



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΤΜΗΜΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Διδακτική της Τεχνολογίας & Ψηφιακά Συστήματα

Κατεύθυνση Ψηφιακών Επικοινωνιών και Δικτύων

" Βελτιστοποίηση σχεδίασης ασύρματων δικτύων 4G"

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΩΝΥΜΟ: ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ

ΟΝΟΜΑ: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΟΝΟΜΑ ΠΑΤΡΟΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ

A.M: ΜΕ09094

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: κα. ΑΓΓΕΛΙΚΗ ΑΛΕΞΙΟΥ

Αύξων αριθμός Διπλωματικής Εργασίας:

ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2014

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Πιστοποιείται ότι η διπλωματική εργασία με θέμα:

"Βελτιστοποίηση σχεδίασης ασύρματων δικτύων 4G"

του φοιτητή του μεταπτυχιακού προγράμματος του τμήματος Ψηφιακών Συστημάτων
Διδακτική της Τεχνολογίας & Ψηφιακά Συστήματα

ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ του ΙΩΑΝΝΟΥ Α.Μ. ΜΕ09094

Παρουσιάστηκε δημόσια και εξετάστηκε στο Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων

στις 26/02/2014

Η Επιβλέπουσα

Α.Αλεξίου, Επίκουρη Καθηγήτρια

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος "Διδακτική της Τεχνολογίας & Ψηφιακά Συστήματα" του τμήματος Ψηφιακών Συστημάτων, του Πανεπιστημίου Πειραιώς. Θέμα της είναι η βελτιστοποίηση της σχεδίασης ασύρματων δικτύων τέταρτης γενιάς (4G). Μελετώντας το cooperation transmission (*Network MIMO*) προσπαθούμε να αναδείξουμε τα πλεονεκτήματά του έναντι δυο χρηστών που μεταδίδουν ανεξάρτητα μεταξύ τους (*SISO*). Στην αρχή κάνουμε μια εισαγωγή στην εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών μέσα στον χρόνο και φτάνουμε στο σήμερα και συγκεκριμένα στα δίκτυα 4ης γενιάς και στο LTE. Παρουσιάζουμε την δομή, τα πλεονεκτήματα και τον τρόπο λειτουργίας των δικτύων αυτών και κατόπιν γίνεται μια ανάλυση της λειτουργίας των MIMO συστημάτων. Ακολουθεί μια εισαγωγή στα Network MIMO συστήματα, τα οποία αποτελούν μια εξέλιξη των κλασικών MIMO και μια παρουσίαση μιας μελέτης πάνω σε μια παραλλαγή αυτών. Ουσιαστικά η μελέτη αυτή κατορθώνει να συμπεριφέρονται οι πομποί αν και είναι σε μεγάλη απόσταση ($> \lambda/2$) μεταξύ τους σαν ένα MIMO σύστημα, δηλαδή να συγχρονίζονται μεταξύ τους και αποφεύγονται οι παρεμβολές.

Στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μια προσομοίωση με την βοήθεια του Matlab ενός Network MIMO περιβάλλοντος και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα του έναντι ενός συστήματος που λειτουργεί χωρίς συνεργασία μεταξύ των πομπών.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται ο κύκλος των μεταπτυχιακών μου σπουδών στο τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Πειραιά. Θεωρώ υποχρέωσή μου να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στην καθηγήτριά μου κα. Αγγελική Αλεξίου για την κατανόησή της και την άριστη συνεργασία που είχαμε, τις γνώσεις που μου προσέφερε, τις πολύ σημαντικές παρατηρήσεις, υποδείξεις και διορθώσεις που έκανε, συμβάλλοντας έτσι τα μέγιστα στην διεκπεραίωση της διπλωματικής μου εργασίας. Εν κατακλείδι, θα ήθελα να αφιερώσω την παρούσα εργασία στην οικογένειά μου αλλά και στους συγγενείς μου στην Γερμανία που τόσο με στήριξαν σε όλη μου αυτήν την προσπάθεια.

