απαιτεί μοντελοποίηση τέτοια που να δίνει ακριβείς τιμές για την αντίσταση πύλης και τις short-channel επιδράσεις. Η λειτουργία κοντά στη συχνότητα διέλευσης f_T των τρανζίστορ, απαιτεί τη μοντελοποίηση της μετάβασης μακριά από τα quasi-static μοντέλα, έτσι ώστε όλες οι αλλαγές στο ρεύμα του καναλιού να ακολουθούν ακαριαία τη μεταβολή της τάσης πύλης. Τα DC μη γραμμικά χαρακτηριστικά μπορεί να προκαλέσουν μη γραμμικές επιδράσεις σε υψηλότερες συχνότητες. Τα σχεδιαστικά

μοντέλα πρέπει επίσης να συλλαμβάνουν με ακρίβεια τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά των μεγάλων σημάτων των τρανζίστορ, ειδικά για χρήση σε μη γραμμικά στοιχεία όπως οι ενισχυτές ισχύος και οι ταλαντωτές ελεγχόμενοι από τάση (Voltage Controlled Oscillators, VCOs). Σημαντικές είναι επίσης οι παρασιτικές χωρητικότητες που παρεμποδίζουν την αποδοτική λειτουργία, προσθετικά με τον πεπερασμένο χρόνο που απαιτείται από το κανάλι ώστε να ανταποκριθεί στις μεταβολές της τάσης πύλης. Επίσης μπορεί να προστεθεί ένα δίκτυο υποστρώματος, έτσι ώστε η ωφέλιμη ενέργεια να μπορεί να διαχυθεί στο υπόστρωμα του τρανζίστορ και οι τάσεις στους τέσσερις ακροδέκτες του τρανζίστορ (πηγή, διαρροή, πύλη, και σώμα) να είναι σε θέση να προκαλέσει τη φόρτιση άλλων ακροδεκτών μέσω των χωρητικότητων του υποστρώματος (Sze, Ng, 2007).

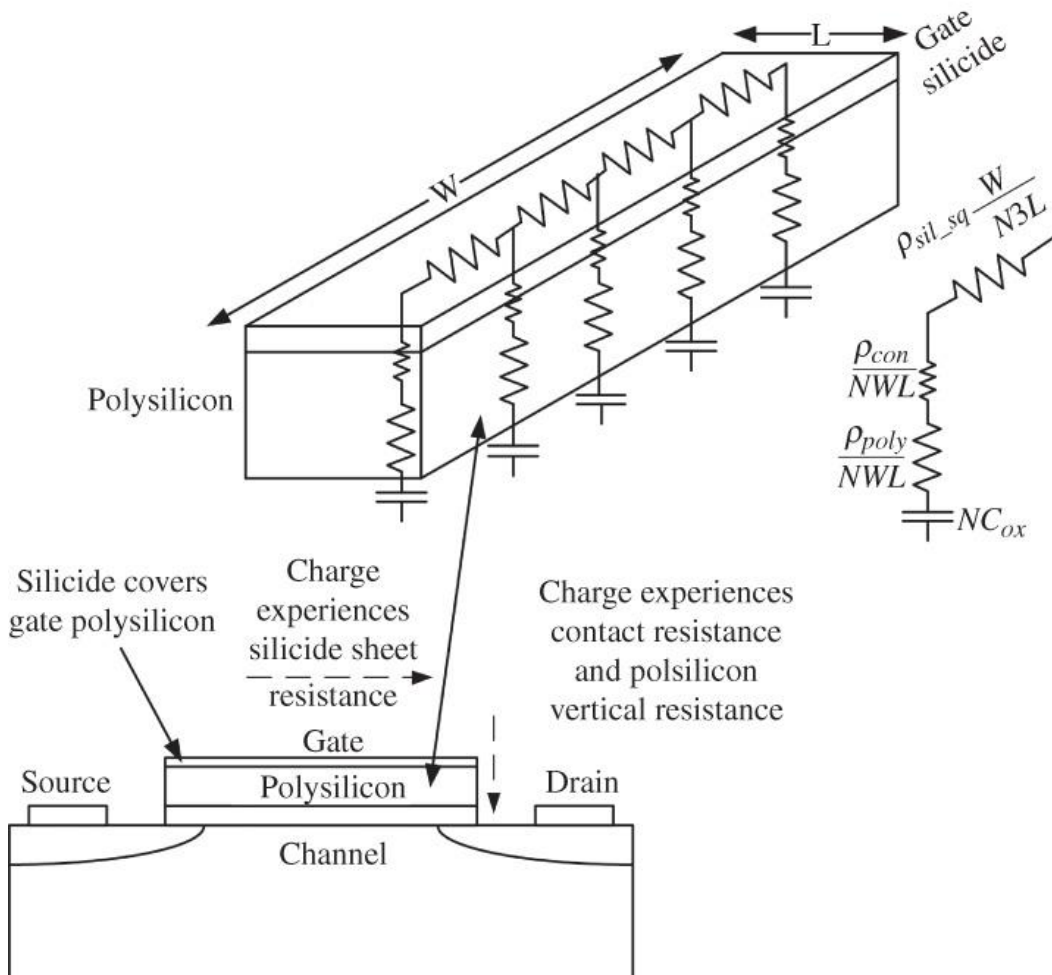


Σχήμα 5.1. Απεικόνιση τρανζίστορ με δύο δάχτυλα

Η διάταξη μιας συσκευής έχει σημαντική επίδραση στην **αντίσταση πύλης**, η οποία αποτελεί μια σημαντική παράμετρο, δεδομένου ότι μια μεγάλη αντίσταση πύλης περιορίζει ισχυρά την απολαβή ισχύος που μπορεί να επιτύχει το τρανζίστορ. Η αντίσταση πύλης δίνεται κατά προσέγγιση:

$$R_g = \frac{1}{N_f} \left(\frac{\rho_{sil_{sq}} W_f}{3N_{gate\ con}^2 L} + \frac{(\rho_{con} + \rho_{poly})}{W_f L} \right) \quad (5.1)$$

όπου N_f είναι ο αριθμός των δακτύλων, W_f είναι το πλάτος κάθε δακτύλου, L είναι το μήκος της πύλης, $N_{gate\ con}$ είναι ο αριθμός των επαφών της πύλης, $\rho_{sil_{sq}}$ είναι η αντίσταση φύλλου (sheet resistance) του πυριτιούχου (περίπου 4 Ω/sq), η οποία επικαλύπτει την πύλη πολυπυριτίου, ρ_{con} είναι η αντίσταση επαφής μεταξύ του πυριτιούχου και του πολυπυριτίου και ρ_{poly} είναι η κατακόρυφη αντίσταση πολυπυριτίου, δηλαδή η αντίσταση που συναντούν τα φορτία καθώς κινούνται κατακόρυφα προς τα κάτω μέσα από την πύλη.



Σχήμα 5.2. Απεικόνιση της αντίστασης πύλης ενός τρανζίστορ

Κατά το σχεδιασμό εφαρμογών υψηλών συχνοτήτων, η ελαχιστοποίηση της αντίστασης πύλης είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Εκτός από την αντίσταση πύλης, υπάρχουν επίσης αντιστάσεις που σχετίζονται με κάθε μία από τις επαφές, συμπεριλαμβανομένων των αντιστάσεων στην πύλη και την πηγή και συχνά, αυτές είναι οι αντιστάσεις που κυριαρχούν στο εξωτερικό τμήμα των τρανζίστορ. Η μείωση της αντίστασης επαφής είναι απαραίτητη στις εφαρμογές στη συχνοτική περιοχή των mmWave. Η παρασιτική εξωγενής αντίσταση πύλης μπορεί να αντιμετωπιστεί με σωστή επιλογή του αριθμού των δακτύλων και των επαφών πύλης. Η κακή διάταξη μιας συσκευής μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην απόδοσή της, αυξάνοντας εκτός από την αντίσταση πύλης και τις παρασιτικές αντιστάσεις και χωρητικότητες. Επιδράσεις τέτοιου είδους θα μπορούσαν να αγνοηθούν σε χαμηλότερες συχνότητες λειτουργίας λόγω του ηλεκτρικού μεγέθους των στοιχείων, αλλά σε συχνότητες mmWave η ιδιαιτερότητα των διατάξεων, συμπεριλαμβανομένης της κατάλληλης τοποθέτησης των διασυνδέσεων, μπορεί να έχει σημαντική επίδραση και πρέπει να περιλαμβάνεται στο σχεδιαστικό μοντέλο.

Οι **επιδράσεις short-channel** αναφέρονται στις αλλαγές των παραμέτρων των τρανζίστορ με πολύ μικρό μήκος πύλης, αρκετά μικρότερο από 1 μm . Δύο από τις κύριες επιδράσεις των πολύ μικρών μηκών πύλης περιλαμβάνουν τη μείωση της τάσης κατωφλίου V_t , γνωστής και ως επίδρασης short channel, η οποία καθιστά πιο δύσκολη την απενεργοποίηση του τρανζίστορ, καθώς ακόμη και πολύ μικρές τάσεις πύλης μπορεί να οδηγήσουν σε φορτίσεις εντός του καναλιού και τη φτωχή απομόνωση μεταξύ της τάσης διαρροής και του καναλιού, όταν δηλαδή η τάση απαγωγού και όχι η τάση πύλης είναι αυτή που καθορίζει αν φόρτιση θα είναι παρούσα στο κανάλι. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται drain induced barrier lowering (DIBL) και κατά την ανάπτυξη των τρανζίστορ ο σχεδιασμός συχνά επικεντρώνεται στην επίτευξη του σωστού επιπέδου ενίσχυσης του καναλιού του τρανζίστορ, ώστε να αποφευχθούν αυτές οι επιδράσεις. Η βασική σχεδιαστική προσέγγιση επικεντρώνεται στην αύξηση των επιπέδων συγκέντρωσης ενίσχυσης, έτσι ώστε να μειωθεί το μέγεθος της περιοχής του ημιαγωγικού καναλιού, η συγκέντρωση φόρτισης του οποίου καθορίζεται από τον απαγωγό. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η μείωση του μήκους του καναλιού μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της τάσης κατωφλίου, φαινόμενο γνωστό ως αντίστροφη επίδραση short-channel.

Η λειτουργία των τρανζίστορ κοντά στη **συχνότητα διέλευσης** (transit frequency) είναι σημαντική, διότι η συχνότητα διέλευσης καθορίζει τις περιοχές λειτουργίας όπου ένα MOSFET μπορεί να επιτύχει σημαντική αύξηση και συχνά υποδηλώνει το είδος των παρασιτικών συνιστωσών (για παράδειγμα ανεπιθύμητες χωρητικότητες) που δρουν εντός των τρανζίστορ.

Η **λειτουργία μεγάλης κλίμακας** αναφέρεται στο γεγονός ότι ένα γραμμικό μοντέλο, βασισμένο σε παραμέτρους όπως η διαγωγιμότητα, εμφανίζει χαμηλή αποδοτικότητα όταν το σήμα εισόδου παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις πλάτους. Το βασικό μοντέλο διαγωγιμότητας για τρανζίστορ που λειτουργούν μεταξύ των περιοχών μικρών σημάτων και μεγάλων σημάτων, υποθέτει ότι υπάρχουν μόνο τρεις βασικοί τρόποι λειτουργίας: ο γραμμικός (γνωστός και ως τρίοδος), ο κορεσμός και η αποκοπή (όταν η τάση πύλης δεν επαρκεί για να γεμίσει το κανάλι με φορτία). Το απλοποιημένο μοντέλο υποθέτει επίσης ότι ο τρόπος λειτουργίας εξαρτάται μόνο από την τάση μεταξύ πύλης και πηγής ομοίως με την τάση κατωφλίου V_t και την τάση μεταξύ απαγωγού και πηγής.

Οι δύο σημαντικότερες **παρασιτικές χωρητικότητες** που πρέπει να περιλαμβάνονται στο μοντέλο διαγωγιμότητας είναι η χωρητικότητα πύλης-πηγής και η χωρητικότητα πύλης-απαγωγού. Οι χωρητικότητες αυτές θα πρέπει να παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα, διατηρώντας τμήματα του ηλεκτροδίου της πύλης μακριά από ενεργά τρανζίστορ. Η χωρητικότητα πύλης-πηγής αυξάνεται με τον αριθμό των δακτύλων, ενώ η αντίσταση πύλης μειώνεται, οπότε θα πρέπει να επιτευχθεί ένας συμβιβασμός για την επιθυμητή τιμή αντίστασης πύλης και χωρητικότητας πύλης-πηγής. Η αύξηση της χωρητικότητας πύλης-πηγής μειώνει τη συχνότητα διέλευσης, ενώ η αύξηση της αντίστασης πύλης μειώνει τη μέγιστη συχνότητα ταλάντωσης. Η χωρητικότητα πύλης-απαγωγού είναι επίσης σημαντικότερη για τις συχνότητες mmWave συγκριτικά με άλλες συχνότητες και μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με χρήση τεχνικών συντονισμού, δηλαδή με χρήση επαγωγικών πηνίων.

Το **δίκτυο υποστρώματος** (substrate network) ευθύνεται για την απώλεια που προκαλείται από τα ρεύματα που διεγείρονται εντός του υποστρώματος μέσω χωρητικών συζεύξεων με τη συσκευή. Συχνά προκρίνεται η υλοποίηση σύνθετων δικτύων αντιστάσεων έναντι ενός μονού ή διπλού δικτύου, ώστε να εξισορροπηθεί η απώλεια του υποστρώματος. Οποιαδήποτε αντίσταση μεταξύ της πηγής και

υποστρώματος κλιμακώνεται αντίστροφα με το πλάτος των δαχτύλων και τον αριθμό των επαφών.

Οι **επιδράσεις non-quasi static** οφείλονται στον πεπερασμένο χρόνο που απαιτείται από μια τάση ή ρεύμα σε έναν κόμβο ενός μοντέλου κυκλώματος ώστε να οδηγήσει σε μια αλλαγή σε ένα άλλο σημείο του μοντέλου. Η αντίσταση πύλης μπορεί να αποτελέσει αιτία εμφάνισης των επιδράσεων non-quasi static, καθώς προσθέτει μια χρονική RC σταθερά στο πόσο γρήγορα το κανάλι μπορεί να ανταποκριθεί σε μια αλλαγή της τάσης πύλης. Η μη ακαριαία απόκριση του καναλιού μπορεί να εξισορροπηθεί με την προσθήκη ενός παράγοντα καθυστέρησης φάσης $e^{-j\omega t}$ στην έκφρασή τους για τη διαγωγιμότητα καναλιού.

5.2 Γραμμές Μεταφοράς και Παθητικά Στοιχεία

Οι γραμμές μεταφοράς και τα παθητικά στοιχεία είναι απαραίτητα για τη μεταφορά των σημάτων και για να ενεργούν ως συνιστώσες αντίδρασης προς τους συντονιστές, ενώ μπορούν να λειτουργήσουν και ως μετασχηματιστές. Αν και διαθέτουν μεγαλύτερες διαστάσεις από τα πηνία, μπορούν να υλοποιηθούν ευκολότερα και ταχύτερα και έτσι δύνανται να βελτιώσουν το ποσοστό επιτυχίας της πρώτης διέλευσης των επαγωγικών αντιδραστικών στοιχείων. Ένας από τους σημαντικότερους σχεδιαστικούς παράγοντες των γραμμών μεταφοράς είναι ο συντελεστής ποιότητας (quality factor) της γραμμής.

Κάθε γραμμή μεταφοράς χαρακτηρίζεται από δύο βασικές παραμέτρους: τη χαρακτηριστική της αντίσταση και τη σταθερά διάδοσής της. Η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση Z_0 μιας γραμμής μεταφοράς καθορίζει το λόγο της τάσης προς το ρεύμα στη γραμμή και είναι μία σημαντική παράμετρος για τον προσδιορισμό της σύζευξης της γραμμής με άλλα κυκλώματα. Η σταθερά διάδοσης α , καθορίζει την απώλεια στη γραμμή, αλλά και το απαιτούμενο μήκος της γραμμής ώστε να επιτευχθεί μια δεδομένη σύνθετη αντίσταση εισόδου. Αυτές οι δύο βασικές παράμετροι είναι συναρτήσεις των ιδιοτήτων των ημιαγωγών και του φυσικού μεγέθους των γραμμών μεταφοράς (Hasani, Kamarei, Ndagijimana, 2007).

Μια βασική γραμμή μεταφοράς απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3, με τις ιδιότητές της να προκύπτουν ως αποτέλεσμα της φύσης των απειροελάχιστων κυττάρων που

βρίσκονται σε αλληλουχία ώστε να σχηματιστεί η γραμμή μεταφοράς. Οι βασικές εξισώσεις που συσχετίζουν την τάση και το ρεύμα στη γραμμή με τη θέση της γραμμής l και τη σταθερά διάδοσης και τη χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση με την επαγωγή και τη χωρητικότητα, είναι οι εξής:

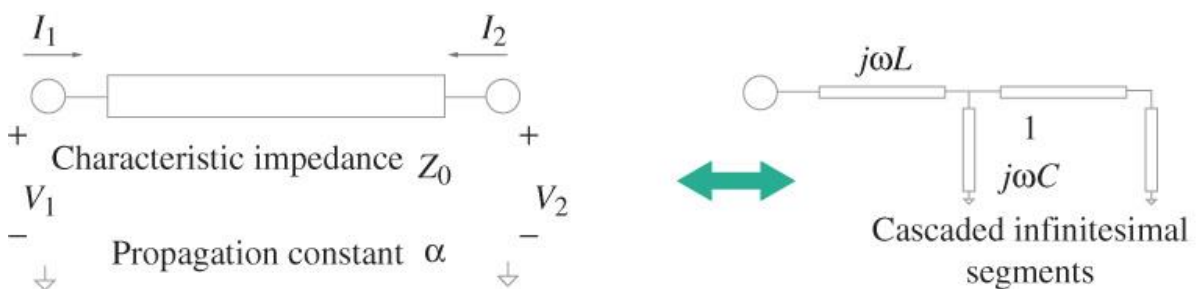
$$I(l) = \frac{V^+}{Z_0} e^{-j\omega\sqrt{LC}l} - \frac{V^-}{Z_0} e^{j\omega\sqrt{LC}l} \quad (5.2)$$

$$V(l) = V^+ e^{-j\omega\sqrt{LC}l} + V^- e^{j\omega\sqrt{LC}l} \quad (5.3)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5.4)$$

$$a = \omega\sqrt{LC} \quad (5.5)$$

όπου V^+ και V^- είναι δύο παράμετροι που καθορίζουν τις τιμές των προς τα εμπρός και προς τα πίσω κυμάτων διάδοσης τάσης, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.2. Απεικόνιση μιας βασικής γραμμής μεταφοράς

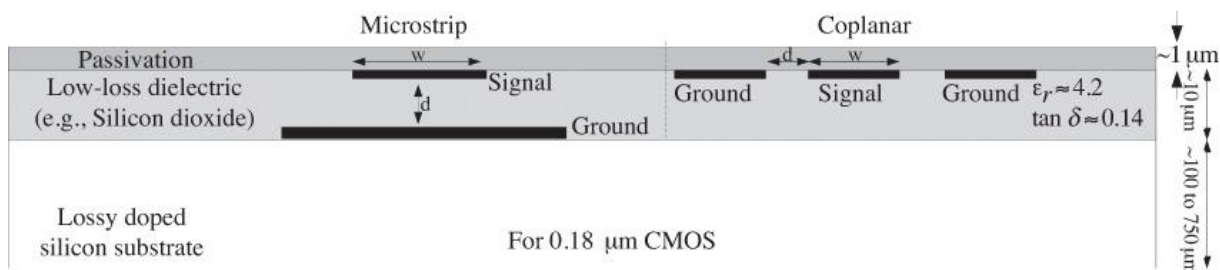
Δύο επίσης χρήσιμες σχέσεις είναι η σύνθετη αντίσταση εισόδου της γραμμής για ένα δεδομένο φορτίο και ο πίνακας matrix που συσχετίζει τις τάσεις και τα ρεύματα με τα δύο άκρα της γραμμής:

$$Z_{in} = \frac{Z_0(Z_L + jZ_0 \tan(al))}{Z_0 + jZ_L \tan(al)} \quad (5.6)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -jZ_0 \cos(al) & Z_0 \tan(al) \\ Z_0 \tan(al) & -jZ_0 \cos(al) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Η τοπολογία των γραμμών μεταφοράς έχει μεγάλο αντίκτυπο στα χαρακτηριστικά και στις επιδόσεις τους. Για παράδειγμα, εφαρμόζονται κωνικοί (tapered) σχεδιασμοί γραμμών μεταφοράς προκειμένου να επιτευχθεί βελτιωμένος συντελεστής ποιότητας, για εφαρμογές με χρήση συντονιστών. Δύο κοινές τοπολογίες με τυποποιημένες

φόρμουλες σχεδιασμού είναι οι μικροταινίες (microstrip) και οι συνεπίεδοι κυματοδηγοί (Co-Planar Waveguide, CPW) που απεικονίζονται στο Σχήμα 5.4. Γενικά, οι γραμμές μεταφοράς CPW προσφέρουν υψηλότερους συντελεστές επαγωγικής ποιότητας από τις γραμμές microstrip και έτσι συχνά προτιμούνται για εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλός επαγωγικός συντελεστής ποιότητας, όπως για παράδειγμα στο σχεδιασμό ενισχυτών.

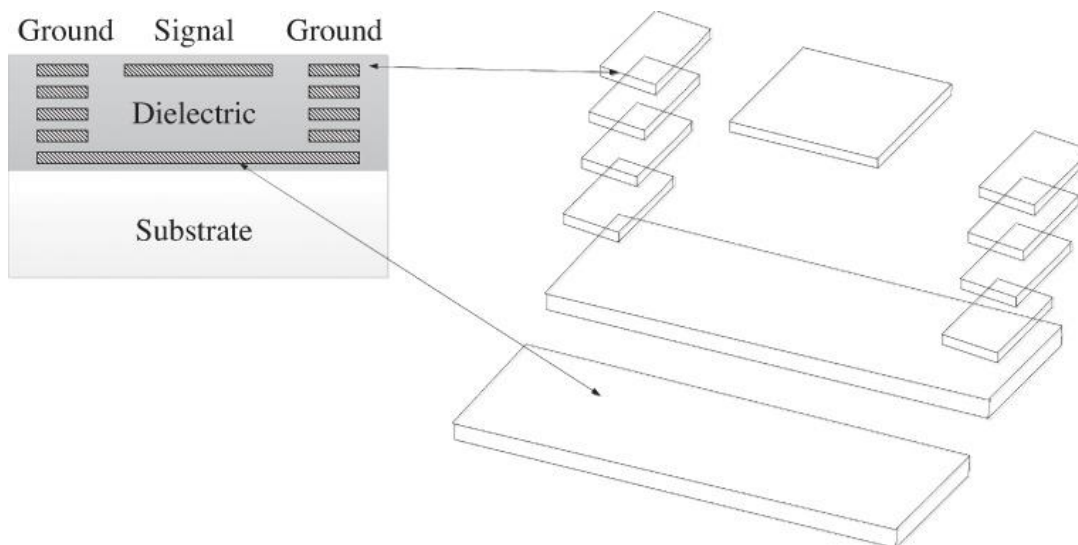


Σχήμα 5.4. Οι δύο πιο κοινές τοπολογίες γραμμών μεταφοράς, οι microstrip και οι CPW

Υπάρχουν πολλά ζητήματα κατά το σχεδιασμό γραμμών μεταφοράς και ένα από τα πιο σημαντικά είναι η διαδρομή επιστροφής του ρεύματος γείωσης. Οι γραμμές μεταφοράς έχουν το πλεονέκτημα ότι οι διαδρομές επιστροφής της γείωσής τους ορίζονται ρητά. Η διαδρομή επιστροφής της γείωσης θα πρέπει να κατασκευαστεί έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται ο βαθμός κατά τον οποίο τα ρεύματα επιστροφής της γείωσης επάγουν απώλειες ρευμάτων στο υπόστρωμα, διατηρώντας για παράδειγμα τη γείωση όσο το δυνατόν πιο μακριά από το υπόστρωμα.

Οι τοπολογίες των γραμμών μεταφοράς για συσκευές mmWave ποικίλλουν σημαντικά. Για παράδειγμα, υπάρχουν διάφορα είδη CPW γραμμών μεταφοράς. Οι δύο πιο δημοφιλείς CPW σχεδιασμοί περιλαμβάνουν τις θωρακισμένες (shielded) και μη θωρακισμένες (non-shielded) γραμμές. Οι θωρακισμένες γραμμές που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5, έχουν μια συστοιχία από ταινίες μεταξύ της γραμμής και του υποστρώματος, σε ένα κατώτερο στρώμα μετάλλου και μπορούν να προσφέρουν συντελεστές ποιότητας τρεις φορές υψηλότερους από τις αθωράκιστες γραμμές, αλλά παρουσιάζουν μεγαλύτερη μεταβλητότητα στην απόδοση. Επίσης, στο Σχήμα 5.5 φαίνεται η χρήση πολλαπλών μεταλλικών στρωμάτων για τον σχηματισμό των ιχνών γείωσης για τη CPW. Αυτά τα ίχνη βοηθούν στη συγκράτηση των ηλεκτρικών και

μαγνητικών πεδίων μέσα στα όρια των γραμμών μεταφοράς (Varonen, Karkkainen, Kantanen, Halonen, 2008).