Πειραιάς, Φεβρουάριος 2014
Οικονόμου Ι. Κωνσταντίνος

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Περιεχόμενα

<i>Εισαγωγή</i>	14
1.1 Ιστορική αναδρομή των Τηλεπικοινωνιών	14
1.2 Ασύρματα δίκτυα τηλεπικοινωνιών	15
1.3 Ασύρματα δίκτυα υπολογιστών	19
1.3.1 Κυψελωτά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας	19
1.3.2 Ασύρματα τοπικά δίκτυα (<i>WLAN</i>)	21
1.3.3 Ασύρματα προσωπικά δίκτυα (<i>WPAN</i>)	22
1.3.4 Ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (<i>WMAN</i>)	23
1.3.5 Κυψελωτά δίκτυα (<i>IMS</i>)	23
1.4 Εφαρμογές Ασύρματης Επικοινωνίας	24
1.5 Μετάδοση σήματος	25
1.6 Ασύρματη μετάδοση	27
<i>Δίκτυα 4ης γενιάς</i>	30
2.1 Εισαγωγή στο LTE	30
2.1.1 Δίκτυο Πρόσβασης	31
2.1.2 Πυρήνας του δικτύου	34
2.2 Αρχιτεκτονική LTE	35
2.2.1 Evolved Radio Access Network (<i>RAN</i>)	35
2.2.2 Serving Gateway (<i>SGW</i>)	36
2.2.3 Mobility Management Entity (<i>MME</i>)	37
2.2.4 Packet Data Network Gateway (<i>PDN GW</i>)	37
2.2.5 Policy and Charging Resource Function (<i>PCRF</i>)	38
2.2.6 Home Subscription Server (<i>HSS</i>)	38
2.3 OFDM	39
<i>MIMO τεχνολογίες σε LTE</i>	42
3.1 MIMO	42
3.2 Downlink SU-MIMO στο LTE	44
3.3 Transmit Diversity στο LTE	46
3.4 MU-MIMO στο LTE	48
3.5 Πλεονεκτήματα του MIMO	48
3.5.1 Κέρδος συστοιχίας (<i>Array gain</i>)	48
3.5.2 Χωρικός διαφορισμός κέρδους (<i>Spatial diversity gain</i>)	49

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

3.5.3 Μείωση και αποφυγή παρεμβολών	49
<i>Network- Cooperative MIMO</i>	52
4.1 Εισαγωγή.....	52
4.2 Network MIMO	52
4.3 Εφαρμογή Network MIMO σε ασύρματο δίκτυο	54
4.3.1 Σύγκριση με υπάρχοντα συστήματα	55
4.3.2 Συγχρονισμός κατανεμημένης φάσης.....	56
4.3.3 Το πρωτόκολλο του MegaMIMO	59
4.3.4 Συμβατότητα με 802.11	61
4.3.5 Διαχωρισμός μετρήσεων σε διαφορετικούς δέκτες.....	63
4.3.6 Πλατφόρμα δοκιμών και εφαρμογής	64
<i>Αξιολόγηση Network MIMO με προσομοίωση</i>	72
5.1 Εισαγωγή.....	72
5.2 Σύστημα με και χωρίς συνεργαζόμενους πομπούς	72
5.3 Συμπεριφορά μη συνεργαζόμενων πομπών	74
<i>Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία</i>	78
6.1 Σύνοψη	78
6.2 Συμπεράσματα	78
6.3 Μελλοντική εργασία	79
<i>Βιβλιογραφία</i>	80
<i>Παράρτημα Matlab κώδικας</i>	82

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΑΚΡΩΝΥΜΑ

3GPP	(3rd Generation Partnership Project)
AMPS	(Advanced Mobile Phone Service)
AP	(Access Point)
BSC	(Base Station Controller)
BTS	(Base Transceiver Station)
CDF	(Cumulative Distribution Function)
CDM	(Code Division Multiplexing)
CDMA	(Code Division Multiple Access)
CDMA	(Code Division Multiple Access)
CSMA	(Carrier Sense Multiple Access)
DCH	(Dedicated Channel)
DECT	(Digital European Cordless Telephone)
DSCH	(Downlink Shared Channel)
EDGE	(Enhanced Data Rates for Global Evolution)
FDMA	(Frequency Division Multiple Access)
GSM	(Global System for Mobile)
HSCSD	(High-Speed Circuit-Switched Data)
HSDPA	(High Speed Downlink Packet Access)
HS-DSCH	(High-speed DSCH)
HSUPA	(High Speed Uplink Packet Access)
IMS	(IP Multimedia Subsystem)
INR	(Interference to Noise Ratio)
LTE	(Long Term Evolution)
MIMO	(Multiple Input-Multiple Output)
NMT	(Nordic Mobile Telephone)
OFDM	(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
OFDMA	(Orthogonal Frequency Division Multiple Access)
PDC	(Personal Digital Cellular)
SNR	(Signal to Noise Ratio)
TACS	(Total Access Communication System)
TDM	(Time Division Multiplexing)
UMTS	(Universal Mobile Telecommunications System)
USRP	(Universal Software Radio Peripheral)
WiMAX	(Worldwide Interoperability for Microwave Access)
WLAN	(Wireless Local Area Network)
WMAN	(Wireless Metropolitan Area Network)
WPAN	(Wireless Personal Area Network)

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

1

Εισαγωγή

1.1 Ιστορική αναδρομή των Τηλεπικοινωνιών

Η ιστορία των σύγχρονων τηλεπικοινωνιών ουσιαστικά ξεκινάει το 1844 όταν ο Samuel Morse έστειλε το πρώτο μήνυμα μέσω τηλεφωνικής γραμμής από την Washington στην Baltimore. Ο Morse επινόησε τον πρώτο δυαδικό κώδικα που αποτελούνταν από τελείες και παύλες. Κάθε λέξη αποτελούνταν από έναν μοναδικό συνδυασμό από τελείες και παύλες. Το αλφάβητο Morse αποτέλεσε ουσιαστικά τον πρόαγγελο του δυαδικού συστήματος ψηφιακής επικοινωνίας. Στην δεκαετία του 1870, με την βοήθεια της εφεύρεσης του τηλεφώνου από τον Alexander Graham Bell το 1876, τα πρώτα τηλεφωνικά συστήματα εξυπηρετούσαν επικοινωνίες σε αποστάσεις μερικών εκατοντάδων μιλίων.

Το πρώτο "πρωτόγονο" ασύρματο τηλεφωνικό δίκτυο, λειτούργησε στις ΗΠΑ το 1946, εξυπηρετώντας έναν αριθμό από 5.000 συνδρομητές και με συνολικό αριθμό κλήσεων τις 30.000 σε εβδομαδιαία βάση. Καθότι δεν διέθετε τη σημερινή κυψελοειδή δομή, με πολλούς σταθμούς βάσης ανά την επικράτεια, είχε το μειονέκτημα της περιορισμένης γεωγραφικής κάλυψης και του μικρού αριθμού διαθέσιμων καναλιών, με αποτέλεσμα σύντομα να κορεστεί.

Το Δεκέμβριο του 1947, ο Douglas H. Ring και ο W. Rae Young πρότειναν για πρώτη φορά την ιδέα της κυψελωτής δομής, όπου ο γεωγραφικός χώρος καλύπτεται από εξάγωνες κυψέλες με κατευθυντικές κεραίες σε κάθε γωνία που θα μεταδίδουν και θα λαμβάνουν σε τρεις διευθύνσεις. Χρειάστηκαν να περάσουν 30 χρόνια, προτού η ιδέα ενός τέτοιου συστήματος γίνει πραγματικότητα, λόγω της περιορισμένης τεχνογνωσίας που υπήρχε εκείνη την εποχή. Το 1953, με την βοήθεια του πρώτου διατλαντικού καλωδίου και των ενισχυτών σήματος, επιτεύχθηκε και η πρώτη διηπειρωτική τηλεφωνική επικοινωνία μεταξύ Ευρώπης και Αμερικής.

Τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας, είτε αυτά είναι τηλεφωνικά είτε

υπολογιστικά, χρησιμοποιούν τα ραδιοκύματα ως φορείς στο φυσικό τους επίπεδο. Πρώτος ο James C. Maxwell απέδειξε την ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων το 1864 και πρότεινε τη χρήση τους στο χώρο των επικοινωνιών. Βασισμένος στις αποδείξεις του Maxwell, ο Marconi το 1895, πραγματοποιεί την πρώτη επίσημη ασύρματη μετάδοση με τη βοήθεια ενός δίπολου Hertz.