Σχήμα 5.5. Απεικόνιση των θωρακισμένων γραμμών μεταφοράς

Οι γραμμές μικροταινίας αποτελούν μια λιγότερο δημοφιλή επιλογή σχεδιασμού κατά τις υλοποιήσεις CMOS mmWave συστημάτων. Η μελέτη της συμπεριφοράς της συχνότητας των γραμμών μεταφοράς μικροταινίας, φανέρωσε τα ακόλουθα: η χωρητικότητα της γραμμής ως προς τη γείωση έχει πολύ μικρή εξάρτηση από τη συχνότητα και αυξάνει σχεδόν γραμμικά με το πλάτος της γραμμής σήματος. Η επαγωγή μεταξύ των δύο άκρων της γραμμής εξαρτάται από τη συχνότητα μόνο κοντά DC, ενώ πέρα από αυτό δείχνει μια πτωτική τάση με την αύξηση του πλάτους της γραμμής. Η αγωγιμότητα ως προς τη γείωση αυξάνει σχεδόν γραμμικά με τη συχνότητα και το πλάτος της γραμμής. Η αντίσταση αυξάνει με τη συχνότητα και μειώνεται με το πλάτος της γραμμής.

Η ποιότητα σχεδιασμού της γείωσης σε ένα chip είναι εξαιρετικά σημαντική, ώστε να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση των απωλειών στις γραμμές μεταφοράς. Η καλή γείωση δρα επίσης αποτρεπτικά στην εμφάνιση επιζήμιου θορύβου και παραμορφώσεων. Όλες οι αναλογικές γειώσεις θα πρέπει να έχουν ίδια τάση. Αυτό επηρεάζει το σχεδιασμό των γραμμών CPW, ενθαρρύνοντας τη συγχώνευση των ιχνών γείωσης κοντινών γραμμών μεταφοράς σε ένα ενιαίο επίπεδο. Ένα βήμα προς την παραγωγή των μεταλλικών στρωμάτων σε έναν σχεδιασμό CMOS είναι η χημική μηχανική στίλβωση (Chemical Mechanical Polishing, CMP), όπου τα μεταλλικά επίπεδα στιλβώνονται με χημικά. Για να

είναι δυνατή η CMP, κανένα κομμάτι γειτονικού μετάλλου δεν μπορεί να είναι πολύ μεγάλο και ως εκ τούτου, θα πρέπει να προστίθενται περιστασιακά μεταλλικές τρύπες. Μια άλλη σχεδιαστική προσέγγιση είναι η χρήση διπλών επιπέδων γείωσης (dual ground plane), για τις περιπτώσεις στις οποίες δύο υποσυστήματα ενός κυκλώματος μοιράζονται κάποια εξαρτήματα, ενώ λειτουργούν χρησιμοποιώντας διαφορετικά τροφοδοτικά. Μια άλλη περίπτωση όπου είναι απαραίτητα τα ξεχωριστά επίπεδα γείωσης, είναι όταν ένα υποσύστημα απαιτεί ένα μη θορυβώδες επίπεδο γείωσης, ενώ ένα άλλο υποσύστημα χαρακτηρίζεται από πολλές γρήγορες μεταγωγές (switching) ή άλλες διεργασίες που μπορεί να προκαλέσουν τη διάδοση θορυβωδών σημάτων στο επίπεδο της γείωσης.

5.3 Μετατροπείς Αναλογικού Σήματος σε Ψηφιακό

Οι σχεδιαστικές τάσεις των μετατροπέων αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (Analog to Digital Converters, ADCs) για εφαρμογές mmWave, στοχεύουν στην αύξηση του δυναμικού εύρους και κατά συνέπεια στην αύξηση του αριθμού των bits και του SNR, με παράλληλη αύξηση της ταχύτητας δειγματοληψίας και στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Η ταυτόχρονη επίτευξη και των δύο αυτών στόχων είναι αδύνατη, καθώς περιλαμβάνει το κλασικό tradeoff μεταξύ ισχύος και εύρους ζώνης. Επιπλέον, δύο κύριες σχεδιαστικές τάσεις για την ισχύ των ADCs, περιλαμβάνουν την τάση για αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας προκειμένου να ξεπεραστεί η αδυναμία των sub-micron τεχνολογιών να επιτύχουν καλύτερη απόδοση και η τάση για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη ταχύτητα δειγματοληψίας στους επιμέρους ADCs σε συστήματα on-a-chip (Uyttenhove, Steyaert, 2002).

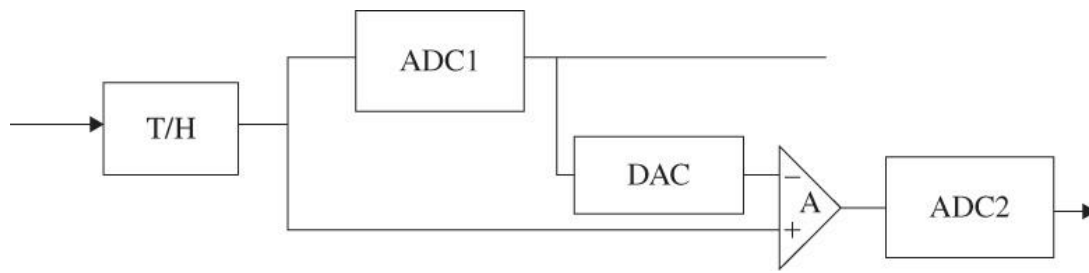
Ο υψηλός ρυθμός δεδομένων και χρονισμού που απαιτείται στα συστήματα mmWave, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των σχεδιαστικών προκλήσεων εξαιτίας της χρονικής απόκλισης (skew rate) του ρολογιού, που προκαλείται από τις διαφορές μεταξύ του ρολογιού και των χρόνων διάδοσης δεδομένων. Όσο ο ρυθμός δεδομένων αυξάνει, μία βασική μεθοδολογία για μείωση της ασυμμετρίας είναι η χρησιμοποίηση προενισχυτών υψηλότερης ισχύος και κωνικών απομονωτών εισόδου, που θα έχουν επίσης ως αποτέλεσμα την αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας.

Η αυξημένη εξάρτηση από συγκριτές σε αντίθεση με τελεστικούς ενισχυτές και η ανάγκη για υψηλούς ρυθμούς δειγματοληψίας σε εφαρμογές όπως WPANs, έχουν αυξήσει τη δημοτικότητα των σχεδιαστικών μοντέλων βασισμένων σε συγκριτές, όπως ADCs διαδοχικής προσέγγισης (successive approximation ADCs), pipeline ADCs και sub-ranging ADCs. Για τα κυκλώματα mmWave πρώτης γενιάς, η ανάγκη για υψηλή ταχύτητα σε συνδυασμό με τις χαμηλότερες φασματικές αναλύσεις που απαιτούνται, καθιστούν τους flash ADCs ελκυστικούς, καθώς αυτοί θεωρούνται ως οι πιο γρήγοροι ADCs (Shahramian, Voinigescu, Carusone, 2009).

Το δυναμικό εύρος και το SNR που μπορεί να επιτευχθεί συνοψίζονται με την εξίσωση που δίνει το δυναμικό εύρος ενός διαφορικού κυκλώματος δειγματοληψίας και συγκράτησης: $SNR = \frac{CV_{pp}}{4kT}$, όπου V_{pp} είναι η από κορυφή σε κορυφή (peak-to-peak) τάση του δειγματοληφθέντος σήματος. Όταν οι τάσεις τροφοδοσίας μειώνονται, η peak-to-peak τάση των δειγματοληφθέντων σημάτων πρέπει επίσης να μειωθεί, έτσι ώστε τα τρανζίστορ να μην εισέλθουν στη γραμμική περιοχή λειτουργίας. Το SNR μπορεί να διατηρηθεί σε υψηλά επίπεδα αν η χωρητικότητα δειγματοληψίας αυξηθεί, αλλά αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ρυθμού δειγματοληψίας.

5.3.1 Pipeline ADC

Η αρχή λειτουργίας ενός pipeline ADC απεικονίζεται στο Σχήμα 5.6. Στην είσοδο του ADC χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα track-and-hold (T/H) για τη δειγματοληψία του σήματος εισόδου. Κάθε sub-ADC έχει χαμηλότερη ανάλυση από το συνολικό ADC. Ο πρώτος ADC παρέχει στην έξοδό του τα πιο σημαντικά bits (Most Significant Bits, MSBs). Οι ADCs που ακολουθούν, λαμβάνουν ένα ενισχυμένο υπόλοιπο, τέτοιο ώστε να με χρήση ανάλυσης πορείας να δημιουργηθούν τα λιγότερο σημαντικά bits (Least Significant Bits, LSBs) του αρχικού σήματος. Αυτός ο σχεδιασμός δεν συνδέεται αποκλειστικά με μια συγκεκριμένη αρχιτεκτονική ADC. Κάθε sub-ADC μπορεί να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας για παράδειγμα flash ADC ή successive approximation ADC. Ο αριθμός των bits του πρώτου ADC θα πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά, έτσι ώστε οι απαιτήσεις για τα ενδιάμεσα DAC να είναι ρεαλιστικές.

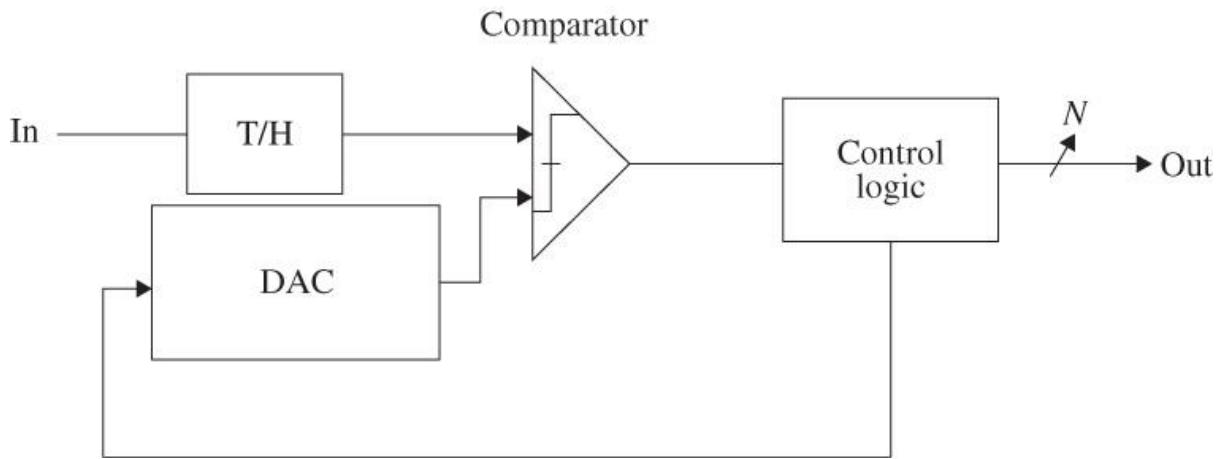


Σχήμα 5.6. Απεικόνιση ενός pipeline ADC

5.3.2 Successive Approximation ADCs

Οι successive approximation (SA) ADCs προσφέρουν τα πλεονεκτήματα της υψηλής απόδοσης ισχύος και του χαμηλού αριθμού απαιτούμενων συγκριτών. Οι μεμονωμένοι SA ADCs δεν συγκαταλέγονται μεταξύ των ταχύτερων αρχιτεκτονικών και ως εκ τούτου, δεν είναι πιθανό να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές mmWave στο εγγύς μέλλον. Αν όμως ενσωματωθούν σε μία time-interleaved αρχιτεκτονική, μπορεί να είναι δυνατή η χρήση SA ADCs στα συστήματα mmWave. Υπάρχουν τρεις τεχνικές για να καταστεί η SA αρχιτεκτονική προσέγγιση χρήσιμη για το σχεδιασμό συστημάτων υψηλών ταχυτήτων: η τεχνική SA pipelining, όπου κάθε υπο-κανάλι χρησιμοποιεί ένα ζεύγος pipelined SA ADC, η τεχνική single-sided overrange και η τεχνική look-ahead logic. Η τεχνική overranging μειώνει την ποσότητα του χρόνου που πρέπει να διατεθεί για τη διευθέτηση χρόνου του DAC σε κάθε κύκλο ρολογιού και μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την ουσιαστική μείωση της ισχύος ανά μετατροπή. Η τεχνική look-ahead logic είναι ένα απλό μέσο για τη μείωση της συμφόρησης (bottleneck) που αντιπροσωπεύεται από τη λογική ψηφιακού ελέγχου στο σχεδιασμό SA.

Η βασική λειτουργία της SA ADC προσέγγισης απεικονίζεται στο Σχήμα 5.7. Η λειτουργία είναι παρόμοια με μία δυαδική αναζήτηση μέσα από μια ταξινομημένη λίστα. Η είσοδος ελέγχει το επίπεδο εξόδου του DAC, η οποία συγκρίνεται με το σήμα εισόδου. Κάθε επανάληψη του βρόχου χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει ένα bit της εξόδου και η τιμή εξόδου του συγκριτή χρησιμοποιείται από τη λογική ελέγχου για τον καθορισμό της επόμενης εξόδου του DAC. Για ένα N-bit ADC, πρέπει να ολοκληρωθούν N επαναλήψεις του βρόχου εντός της περιόδου του δείγματος.



Σχήμα 5.7. Απεικόνιση ενός *successive approximation DAC*

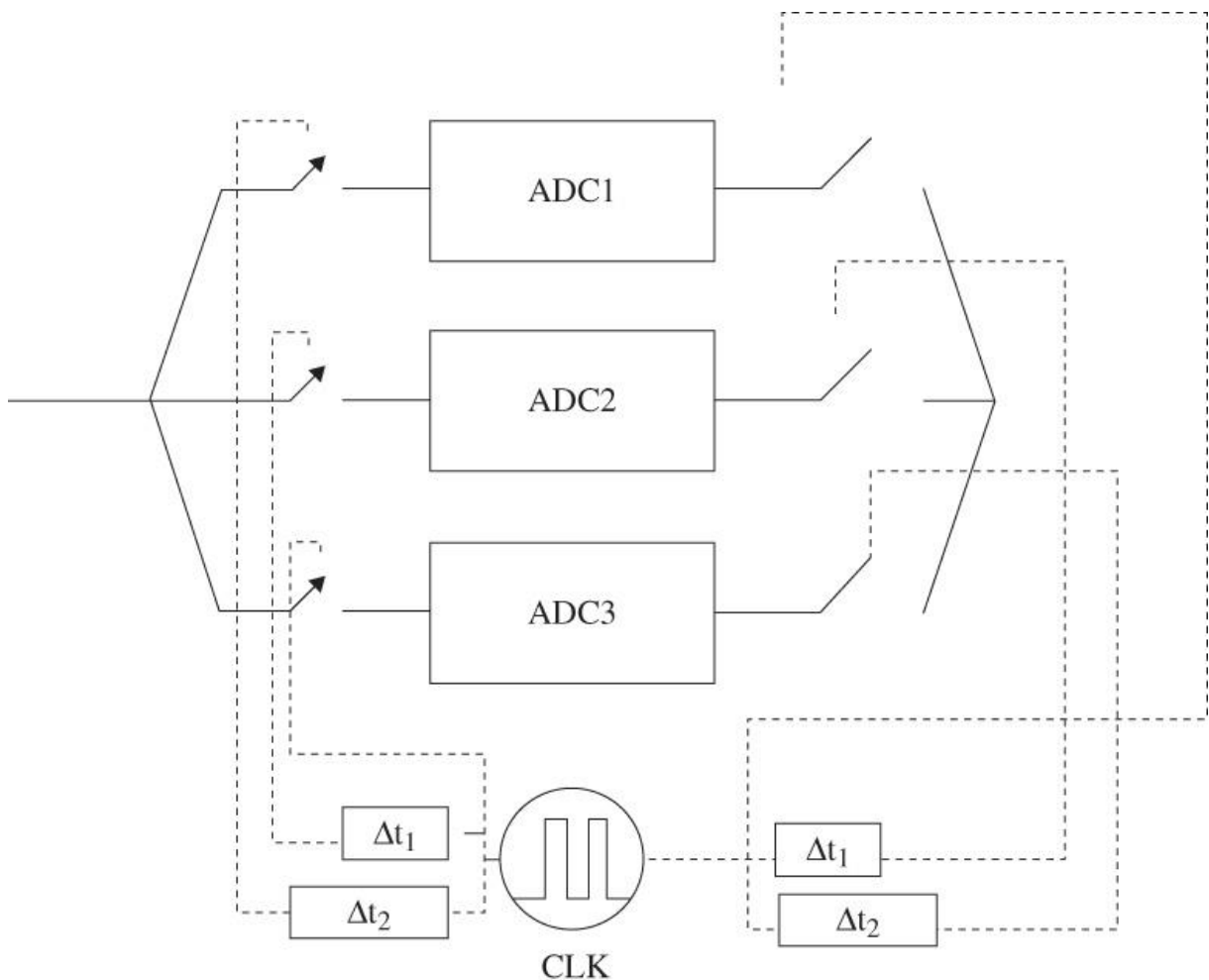
Ο DAC που χρησιμοποιείται στην SA προσέγγιση, είναι ένα ζωτικής σημασίας συστατικό για έναν SA ADC. Η αύξηση του ρυθμού δειγματοληψίας των SA ADCs βελτιώνει την χρησιμότητά τους για υλοποιήσεις συστημάτων mmWave. Ένας τρόπος για να γίνουν οι SA ADCs πιο γρήγοροι, είναι μέσω της ασύγχρονης λειτουργίας, όπου η διευθέτηση χρόνου για κάθε δειγματοληφθέν bit ορίζεται σε διαφορετική τιμή, με βάση τη σημασία των bits, ώστε να αυξηθεί η ταχύτητα λειτουργίας.

5.3.3 Time-Interleaved ADC

Οι time-interleaved αρχιτεκτονικές μπορούν να επιτύχουν υψηλούς ρυθμούς δειγματοληψίας, υψηλή ανάλυση και αποδοτικότητα ισχύος, αλλά έχουν το μειονέκτημα της αύξησης των διαστάσεων και της κατανάλωσης ενέργειας, ενώ απαιτούν και εκτεταμένη βαθμονόμηση. Η βασική προσέγγιση ενός time-interleaved ADC περιλαμβάνει τη χρήση ενός παράλληλου συνόλου από sub-ADCs, το καθένα με διαφορετικά στάδια δειγματοληψίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.8. Κάθε sub-ADC απαιτεί ένα ρυθμό δειγματοληψίας f_s/M , όπου f_s είναι ο ρυθμός δειγματοληψίας του συνολικού ADC και M είναι ο βαθμός του παραλληλισμού, δηλαδή ο αριθμός των παράλληλων ADCs. Ο βαθμός του παραλληλισμού περιορίζεται από τη μέγιστη επιτρεπόμενη χωρητικότητα εισόδου του ADC, την ανάλυση φάσης των ρολογιών δειγματοληψίας, καθώς και από την πολυπλοκότητα και την κατανομή χώρου κατά το σχεδιασμό, τα οποία αυξάνονται με την αύξηση της συχνότητας.

Ένα πλεονέκτημα του time-interleaved σχεδιασμού είναι η ευκολία και η χαμηλή ταχύτητα με την οποία μπορούν να πολυπλεχθούν τα δεδομένα εξόδου. Αυτό είναι

σημαντικό πλεονέκτημα σε περιπτώσεις στις οποίες σειριακά δεδομένα πολύ υψηλής ταχύτητας πρέπει να υποβληθούν σε επεξεργασία από πιο αργές παράλληλες τεχνολογίες. Ο υψηλός βαθμός παραλληλισμού των time-interleaved ADCs τους καθιστά ευπαθής σε σφάλματα αναντιστοιχίας. Πιθανές αναντιστοιχίες μεταξύ διαδρομών περιλαμβάνουν την αναντιστοιχία κέρδους, την αναντιστοιχία εύρους ζώνης, καθώς και την αναντιστοιχία αντιστάθμισης (offset) και φάσης ρολογιού (clock skew). Στην πράξη, η ποσότητα του clock skew δρα ως περιοριστικός παράγοντας για την ποσότητα του παραλληλισμού και ως εκ τούτου, για το ρυθμό δειγματοληψίας των time-interleaved ADCs.

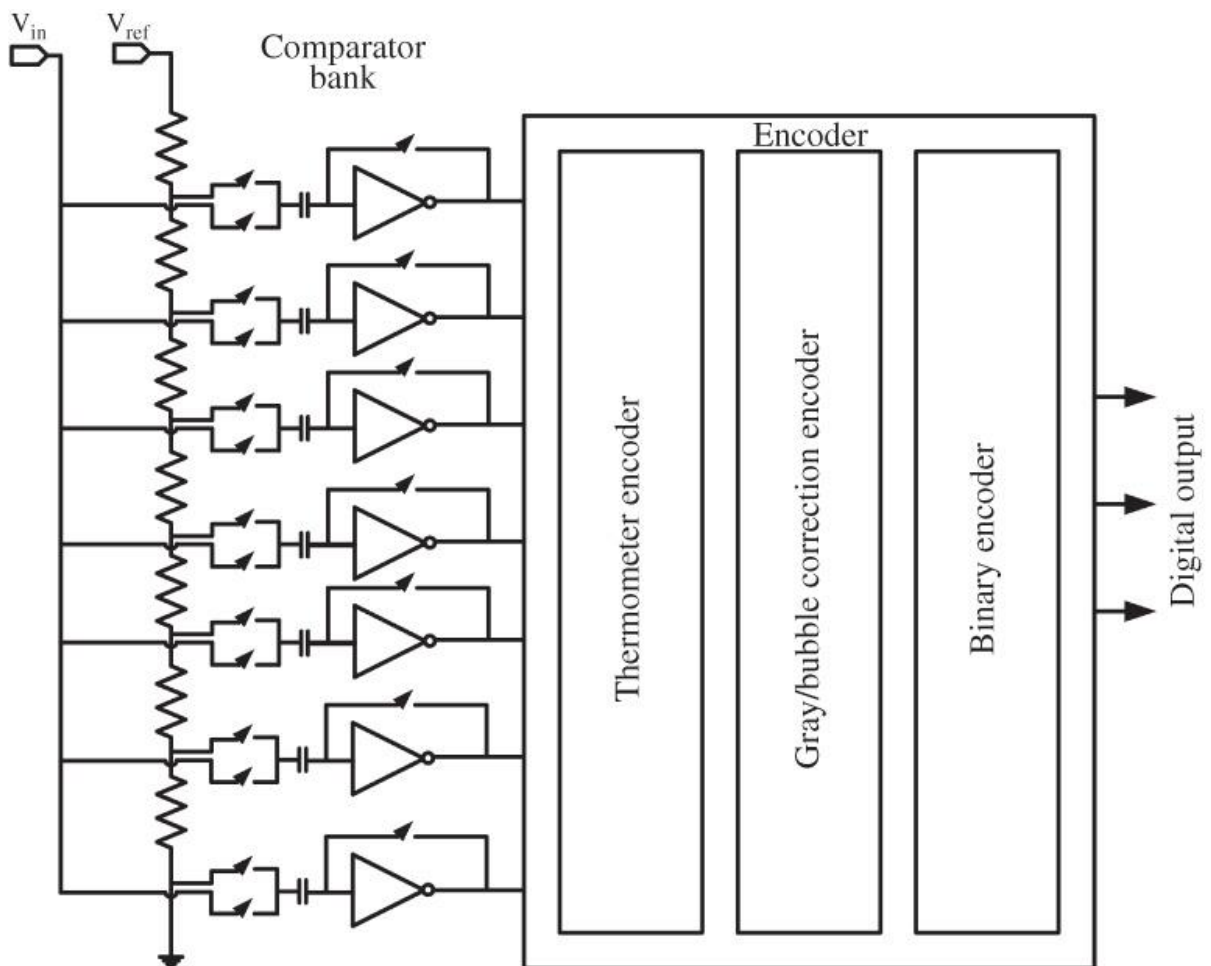


Σχήμα 5.8. Απεικόνιση της time-interleaved αρχιτεκτονικής ενός ADC

5.3.4 Flash ADC

Οι Flash ADCs δεν απαιτούν ανατροφοδότηση και είναι πλήρως παράλληλοι, οπότε είναι κατάλληλοι για πολύ γρήγορους ρυθμούς μετατροπής. Ο σχεδιασμός τους όμως περιορίζεται από το γεγονός ότι ο αριθμός των απαιτούμενων συγκριτών αυξάνεται

εκθετικά με την απαιτούμενη ανάλυση, με αποτέλεσμα δυνητικά να δημιουργούνται πολύ μεγάλες χωρητικότητες εισόδου, οι οποίες περιορίζουν το εύρος ζώνης των αναλογικών εισόδων. Η ανάλυση που απαιτείται για πολλές ασύρματες εφαρμογές δεν υπερβαίνει τις δυνατότητες των αρχιτεκτονικών flash (έως και 8 bits), συνεπώς αυτή η αρχιτεκτονική είναι κατάλληλη για χρήση σε πολλά συστήματα mmWave. Στο Σχήμα 5.9 απεικονίζεται η βασική αρχιτεκτονική ενός flash ADC. Η απόδοση των flash ADCs επηρεάζεται σημαντικά ή ακόμη και κυριαρχείται από το επίπεδο της αναντιστοιχίας που μπορεί να παρουσιαστεί στα διαφορικά κυκλώματα που χρησιμοποιούνται στους συγκριτές. Ως εκ τούτου, η τάση της αναντιστοιχίας με συνεχή κλιμάκωση συσκευής είναι ένα μέσο πρόβλεψης της εξέλιξης των flash ADCs. Άλλες προκλήσεις κατά το σχεδιασμό flash είναι η μείωση της περιοχής και η κατανάλωση ενέργειας.



Σχήμα 5.9. Απεικόνιση της βασικής αρχιτεκτονικής των flash ADCs

Η λειτουργία της αρχιτεκτονικής flash βασίζεται στη σύγκριση του σήματος εισόδου με μια σειρά από τάσεις αναφοράς. Αποτελείται από μια τράπεζα 2^{N-1} συγκριτών που

ακολουθείται από έναν temperature-to-binary αποκωδικοποιητή (όπου N είναι ο αριθμός των bits της ανάλυσης). Ένας κώδικας θερμόμετρου είναι το αποτέλεσμα της εξόδου της τράπεζας των συγκριτών. Όταν η αναλογική τάση εισόδου είναι μεγαλύτερη από τις τάσεις αναφοράς, ο αριθμός των άσων στην τράπεζα των συγκριτών αυξάνει. Η ονομασία κώδικας θερμόμετρου προέρχεται από το γεγονός ότι αν η αναλογική τάση εισόδου σε κάθε συγκριτή είναι μεγαλύτερη από την τάση αναφοράς, τότε ο συγκριτής παράγει ένα λογικό «1» ως έξοδο και ως εκ τούτου, στην τράπεζα των παράλληλων συγκριτών, μεγαλύτερες τάσεις θα προκαλούν την παραγωγή περισσότερων άσων. Η αναλογία είναι ότι ένα μεγαλύτερο σήμα τάσης εισόδου θα παράγει περισσότερους άσους στην τράπεζα των συγκριτών, όπως ακριβώς και οι θερμότερες θερμοκρασίες προκαλούν την αύξηση του υδραργύρου σε ένα θερμόμετρο. Συνεπώς, ένας κώδικας θερμόμετρου μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ένα μοναδιαίος κώδικας. Για τη μετατροπή των παράλληλων εξόδων της τράπεζας συγκριτών σε δυαδικά δεδομένα που αντιπροσωπεύουν την τάση του σήματος εισόδου, απαιτείται η χρήση ενός αποκωδικοποιητή. Ο αποκωδικοποιητής χρησιμοποιεί αυτές τις εξόδους για να παράγει ένα δυαδικό κώδικα N -bit.

5.4 Μετατροπείς Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό

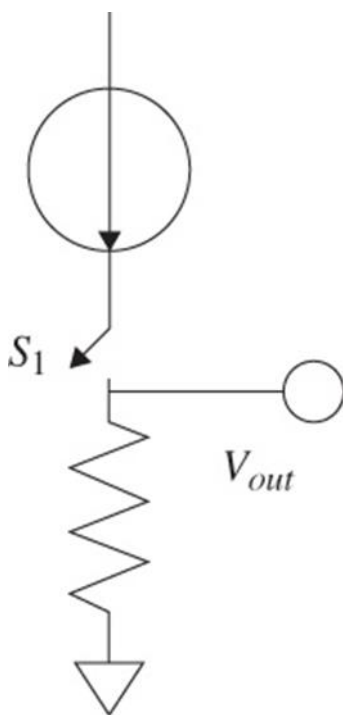
Οι μετατροπείς ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (Digital to Analog Converters, DACs) μεταφράζουν ψηφιακά σήματα που προέρχονται από μονάδες μνήμης, από δίαυλους δεδομένων ή από επεξεργαστές, σε αναλογικά σήματα, τα οποία μπορούν να εισέλθουν στις μονάδες αναλογικού σήματος ενός πομπού. Οι DACs των συσκευών επικοινωνίας mmWave πρώτης γενιάς είναι πιθανό να απαιτούν μέτριο επίπεδο ανάλυσης, δηλαδή μέτριο δυναμικό εύρος, λόγω της χαμηλής φασματικής τους πυκνότητας. Ωστόσο, οι ρυθμοί δειγματοληψίας των mmWave DACs θα πρέπει να είναι αρκετά υψηλοί, ώστε να είναι σε θέση να λειτουργήσουν με το πολύ μεγάλο εύρος ζώνης καναλιού, γεγονός που δημιουργεί σημαντικές σχεδιαστικές προκλήσεις. Οι ψηφιακές τιμές των σημάτων μπορεί να παραμένουν στη μνήμη και να υποβάλλονται σε επεξεργασία από υπολογιστές, αλλά πρέπει να μετατρέπονται σε αναλογικά σήματα, όπως οι κυματομορφές βασικής ζώνης in-phase (I) και quadrature (Q) ή οι πολικές κυματομορφές βασικής ζώνης, οι οποίες στη συνέχεια διαμορφώνονται σε ένα mmWave φέρον και μεταδίδονται μέσω του αέρα. Έτσι, ο ρόλος του DAC είναι η λήψη ψηφιακών κωδικολέξεων (codewords) από έναν ψηφιακό επεξεργαστή, από έναν

πολυπλέκτη, ή από τη μνήμη και η μετατροπή αυτών των κωδικολέξεων σε αναλογικά σήματα που μπορούν να διοχετευτούν στον αναλογικό πομπό και να αποσταλούν μέσω της κεραίας στο κανάλι επικοινωνίας. Μόλις ένας ψηφιακός επεξεργαστής σήματος ή μια μονάδα μνήμης παράσχει τις ψηφιακές λέξεις με τρόπο αντιπροσωπευτικό ως προς το επιθυμητό, χρονικά μεταβαλλόμενο σήμα, με την επιθυμητή ταχύτητα ρολογιού, τότε ο DAC μετατρέπει τις ψηφιακές κωδικολέξεις σε αναλογικά σήματα, χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές διαδικασίες: διαβάζοντας την εισερχόμενη ψηφιακή κωδικολέξη και στη συνέχεια, χαρτογραφώντας την εισερχόμενη ψηφιακή κωδικολέξη σε ένα αναλογικό σήμα τάσης με σταθερή τάση κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης περιόδου ρολογιού. Γενικά, μια τρίτη διαδικασία, το φιλτράρισμα χαμηλής διέλευσης εφαρμόζεται στην έξοδο του DAC, συχνά με ένα χαμηλοπερατό φίλτρο ελεγχόμενο από λογισμικό, με βάση τους συγκεκριμένους ρυθμούς δεδομένων ή τις προδιαγραφές του εύρους ζώνης της διαμόρφωσης που υποστηρίζεται από το αναλογικό σήμα εξόδου του DAC (Wu, Palmers, Steyaert, 2008).

Ο ρόλος ενός DAC είναι να συλλάβει μια ψηφιακή κωδικολέξη και να την μετατρέψει σε ένα αναλογικό σήμα εντός ενός πολύ μικρού ανοίγματος χρόνου, του διαστήματος του χρόνου δειγματοληψίας, έτσι ώστε να παράγει με ακρίβεια και πιστότητα, ένα αναλογικό σήμα σύντομης διάρκειας, που αντιπροσωπεύει τη ψηφιακή κωδικολέξη. Ο DAC διαβάζει συνεχώς ψηφιακές κωδικολέξεις και παράγει πολλές διαδοχικές αναλογικές κυματομορφές πεπερασμένου χρόνου. Η ικανότητα ενός DAC να ανακατασκευάσει μια αναλογική κυματομορφή με υψηλή πιστότητα, είναι κρίσιμης σημασίας για τις σύγχρονες ασύρματες επικοινωνίες, ιδιαίτερα για την παραγωγή κυματομορφών σύμμορφων με τα πρότυπα ποιότητας και τις απαιτήσεις φασματικής μάσκας. Ο χρόνος μεταγωγής (switching time) και ο χρόνος δείγματος ενός DAC είναι συνάρτηση του μικρότερου ρυθμού bit ή συμβόλου της διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται στον πομπό, οπότε οι μελλοντικές mmWave multi-gigabit ταχύτητες μετάδοσης, θα απαιτήσουν DACs που να είναι σε θέση να δημιουργήσουν αναλογικές κυματομορφές με μεταβαλλόμενο πλάτος σήματος εντός χρονικών διαστημάτων μικρότερων από ένα nanosecond. Η απαίτηση αυτή σημαίνει ότι ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής (slew rate) θα πρέπει να είναι εξαιρετικά υψηλός, στην περιοχή των gigahertz και τα ανοίγματα του χρόνου πρέπει να είναι εξαιρετικά μικρά, στην περιοχή των sub-nanosecond.

5.4.1 Current DAC

Το πιο βασικό κύκλωμα DAC είναι ο DAC ρεύματος (current DAC), η αρχή λειτουργίας του οποίου βασίζεται σε ψηφιακούς διακόπτες για τη μεταγωγή ενός ρεύματος μέσω μιας αντίστασης σε κατάσταση “on” ή “off”, αλλάζοντας έτσι την τάση στην αντίσταση. Η απεικόνιση ενός current DAC φαίνεται στο Σχήμα 5.10. Οι DACs των εφαρμογών mmWave θα πρέπει να υποστηρίζουν ρυθμούς δειγματοληψίας αρκετά υψηλούς, ώστε να μπορούν να λειτουργήσουν με εύρος ζώνης καναλιού και συχνότητες σηματοδοσίας της τάξης πολλών gigahertz. Μια προσέγγιση για την υλοποίηση ενός DAC περιλαμβάνει την επέκταση μιας αντίστασης σε κύκλωμα resistance ladder (Seo, Weil, Feng, 2000).

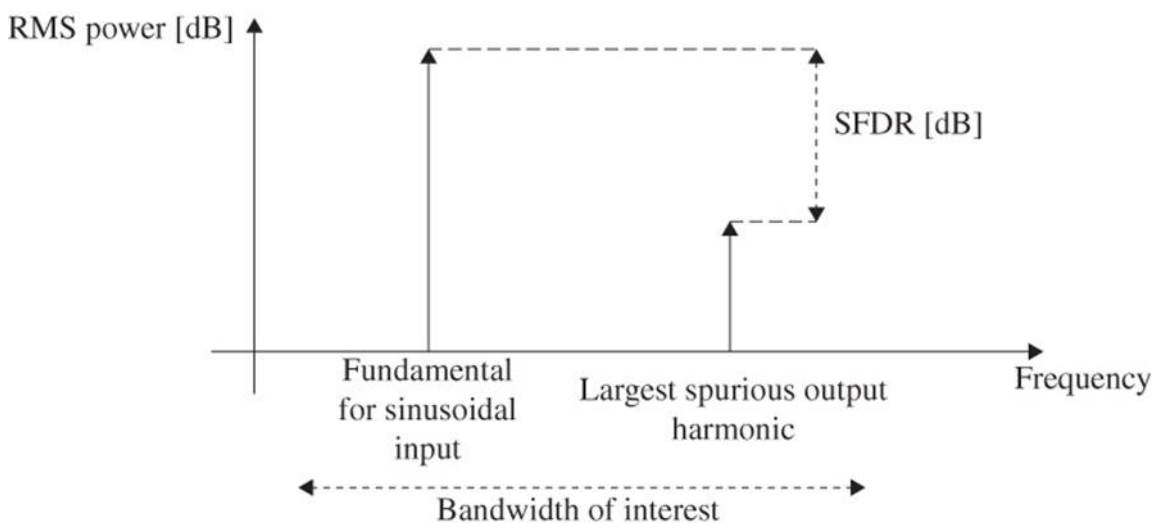


Σχήμα 5.10. Απεικόνιση ενός current DAC

Ο DAC θα πρέπει να είναι σε θέση να υποστηρίξει επαρκή ρυθμό δειγματοληψίας, ικανοποιώντας κατά ελάχιστο το κριτήριο δειγματοληψίας του Nyquist. Συχνά όμως, είναι πλεονεκτική η χρήση υπερδειγματοληψίας, ώστε να αντιμετωπιστεί η επίδραση των αναντιστοιχιών μεταξύ των συσκευών στη δυναμική έξοδο του DAC. Συνεπώς, η υπερδειγματοληψία αποτελεί έναν αποτελεσματικό τρόπο για την εξουδετέρωση των περιορισμών του δυναμικού εύρους και των σφαλμάτων ανάλυσης λόγω αναντιστοιχίας.

Ένας πολύ σημαντικός μετρητής απόδοσης των DACs υψηλής ταχύτητας, είναι ο λόγος της ισχύος του σήματος προς το θόρυβο και την ισχύ παραμόρφωσης (Signal to Noise and Distortion Ratio, SNDR). Το SNDR υποδηλώνει την ισχύ εξόδου για τη θεμελιώδη αρμονική μιας ημιτονοειδούς εισόδου, σε σχέση με την ισχύ όλων των σημάτων παραμόρφωσης και των παρασιτικών σημάτων εντός της συχνότητας Nyquist.

Ένας από τους σημαντικότερους στόχους κατά το σχεδιασμό ενός DAC υψηλής ταχύτητας, είναι η επίτευξη υψηλού δείκτη SFDR (Spurious-Free Dynamic Range). Το SFDR αντανακλά την γραμμικότητα της συσκευής και υποδηλώνει τη διαφορά μεταξύ της RMS ισχύος της θεμελιώδους αρμονικής μιας ημιτονοειδούς εισόδου και της μεγαλύτερης ψευδούς αρμονικής, μέσα σε ένα ορισμένο εύρος ζώνης της θεμελιώδους αρμονικής. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 5.11. Οι μεγάλες σχεδιαστικές προκλήσεις των DACs για την επίτευξη υψηλών SFDR, περιλαμβάνουν την πεπερασμένη σύνθετη αντίσταση εξόδου, την εξαρτώμενη από το κέρδος σύνθετη αντίσταση εξόδου, τις σημαντικές δυσλειτουργίες μεταφοράς, τη φόρτιση των διόδων, τις αιχμές τάσης των μεταγωγών και το θόρυβο τροφοδοσίας.



Σχήμα 5.11. Απεικόνιση του SFDR

Οι DACs υψηλής ταχύτητας απαιτούν κυκλώματα με γρήγορους χρόνους αποκατάστασης (settling time), ώστε να μην περιορίζονται από την απόδοση των στατικών σφαλμάτων. Οι DACs είναι ευαίσθητοι τόσο σε δυναμικά, όσο και σε στατικά σφάλματα. Οι μετρητές στατικής απόδοσης των DACs περιλαμβάνουν το σφάλμα απόκλισης, το σφάλμα κέρδους, την integral non-linearity (INL) και τη differential non-

linearity (DNL). Τα στατικά σφάλματα υποδηλώνουν τα σφάλματα στις εξόδους του DAC μετά τη διευθέτηση της εξόδου.

5.5 Κωδικοποιητές

Οι κωδικοποιητές είναι κυκλώματα που μετατρέπουν τη μορφή των δεδομένων, προκειμένου αυτά να χρησιμοποιηθούν από άλλα τμήματα του επικοινωνιακού συστήματος. Σε έναν ADC, ένας κωδικοποιητής μπορεί να αποτελείται από ένα ή περισσότερα κυκλώματα, συμπεριλαμβανομένων πολυπλεκτών ή απομονωτών, τα οποία μετασχηματίζουν διαφορετικά ψηφιακά αποτελέσματα, για παράδειγμα από διαφορετικούς παράλληλους συγκριτές, έτσι ώστε η προκύπτουσα ψηφιακή πληροφορία να μπορεί να παρασταθεί σε τυποποιημένη μορφή. Η χρήση αυτής της ψηφιακής πληροφορίας μπορεί να είναι σε μία σειριακή ροή δεδομένων ενός κυκλώματος σειριακού διαύλου ή σε παράλληλες ψηφιακές λέξεις που μπορούν να εισαχθούν σε έναν παράλληλο δίαυλο, για χρήση από μία μονάδα DSP ή μία μονάδα μνήμης. Ο κωδικοποιητής που χρησιμοποιείται σε έναν ADC μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ταχύτητα, την ακρίβεια, και την ισχύ λειτουργίας. Σε ορισμένα σχεδιαστικά μοντέλα ADCs για εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, όπως για παράδειγμα στους flash ADCs, ο ψηφιακός κωδικοποιητής μπορεί να ευθύνεται ακόμη και για το 70% της χρήσης ισχύος των ADCs (Madhumati, Rao, Madhaviatha, 2009).

Η αποδοτική κωδικοποίηση που μπορεί να ανιχνεύσει bubble errors και σφάλματα από μεμονωμένους συγκριτές, αποτελεί σημαντική προϋπόθεση κατά το σχεδιασμό των ADCs. Ο κωδικοποιητής πρέπει να περιλαμβάνει ένα κύκλωμα για τη μετατροπή των παράλληλων εξόδων του κώδικα θερμομέτρου της τράπεζας συγκριτών των ADCs σε χρήσιμα δυαδικά δεδομένα, τα οποία αναπαριστούν την τάση του σήματος εισόδου σε πρότυπες δυαδικές λέξεις. Κάθε συγκριτής παρέχει μία μοναδιαία έξοδο, ένα λογικό "1", προκειμένου να υποδηλώσει εάν το σήμα στην είσοδό του υπερβαίνει την εσωτερική του τάση αναφοράς. Με χρήση αυτής μοναδιαίας κωδικοποίησης σε όλους τους συγκριτές και προσμετρώντας τον αριθμό των άσων στην τράπεζα των συγκριτών, η τιμή της κβαντισμένης τάσης μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και να αναπαρασταθεί σε ένα κώδικα, όπως ο κώδικας θερμομέτρου.

Οι τεχνικές κωδικοποίησης που χρησιμοποιούνται στα συστήματα επικοινωνίας, όπως η κωδικοποίηση Gray, στην οποία οι διαδοχικές κωδικές λέξεις διαφέρουν μόνο κατά ένα bit, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων σε ομάδες ατομικών εξόδων συγκριτών, με ελάχιστη ταχύτητα και κόστος υπολογισμού, καθώς και για την ανίχνευση των bubble errors. Μεμονωμένα δείγματα από μεμονωμένους συγκριτές μπορούν να διορθωθούν και στην περίπτωση των MSBs μπορούν να αγνοηθούν, αν η διακύμανση μεταξύ των διαδοχικών δειγμάτων είναι πολύ μεγάλη ώστε να είναι σε θέση να επιτευχθεί με τους δεδομένους περιορισμούς του εύρους ζώνης εισόδου. Τα προηγούμενα δείγματα σε κώδικες επανάληψης μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη θέση των περιπλανώμενων δειγμάτων (errant samples), εάν η διόρθωση σφαλμάτων δεν είναι δυνατή, προκειμένου να αποφευχθούν νόθα δείγματα (spurious samples) λέξεων.

Οι μεθοδολογίες μείωσης του φυσικού μεγέθους των κωδικοποιητών, όπως για παράδειγμα μέσω χρήσης πολυπλεκτών, θα αποτελέσουν αναπόσπαστο κομμάτι του σχεδιασμού των μελλοντικών συστημάτων mmWave, με σκοπό την επίτευξη ταχυτήτων μεταφοράς δεδομένων της τάξης των multi-Gbps. Επίσης, η επιλογή ενός κωδικοποιητή θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την ανθεκτικότητα του κάθε σχεδιασμού απέναντι στα bubble errors που προκαλούνται από την αντιστάθμιση τάσης, την αναντιστοιχία χρόνου δειγματοληψίας ή τη μεταστάθεια των κυκλωμάτων (Sail, Vesterbacka, 2007).

Εκτός από την εύρεση ενός σχεδιαστικού μοντέλου κωδικοποιητή ικανό να προσφέρει χαμηλή ισχύ, υψηλή ταχύτητα και ανθεκτική λειτουργία απέναντι στα σφάλματα, υπάρχουν κάποιες αναγκαίες συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται από κάθε κωδικοποιητή. Αυτές περιλαμβάνουν την ομοιόμορφη καθυστέρηση για όλες τις εξόδους και τη σταθερότητα εξόδου για τον απαιτούμενο χρόνο συγκράτησης (hold time) των προηγούμενων σταδίων του ψηφιακού κυκλώματος. Ένας τρόπος για να εξασφαλιστεί η ενιαία καθυστέρηση είναι η σχεδίαση του κωδικοποιητή, έτσι ώστε όλα τα σήματα περνούν από τον ίδιο αριθμό πυλών στη διαδρομή τους προς την έξοδο. Ορισμένοι σχεδιασμοί κωδικοποιητών, όπως για παράδειγμα, οι fat-tree κωδικοποιητές, θα παρουσιάσουν προβλήματα συγχρονισμού, γιατί κάθε bit εξόδου είναι αναγκασμένο να περάσει μέσα από ένα διαφορετικό αριθμό πυλών.

Κεφάλαιο 6

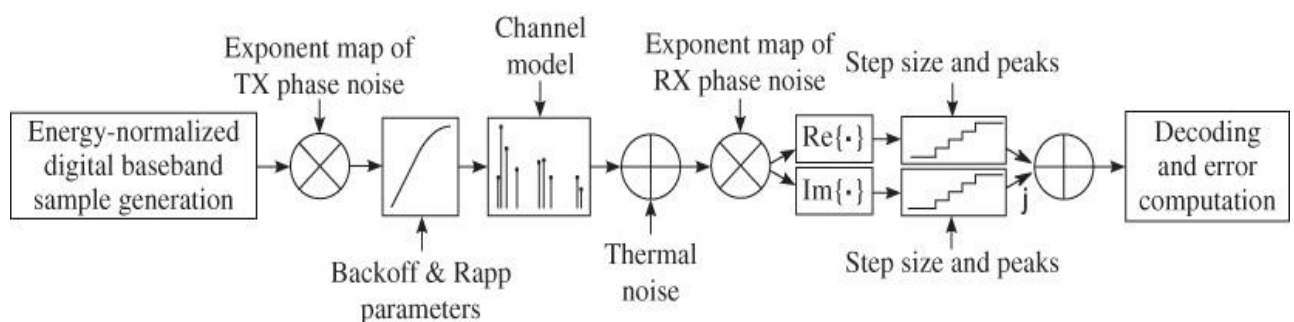
Σχεδιασμός και Εφαρμογές Συστημάτων mmWave

6.1 Το Φυσικό Επίπεδο στα Συστήματα mmWave

Η υψηλή συχνότητα φέροντος, η χρήση κατευθυνόμενων και προσαρμόσιμων κεραιών και το πολύ μεγάλο εύρος ζώνης των συστημάτων mmWave, δημιουργούν σημαντικές σχεδιαστικές προκλήσεις και πολλές φορές είναι απαραίτητο να γίνονται συμβιβασμοί μεταξύ κόστους και απόδοσης κατά την επεξεργασία σήματος στο φυσικό επίπεδο (PHY). Το κέρδος στο κανάλι επικοινωνίας είναι σημαντικό να μπορεί να επιτυγχάνει λογικά περιθώρια ζεύξης. Υπάρχουν δύο βασικές μεθοδολογίες για την παροχή αυτών κερδών: (i) διασπορά συχνότητας ή χρόνου και (ii) διαμόρφωση δέσμης. Με τη διασπορά συχνότητας ή χρόνου, το εκπεμπόμενο σήμα παρουσιάζει πλεονασμό στο επίπεδο συμβόλου, επιτρέποντας την επίτευξη του επιθυμητού κέρδους επεξεργασίας ή κωδικοποίησης πριν την αποκωδικοποίηση των bits. Με τη διαμόρφωση δέσμης, ο σχηματισμός των δεσμών πρέπει να γίνεται μόνο μετά από την εγκαθίδρυση των συνδέσεων, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η επιβάρυνση σηματοδοσίας, να αποφευχθεί η σπατάλη ισχύος και να αποφευχθούν οι περιττές παρεμβαλλόμενες μεταδόσεις.

Το πλεονέκτημα της διασποράς συχνότητας είναι ότι δεν απαιτεί τη χρήση hardware ή διαμόρφωσης ειδικού σκοπού. Ωστόσο, ο πλεονασμός των σημάτων διασποράς στο εύρος ζώνης ή στο χρόνο, μειώνει σημαντικά το συνολικό ρυθμό μετάδοσης. Ως εκ τούτου, η διασπορά δεν αξιοποιεί τους τεράστιους πόρους του ραδιοφάσματος με αποδοτικό τρόπο, καθώς το κυρίαρχο κίνητρο για μετάβαση σε συστήματα mmWave είναι η επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων και μεγαλύτερης

χωρητικότητα. Επιπλέον, δεδομένου ότι τα συστήματα mmWave που χρησιμοποιούν κατευθυνόμενες δέσμες είναι πιο πιθανό να περιορίζονται από τις παρεμβολές παρά από το θόρυβο, είναι προτιμότερο να γίνεται χρήση της time division duplexing (TDD), έναντι της frequency division duplexing (FDD). Οι ιδιότητες αντίστασης των παρεμβολών και τα κέρδη επεξεργασίας που προσφέρονται από τις τεχνικές διασποράς συχνότητας είναι λιγότερο ευεργετικές, αν και πολλές τεχνικές διασποράς συχνότητας μπορούν εύκολα να συνδυαστούν με μεθοδολογίες διαμόρφωσης δέσμης. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, η επικοινωνία mmWave διασποράς φάσματος είναι πιθανό να προτιμάται κυρίως για τον έλεγχο επικοινωνίας πριν ή κατά τη διάρκεια της διαπραγμάτευσης της διαμόρφωσης δέσμης και όχι μετά από τη διαπραγμάτευση των δεσμών. Με τη διαμόρφωση δέσμης είναι δυνατόν να επιτευχθούν μέτρια έως υψηλά SNR στο δέκτη, για μεγάλες αποστάσεις χωρίς διασπορά, τόσο για κανάλια LOS όσο και NLOS.



Σχήμα 6.1. Block διάγραμμα του επιπέδου PHY ενός πομποδέκτη, συμπεριλαμβανομένων των mmWave impairments

6.1.1 Διαμόρφωση, Κωδικοποίηση και Ισοστάθμιση

Η φασματική αποδοτικότητα της επικοινωνίας, δηλαδή, ο αριθμός των bits/second/Hz (bps/Hz), μεγιστοποιείται με τη χρήση μπλοκ συμβόλων άπειρου μήκους και κωδικοποίηση Gaussian συμβόλων. Οι σύγχρονες ψηφιακές ασύρματες επικοινωνίες προσεγγίζουν αυτή τη μεθοδολογία με τη διαμόρφωση (QAM), τους κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων και τους μπλοκ κώδικες πεπερασμένου μήκους, καθιστώντας την πολυπλοκότητα υλοποίησης τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη, πιο εύκολα διαχειρίσιμη.