Τον 20ο αιώνα υπήρξε μια επανάσταση στον χώρο των τηλεπικοινωνιών. Η εφεύρεση του τρανζίστορ το 1947, του ολοκληρωμένου κυκλώματος και του laser το 1958 έκαναν εφικτή την ανάπτυξη ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μικρών διαστάσεων, χαμηλής ισχύος, μικρού βάρους και υψηλού ρυθμού λειτουργίας, που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή συστημάτων δορυφορικών επικοινωνιών, συστημάτων μικροκυματικών ραδιοζεύξεων ευρείας ζώνης και συστημάτων οπτικών επικοινωνιών με χρήση καλωδίων οπτικών ινών.

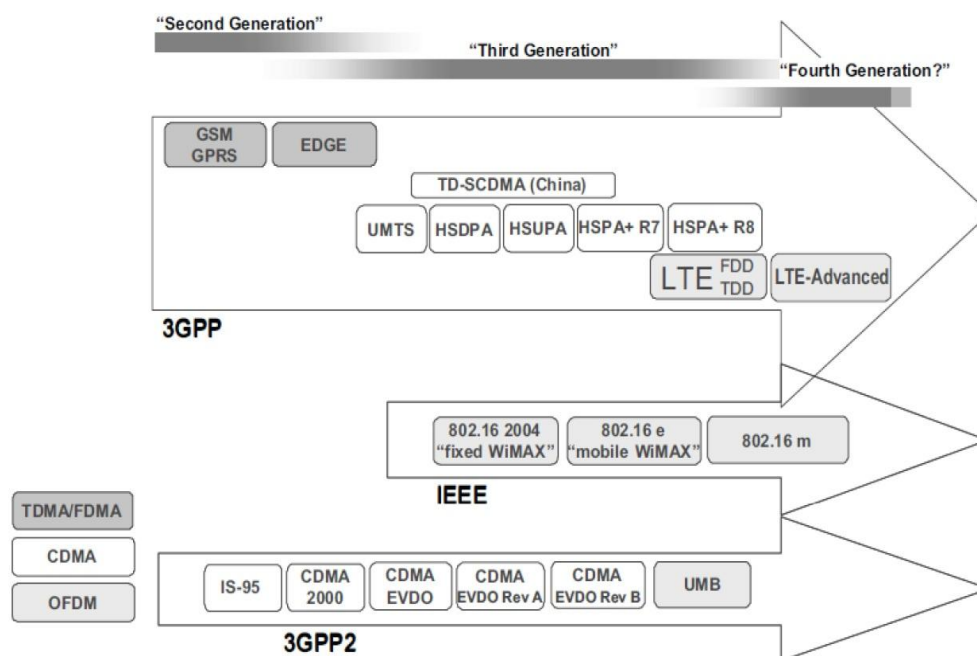
Πλέον, τα περισσότερα ενσύρματα συστήματα επικοινωνιών αντικαθίστανται από καλώδια οπτικών ινών που παρέχουν εξαιρετικά μεγάλο εύρος ζώνης και έτσι τη δυνατότητα μετάδοσης υπηρεσιών φωνής, δεδομένων, video και πολυμέσων. Με την παράλληλη ανάπτυξη της κυψελωτής ραδιοεπικοινωνίας των κινητών, προσφέρονται πλέον υπηρεσίες φωνής σε συνδρομητές που κινούνται με αυτοκίνητα, τρένα και λεωφορεία. Σήμερα γινόμαστε μάρτυρες μιας ραγδαίας ανάπτυξης σε υπηρεσίες προσωπικών επικοινωνιών που υποστηρίζονται από δίκτυα δορυφόρων και οπτικών ινών με πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης.

1.2 Ασύρματα δίκτυα τηλεπικοινωνιών

Ιστορικά, η ανάπτυξη στον τομέα των κινητών επικοινωνιών γίνεται με ρυθμό που συμβαδίζει στενά με τις τεχνολογικές εξελίξεις. Η ιδέα της παροχής ασύρματης επικοινωνίας στους κατοίκους μιας σχετικά μεγάλης έκτασης εξελίχθηκε στα εργαστήρια Bell που ανέπτυξαν την έννοια της κυψελωτής επικοινωνίας στη δεκαετία του '60. Πρακτικά, η εποχή της ασύρματης επικοινωνίας ξεκίνησε στη δεκαετία του '70, όπου αναπτύχθηκε αξιόπιστο hardware για ραδιοσυχνότητες.