Στα ευρείας ζώνης κανάλια των συστημάτων mmWave, ο δέκτης επιλέγει κατά βέλτιστο τρόπο τις εκτιμήσεις των bits, χρησιμοποιώντας το κριτήριο μέγιστης πιθανότητας, ως συνάρτηση όλων των συνδέσεων του καναλιού. Ωστόσο, η προσέγγιση μέγιστης πιθανότητας, όπως εφαρμόζεται μέσω της αποκωδικοποίησης Viterbi, παρουσιάζει εκθετική κλιμάκωση της πολυπλοκότητας επεξεργασίας, ως συνάρτηση του αριθμού των συνδέσεων του καναλιού. Ο αριθμός των συνδέσεων σε ένα κανάλι επικοινωνίας mmWave είναι συχνά πολύ μεγάλος, λόγω του `giga-sample-per-second` ρυθμό συμβόλων και του μεγάλου αριθμού των ανακλαστικών διαδρομών σε εσωτερικά και εξωτερικά κανάλια, παρόλο που το στενό εύρος δέσμης μειώνει τις συνιστώσες πολλαπλών διαδρομών. Επειδή η πολυπλοκότητα της υλοποίησης αποτελεί ανασχετικό παράγοντα για τόσο υψηλούς ρυθμούς συμβόλων, η προσέγγιση μέγιστης πιθανότητας δεν χρησιμοποιείται σε πρακτικές εφαρμογές. Για να παρακαμφθεί αυτή η πολυπλοκότητα υλοποίησης, εφαρμόζεται εξισορρόπηση καναλιού στους δέκτες πριν την ανίχνευση, έτσι ώστε οι αποκωδικοποιητές Viterbi να χρειάζεται να εξετάσουν την απόκριση μιας μοναδικής σύνδεσης, καθιστώντας ουσιαστικά το κανάλι ως κανάλι στενής ζώνης για τον ανιχνευτή.

Κατά το σχεδιασμό των συστημάτων πρέπει να γίνει επιλογή μέσα από μια σειρά αλγορίθμων ισοστάθμισης, μεταξύ των οποίων είναι οι γραμμικοί `zero-forcing` ισοσταθμιστές, οι οποίοι μειώνουν τις αιχμές της παραμόρφωσης, οι γραμμικοί ισοσταθμιστές ελάχιστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος, οι ισοσταθμιστές ανάδρασης απόφασης, οι οποίοι χρησιμοποιούν `soft-output` λαμβανόμενα σύμβολα μέσω γραμμικών `feed-forward` ισοσταθμιστών και τα ανατροφοδοτούν μέσω γραμμικών `feedback` ισοσταθμιστών, οι μη γραμμικοί ισοσταθμιστές και οι προσαρμόσιμοι ισοσταθμιστές.

Οι αλγόριθμοι ισοστάθμισης παραδοσιακά λειτουργούν στο πεδίο του χρόνου. Η ισοστάθμιση όμως στο πεδίο της συχνότητας (`Frequency Domain Equalization`, FDE) αρχίζει να γίνεται δημοφιλής, επειδή μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη πολυπλοκότητα επεξεργασίας. Με την FDE, κάθε τόνος μπορεί να μετριάσει πλήρως τις ευρυζωνικές επιδράσεις του καναλιού χρησιμοποιώντας έναν απλό γραμμικό ισοσταθμιστή, δεδομένου ότι κάθε υπο-κανάλι είναι στενής ζώνης, οπότε υπόκειται σε επίπεδη εξασθένιση. Για τη βελτιστοποίηση της πολυπλοκότητας και τη μετάβαση στο πεδίο της συχνότητας, αξιοποιείται ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT). Για την

ενεργοποίηση του μετασχηματισμού στο πεδίο της συχνότητας μέσω του FFT στον δέκτη, οι κυματομορφές πρέπει να μορφοποιηθούν μέσω μπλοκ συμβόλων που διαθέτουν πρόθεμα με διαστήματα προστασίας (guard intervals), για διατήρηση της κυκλικής συνέλιξης στην περίπτωση διάδοσης πολλαπλών διαδρομών. Τα διαστήματα προστασίας συχνά υλοποιούνται μέσω ενός κυκλικού προθέματος ή μέσω επαναλαμβανόμενων ακολουθιών κατάρτισης.

Αν και η λειτουργία της ισοστάθμισης στο πεδίο της συχνότητας φαίνεται να προτιμάται καθολικά για τα mmWave ευρυζωνικά κανάλια, αυτό δεν ισχύει για την επιλογή κατάλληλης μεθοδολογίας διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Για παράδειγμα, η επιλογή του τύπου διαμόρφωσης για τη συχνότητα των 60 GHz για τα πρότυπα διάδοσης σε εσωτερικούς χώρους διχάζεται μεταξύ της OFDM και της SC-FDE. Αυτό το γεγονός έχει οδηγήσει σε πολλαπλές αρχιτεκτονικές φυσικού επιπέδου στα πρότυπα των 60 GHz, συμπεριλαμβανομένων του ECMA-387, του IEEE 802.15.3c και του IEEE 802.11ad. Τα πρώιμα ενισχυμένα εξωτερικά δίκτυα τοπικής πρόσβασης, επίσης χρησιμοποιούν παραλλαγές αυτών των διαμορφώσεων. Στα κανάλια επίπεδης συχνότητας με ιδανικούς πομποδέκτες, η OFDM και η SC-FDE παρουσιάζουν την ίδια αποδοτικότητα. Αυτό δεν ισχύει ωστόσο στα mmWave κανάλια συχνοτικής επιλεκτικότητας.

Equalizer Type	Advantages	Disadvantages
Linear (non-adaptive)	Low discovery and processing complexity	Moderate performance
Non-linear (non-adaptive)	Performance advantage over linear	Higher discovery and processing complexity
DFE (linear+non-linear)	Low discovery complexity, improved performance	Increased processing complexity, error propagation
Adaptive (linear+non-linear)	Compatible with evolving channel estimates	Increased processing complexity, convergence time

Πίνακας 6.1. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα δημοφιλών αλγόριθμων ισοστάθμισης

Θεωρητικά, η OFDM είναι καταλληλότερη για τη λειτουργία καναλιών συχνοτικής επιλεκτικότητας. Για εκπομπή στις ορθογώνιες συνιστώσες του πεδίου συχνοτήτων των υπο-φερόντων και υποθέτοντας ότι έχουμε ιδανικούς γραμμικούς πομποδέκτες, άπειρου μεγέθους FFT μπλοκ με Gaussian κωδικοποίηση και βέλτιστη κατανομή ισχύος

ανά υπο-φέρον, η OFDM προσφέρει τη βέλτιστη χωρητικότητα. Στην πράξη, τα μεγέθη των FFT μπλοκ πρέπει να είναι μικρά για τη διαχείριση της πολυπλοκότητας, αφού η κατανομή ισχύος ανά υπο-φέρον επισύρει την ατέλεια των mmWave πομποδεκτών, ενώ και οι κώδικες υψηλού ρυθμού μπορεί να μην επαρκούν στην περίπτωση σοβαρής συχνοτικής επιλεκτικότητας. Εξαιτίας αυτών των μειονεκτημάτων, αρκετές εφαρμογές συστημάτων mmWave υλοποιούνται με χρήση της διαμόρφωσης SC-FDE.

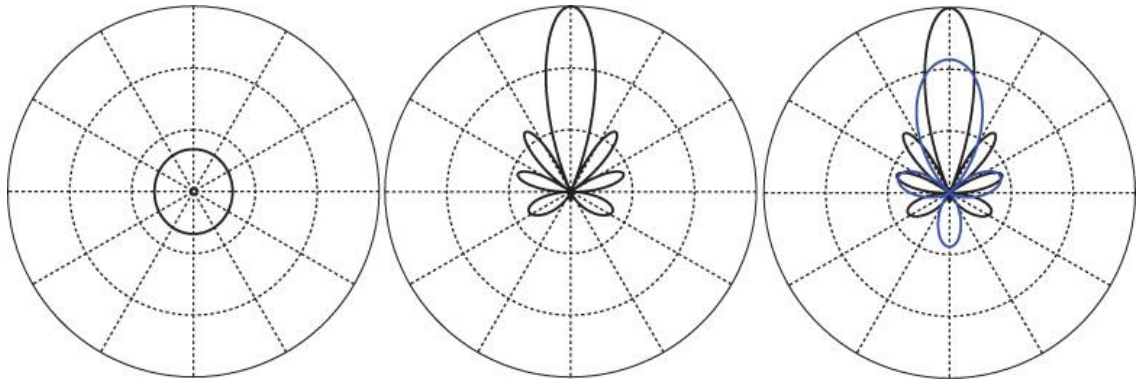
6.2 Σχεδιαστικές Προκλήσεις Δικτύων Βασισμένων σε Συστήματα mmWave

Ο σχεδιασμός ενός δικτύου με συσκευές mmWave δημιουργεί νέες προκλήσεις, οι οποίες προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά του καναλιού επικοινωνίας mmWave. Οι περισσότερες από τις δυσκολίες που αντιμετωπίζει η δικτύωση με συσκευές mmWave, ανακύπτουν από τη χρήση beamforming σε πομπό και δέκτη. Αυτό καθιστά πιο δύσκολη την εκτέλεση ορισμένων λειτουργιών από το πρωτόκολλο MAC, όπως για παράδειγμα την ανίχνευση σύγκρουσης, αλλά προσφέρει επίσης τη δυνατότητα επίτευξης υψηλής αποδοτικότητας, μέσω της χωρικής επαναχρησιμοποίησης.

6.2.1 Κατευθυντικές Κεραίες στο Φυσικό Επίπεδο

Τα συστήματα mmWave κάνουν μεγάλη χρήση κατευθυντικών εκπομπών, προκειμένου να παρέχουν συνδέσεις υψηλότερης ποιότητας. Εξαιτίας των περιορισμών που επιβάλλονται στη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής για τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί υψηλότερη ισχύς εκπομπής προκειμένου να αντισταθμιστούν οι ισχυρές απώλειες διαδρομής. Επίσης, η υψηλότερη ισχύς εκπομπής θα είχε ως αποτέλεσμα την απαγορευτικά χαμηλή διάρκεια ζωής των μπαταριών των φορητών συσκευών. Συνεπώς, ο μόνος τρόπος για να αντιμετωπιστεί η απώλεια διαδρομής, είναι η αύξηση του κέρδους των κεραιών. Το κέρδος μιας κεραίας είναι η ποσότητα της επιπλέον ισχύος που συλλαμβάνεται είτε όταν η κεραία χρησιμοποιείται για εκπομπή, είτε για λήψη, σε σύγκριση με μια ιδανική ιστροπική κεραία. Το κέρδος των κεραιών σχετίζεται με μία ποσότητα γνωστή ως άνοιγμα (aperture), η οποία είναι η ενεργός επιφάνεια ή η ηλεκτρική περιοχή της κεραίας, συχνά ευθέως ανάλογη αλλά όχι αναγκαστικά ταυτόσημη με τη φυσική περιοχή της κεραίας. Το κέρδος σε γραμμική κλίμακα είναι ανάλογο με το άνοιγμα της κεραίας και

κλιμακώνεται αντιστρόφως ανάλογα με λ^2 . Εάν οι κεραιές είναι σε θέση να καταλάβουν ίδια ποσότητα περιοχής, τότε η αύξηση της απώλειας διαδρομής ελεύθερου χώρου στις υψηλότερες συχνότητες μπορεί να αντισταθμιστεί, καθώς αυτή η πρόσθετη απώλεια υπερκαλύπτεται από το πρόσθετο κέρδος που παρέχεται από τις κεραιές ισοδύναμου μεγέθους.



Σχήμα 6.2. Απεικόνιση της έννοια του *beamforming*. (Αριστερά) Μία πανκατευθυντική δέσμη. (Μέση) Μία κατευθυντική δέσμη, όπου ένας κύριος λοβός παρουσιάζει υψηλό κέρδος προς την κατεύθυνση μετάδοσης και λήψης. (Δεξιά) Παραλλαγές του σχήματος της δέσμης.

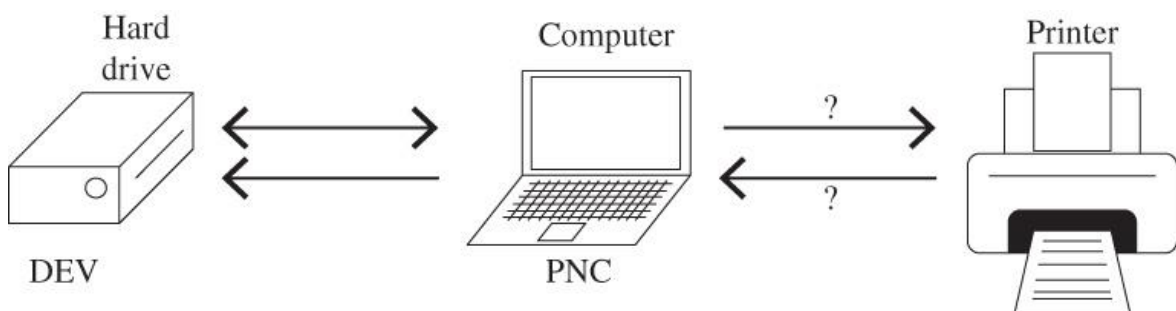
Η βασικότερη μεθοδολογία για την αύξηση του κέρδους είναι η χρήση κατευθυντικών κεραιών. Σε ένα LOS κανάλι επικοινωνίας, η πιο αποτελεσματική και προβλέψιμη επικοινωνία με μία κατευθυντική κεραία υφίσταται όταν η κατευθυντική κεραία εκπομπής είναι στραμμένη προς το δέκτη και η κατευθυντική κεραία λήψης είναι αντίστοιχα στραμμένη προς τον πομπό, κάτι που ονομάζεται ευθυγράμμιση σκόπευσης (*boresight alignment*). Αν η κεραία έχει μια σταθερή δέσμη, τότε ο πομπός και ο δέκτης θα πρέπει να είναι στραμμένοι ο ένας προς τον άλλο, όπως ακριβώς συμβαίνει με τα πιάτα δορυφορικών κεραιών, τα οποία είναι στραμμένα προς τους δορυφόρους. Σε NLOS κανάλια, η τοποθέτηση των κατευθυντικών κεραιών είναι πιο περίπλοκη. Η καλύτερη τοποθέτηση είναι προς μία ή περισσότερες κυρίαρχες ανακλάσεις εντός μιας ενιαίας δέσμης. Στα κανάλια NLOS, είναι επιθυμητό να έχουμε πιο περίπλοκα σχήματα δέσμης, τα οποία μπορούν να μεταφέρουν την ενέργεια στις πολλαπλές διαδρομές διάδοσης, κάτι που απαιτεί προσαρμοσιμότητα από μέρους των κεραιών.

Οι συστοιχίες κεραιών είναι μια προσέγγιση υλοποίησης ευέλικτων προσαρμόσιμων κεραιών. Οι συστοιχίες κεραιών αποτελούνται από πολλαπλά στοιχεία κεραιών, το

σύνολο των οποίων ορίζει το άνοιγμα της κεραίας. Στην πλευρά του δέκτη, η μεταβολή της φάσης της άθροισης των σημάτων εξόδου κάθε κεραίας, είναι δυνατόν να κατευθύνει τον κύριο λοβό της κεραίας προς διαφορετικές κατευθύνσεις. Αυτή η συστοιχία κεραιών ονομάζεται phased array.

6.2.2 Device Discovery

Το device discovery είναι ένας γενικός όρος ο οποίος περιγράφει τις διαδικασίες ταυτοποίησης των γειτονικών συσκευών σε ένα δίκτυο. Το device discovery είναι η διαδικασία που επιτρέπει νέες προσθήκες συσκευών σε ένα δίκτυο, καθώς και αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου. Το device discovery αποτελεί πρόκληση για τα συστήματα mmWave, λόγω χρήσης κατευθυντικών κεραιών. Στα δίκτυα mmWave, η χρήση κατευθυντικών κεραιών και στα δύο άκρα της ζεύξης, απαιτεί από τις καινούργιες συσκευές να στρέψουν την κεραία τους προς την κατεύθυνση των γειτονικών συσκευών, ενώ την ίδια στιγμή οι γειτονικές συσκευές πρέπει να στείλουν ένα σήμα beacon προς την κατεύθυνση της νέα συσκευής, προκειμένου να επιτευχθεί το device discovery. Ως εκ τούτου, η χρήση κεραιών υψηλής κατευθυντικότητας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου που απαιτείται για τον συγχρονισμό των συσκευών.



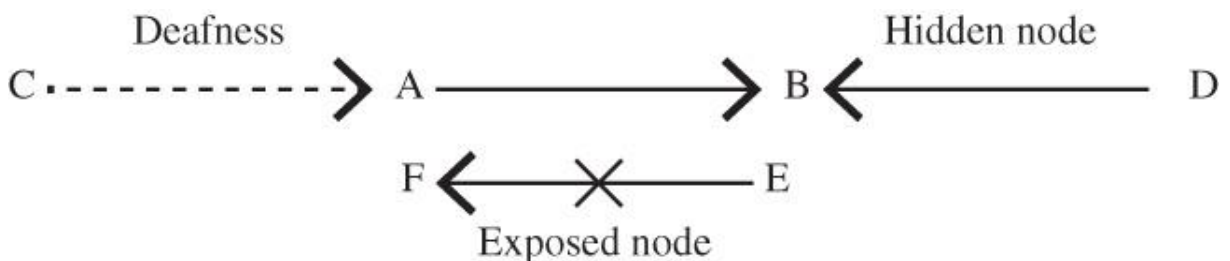
Σχήμα 6.3. Device discovery σε ένα δίκτυο piconet

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις για το device discovery και το beamforming στα κατευθυντικά δίκτυα. Υπάρχουν τρεις φάσεις: η ανακάλυψη γείτονα, η ανακάλυψη δέσμης και η παρακολούθηση δέσμης. Σε δίκτυα piconet για παράδειγμα, ο συντονιστής piconet (Piconet Coordinator, PNC) περιοδικά στέλνει beacons σε ένα προκαθορισμένο αριθμό χωρικών δεσμών, με μία διαδικασία που είναι γνωστή ως quasi-omni transmission mode, που αποτελεί τον λιγότερο κατευθυντικό τρόπο

μετάδοσης. Η κινητή συσκευή ανιχνεύει αυτά τα σήματα beacons κατά τη διάρκεια κάθε quasi-omni transmission mode και διαδοχικά χρησιμοποιεί καθεμία από τις διαθέσιμες κατευθυντικές λήψεις. Με τον τρόπο αυτό, η συσκευή είναι σε θέση να καθορίσει τον καλύτερο συνδυασμό δεσμών, με βάση τις μεταδόσεις από τον συντονιστή riconet και τη ποιότητα της σύνδεσης, η οποία μετρείται χρησιμοποιώντας τις δικές της δέσμες λήψης. Η συσκευή στη συνέχεια στέλνει αυτές τις πληροφορίες πίσω στο access point ή στο PNC, στην κατάλληλη περίοδο πρόσβασης, που αντιστοιχεί στο καλύτερο quasi-omni transmission mode. Εάν η πρόσβαση αυτή χορηγείται από το PNC, μπορεί να εφαρμοστεί μια πρόσθετη φάση ανακάλυψης της δέσμης, στην οποία αρκετοί κύκλοι κατάρτισης δέσμης χρησιμοποιούνται από τον συντονιστή riconet και τη συσκευή για να βελτιώσουν την επιλογή της βέλτιστης δέσμης. Αυτό επιτρέπει στη συσκευή να χρησιμοποιεί κατευθυντικό beamforming με μεγαλύτερο κέρδος. Μετά την ολοκλήρωση της φάσης ανακάλυψης δέσμης, η παρακολούθηση δέσμης αρχικοποιείται στη συσκευή και στο PNC, όπου το βέλτιστο κατευθυντικό beamforming ελέγχεται για τη συμβολή του στις αργές μεταβολές στο κανάλι. Αυτή η προσέγγιση πολλαπλών φάσεων προσφέρει μία αποτελεσματική λύση τόσο για το device discovery, όσο και για το beamforming της συσκευής.

6.2.3 Ανίχνευση Σύγκρουσης και Αποφυγή Σύγκρουσης

Η κατευθυντική εκπομπή και λήψη περιπλέκει τις λειτουργίες που πρέπει να εκτελεστούν σε συμβατικά δίκτυα όταν συσκευές επιχειρούν να ανιχνεύσουν και να αποφύγουν συγκρούσεις. Μια απεικόνιση των βασικών εννοιών ανίχνευσης και αποφυγής σύγκρουσης φαίνεται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.4. Απεικόνιση βασικών εννοιών ανίχνευσης και αποφυγής σύγκρουσης

Το πρόβλημα της κώφωσης (deafness) παρουσιάζεται όταν το τερματικό C προσπαθεί να επικοινωνήσει με το τερματικό A που εκπέμπει σε μια διαφορετική κατεύθυνση.

Λόγω της κώφωσης, το τερματικό C συνεχίζει την προσπάθεια να μεταδώσει μέχρι να είναι σε θέση να εγκαθιδρύσει μία σύνδεση επικοινωνίας με το τερματικό A. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, άλλοι κόμβοι μπορεί να θεωρήσουν ότι το μέσο είναι κατειλημμένο και να αποτραπούν από το να εκπέμψουν.

Το πρόβλημα κρυμμένου τερματικού προκύπτει όταν το τερματικό D προσπαθεί να επικοινωνήσει με το τερματικό B, το οποίο ακούει μια επικοινωνία σε διαφορετική κατεύθυνση. Αν τερματικό D είναι κοντά στο τερματικό B, τότε ορισμένα από τα σήματα του D θα εξακολουθούν να λαμβάνονται από τερματικό B, λόγω του μη ιδανικού σχεδιασμού των κεραιών. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει ένα σφάλμα στη σύνδεση από το A στο B, προκαλώντας αναμετάδοση. Το πρόβλημα κρυμμένου τερματικού φθείρει τις εν εξελίξει μεταδόσεις και μπορεί επίσης να αποτρέψει νέους κόμβους από το να εκπέμψουν.

Το πρόβλημα εκτεθειμένου κόμβου εμφανίζεται όταν το τερματικό E πιστεύει ότι το μέσο είναι ακόμα απασχολημένο, ενώ αυτό θα μπορούσε να υποστηρίξει ταυτόχρονη εκπομπή υψηλής κατευθυντικότητας. Το πρόβλημα εκτεθειμένου κόμβου μειώνει τις δυνατότητες μετάδοσης και ως εκ τούτου, αδυνατεί να εκμεταλλευθεί πλήρως τη χωρική επαναχρησιμοποίηση.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για τη διαχείριση δικτύων κατευθυντικών κεραιών. Μία λύση είναι η τροποποίηση συμβατικών πρωτοκόλλων, για παράδειγμα το carrier sense multiple access with collision avoidance (CSMA/CA). Είναι σύνηθες για τα πρωτόκολλα CSMA/CA να περιλαμβάνουν τόσο ένα σήμα request to send (RTS), όσο και ένα clear to send (CTS), ώστε να αποφεύχονται προβλήματα λόγω κρυμμένων τερματικών. Το βασικό πρωτόκολλο CSMA/CA υποθέτει ότι οι κόμβοι στέλνουν και λαμβάνουν χρησιμοποιώντας πανκατευθυντικές κεραιές. Μια καλύτερη λύση για τα συστήματα mmWave είναι ο σχεδιασμός του πρωτοκόλλου υποθέτοντας ότι υπάρχουν μόνο κατευθυντικές κεραιές και ότι είναι διαθέσιμη in-band επικοινωνία. Το πρόβλημα της χωρικής αποδοτικότητας θα μπορούσε να βελτιωθεί αν κάθε κόμβος διατηρούσε έναν πίνακα με πληροφορίες κατευθυντικότητας, που θα έδειχνε τις κατευθύνσεις που βρίσκονται σε χρήση και τις κατευθύνσεις που είναι διαθέσιμες για μετάδοση. Όταν αυτό συνδυαστεί με πληροφορίες κατευθυντικότητας που λαμβάνονται από την

ανακάλυψη γείτονα, τα τερματικά μπορούν στη συνέχεια να εκμεταλλευτούν τη χωρική επαναχρησιμοποίηση εκπέμποντας προς κόμβους των διαθέσιμων κατευθύνσεων.

Μια άλλη στρατηγική σχεδιασμού ενός πρωτοκόλλου MAC για κατευθυντική μετάδοση, είναι η εφαρμογή μιας πιο συγκεντρωτικής προσέγγιση. Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο διαιρείται σε riconets, με κάθε riconet να έχει έναν ελεγκτή riconet. Ο ελεγκτής riconet θα λαμβάνει αιτήματα για τη μετάδοση κατά τη διάρκεια μιας κατευθυντικής περιόδου πρόσβασης. Οι πληροφορίες θα μπορούσαν να μεταδοθούν από μία συσκευή στο τερματικό riconet και από εκεί σε μια άλλη συσκευή ή το τερματικό riconet θα μπορούσε να δημιουργήσει μια απευθείας σύνδεση από συσκευή σε συσκευή. Δεδομένου ότι οι αιτήσεις υποβάλλονται στον ελεγκτή riconet μετά τη διαδικασία ανακάλυψης γείτονα, όλα τα τερματικά θα πρέπει να μεταδίδουν στον ελεγκτή χρησιμοποιώντας τον κατευθυντικό τους τρόπο μετάδοσης και χρειάζεται να λαμβάνουν χρησιμοποιώντας την κατευθυντική τους λήψη. Η προσέγγιση αυτή είναι κατάλληλη για τη δικτύωση ενός αριθμού συσκευών που βρίσκονται σε σχετικά κοντινή απόσταση, όπως σε ένα προσωπικό δίκτυο (Personal Area Network, PAN), αλλά δεν είναι κατάλληλο για ένα πλέγμα συσκευών που καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις διάδοσης.

6.2.4 Αξιοποίηση Καναλιού και Χωρική Επαναχρησιμοποίηση

Ένα από τα οφέλη της μετάδοσης και λήψης υψηλής κατευθυντικότητας, είναι η μείωση των συν-καναλικών παρεμβολών (co-channel interference). Αυτό σημαίνει ότι σε ένα κατανεμημένο δίκτυο, περισσότερα ζεύγη πομπών και δεκτών μπορούν να επικοινωνούν ταυτόχρονα, δημιουργώντας αυτό που είναι γνωστό ως χωρική επαναχρησιμοποίηση. Ένα αποδοτικό πρωτόκολλο MAC θα επιτρέψει πολλές ταυτόχρονες εκπομπές και λήψεις όταν είναι αυτό είναι δυνατό.

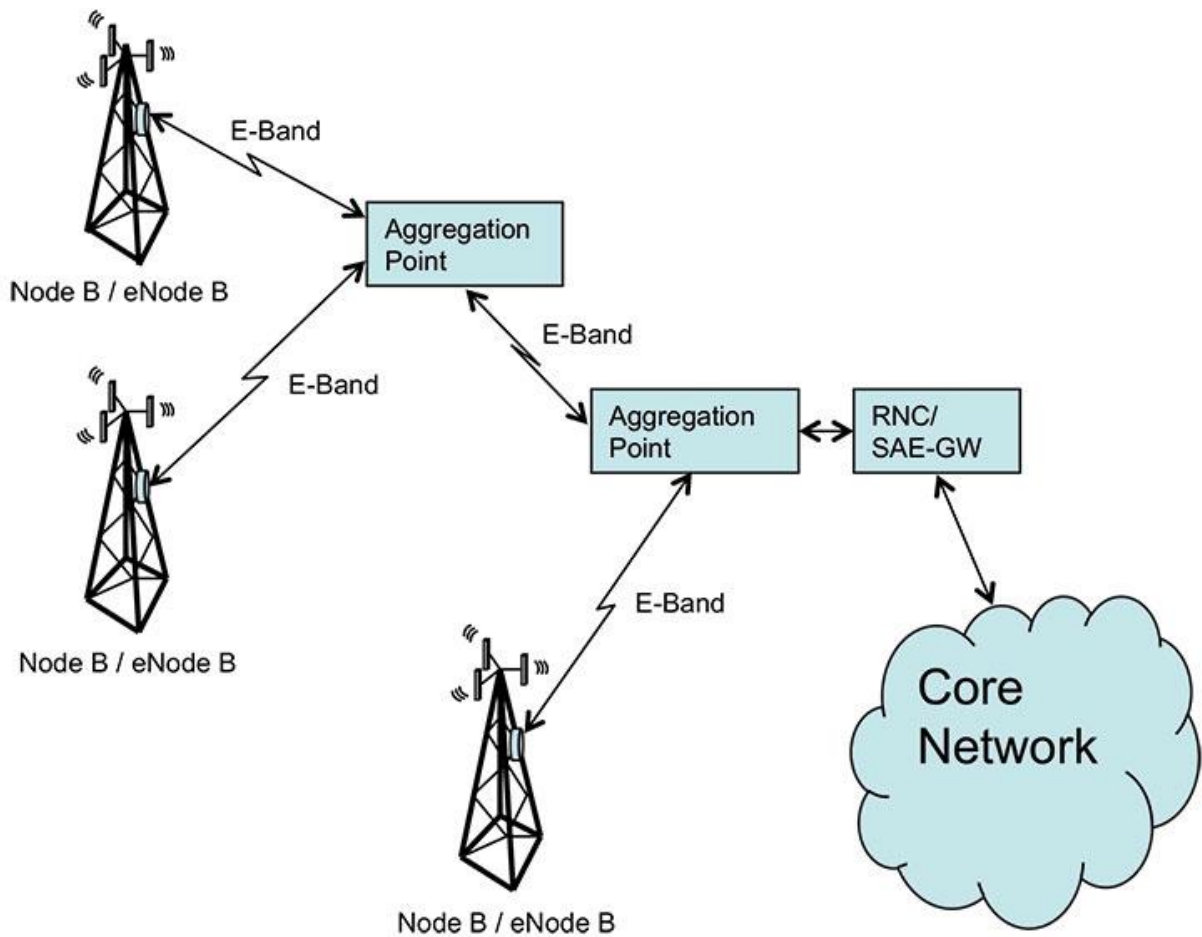
Η χωρική επαναχρησιμοποίηση παρουσιάζει ενδιαφέρον σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν πολλαπλές πηγές που έχουν πληροφορίες για μετάδοση σε πολλαπλούς προορισμούς. Η χωρική επαναχρησιμοποίηση είναι ένα κρίσιμο ζήτημα για τα κυψελοειδή συστήματα mmWave. Η φασματική αποδοτικότητα της περιοχής ενός κυψελοειδούς συστήματος απαιτεί την επιθετική επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εάν όλοι οι σταθμοί βάσης

επαναχρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα φέροντος. Αυτό είναι εύλογο σε δίκτυα mmWave, καθώς η χρήση της διαμόρφωσης δέσμης τείνει να μειώσει τον αντίκτυπο της συν-καναλικής παρεμβολής. Ακόμη μεγαλύτερη φασματική επαναχρησιμοποίηση μπορεί να επιτευχθεί επιτρέποντας στο σταθμό βάσης να διαμορφώσει τη δέσμη έτσι ώστε να εξυπηρετεί πολλαπλούς χρήστες ταυτόχρονα.

6.3 Χρήση Συστημάτων mmWave σε Δίκτυα Backhaul

Μία σημαντική εφαρμογή των συστημάτων επικοινωνίας mmWave είναι τα δίκτυα backhaul. Τα δίκτυα backhaul χρησιμοποιούνται σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας για τη σύνδεση των σταθμών βάσης μεταξύ τους, καθώς και για τη σύνδεση των σταθμών βάσης με την υποδομή του ενσύρματου δικτύου. Η εξασφάλιση συνδέσεων backhaul υψηλού ρυθμού δεδομένων σε αστικές περιοχές, με τις συμβατικές συχνότητες των κυψελοειδών συστημάτων, αποτελεί σημαντική πρόκληση και μπορεί να έχει απαγορευτικό κόστος υλοποίησης. Ως εκ τούτου, υπάρχει ενδιαφέρον για χρήση συστημάτων mmWave για την παροχή λύσεων backhaul, ειδικά στις συχνότητες λειτουργίας των 28, 38-40, και 73 GHz. Αν και είναι δυνατή η χρήση σταθερών κεραιών υψηλής κατευθυντικότητας, όπως είναι για παράδειγμα οι παραβολικές κεραιές, μια τέτοια λύση θα ήταν ευαίσθητη σε κακή ευθυγράμμιση λόγω καιρικών συνθηκών. Ως εκ τούτου, προκρίνεται η λύση των προσαρμόσιμων συστοιχιών κεραιών για την υλοποίηση των εφαρμογών backhaul με συστήματα mmWave.

Τα πρωτόκολλα για τις συνδέσεις backhaul στο MAC επίπεδο, είναι συνήθως λιγότερο περίπλοκα από ότι για τα πρότυπα IEEE 802.15.3c ή IEEE 802.11ad. Ο λόγος είναι ότι έχουμε επικοινωνία μεταξύ δύο συνδέσεων και όχι ένα δίκτυο, οπότε λειτουργίες όπως η ανακάλυψη γείτονα δεν χρειάζεται να εκτελεστούν. Επιπλέον, οι χρόνοι προσαρμογής μπορεί να μεταβάλλονται, ανάλογα με την ακριβή εγκατάσταση. Λόγω του ανέμου, πιθανότατα θα απαιτείται μικρό refinement κεραιών. Εάν η κύρια διαδρομή επικοινωνίας είναι αποκλεισμένη, τότε η σύνδεση θα πρέπει να επαναδιαπραγματεύεται. Επίσης, η γρήγορη προσαρμογή εξακολουθεί να είναι ζητούμενο για εφαρμογές backhaul.



Σχήμα 6.5. Απεικόνιση της χρήσης της E-Band σε ασύρματη υλοποίηση backhaul ενός κυψελοειδούς συστήματος

Equipment Type	NLOS/LOS	PTP/PMP ^[1]	Band	License Status	Channel BW ETSI, ANSI (MHz)	Modulation
Microwave	LOS	PTP/PMP ^[2]	C, Ku, Ka-band	License	3.5/7/14/28/56 10/20/30/40/50	QPSK to 2048-QAM
		PTP/PMP	Q-band	License	28/56/112	QPSK to 2048-QAM
Millimeter	LOS	PTP	V-band	Unlicensed	250 (min)	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
		PTP	E-band	Light license	250MHz to 5GHz	
VSAT	LOS	PTP	C, Ku, Ka-band	Licensed	26/33/50/72/500	QPSK, 8-PSK, 32-ASK
Sub-6GHz	NLOS/LOS	PMP/PTP	S, C-band	Licensed, unlicensed	5/10/20/40/80/160	64-QAM, 256-QAM OFDM
In-band relay	NLOS	PTP	LTE band 1- 43	Licensed	5/10/15/20/40	64-QAM, OFDM

[1] PTP = Point to Point; PMP = Point to Multipoint

[2] PMP in assigned bands

Πίνακας 6.2. Σύγκριση ασύρματων υλοποιήσεων συστημάτων backhaul για λειτουργία point-to-point και point-to-multipoint

Μία λύση backhaul δικτύου υποστηρίζει μια προσέγγιση codebook-based beamforming. Τα πολυεπίπεδα beamforming codebooks επιτρέπουν την αναζήτηση δέντρου στο γωνιακό επίπεδο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη. Το σύστημα αναζητά την καλύτερη δέσμη εκπομπής και λήψης με επαναληπτικό τρόπο. Ο πομπός αποκρίνεται σε διαφορετικά σχήματα δεσμών εκπομπής, σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο refinement. Ο δέκτης, ο οποίος μπορεί να προσαρμόσει το σχήμα της δέσμης λήψης, απαντά με την καλύτερη δέσμη εκπομπής. Κατόπιν, η αναζήτηση προχωρά χρησιμοποιώντας μεγαλύτερη ανάλυση του codebook. Η παρακολούθηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κάνει βελτιώσεις στα σχήματα δέσμης μόλις εγκαθιδρυθεί η σύνδεση. Τα αποτελέσματα ερευνών δείχνουν ότι το κέρδος beamforming που επιτυγχάνεται, προσεγγίζει το κέρδος που επιτυγχάνεται μέσα από εξαντλητική αναζήτηση με υψηλά SNR. Ως εκ τούτου, οι ιεραρχικά προσαρμοσμένες δέσμες παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα για εφαρμογές backhaul.

Equipment Type	NLOS LOS	Range	Latency	Capacity, Single Channel	Application	Comments
Microwave	LOS	<10km	<0.2ms	Mid-high 500Mbps	Macro cell Small Cell Aggregation	High-reliability and high-capacity links suit macro-cell applications
Millimeter	LOS	<4km (E-band) <<1km (V-band)	<50μs	Mid-high 300Mbps 10Gbps	Small cell Aggregation Macro cell (E-band)	V-band leverages narrow beam and oxygen absorption to improve frequency reuse
Satellite VSAT	LOS	>10km	<120ms (MEO) <330ms (GEO)	Mid-High <1Gbps	Small cell	Remote/rural sites, serve areas with no infrastructure, MEO = Medium Earth Orbit, GEO = Geosynchronous Earth Orbit
Sub-6GHz	NLOS LOS	1km (NLOS) 10km (LOS)	<12ms	Low-mid 500Mbps	Metro, <u>pico</u> , <u>femto</u>	Fast deployment, unpredictable capacity
In-band relay	NLOS	<10km	+10ms	Low-mid	Pico, <u>femto</u>	Occupies LTE spectrum, adds 10ms latency to donor <u>eNodeB</u> latency

Πίνακας 6.3. Σύγκριση των χαρακτηριστικών λειτουργίας μεταξύ διαφορετικών υλοποιήσεων ασύρματων συστημάτων backhaul

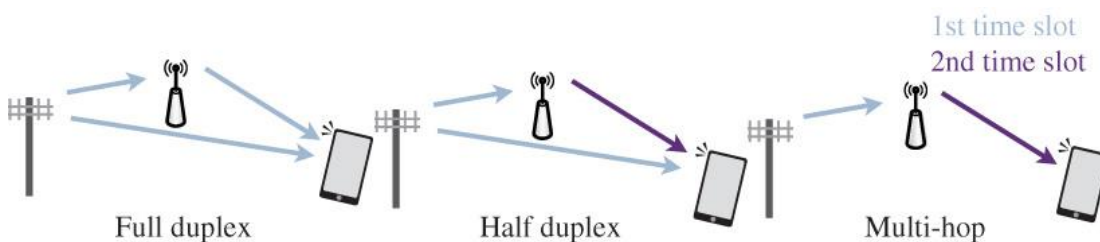
6.4 Χρήση Αναμεταδοτών για Αύξηση της Ραδιοκάλυψης

Η επικοινωνία mmWave λειτουργεί καλύτερα σε LOS συνδέσεις επικοινωνίας. Δυστυχώς, η LOS επικοινωνία δεν είναι πάντα εφικτή. Στις περιπτώσεις λοιπόν που δεν είναι δυνατή η οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη, μια φυσική προσέγγιση επικοινωνίας είναι η διάδοση των σημάτων μέσα από τα εμπόδια που βρίσκονται εντός του καναλιού. Το μειονέκτημα της διάδοσης των σημάτων μέσα από τα εμπόδια είναι η πολύ μεγάλη μείωση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος, η οποία εξαρτάται από το υλικό των εμποδίων και από το σενάριο διάδοσης. Αντίκτυπο της μείωσης της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος, είναι ο χαμηλότερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων. Μια εναλλακτική λύση είναι η διάδοση γύρω από τα εμπόδια, με τη δημιουργία εναλλακτικών διαδρομών διάδοσης χρησιμοποιώντας έναν αναμεταδότη (relay). Με αυτόν τον τρόπο, η άμεση επικοινωνία μεταξύ ενός πομπού και δέκτη αντικαθίσταται από μία επικοινωνία πολλαπλών ανακλάσεων.

Ένας αναμεταδότης λαμβάνει ένα σήμα εισόδου, εκτελεί κάποια επεξεργασία σήματος, και στη συνέχεια μεταδίδει ένα νέο σήμα. Ο αναμεταδότης μπορεί να είναι μια άλλη συσκευή επικοινωνίας του δικτύου που είτε παράγει, είτε λαμβάνει τις δικές του πληροφορίες ή μπορεί να είναι ένα ειδικά σχεδιασμένο τμήμα του hardware του συστήματος. Ένα παράδειγμα χρήσης αναμεταδότη, είναι οι αναμεταδότες που χρησιμοποιούνται σε δίκτυα WiFi για την επέκταση της κάλυψης σε χώρους μεγάλης επιφάνειας. Οι μεθοδολογίες αναμετάδοσης είναι κατάλληλες για τα μελλοντικά ευρείας ζώνης δίκτυα ασύρματης επικοινωνίας, τα οποία θα χρησιμοποιούν μικρότερη εμβέλεια κάλυψης.

Τα διαφορετικά είδη λειτουργίας αναμεταδοτών απεικονίζονται στο Σχήμα 6.2. Μέχρι στιγμής στα συστήματα mmWave, η περισσότερη έρευνα επικεντρώθηκε στους multi-hop αναμεταδότες. Οι αναμεταδότες που λειτουργούν σε λειτουργία half duplex, είναι σε θέση είτε να λαμβάνουν είτε να εκπέμπουν, αλλά όχι και τα δύο ταυτόχρονα. Τυπικά, οι αναμεταδότες εναλλάξ λαμβάνουν και μεταδίδουν ένα μπλοκ δεδομένων. Αν και η αναμετάδοση είναι ένα είδος multi-hop επικοινωνίας, ο όρος αναμετάδοση αναφέρεται στη χρήση των πολλαπλών ανακλάσεων για την υποβοήθηση της εκπομπής μεταξύ μίας

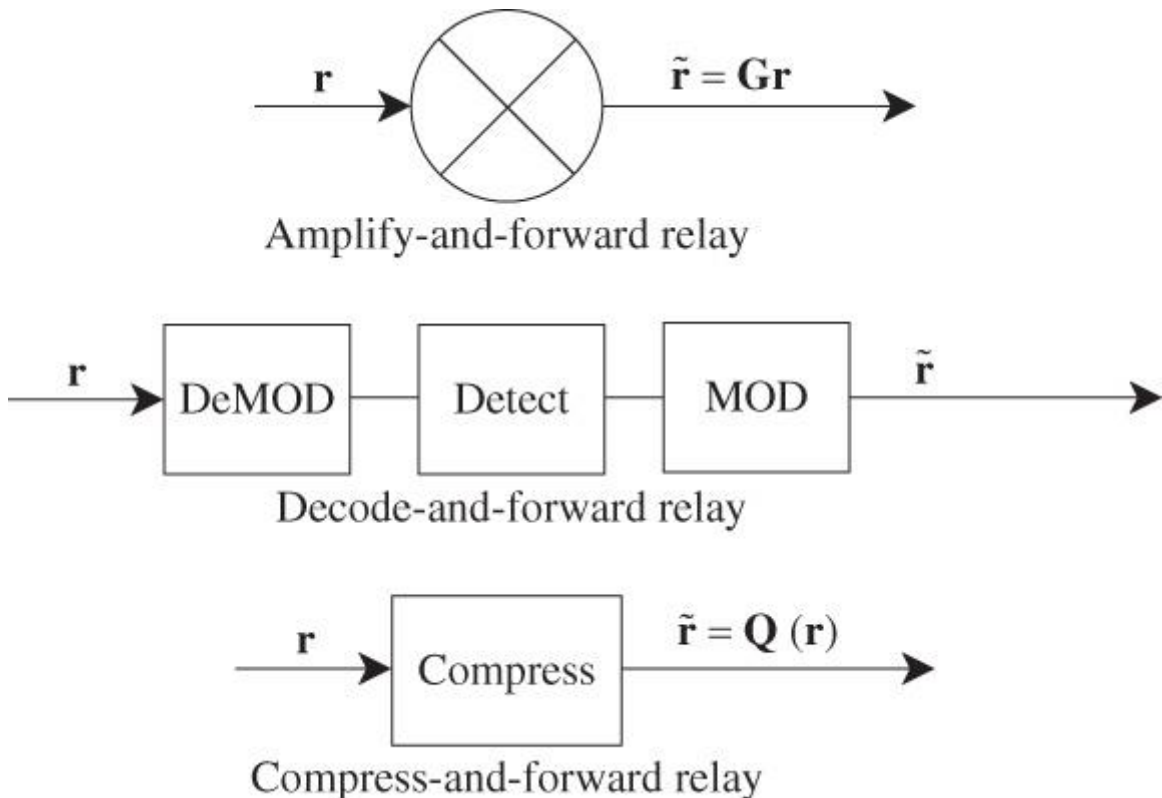
μοναδικής πηγής και ενός προορισμού και τυπικά εκτελείται στο 1^ο και 2^ο επίπεδο της στοίβας δικτύου. Σε ad hoc ή mesh δίκτυα, η multi-hop επικοινωνία πραγματοποιείται από όλους τους κόμβους του δικτύου ως λειτουργία του 3^{ου} επιπέδου και μπορεί να περιλαμβάνει πρόσθετες λειτουργίες, όπως δρομολόγηση και διευθυνσιοδότηση. Οι αναμεταδότες και η multi-hop επικοινωνία αποτελούν σημαντικούς μηχανισμούς για την αντιμετώπιση της ύπαρξης εμποδίων εντός του καναλιού διάδοσης στα συστήματα mmWave.



Σχήμα 6.6. Απεικόνιση διαφορετικών υλοποιήσεων αναμεταδοτών

Οι αναμεταδότες μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την επεξεργασία σήματος που εφαρμόζεται για τη δημιουργία του σήματος μετάδοσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3. Τα δύο πιο δημοφιλή είδη των ευφών λειτουργιών επαναληπτών είναι το decode-and-forward (DF) και το amplify-and-forward (AF). Σε λειτουργία DF, ο αναμεταδότης αποκωδικοποιεί το λαμβανόμενο σήμα, λαμβάνει αποφάσεις σχετικά με τα bits που μεταδίδονται και στη συνέχεια κωδικοποιεί εκ νέου το σήμα πριν την αναμετάδοσή του. Σε λειτουργία AF, ο αναμεταδότης μπορεί να εκτελέσει κάποια επεξεργασία σήματος για το λαμβανόμενο σήμα, αλλά δεν λαμβάνει αποφάσεις σχετικά με τα μεταδιδόμενα bits. Ένας αναλογικός επαναλήπτης αποτελεί μια θεμελιώδη περίπτωση λειτουργίας AF, στην οποία το λαμβανόμενο σήμα ενισχύεται και αναμεταδίδεται. Για ένα απλό μοντέλο απώλειας διαδρομής, η λειτουργία DF έχει υψηλότερη επίδοση όταν ο αναμεταδότης είναι πιο κοντά στον πομπό, ενώ η AF έχει υψηλότερη επίδοση όταν ο αναμεταδότης είναι πιο κοντά στο δέκτη. Μια στρατηγική που ονομάζεται compress-and-forward έχει αποδειχθεί ότι παρέχει υψηλότερη επίδοση, αλλά δεν έχει μελετηθεί ευρέως στην πράξη. Μια στρατηγική που ονομάζεται demodulate-and-forward λαμβάνει αποφάσεις σχετικά με τα σύμβολα αστερισμού που εκπέμπει, αλλά δεν εκτελεί αποκωδικοποίηση ελέγχου σφαλμάτων, μειώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο τη λανθάνουσα κατάσταση του αναμεταδότη εις βάρος της αξιοπιστίας. Τόσο η λειτουργία DF, όσο και η AF, υποστηρίζεται στο πρότυπο IEEE 802.11ad. Η αναμετάδοση στο πρότυπο IEEE

802.15.3c δεν είναι σαφής, καθώς η multi-hop επικοινωνία είναι ενσωματωμένη στο πρωτόκολλο MAC. Το ECMA 387 υποστηρίζει την αναμετάδοση AF από συσκευές υψηλής λειτουργικότητας. Η αναμετάδοση και η multi-hop επικοινωνία για την αποφυγή εμποδίων και τη βελτίωση των παρεμβολών κάλυψης ή την ασφάλεια, αποτελεί ένα μόνιμο θέμα έρευνας για τα συστήματα mmWave. Για εξωτερικά κυψελοειδή σενάρια, οι αναμεταδότες και οι επαναλήπτες είναι πιθανό να γίνουν περισσότερο διάχυτοι, λόγω της ανάγκης για ανάπτυξη πυκνών υποδομών.



Σχήμα 6.7. Απεικόνιση διαφορετικών ειδών λειτουργίας αναμεταδοτών

Σε δίκτυα με πολλαπλές ταυτόχρονες συνδέσεις, η χρήση αναμεταδοτών μπορεί να μειώσει τη χωρική επαναχρησιμοποίηση. Η αναμεταδιδόμενη σύνδεση μπορεί να βελτιώσει το throughput σύνδεσης μίας ζεύξης, εις βάρος όμως της μείωσης του συνολικού throughput του συστήματος.

6.5 Υποστήριξη Πολυμεσικών Εφαρμογών

Σημαντικά μοντέλα αξιοποίησης των συστημάτων mmWave αποτελούν τα σήματα υψηλής ποιότητας ήχου, βίντεο και απεικονίσεων. Αυτό συμβαίνει επειδή το φάσμα των

μικροκυμάτων δεν επαρκεί για να υποστηρίξει τις υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων που απαιτούνται από ασυμπιεστές πηγές βίντεο. Ως αποτέλεσμα, η υποστήριξη εφαρμογών πολυμέσων (multimedia) αποτέλεσε προτεραιότητα κατά την ανάπτυξη των προτύπων WPAN και WLAN και έχει επηρεάσει τις σχεδιαστικές αποφάσεις κατά την ανάπτυξη των ασύρματων συσκευών.

Η υποστήριξη ασυμπιεστού βίντεο είναι μια απαίτηση για τα συστήματα mmWave, εφόσον αυτά πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για την αντικατάσταση των καλωδίων στους σταθμούς εργασίας υπολογιστών ή στα κέντρα πολυμέσων. Παραδείγματα καλωδιακών συνδέσεων που μπορούν να αντικατασταθούν, συμπεριλαμβάνουν τα πρότυπα HDMI (high-definition multimedia interface) και DVI (digital video interface). Για την αντικατάσταση των καλωδίων, τα συστήματα επικοινωνίας mmWave θα πρέπει να λειτουργούν αγνωστικιστικά ως προς το περιεχόμενο των σημάτων, παρέχοντας υψηλής ποιότητας υπηρεσίες για ταινίες, παιχνίδια και γενικές απεικονίσεις υπολογιστών.

Υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τρόποι για την υποστήριξη ασυμπιεστού βίντεο σε δίκτυα WLAN και WPAN. Παρά το γεγονός ότι το βίντεο μπορεί να αντιμετωπιστεί ως άλλη μία πηγή δεδομένων, το ασυμπιεστο βίντεο διαθέτει πλεονασμό ή συσχέτιση στο χώρο και το χρόνο. Επειδή ο τελικός χρήστης για τις περισσότερες εφαρμογές βίντεο είναι ο άνθρωπος, αυτός ο πλεονασμός μπορεί να αξιοποιηθεί για τη δημιουργία αλγορίθμων σφαλμάτων απόκρυψης, που ελαχιστοποιούν την αντιληπτική παραμόρφωση. Αυτό μειώνει την επίδραση των σφαλμάτων και καθιστά την εμπειρία θέασης πιο ευχάριστη.

Ο πιο κοινός τρόπος για την εφαρμογή επεξεργασίας σήματος βίντεο σε συστήματα με συχνότητα λειτουργίας 60 GHz, είναι η ταξινόμηση bits σε επίπεδο pixel με βάση τις επιπτώσεις τους στην ποιότητα του βίντεο και στη συνέχεια, η αντιμετώπιση κάθε κατηγορίας με διαφορετικό τρόπο κατά τη διάρκεια της μετάδοσης. Η κατάταξη γίνεται κατά κανόνα με βάση τα πιο σημαντικά bits (MSBs) και τα λιγότερο σημαντικά bits (LSBs) για κάθε χρώμα του κάθε pixel. Η κατάταξη μεταξύ MSB και LSB μπορεί να είναι ευέλικτη και να επικοινωνείται μέσα από ένα κανάλι ελέγχου ή μπορεί να είναι σταθερή. Για παράδειγμα, εάν υποστηρίζεται βάθος χρώματος με 24 bits, τότε το κόκκινο, το

πράσινο και το μπλε θα αντιπροσωπεύονται με 8 bits το καθένα. Μία σταθερή κατάταξη θα διέθετε 4 bits για το MSB και 4 bits για το LSB για κάθε pixel.

Για τη δημιουργία διαδρομών δεδομένων με διαφορετική αξιοπιστία για τις MSB και LSB ταξινομήσεις, συχνά χρησιμοποιείται η UEP (Unequal Error Protection). Η αρχή λειτουργίας της UEP είναι η χρησιμοποίηση κάποιου συνδυασμού διαφορετικών διαμορφώσεων και κωδικοποιήσεων για την αποστολή των MSBs στο κανάλι επικοινωνίας, με χαμηλότερο ρυθμό σφάλματος bit από τα LSBs. Η UEP πρέπει να αντιπαραβάλλεται με την EEP (Equal Error Protection), όπου οι διαφορετικές κατηγορίες αντιμετωπίζονται ισότιμα.

Υπάρχουν διάφορες μορφές UEP που έχουν μελετηθεί για τη μετάδοση πολυμέσων σε δίκτυα WPAN και WLAN. Η UEP-by-coding προκύπτει όταν κάθε διαδρομή δεδομένων λαμβάνει ένα διαφορετικό ρυθμό κώδικα FEC (Forward Error Coding), αλλά αποστέλλεται χρησιμοποιώντας την ίδια μορφή διαμόρφωσης. Η UEP-by-MCS προκύπτει όταν κάθε διαδρομή δεδομένων λαμβάνει διαφορετικό σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (Modulation and Coding Scheme, MCS), το οποίο αποτελείται από ένα δυνητικά διαφορετικό συνδυασμό τάξης διαμόρφωσης και ρυθμού κώδικα FEC. Η UEP-by-modulation προκύπτει όταν ένας ασύμμετρος αστερισμός χρησιμοποιείται για τη μετάδοση κάθε διαδρομής δεδομένων, με τα πιο αξιόπιστα bits να χαρτογραφούνται στα σημεία αστερισμού με μεγαλύτερη ελάχιστη απόσταση.

Η απόκρυψη σφάλματος (error concealment) είναι ένα σημαντικό συστατικό των μεταδόσεων σημάτων βίντεο. Η ιδέα είναι η αξιοποίηση της συσχέτισης στην πηγή, για τη μείωση της αντιληπτικής επίδρασης των σφαλμάτων. Για την εφαρμογή απόκρυψης σφάλματος, απαιτείται η γνώση της δημιουργίας ενός σφάλματος. Με την UEP, αυτό συνηθέστερα επιτυγχάνεται με την προσθήκη διαφορετικών κωδικών CRC (Cyclic Redundancy Check) για τα MSB και LSB τμήματα των πακέτων. Με αυτόν τον τρόπο, καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός της λανθασμένης αποκωδικοποίησης ενός πακέτου και είτε γίνεται αίτημα για να αποσταλεί ξανά ή εφαρμόζεται κάποιας μορφής απόκρυψη σφάλματος. Αν το LSB έχει χαθεί, τότε θα απεικονιστούν μόνο τα MSB τμήματα των δεδομένων pixel. Για την ενεργοποίηση της απόκρυψης σφάλματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο διαμερισμός pixel για την αξιοποίηση του χωρικού πλεονασμού μεταξύ των εικονοστοιχείων, ο οποίος δηλώνει υψηλή πιθανότητα

γειτονικά pixels να έχουν παρόμοιο χρώμα. Στη συνέχεια, αν έχει χαθεί ένα subpacket που αντιστοιχεί σε ένα από τα τμήματα πακέτου, ένα από τα υπόλοιπα τμήματα μπορεί να αντιγραφεί στη θέση του, με αποτέλεσμα να έχουμε μικρότερη αντιληπτική παραμόρφωση συγκριτικά με τη μη εμφάνιση των εικονοστοιχείων.

Technology	Frequency band	Maximum data rate	Maximum range (meters)	Key feature
802.11ad	60 GHz	7 Gbits/s	10	Beamforming
WirelessHD	60 GHz	10 to 28 Gbits/s	10	Beamforming
WHDl	5 GHz	1.5 Gbits/s	30	MIMO
802.11n	2.4 or 5 GHz	600 Mbits/s	100	MIMO
802.11ac	5 GHz	7 Gbits/s	50	MIMO
UWB	3.1 to 10.6 GHz	480 Mbits/s	10	Ultra-low power

Πίνακας 6.4. Πρωτόκολλα για υψηλής ταχύτητας video streaming σε μικρές αποστάσεις

Μία προσέγγιση για την υποστήριξη βίντεο για εφαρμογές mmWave είναι το αίτημα αυτόματης επανάληψης (Automatic Repeat Request, ARQ) ασυμπιέστου βίντεο. Η ιδέα είναι ότι η ανατροφοδότηση της κατάστασης αποκωδικοποίησης του MSB και του LSB θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό των πακέτων που χρειάζονται αναμετάδοση. Εάν το πακέτο MSB δεν αποκωδικοποιείται σωστά, τότε μπορεί να αναμεταδοθεί με χαμηλότερη διαμόρφωση σφάλματος και ρυθμό κωδικοποίησης, ενώ αν το MSB ληφθεί σωστά, τότε δεν ζητείται αναμετάδοση, ανεξάρτητα από την κατάσταση του LSB. Μια άλλη προσέγγιση για την απόκρυψη σφάλματος, είναι η χρησιμοποίηση ορισμένων ιδιοτήτων των κωδίκων Reed-Solomon στο φυσικό επίπεδο για την παροχή ανάδρασης από το PHY στα επίπεδα MAC. Εξαιτίας ορισμένων ιδιοτήτων των κωδίκων Reed-Solomon, ένας τυπικός Reed-Solomon αποκωδικοποιητής θα έχει ως έξοδο είτε μια αποτυχία αποκωδικοποίησης, είτε μία λάθος κωδικολέξη. Οι αποτυχίες αποκωδικοποίησης μπορεί να περάσουν στο επίπεδο MAC και να χρησιμοποιηθούν σαν μια αποτυχία CRC, αλλά με μεγαλύτερη διακριτικότητα. Ο διαμερισμός pixel μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντικαταστήσει αποτυχημένα πακέτα με γειτονικά πακέτα. Αν μια κωδικολέξη από άλλο τμήμα πακέτου δεν είναι διαθέσιμη για την αντικατάσταση της χαμένης κωδικολέξης, τότε χρησιμοποιείται μια

άλλη γειτονική κωδικολέξη Reed-Solomon. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται κώδικας ανταλλαγής (code swapping) και αποτελεί μέρος της ECMA-387.

6.6 Κυψελοειδή Δίκτυα με Συστήματα mmWave

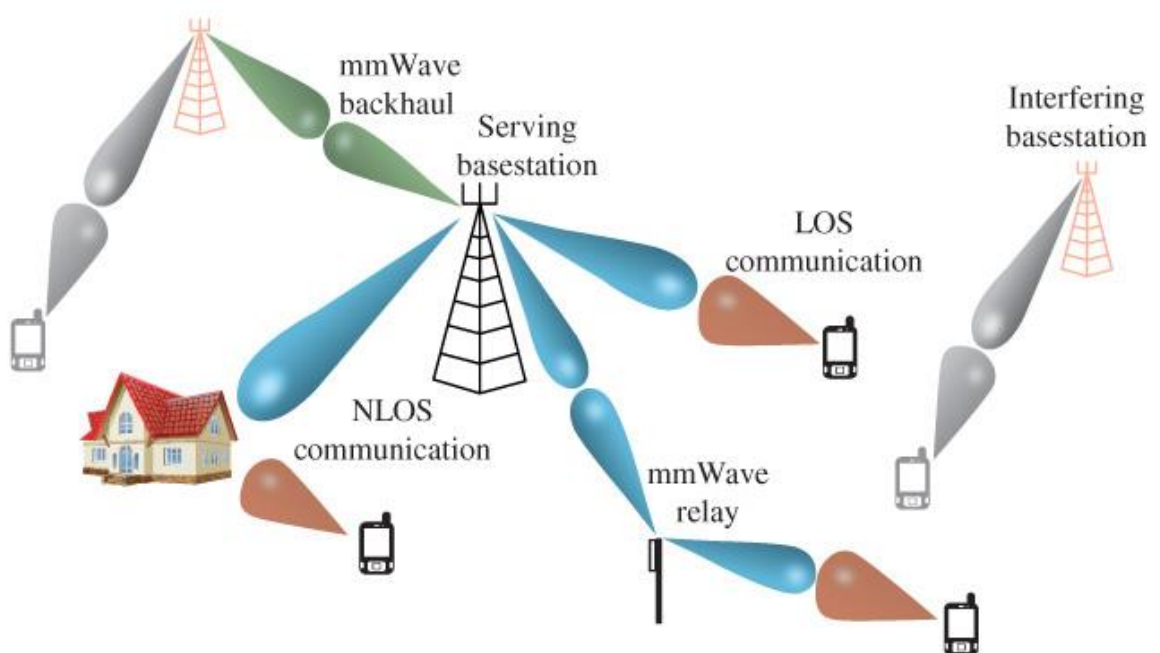
Η ποιότητα του καναλιού mmWave ποικίλλει ανάλογα με το εάν η διαδρομή διάδοσης είναι LOS ή NLOS. Αυτή η παρατήρηση είναι χρήσιμο να ενσωματώνεται κατά την ανάλυση και σχεδίαση κυψελοειδών συστημάτων mmWave. Ο δείκτης SINR (Single-to-Interference-plus-Noise-Ratio) στο downlink ενός συστήματος mmWave υπολογίζεται:

$$SINR = \frac{h_0 G_0 PL(|X_0|)}{\sigma^2 + \sum_{\ell > 0: X_\ell \in \Phi} h_\ell G_\ell PL(|X_\ell|)} \quad (6.1)$$

όπου h_ℓ είναι η διάλειψη στον χρήστη, G_ℓ είναι το συνδυασμένο κέρδος του πομπού και το beamforming του δέκτη, PL είναι η απώλεια διαδρομής προς τον χρήστη, σ^2 είναι η ισχύς του θορύβου, το X_ℓ δηλώνει τη θέση των σταθμών βάσης και το X_0 δηλώνει το σταθμό βάσης με τη μικρότερη απώλεια διαδρομής προς τον χρήστη. Διαφορετικές φόρμουλες απώλειας διαδρομής, με διαφορετικούς εκθέτες απώλειας διαδρομής LOS και NLOS, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της απώλειας διαδρομής PL, ανεξάρτητα με το αν ο σταθμός βάσης είναι LOS προς τον χρήστη ή όχι.

Τα συστήματα mmWave μπορούν να επιτύχουν αποδεκτή κάλυψη SINR όταν οι σταθμοί βάσης είναι αρκετά πυκνοί, ακόμα και αν υπάρχουν εμπόδια εντός του καναλιού διάδοσης και υψηλή απώλεια διαδρομής. Η κάλυψη των δικτύων mmWave εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πυκνότητα των σταθμών βάσης. Συγκεκριμένα, τα mmWave κυψελοειδή δίκτυα χρειάζονται πυκνή ανάπτυξη των σταθμών βάσης για να επιτύχουν αποδεκτή πιθανότητα κάλυψης. Η αύξηση ωστόσο της πυκνότητας των σταθμών βάσης σε ένα αρκετά πυκνό δίκτυο, δεν μπορεί να βελτιώσει την SINR κάλυψη. Ένας χρήστης μπορεί να παρατηρήσει μόνο έναν πεπερασμένο αριθμό σταθμών βάσης εντός της περιοχής LOS, λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία των εμποδίων εντός του καναλιού. Η αύξηση της πυκνότητας των σταθμών βάσης, ισοδύναμα θα συσσωρεύσει περισσότερους σταθμούς βάσης στην περιοχή LOS, καθιστώντας τους και αυτούς LOS. Όταν η πυκνότητα των σταθμών βάσης είναι χαμηλή, η αύξηση της πυκνότητας μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση του συνολικού

SINR. Αντίθετα, όταν οι σταθμοί βάσης είναι ήδη αρκετά πυκνοί, η συσσώρευση περισσότερων σταθμών βάσης στην περιοχή LOS θα αυξήσει τον αριθμό των ισχυρών παρεμβολών LOS και έτσι θα αυξηθεί η συνολική ισχύς παρεμβολής, η οποία μπορεί να προκαλέσει μείωση της κάλυψης SINR. Η μείωση της κάλυψης SINR σε ένα πυκνό δίκτυο, δείχνει επίσης ότι τα πυκνά δίκτυα mmWave μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα καθεστώς περιορισμένων παρεμβολών και η απόδοσή τους μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με συνεργασία μεταξύ των σταθμών βάσης και έξυπνη μεταγωγή των σταθμών βάσης σε κατάσταση on και off.



Σχήμα 6.8. Απεικόνιση ενός mmWave κυψελοειδούς συστήματος

6.7 Το Πρότυπο IEEE 802.11ad

Το πρότυπο IEEE 802.11ad είναι το πρότυπο στο οποίο θα βασιστεί ο σχεδιασμός των μελλοντικών ασύρματων τοπικών δικτύων (Wireless Local Area Networks, WLANs). Το IEEE 802.11ad επικεντρώνεται στο φάσμα των 60 GHz. Η υλοποίηση του IEEE 802.11ad προκρίνει ως καλύτερη λύση την αξιοποίηση της υψηλής ζώνης συχνοτήτων των 60 GHz των συστημάτων mmWave, όπου είναι διαθέσιμο περισσότερο εύρος ζώνης, εστιάζοντας λιγότερο στην φασματική αποδοτικότητα. Οι σχεδιαστικές προκλήσεις του IEEE 802.11ad περιλαμβάνουν την αξιοποίηση της τεχνολογία αιχμής των συσκευών

CMOS χιλιοστομετρικού κύματος, την κατανάλωση πολύ μεγάλου εύρου ζώνης, την εισαγωγή της διεύθυνσης προσαρμόσιμων δεσμών mmWave και την εφαρμογή κατευθυντικότητας στο MAC επίπεδο. Από την άλλη πλευρά, το IEEE 802.11ad προσφέρει μια πιο άμεση μετάβαση προς τα μελλοντικά δίκτυα, τα οποία αναπόφευκτα θα αυξήσουν τις συχνότητες λειτουργίας, προκειμένου να μπορούν να ανταποκριθούν στις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για μεγαλύτερο εύρος ζώνης.

Το κύριο χαρακτηριστικό του προτύπου IEEE 802.11ad είναι το directional multi-gigabit (DMG) επίπεδο PHY, με δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων gigabit-per-second μέσω beamforming πολλαπλών κεραιών στο φάσμα των 60 GHz. Η distributed coordination function (DCF) με τη CSMA/CA μεθοδολογία πρόσβασης στο φάσμα, που συναντάμε σε προγενέστερες εκδόσεις του προτύπου IEEE 802.11, δεν μπορούν να εξυπηρετήσουν επαρκώς το PHY DMG λόγω των υψηλότερων απωλειών διαδρομής και των κατευθυντικών συνδέσεων που αυτό διαθέτει. Για το λόγο αυτό, με μια διαδικασία παρόμοια με την πρόσβαση στο μέσο του προτύπου IEEE 802.15.3c, η πρόσβαση DMG παρέχεται στους χρήστες από το συντονιστή ή όπως ορίζεται στο πρότυπο IEEE 802.11ad, είτε από ένα personal basic service set control point (PCP), είτε από ένα access point (AP). Τα PCPs είναι απαραίτητα για τις συσκευές IEEE 802.11ad που λειτουργούν σε ένα ad hoc πλαίσιο, όπου στο παρελθόν δεν υπήρχε διαθέσιμος κεντρικός έλεγχος. Επίσης, κάθε συσκευή IEEE 802.11ad αναφέρεται ως σταθμός (STA), ανεξάρτητα από το αν λειτουργεί ως ένα PCP/AP.

Η αρχιτεκτονική του επιπέδου MAC για τα DMG STAs παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις με τη λειτουργία κατανεμημένου συντονισμού. Η κύρια διαφορά για τα DMG STAs είναι η αντικατάσταση της DCF πρόσβασης καναλιού με τη DMG. Η DMG πρόσβαση καναλιού περιέχεται εντός διαστημάτων beacons. Κάθε διάστημα beacon έχει μορφοποιηθεί σε διακριτή περίοδο πρόσβασης από ένα PCP ή AP, σχηματίζοντας ένα διάγραμμα, όπου η επικοινωνία είναι διακριτή σε κάθε περίοδο. Εάν ένα STA δεν είναι PCP ή AP, δεν μπορεί να έχει πρόσβαση στο μέσο DMG χωρίς να του παραχωρηθούν πλαίσια πρόσβασης από ένα PCP/AP. Οι περίοδοι πρόσβασης διακρίνονται σε beacon transmission interval (BTI), association beamforming training (A-BFT), announcement transmission interval (ATI), data transfer interval (DTI), scheduled service period (SP) και contention-based access period (CBAP).

	802.11n	802.11ac	802.11ad
Throughput	600 Mbps	3.2 Gbps	Up to 7 Gbps
Coverage	Home, 70 m	Home, 30 m	Room, <5m
Freq. Band	2.4/5 GHz	5 GHz	2.4/5/60 GHz
Antennas	4 x 4 MIMO	8 x 8 MIMO	>10 x 10 MIMO
Applications	Data, Video	Video	Uncompressed Video

Πίνακας 6.5. Σύγκριση μεταξύ των προτύπων IEEE 802.11n, 802.11ac και 802.11ad

Τα δίκτυα IEEE 802.11ad με συχνότητα λειτουργίας 60 GHz μειώνουν τις παρεμβολές και βελτιώνουν τη χωρική επαναχρησιμοποίηση μέσω της ομαδοποίησης των PCPs/APs. Για παράδειγμα, εάν δύο PCPs/APs συντονίζουν δύο διακριτές περιόδους DMG πρόσβασης ταυτόχρονα, θα πρέπει να βρίσκονται σε μη-επικαλυπτόμενες χρονικές περιόδους για την αποφυγή παρεμβολών. Για τη δημιουργία μη-επικαλυπτόμενων επιπέδων, ένα νέο επίπεδο δημιουργείται στην ιεραρχία πρόσβασης μέσω συγχρονισμού των PCPs (S-PCPs) και συγχρονισμού των APs (S-APs). Τα S-APs/S-PCPs είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία συμπλεγμάτων (clusters) PCPs/APs μη-επικαλυπτόμενων περιόδων πρόσβασης, με δύο τρόπους: decentralized clustering, όπου όλα τα DMG PCPs/APs μέσα σε ένα σύμπλεγμα συντονίζονται από ένα S-PCP/S-AP και centralized clustering, όπου ένα κεντρικό σύμπλεγμα περιέχει πολλαπλά συντονισμένα S-APs μέσα σε ένα σύμπλεγμα.

Η διαμόρφωση δέσμης των κεραιών διαχωρίζεται σε δύο διαδικασίες: στο sector sweep και στο beam refinement. Το sector sweep είναι το πρώτο βήμα της κατάρτισης των κεραιών σε πομπό και δέκτη. Μια ενιαία κεραία στο DMG PHY επίπεδο μπορεί να διαθέτει μέχρι 64 τομείς, ενώ ο συνολικός αριθμός των τομέων σε όλες τις κεραιές δεν μπορεί να υπερβαίνει τους 128. Το sector sweep περιλαμβάνει τέσσερις συνιστώσες: initiator transmit ή receive sector sweep (TXSS ή RXSS), responder TXSS ή RXSS, feedback και acknowledgement (ACK). Στο TXSS, τα διαμορφωμένα πλαίσια CPHY εκπέμπονται για κάθε συνδυασμό του τομέα εκπομπής STA και κάθε κεραία, με ένα σταθερό τομέα στο STA λήψης. Αυτό επιτρέπει στο δέκτη να υπολογίσει την καλύτερη διαμόρφωση τομέα στον πομπό σε σχέση με όλες τις πιθανές κεραιές λήψης. Στη

λειτουργία RXSS οι ρόλοι αντιστρέφονται, καθώς τα πλαίσια RXSS αποστέλλονται με ένα σταθερό τομέα για κάθε συνδυασμό των κεραιών εκπομπής και κάθε τομέα στο STA λήψης. Τα sector sweeps ολοκληρώνονται με feedback και ACK μηνύματα, τα οποία εξυπηρετούν δύο σκοπούς: την ανταλλαγή πληροφοριών για τον καλύτερο τομέα και την επιβεβαίωση της επιτυχούς λειτουργίας του sector sweep.

Στο beam refinement, όταν το επίπεδο του τομέα κατάρτισης έχει ολοκληρωθεί, οι δέσμες μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω εάν είναι επιθυμητό, μέσω του beam refinement protocol (BRP). Το beam refinement ενεργοποιείται από δύο τύπους πακέτων BRP: Τα BRP-RX και τα BRP-TX. Τα BRP πακέτα είναι πακέτα του επιπέδου PHY με συνημμένη κατάρτιση κεραιών. Τα πακέτα BRP-RX χρησιμοποιούν ακολουθίες κατάρτισης TRN-R, οι οποίες επιτρέπουν τη λήψη αξιολόγησης των κεραιών λήψης, ενώ τα πακέτα BRP-TX χρησιμοποιούν ακολουθίες κατάρτισης TRN-T, οι οποίες επιτρέπουν την αξιολόγηση των κεραιών εκπομπής. Τα πακέτα BRP-TX μπορούν να μεταδοθούν με πολλαπλές διαμορφώσεις κεραιών, δεδομένου ότι η διάταξη των κεραιών εκπομπής επιτρέπεται να αλλάξει για κάθε ακολουθία TRN-T εντός του πακέτου BRP-TX. Ο αριθμός των TRN-R/TRN-T ακολουθιών σε κάθε πακέτο BRP, καθορίζεται από τον αριθμό των επιθυμητών διατάξεων κεραιών για κατάρτιση στο δέκτη ή στον πομπό.

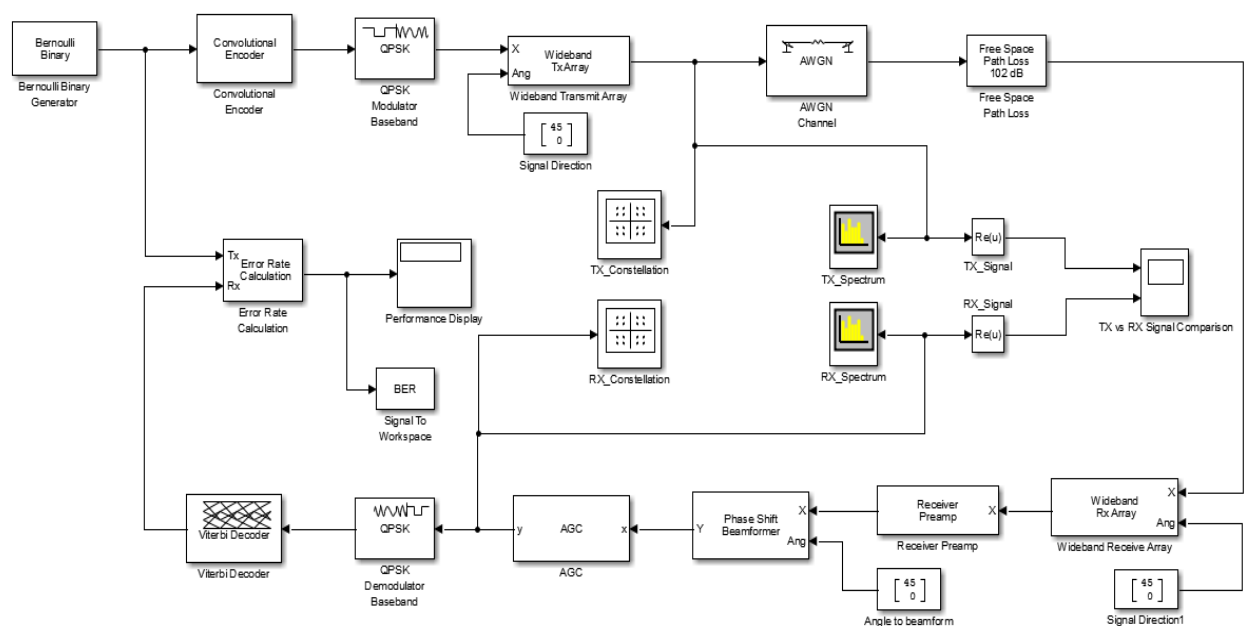
Η χρήση αναμεταδοτών είναι πολύ χρήσιμη για εφαρμογές με συχνότητα λειτουργίας στα 60 GHz, προκειμένου να επεκταθεί η εμβέλεια μετάδοσης, να καταστεί δυνατή η εφαρμογή παρακολούθησης και ασφάλειας στο δίκτυο, καθώς και η προστασία από διακοπές σύνδεσης. Για το IEEE 802.11ad, μια σύνδεση με ένα STA με δυνατότητα αναμετάδοσης και STAs συμβατών με αναμετάδοση, μπορεί να καθορίσει τη συνολική λειτουργία της αναμετάδοσης. Λόγω του διαγράμματος της DMG πρόσβασης καναλιού που παρέχεται από ένα PCP/AP, ένα STA ξέρει πότε πρέπει να γίνει αναμεταδότης και πότε να λειτουργεί εντός των πλαισίων λειτουργίας αναμετάδοσης. Η λειτουργία της αναμετάδοσης έχει δύο μορφές: το link switching και το link cooperating. Στη λειτουργία link switching, ο αναμεταδότης χρησιμοποιείται για την παροχή μιας εναλλακτικής ηλεκτρομαγνητικής διαδρομής. Στη λειτουργία link cooperation, η σύνδεση αναμετάδοσης είναι πάντα ενεργοποιημένη, ως ένα μέσο συνεχούς βελτίωσης της επικοινωνίας.

Κεφάλαιο 7

Προσομοίωση Συστήματος Επικοινωνίας mmWave

7.1 Πηγή Δεδομένων

Ως πηγή δεδομένων στην προσομοίωση συστήματος επικοινωνίας mmWave, χρησιμοποιήθηκε μία Bernoulli Binary Generator, η οποία παράγει τυχαίους δυαδικούς αριθμούς χρησιμοποιώντας μια κατανομή Bernoulli. Η κατανομή Bernoulli με παράμετρο p παράγει το λογικό μηδέν με πιθανότητα p και το λογικό ένα με πιθανότητα $1-p$. Η κατανομή Bernoulli έχει μέση τιμή $1-p$ και διακύμανση $p(1-p)$. Η πιθανότητα μιας παραμέτρου μηδέν καθορίζει το p και μπορεί να είναι οποιοσδήποτε πραγματικός αριθμός μεταξύ του μηδέν και του ένα.



Σχήμα 7.1. Το κύκλωμα προσομοίωσης του επικοινωνιακού συστήματος mmWave

7.2 Κωδικοποίηση Πηγής

Η κωδικοποίηση πηγής έγινε με χρήση κώδικα συνέλιξης (convolutional code), ο οποίος είναι ένας τύπος κώδικα ελέγχου σφάλματος και συνήθως θεωρείται ως μια ειδική περίπτωση των κωδίκων trellis. Οι κώδικες συνέλιξης χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλά συστήματα επικοινωνίας λόγω της ικανότητάς τους να διορθώνουν non-burst σφάλματα. Ένας κώδικας συνέλιξης χαρακτηρίζεται από τον γεννήτορα πολυωνύμων που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του κώδικα και της μνήμης του κώδικα. Με πολώνυμα τάξης L , ο κώδικας έχει περιορισμό μήκους $L+1$. Μια μεγαλύτερη ποσότητα μνήμης στο γεννήτορα πολυωνύμων βελτιώνει την απόδοση του κώδικα, αυξάνοντας όμως την πολυπλοκότητα της αποκωδικοποίησης. Ο ρυθμός ενός κώδικα συνέλιξης δίνεται από το λόγο K/N , όπου K είναι ο αριθμός των bits εισόδου και N είναι ο αριθμός των bits εξόδου ανά μπιτ εισόδου K . Γενικά, ένας κώδικας συνέλιξης με ρυθμό K/N θα έχει KN αντίστοιχους γεννήτορες πολυωνύμων. Ένας κωδικοποιητής συνέλιξης περιλαμβάνει την δυαδική συνέλιξη μιας ακολουθίας δεδομένων με πολλαπλούς γεννήτορες πολυωνύμων. Οι πολλαπλοί έξοδοι συνδυάζονται σε μία έξοδο με μια μεθοδολογία round-robin.

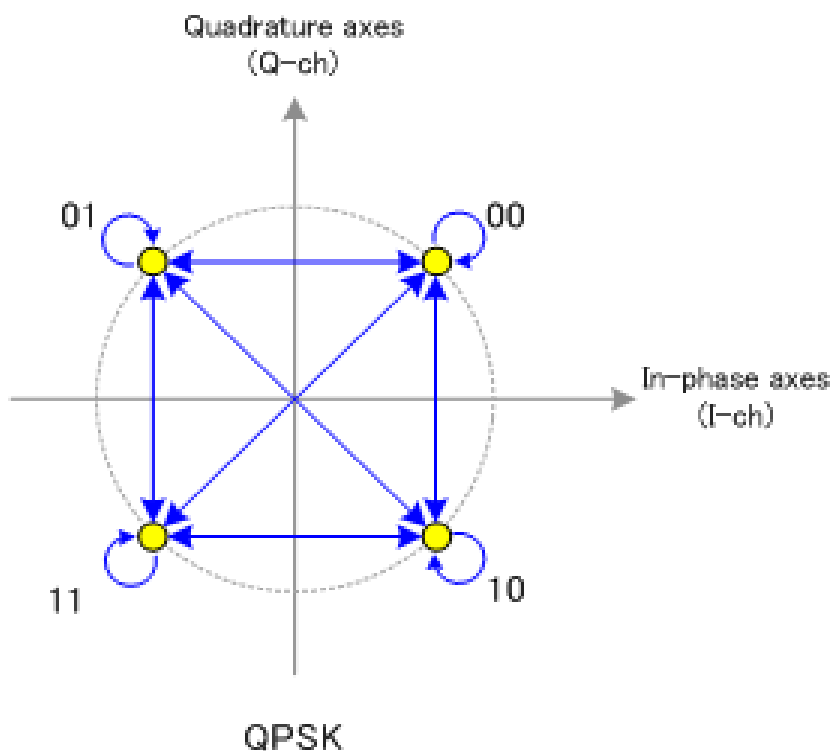
Η απόδοση ενός κώδικα συνέλιξης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο της αποκωδικοποίησης που υλοποιείται στο δέκτη. Στο σύστημα επικοινωνίας της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε ένας αποκωδικοποιητής Viterbi. Ο αλγόριθμος Viterbi αποτελεί την πιο συχνή υλοποίηση του αλγόριθμου αποκωδικοποίησης MLSE (maximum likelihood sequence estimator). Ο αλγόριθμος Viterbi λειτουργεί εκμεταλλευόμενος την ιδιότητα Markov της εξόδου της συνελκτικά κωδικοποιημένης πηγής. Συγκεκριμένα, εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι η έξοδος $C[n]$ εξαρτάται μόνο από τη δυαδική ακολουθία $m[n], m[n-1], \dots, m[n-L]$, όπου L είναι η μνήμη του κώδικα, υποθέτοντας ότι ο ρυθμός του κώδικα είναι $1/N$. Η βασική ιδέα του αποκωδικοποιητή είναι να ορίσει ένα state-space που αποτελείται από όλες τις πιθανές τιμές των $m[n-1], \dots, m[n-L]$. Η κατάσταση σε χρόνο $N-1$ συνδέεται με την κατάσταση σε χρόνο N μέσω διακλάδωσης, η οποία εξαρτάται από την τιμή του $m[n]$. Ο αλγόριθμος Viterbi σε κάθε επόμενο βήμα χρονικής στιγμής n και για κάθε κατάσταση k , καθορίζει την πιθανότερη προηγούμενη κατάσταση θεωρώντας $m[n] = 0$ ή $m[n] = 1$. Στη συνέχεια, στο traceback βήμα, ο αποκωδικοποιητής ξεκινά από την τελική κατάσταση και

ιχνηλατεί την πιο πιθανή διαδρομή, δημιουργώντας τις αντίστοιχες τιμές bit που οδηγούν σε αυτές τις μεταβάσεις.

7.3 Ψηφιακή Διαμόρφωση

Η ψηφιακή διαμόρφωση που χρησιμοποιήθηκε είναι η QPSK (Quadrature Phase Shift Keying). Η QPSK αποτελεί ένα σύνθετο σχήμα διαμόρφωσης, το οποίο στέλνει δύο bits πληροφορίας ανά περίοδο συμβόλου. Είναι ισοδύναμη με χρήση της διαμόρφωσης BPSK για καθένα από τα in-phase και quadrature συστατικά του σήματος. Το διάγραμμα αστερισμού της διαμόρφωσης QPSK δίνεται:

$$C_{QPSK} = \frac{1}{\sqrt{2}} \{1 + j, -1 + j, -1 - j, 1 - j\} \tag{7.1}$$



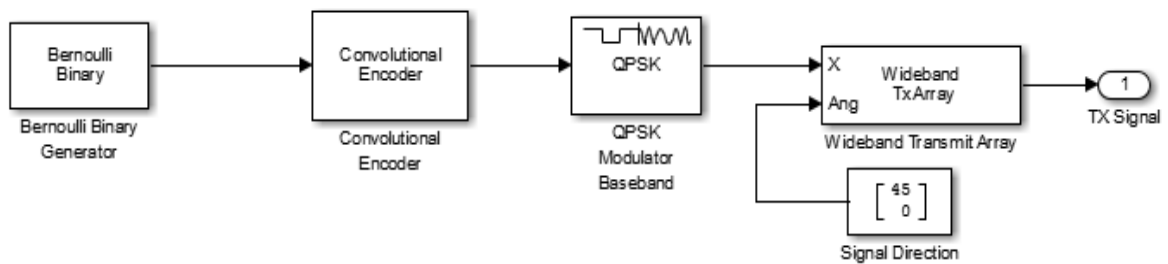
Σχήμα 7.2. Αστερισμός της QPSK διαμόρφωσης

Η QPSK χρησιμοποιεί τέσσερα σημεία στο διάγραμμα αστερισμού, τα οποία ισαπέχουν γύρω από την περίμετρο ενός κύκλου. Χρησιμοποιώντας τέσσερις φάσεις, η QPSK μπορεί να κωδικοποιεί δύο bits ανά σύμβολο, διπλασιάζοντας το εύρος ζώνης του φέροντος και στοχεύοντας παράλληλα στην ελαχιστοποίηση του bit error rate (BER).

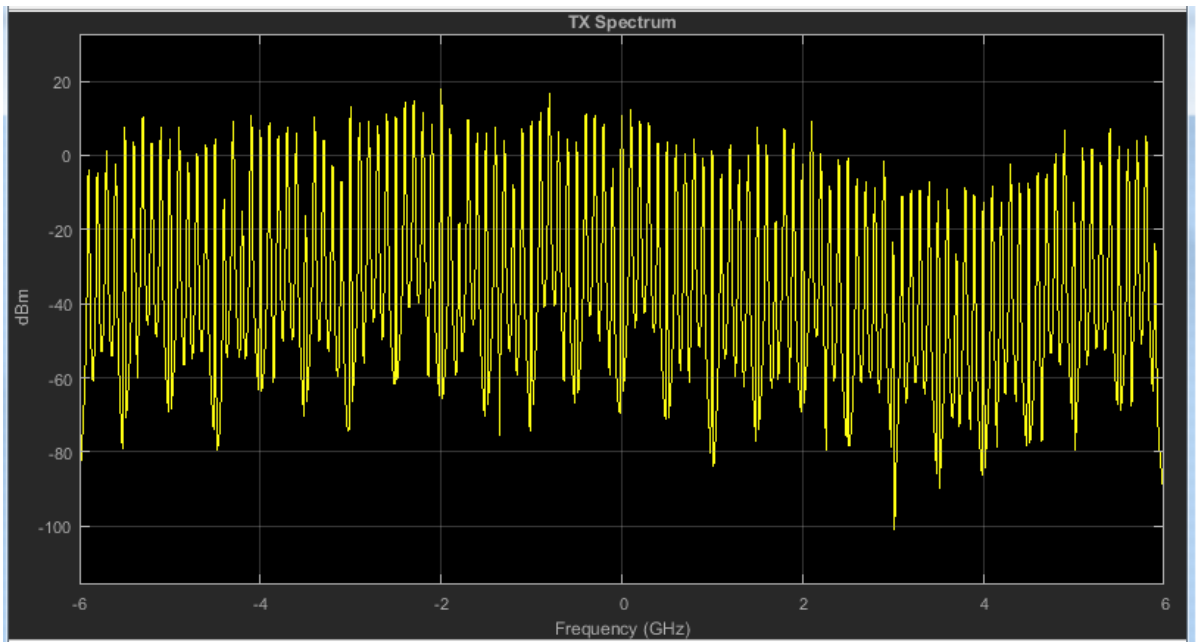
Αν και η QPSK μπορεί να θεωρηθεί ως μία τεταρτοταγής διαμόρφωση, είναι πιο εύκολο να εξεταστεί ως δύο ανεξάρτητα διαμορφωμένα τετραγωνικά φέροντα, καθώς τα άρτια (ή περιττά) bits χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν τα in-phase συστατικά του φέροντος, ενώ τα περιττά (ή άρτια) bits χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση των quadrature-phase συστατικών του φέροντος.

7.4 Διάταξη Κεραιών στον Πομπό

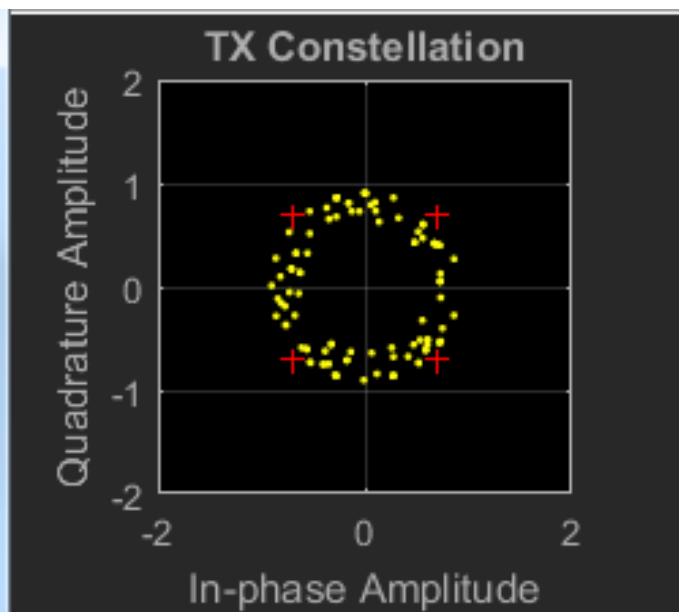
Η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος mmWave της προσομοίωσης ορίστηκε στα 60 GHz. Για την εκπομπή του σήματος χρησιμοποιήθηκε μια συστοιχία κεραιών ευρείας ζώνης. Η συστοιχία των κεραιών αποτελείται από 4 ιστροπικές κεραίες, τοποθετημένες σε μεταξύ τους απόσταση 1 mm. Το προς μετάδοση σήμα διαιρείται σε υποζώνες συχνοτήτων και στη συνέχεια υπόκειται σε μετατόπιση φάσης για κάθε υποζώνη, σύμφωνα με την κατεύθυνση εκπομπής. Η κατεύθυνση εκπομπής ορίζεται με ένα διάνυσμα δύο διαστάσεων, όπου γίνεται ο καθορισμός της γωνίας αζιμούθιου και της γωνίας ανύψωσης των κεραιών. Κατόπιν, τα σήματα που προκύπτουν για κάθε υποζώνη συνδυάζονται ώστε να προκύψει το σήμα εξόδου του πομπού. Η γεωμετρία της συστοιχίας των κεραιών του πομπού είναι ULA (Uniform Linear Array).



Σχήμα 7.3. Διάταξη πομπού



Σχήμα 7.4. Το φάσμα του σήματος εκπομπής

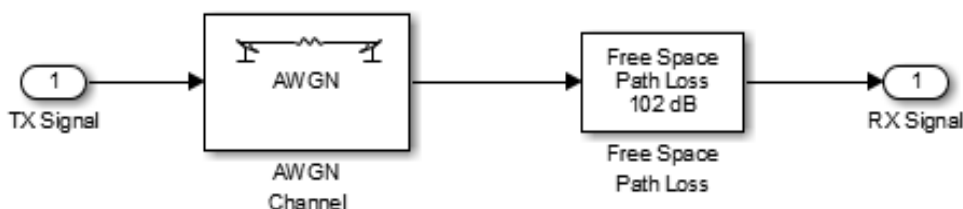


Σχήμα 7.5. Ο αστερισμός QPSK στον πομπό

7.5 Κανάλι Μετάδοσης

Το εύρος ζώνης του mmWave καναλιού διάδοσης ορίστηκε στο 1 GHz. Για την προσομοίωση της επίδρασης των τυχαίων διεργασιών που προκύπτουν κατά τη φυσική διάδοση των σημάτων, έχει προστεθεί στο κανάλι μετάδοσης προσθετικός λευκός γκαουσιανός θόρυβος (Additive White Gaussian Noise, AWGN). Ο AWGN

ονομάζεται προσθετικός γιατί προστίθεται στο ωφέλιμο σήμα εκπομπής και σε οποιοδήποτε σήμα θορύβου που μπορεί να είναι εγγενές στο σύστημα επικοινωνίας. Ο AWGN αναφέρεται ως λευκός θόρυβος γιατί έχει ομοιόμορφη κατανομή ισχύος σε όλη τη ζώνη συχνοτήτων του επικοινωνιακού συστήματος. Τέλος, ο AWGN αναφέρεται ως γκαουσιανός θόρυβος γιατί έχει κανονική κατανομή στο πεδίο του χρόνου, με μηδενική μέση τιμή χρονικού πεδίου. Για την προσομοίωση της μεγάλης απώλειας ελεύθερου χώρου που αντιμετωπίζουν τα mmWave συστήματα εξαιτίας των πολύ υψηλών συχνοτήτων λειτουργίας, έχει γίνει προσθήκη επιπλέον απώλειας ελεύθερου χώρου για μετάδοση στη συχνότητα των 60 GHz και για απόσταση 50 m μεταξύ πομπού και δέκτη.

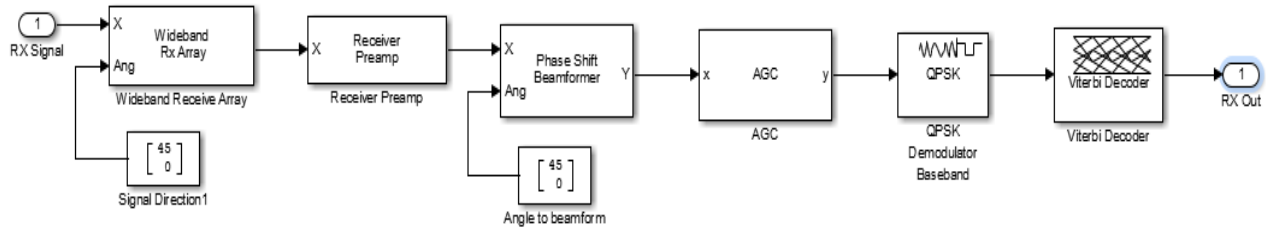


Σχήμα 7.6. Κανάλι μετάδοσης

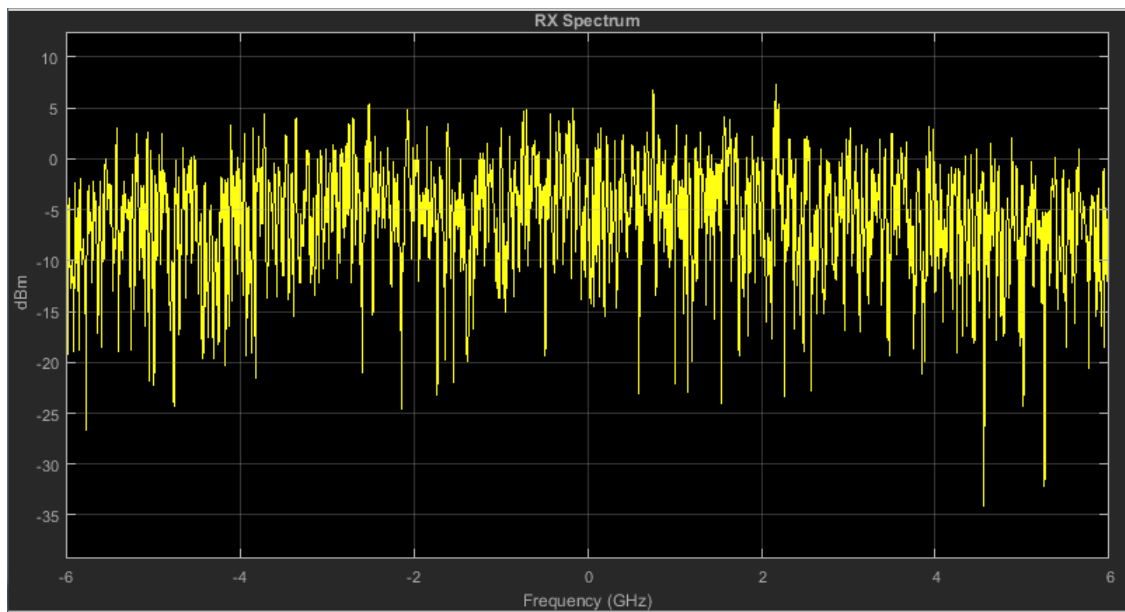
7.6 Διάταξη Κεραιών στο Δέκτη

Για τη λήψη του σήματος στο δέκτη γίνεται χρήση συστοιχίας κεραιών ευρείας ζώνης. Η συστοιχία κεραιών στο δέκτη, ομοίως με τη συστοιχία κεραιών στον πομπό, αποτελείται από 4 ιστροπικές κεραιές τοποθετημένες σε μεταξύ τους απόσταση 1 mm. Η γεωμετρία της συστοιχίας κεραιών είναι ULA. Το ληφθέν σήμα διαιρείται σε υποζώνες και στη συνέχεια υπόκειται σε μετατόπιση φάσης για κάθε υποζώνη, σύμφωνα με τη διεύθυνση πρόσπτωσης του σήματος. Έπειτα, τα προκύπτοντα σήματα υποζώνης συνδυάζονται για να σχηματίσουν το σήμα εξόδου της συστοιχίας κεραιών του δέκτη. Αυτό το σήμα εισάγεται στη συνέχεια στον προενισχυτή του δέκτη όπου ενισχύεται κατά 10 dB. Στον προενισχυτή γίνεται επίσης προσομοίωση της επίδρασης του θερμικού θορύβου στο δέκτη. Κατόπιν, πραγματοποιείται beamforming στις κεραιές του δέκτη με χρήση μετατόπισης φάσης στο πεδίο του χρόνου. Η κατεύθυνση του beamforming σε μοίρες καθορίζεται με ένα διάνυσμα δύο διαστάσεων, στο οποίο ορίζεται η γωνία αζιμούθιου και η γωνία ανύψωσης των κεραιών. Τέλος, το σήμα λήψης στο δέκτη εισάγεται σε μία μονάδα αυτόματου ελέγχου κέρδους (Automatic Gain

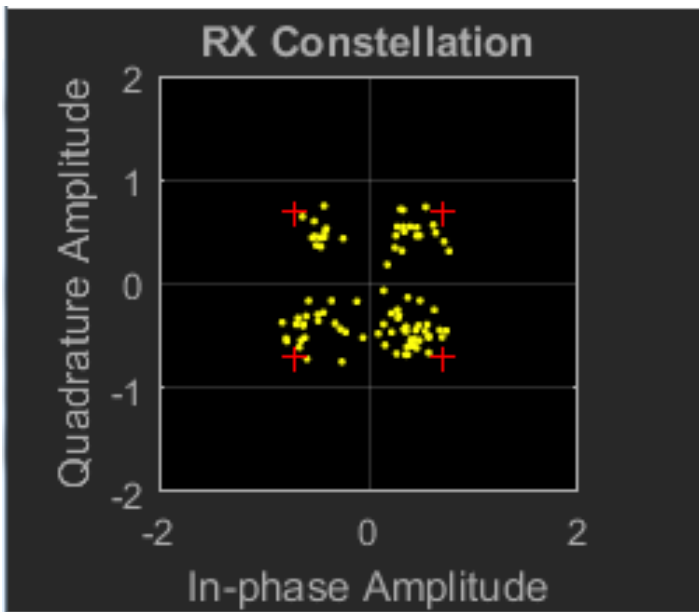
Control, AGC), όπου το κέρδος του σήματος ρυθμίζεται προσαρμοστικά ώστε να επιτευχθεί ένα σταθερό επίπεδο σήματος στην έξοδο, της τάξης του 1 W.



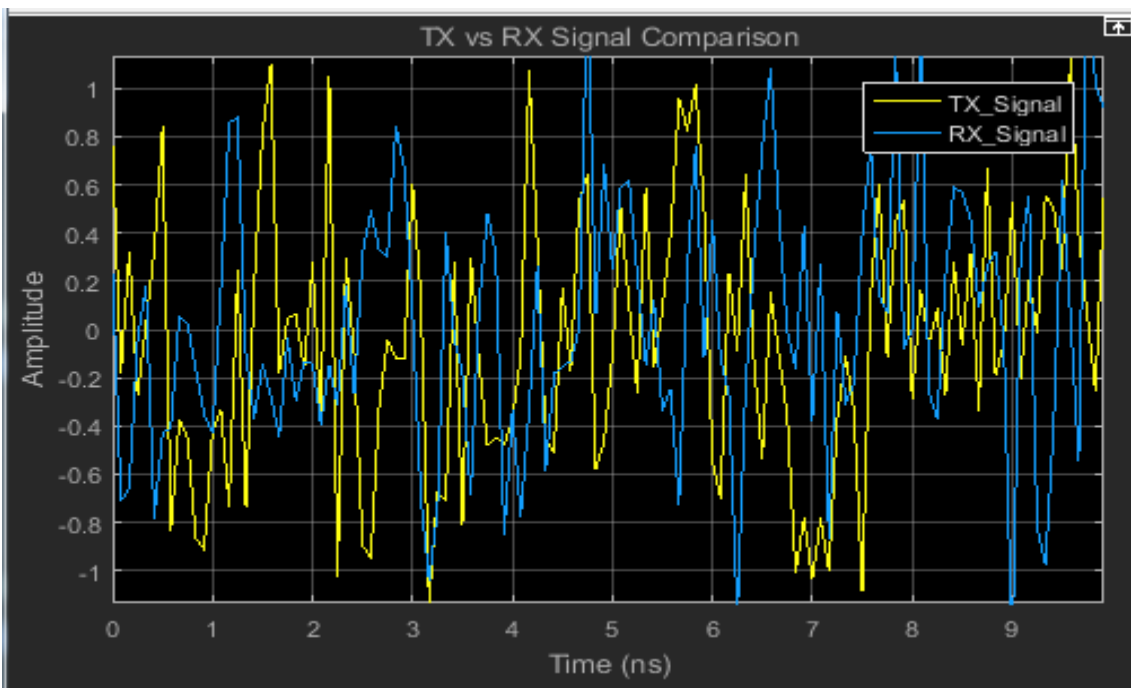
Σχήμα 7.7. Διάταξη δέκτη



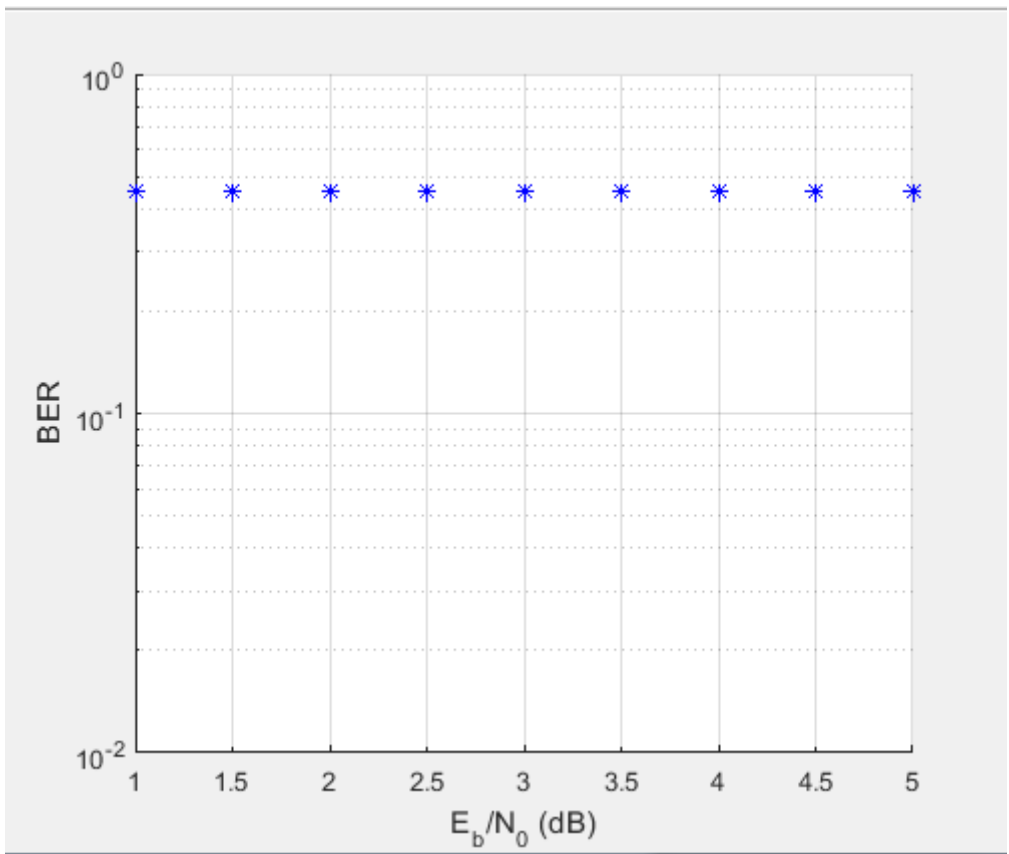
Σχήμα 7.5. Το φάσμα του σήματος στο δέκτη



Σχήμα 7.6. Ο αστερισμός QPSK στο δέκτη



Σχήμα 7.7. Σύγκριση των σημάτων πομπού και δέκτη



Σχήμα 7.8. Διάγραμμα BER προς SNR

Κεφάλαιο 8

Επίλογος

8.1 Συμπεράσματα από τη Μελέτη των Συστημάτων Επικοινωνίας mmWave

Τα αναδυόμενα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών mmWave προσφέρουν ένα νέο σύνορο για τον κόσμο των τηλεπικοινωνιών. Τα χαρακτηριστικά της ραδιοδιάδοσης στις συχνότητες των συστημάτων mmWave είναι αρκετά διαφορετικά από τα χαρακτηριστικά των υπαρχόντων συστημάτων επικοινωνίας, δεδομένου του μικρού μήκους κύματος λειτουργίας και των αξιόλογων δυνατοτήτων που υπάρχουν σήμερα για την κατασκευή εξαιρετικά κατευθυντικών κεραιών. Ωστόσο, από πολλές απόψεις, το κανάλι διάδοσης mmWave είναι εντυπωσιακά παρόμοιο με τα UHF και τα μικροκυματικά κανάλια που βρίσκονται σε χρήση σήμερα. Για παράδειγμα, τα πανκατευθυντικά μοντέλα καναλιού για mmWave διάδοση σε εξωτερικούς και εσωτερικούς χώρους είναι εντυπωσιακά παρόμοια με τα κανάλια που χρησιμοποιούνται σε ασύρματα συστήματα με συμβατικές συχνότητες λειτουργίας. Ωστόσο, στις συχνότητες mmWave η περίθλαση γίνεται αμελητέα, ενώ η ανάκλαση και η σκέδαση από μεγάλες επιφάνειες αποτελούν τους κύριους τρόπους διάδοσης. Ωε εκ τούτου, η χρήση κατευθυντικών κεραιών και οι σχεδιαστικές μεθοδολογίες ray-tracing γίνονται ισχυρά σχεδιαστικά εργαλεία.

Υπάρχει μεγάλο μέλλον για εφαρμογές συστημάτων mmWave σε συνδυασμό με άλλα ασύρματα συστήματα, όπως για παράδειγμα στα κυψελοειδή συστήματα. Τα mmWave κυψελοειδή συστήματα προσφέρουν νέα διάσταση χώρου, παράλληλα με μαζική κατανομή εύρους ζώνης, πολύ πάνω από τις δυνατότητες των σημερινών συστημάτων, ώστε να φέρουν επανάσταση στις μεθόδους κατανομής των σημάτων μετάδοσης. Μια

σημαντική σχεδιαστική πρόκληση των κυψελοειδών συστημάτων είναι η υποστήριξη μεγάλου αριθμού χρηστών σε μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή. Λόγω της ανάγκης να εφαρμόζουν επαναχρησιμοποίηση συχνότητας για την αύξηση της χωρητικότητας εντός μιας πεπερασμένης κατανομής φάσματος, η εμφάνιση των παρεμβολών γίνεται ένας σημαντικός παράγοντας υποβάθμισης της λειτουργίας των κυψελοειδών συστημάτων. Τα mmWave κυψελοειδή συστήματα που χρησιμοποιούν κατευθυντικές κεραίες διαφέρουν από όλα τα προηγούμενα κυψελοειδή συστήματα, επειδή η λειτουργία τους περιορίζεται από το θόρυβο και όχι από τις συν-καναλικές παρεμβολές όπως συμβαίνει στα σημερινά κυψελοειδή συστήματα. Οι παρεμβολές μπορούν να αντιμετωπιστούν ως πρόσθετος θόρυβος που συνδυάζεται στατιστικά λόγω του περιβάλλοντος διάδοσης ή η δομή τους μπορεί να αξιοποιηθεί από τους αλγορίθμους του δέκτη για την περαιτέρω βελτίωση των επιδόσεων του συστήματος. Τα κυψελοειδή συστήματα πρέπει επίσης να υποστηρίζουν πολλές ακόμη λειτουργίες, συμπεριλαμβανομένης της μεταπομπής, στην οποία ένας χρήστης περνά από ένα σταθμό βάσης σε ένα άλλο. Οι πόροι των κυψελοειδών συστημάτων θα πρέπει να μοιράζονται αποδοτικά μεταξύ των χρηστών, έτσι η ύπαρξη πολλαπλών στρατηγικών πρόσβασης είναι επίσης σημαντική. Τα συστήματα mmWave μπορεί να είναι τα πρώτα ασύρματα δίκτυα που ενσωματώνουν site-specific γνώση για την κατανομή συχνοτήτων σε πραγματικό χρόνο και την εξισορρόπηση φορτίου, λόγω της προβλέψιμης φύσης της διάδοσης όταν χρησιμοποιούνται κατευθυντικές κεραίες.

Τα μελλοντικά κυκλώματα βασικής ζώνης σε συστήματα ασύρματης επικοινωνίας mmWave, θα βασίζονται σε multi-Gbps ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων. Το κλειδί για την επίτευξη τόσο υψηλών ταχυτήτων μεταφοράς δεδομένων είναι η χρήση αξιόπιστων και υψηλής πιστότητας μετατροπών ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC) και αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC). Τα συστήματα mmWave αντιμετωπίζουν την πρόκληση της επίτευξης πολύ υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, με παράλληλη κατανάλωση όσο το δυνατόν μικρότερης ισχύος. Η ισχύς που καταναλώνει ένας ADC ουσιαστικά επηρεάζει την κατανάλωση ισχύος του συνολικού συστήματος, ενώ η ταχύτητα και η δυναμική περιοχή του ADC καθορίζουν την ποσότητα και την πιστότητα των δεδομένων που μπορούν να μετατραπούν από το πεδίο αναλογικού σήματος στο ψηφιακό πεδίο. Οι μετατροπείς ψηφιακού σήματος σε αναλογικό για τα συστήματα επικοινωνίας mmWave πρώτης γενιάς απαιτούν μέτρια ανάλυση, δηλαδή μέτριες δυναμικές κλίμακες, λόγω των φασματικών πυκνοτήτων χαμηλής ισχύος που

διαθέτουν αυτά τα συστήματα και τις σχετικά μικρές ποσότητες των δυναμικών διακυμάνσεων σήματος, λόγω του πολύ μεγαλύτερου εύρους ζώνης RF και επομένως της πολύ μικρότερης στιγμιαίας διάλειψης σήματος στις κινητές επικοινωνίες. Συστήματα με μέτρια ή χαμηλή δυναμική περιοχή είναι επίσης πιθανό να αποδειχθούν επωφελή από την άποψη της κατανάλωσης ενέργειας σε σύγκριση με τα συστήματα υψηλότερης δυναμικής περιοχής. Οι ρυθμοί δειγματοληψίας των mmWave DACs ωστόσο, θα πρέπει να είναι αρκετά υψηλοί ώστε να μπορούν να λειτουργήσουν με το πολύ μεγάλο εύρος ζώνης καναλιού και εύρος ζώνης baseband σήματος.

Η σχεδίαση των αλγορίθμων mmWave στο επίπεδο PHY παρουσιάζουν πολύ διαφορετικούς σχεδιαστικούς περιορισμούς σε σύγκριση με τις μικροκυματικές ζεύξεις. Επειδή η τεχνολογία αναλογικών κυκλωμάτων ωθείται στα όριά της και επειδή οι προϋπολογισμοί ισχύος (link budgets) είναι δυσκολότερα υλοποιήσιμοι από ποτέ, η λειτουργία των συστημάτων οδηγείται σε πιθανή περαιτέρω υποβάθμιση, πέρα από το κοινώς θεωρούμενο γραμμικό σύστημα με προσθετικό Gaussian μοντέλο θορύβου. Κατά συνέπεια, οι σχεδιαστές των PHY αλγορίθμων πρέπει να λαμβάνουν ρητά υπόψη την ακρίβεια bit του ADC, τη μη-γραμμικότητα του ενισχυτή ισχύος (PA) και το θόρυβο φάσης. Στο πλαίσιο αυτό, η ισοστάθμιση θα συνεχίσει πιθανότατα μέσω αναπαράστασης στο πεδίο της συχνότητας, ανεξάρτητα αν οι τεχνικές διαμόρφωσης παραμένουν στο πεδίο της συχνότητας (OFDM) ή μεταβαίνουν στο πεδίο του χρόνου (SC-FDE). Χαρακτηριστικά των συστημάτων επικοινωνίας όπως ο συγχρονισμός, έχουν επίσης διαφοροποιηθεί. Η πολυπλοκότητα του bottleneck και η μεγαλύτερη απώλεια διαδρομής των mmWave ζεύξεων, σε συνδυασμό με το πρόσθετο πλεονέκτημα των κατευθυνόμενων κεραιών, θα απαιτήσει την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνικών για την εκτίμηση του καναλιού και την ανίχνευση πακέτων. Πολλές ακόμη καινοτόμες τεχνικές είναι πιθανό να αναπτυχθούν για το mmWave επίπεδο PHY, συμπεριλαμβανομένης της εξαιρετικά χαμηλής ακρίβειας bit δέκτη για την περαιτέρω μείωση των απαιτήσεων σχεδιαστικής πολυπλοκότητας και ανάπτυξη συστοιχιών MIMO με λειτουργία εξίσου σε κανάλια NLOS και LOS, ώστε να είναι δυνατή η επίτευξη ακόμη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων.

8.2 Μελλοντικές Εφαρμογές των Συστημάτων

mmWave

Τα συστήματα επικοινωνιών mmWave θα γίνονται ολοένα και πιο σημαντικά για την αγορά τεχνολογίας με μεγάλο πλήθος εφαρμογών, καθώς η απαίτηση των καταναλωτών για προσφορά υψηλού εύρους ζώνης από τις φορητές συσκευές συνεχώς αυξάνεται. Χαρακτηριστικά παραδείγματα όπου αυτά τα συστήματα θα είναι χρήσιμα αφθονούν. Καθώς η παραγωγή των μέσων ψυχαγωγίας εξακολουθεί να παρουσιάζει πρόοδο ώστε να είναι σε θέση να δημιουργήσει μελλοντικές γενιές ταινιών 3-D που θα βασίζονται σε αληθινά τρισδιάστατες εικόνες, οι καταναλωτές θα απαιτήσουν ακόμη μεγαλύτερο εύρος ζώνης για να αποκτήσουν πρόσβαση σε αυτά τα προϊόντα πολυμέσων από ασύρματες συσκευές όπως smartphones και tablets. Τα μελλοντικά κινητά δίκτυα θα μεταφέρουν δεκάδες gigabits πληροφορίας ανά δευτερόλεπτο, χρησιμοποιώντας προσαρμόσιμες συστοιχίες κεραιών με μέγεθος μικρότερο από ένα ανθρώπινο νύχι. Η ανίχνευση του καρκίνου μπορεί σύντομα να είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί με χρήση μιας μικρής συσκευής με συχνότητα λειτουργίας της τάξης των terahertz, με μια ολοκληρωμένη συστοιχία κεραιών, που θα μπορεί να πραγματοποιεί απεικόνιση όγκων κάτω από το δέρμα. Εταιρείες παιχνιδιών θα είναι σε θέση να χρησιμοποιήσουν μικρούς πομποδέκτες mmWave ενσωματωμένους σε προϊόντα για να δημιουργήσουν περίτεχνα παιχνίδια με χρήση ελκυστικών τεχνικών απεικονίσεων οθόνης και συγχρονισμένων κινήσεων των παιχνιδιών. Οι οδηγοί αυτοκινήτων σύντομα θα χρησιμοποιούν διάχυτα συστήματα mmWave ραντάρ για την ανίχνευση κοντινών οχημάτων και συνθηκών πάγου στο δρόμο. Μικροί ολοκληρωμένοι πομποδέκτες με συχνότητα λειτουργίας της τάξης των terahertz με ενσωματωμένες κεραίες, θα είναι σύντομα σε θέση να έχουν τη δυνατότητα φασματοσκοπίας, επιτρέποντας σε έναν τεράστιο αριθμό συσκευών να υλοποιούν εφαρμογές που μπορεί να εκτείνονται από τη βελτίωση της τεχνολογίας ανίχνευσης διαρροής αερίου, έως τον εντοπισμό αστοχίας μόνωσης καλωδίων για τις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού.

Βιβλιογραφία

Theodore S. Rappaport, Robert W. Heath, Robert C. Daniels and James N. Murdock (2014) *"Millimeter Wave Wireless Communications"*, Prentice Hall

Bai Tianyang, Ahmed Alkhateeb and Robert W. Heath, (2014) *"Coverage and Capacity of Millimeter-Wave Cellular Networks"*, Communications Magazine, IEEE , vol.52, no.9, pp.70-77

W. Roh, Seol Ji-Yun, Park JeongHo, Lee Byunghwan, Lee Jaekon, Kim Yungsoo, Cho Jaeweon, Cheun Kyungwhoon and F. Aryanfar (2014) *"Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results"*, Communications Magazine, IEEE , vol.52, no.2, pp.106-113

A.L. Swindlehurst, E. Ayanoglu, P. Heydari and F. Capolino (2014) *"Millimeter-wave massive MIMO: the next wireless revolution?"*, Communications Magazine, IEEE , vol.52, no.9, pp.56-62

T.S. Rappaport, Sun Shu, R. Mayzus, Zhao Hang, Y. Azar, K. Wang, G.N. Wong, J.K. Schulz, M. Samimi and F. Gutierrez (2013) *"Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!"*, Access IEEE, vol.1, no., pp.335-349

A.I. Sulyman, A.T. Nassar, M. Samimi, G.R. Maccartney, T.S. Rappaport and A. Alsanie (2014) *"Radio propagation path loss models for 5G cellular networks in the 28 GHz and 38 GHz millimeter-wave bands"*, Communications Magazine, IEEE , vol.52, no.9, pp.78-86

P.F.M. Smulders (2009) *"Statistical Characterization of 60-GHz Indoor Radio Channels"*, Antennas and Propagation, IEEE Transactions on , vol.57, no.10, pp.2820-2829

Y. Niu, Y. Li, D. Jin, L. Su and V. Vasilakos (2015) *"A Survey of Millimeter Wave (mmWave) Communications for 5G: Opportunities and Challenges"*, *Wireless Networks*, Volume 21, Issue 8, pp 2657–2676

S. Singh, F. Ziliotto, U. Madhow, E.M. Belding and M. Rodwell (2009) *"Blockage and Directivity in 60 GHz Wireless Personal Area Networks: From Cross-Layer Model to Multihop MAC Design"*, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Volume 27 Issue 8, pp 1400-1413

M. R. Akdeniz, Y. Liu, M.K. Samini, S. Sun, S. Rangan, T.S. Rappaport and E. Erkip (2013) *"Millimeter Wave Channel Modeling and Cellular Capacity Evaluation"*, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*

T. Cella, P. Orten and T. Ekman (2014) *"Design of a Practical and Compact mm-Wave MIMO System with Optimized Capacity and Phased Arrays"*, *International Journal of Antennas and Propagation*, Volume 2014

R. Mendez-Rial, C. Rusu, A. Alkhateeb, N. Gonzalez-Prelcic and R.W. Heath (2015) *"Channel Estimation and Hybrid Combining for mmWave: Phase Shifters or Switches?"*, 2015 Information Theory and Applications Workshop (ITA)

T.E. Bogale and L.B. Le (2015) *"Massive MIMO and Millimeter Wave for 5G Wireless HetNet: Potentials and Challenges"*, *IEEE Vehicular Technology Magazine* (To appear)

802.11ad-2012 - IEEE Standard for Information Technology--Telecommunications and information Exchange Between Systems--Local and Metropolitan Area Networks--Specific Requirements-Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band

Xiaoyi Zhu, A. Doufexi, and T. Kocak, (2011) *"Throughput and Coverage Performance for IEEE 802. 11ad Millimeter-Wave WPANs"*, *proc. IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 1,5, 15-18

IEEE TGad (2010) "*Channel Models for 60 GHz WLAN systems. IEEE 11-09-0334-08-00ad*", TGad report

IEEE TGad (2010) "*PHY Simulations and Methodology. IEEE 11-10-0431-03-00ad*", TGad report

"*Wireless LAN at 60 GHz - IEEE 802.11ad Explained*", Application Note, Agilent.

A. E. I. Lamminen, J. Saily, A. R. Vimpari (2008) "*60 GHz Patch Antennas and Arrays on LTCC With Embedded-Cavity Substrate*", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 56, no. 9, pp. 2865, 2874

Y. P. Zhang, M. Sun, K. P. Chua, L. L. Wai, D. X. Liu (2008) "*Integration of Slot Antenna in LTCC Package for 60 GHz Radio*", IET Electronics Letters, vol. 5, no. 44

M. Sun, Y. P. Zhang, Y. X. Guo, K. M. Chua, and L. L. Wai (2009) "*Integration of Grid Array Antenna in Chip Package for Highly Integrated 60 GHz Radios*", IEEE Letters on Antennas and Wireless Propagation, vol. 8, pp. 1364–1366

T. Seki, N. Honma, K. Nishikawa, and K. Tsunekawa (2005) "*Millimeter-wave High Efficiency Multi-layer Parasitic Microstrip Antenna Array on TEFLON Substrate*", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 53, no. 6, pp. 2101–2106

F. Mustafa, A. M. Hashim, N. Parimon, S. F. A. Rhaman, A. R. A. Rahmn, and M. N. Osman (2009) "*RF Characterization of Planar Dipole Antenna for On-Chip Integrated with GaAs-Based Schottky Diode*", 2009 Asia Pacific Microwave Conference (APMC), pp. 571–574

C. Cao, Y. Ding, X. Yang, J. J. Lin, H. T. Wu, A. K. Verma, J. Lin, F. Martin, and K. K. O (2008) "*A 24 GHz Transmitter with On-Chip Dipole Antenna in 0.13 μm CMOS*", IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 43, no. 6, pp. 1394–1402

J. Roderick, H. Kirshnaswamy, K. Newton, and H. Hashemi (2006) "*Silicon-Based Ultra-Wideband Beam-Forming*", IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 41, no. 8, pp. 1726–1740

- M. Fakharzadeh, M.-R. N.-Ahmadi, B. Biglarbegian, and J. A. Shokouh (2010) "*CMOS Phased Array Transceiver Technology for 60 GHz Wireless Applications*", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 58, no. 4, pp. 1093–1104
- B. Streetman and S. Banerjee (2005) "*Solid State Electronic Devices*", 6th ed. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall
- S. M. Sze and K. K. Ng (2007) "*Physics of Semiconductor Devices*", 3rd ed. Hoboken, NJ, Wiley
- J. Hasani, M. Kamarei, and F. Ndagijimana (2007) "*Transmission Line Inductor Modeling and Design for Millimeter Wave Circuits in Digital CMOS Process*", 2007 IEEE International Workshop on Radio-Frequency Integration Technology, (RFIT 2007), pp. 290–293
- M. Varonen, M. Karkkainen, M. Kantanen, and K. A. I. Halonen (2008) "*Millimeter-Wave Integrated Circuits in 65-nm CMOS*" IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 43, no. 9, pp. 1991–2002
- K. Uyttenhove and M. S. J. Steyaert (2002) "*Speed-Power-Accuracy Tradeoff in High-Speed CMOS ADCs*", IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, vol. 49, no. 4, pp. 280–287
- S. Shahramian, S. Voinigescu, and A. Carusone (2009) "*A 35-GS/s, 4-Bit Flash ADC With Active Data and Clock Distribution Trees*", IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 44, no. 6, pp. 1709–1720
- X. Wu, P. Palmers, and M. Steyaert (2008) "*A 130 nm CMOS 6-bit Full Nyquist 3 GS/s DAC*", IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 43, no. 11, pp. 2396–2403
- D. Seo, A. Weil, and M. Feng (2000) "*A 14 bit, 1 GS/s Digital-to-Analog Converter with Improved Dynamic Performances*" in 2000 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2000 Geneva), vol. 5, pp. 541–544

G. Madhumati, K. Rao, and M. Madhavalatha (2009) *"Comparison of 5-bit Thermometer-to-Binary Decoders in 1.8V, 0.18 um CMOS Technology for Flash ADCs"*, 2009 International Conference on Signal Processing Systems, pp. 516–520

E. Sail and M. Vesterbacka (2007) *"Thermometer-to-Binary Decoders for Flash Analog-to-Digital Converters"*, 2007 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD 2007), pp. 240–243

Samsung (2015) *"5G Vision"*, White Paper

Nokia (2014) *"Looking Ahead to 5G"*, White Paper

Huawei (2016) *"Microwave & mmWave"*, Whitepaper

Qualcomm (2016) *"Exploring the Potential of mmWave for 5G Mobile Access"*, Whitepaper

Ericsson (2016) *"5G Radio Access"*, White Paper

Intel (2016) *"5G Technology in mmWave Frequencies"*, White Paper

ETSI (2016) *"mmWave Semiconductor Industry Technologies: Status and Evolution"*, White Paper

Infineon (2013) *"Millimeter Wave Technology and Test Instrumentation for V-E Band Applications"*, White Paper