Μέχρι σήμερα υπάρχουν τέσσερις ξεκάθαρες γενιές κινητών ασύρματων δικτύων, οι οποίες ορίζονται από τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνταν στην ραδιοζεύξη και στην μεταφορά των δεδομένων. Τα δίκτυα της πρώτης γενιάς (*1st Generation-1G*) εμφανίστηκαν στην δεκαετία του 1980 και ήταν αναλογικά. Δεν αποτέλεσαν την αρχή των κινητών επικοινωνιών, καθώς προϋπήρχαν δίκτυα κινητών επικοινωνιών, τα οποία δεν ήταν κυψελωτά. Η πρώτη γενιά χρησιμοποιούσε τεχνικές αναλογικής μετάδοσης για την κίνηση αποκλειστικά φωνής και η υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών ήταν υποτυπώδης και προβληματική. Η τεχνική πολυπλεξίας που χρησιμοποίησε η πρώτη γενιά ήταν πολλαπλή προσπέλαση με διαίρεση συχνότητας FDMA (*Frequency Division Multiply Access*). Δεν υπήρχε

κάποιο πρότυπο που να επικράτησε αλλά διάφορα ανταγωνιστικά συστήματα. Τα κυριότερα και πιο πετυχημένα συστήματα που αναπτύχθηκαν είναι: TACS (Total Access Communication System), NMT (Nordic Mobile Telephone) και AMPS (Advanced Mobile Phone Service). Δυο χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων δικτύων ήταν το AMPS στις ΗΠΑ το 1983 και το ETACS στην Ευρώπη το 1985.



Σχήμα 1.1 Η εξέλιξη των κινητών δικτύων.

Στη δεύτερη γενιά κυψελωτών συστημάτων (*2nd Generation-2G*) χρησιμοποιείται ψηφιακή μετάδοση για την κίνηση, σε αντίθεση με την πρώτη γενιά. Αρχικά σχεδιάστηκε για μεταφορά κλήσεων, σαν σύστημα μεταγωγής κυκλωμάτων (circuit switched system) και το σύστημα βελτιστοποιήθηκε για κίνηση φωνής. Τα δίκτυα δεύτερης γενιάς έχουν σαφώς μεγαλύτερη χωρητικότητα και περισσότερες δυνατότητες από αυτά της πρώτης. Ένα κανάλι συχνοτήτων διαιρείται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από πολλούς διαφορετικούς χρήστες, είτε με διαίρεση χρόνου TDM (Time Division Multiplexing), είτε με διαίρεση κώδικα CDM (Code Division Multiplexing). Επιπλέον χρησιμοποιούνται ιεραρχικές δομές κελιών, δηλαδή η περιοχή κάλυψης διαιρείται σε μακροκυψέλες (macrocells), μικροκυψέλες (microcells) και πικοκυψέλες (picocells), με σκοπό την περαιτέρω αύξηση των δυνατοτήτων των δικτύων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα δικτύων δεύτερης γενιάς, ήταν στην Αμερική το πρότυπο USDC, που επέτρεπε στους διαχειριστές των κυψελωτών συσκευών, να αντικαταστήσουν με κομψό τρόπο κάποια αναλογικά κανάλια ενός μόνο χρήστη (single-user), με ψηφιακά κανάλια, τα οποία υποστηρίζουν ταυτόχρονα 3 χρήστες στο ίδιο εύρος ζώνης των 30 KHz, ενώ τα πρότυπα CT2 και DECT (Digital European Cordless Telephone), που αναπτύχθηκαν στην Ευρώπη, ήταν δύο πολύ δημοφιλή πρότυπα ασύρματης τηλεφωνίας και

χρησιμοποιήθηκαν σε ολόκληρη την Ευρώπη, αλλά και την Ασία. Υπάρχουν τέσσερα κύρια πρότυπα για τα κινητά δίκτυα δεύτερης γενιάς: GSM (Global System for Mobile) communications και τα παράγωγα του Digital AMPS (D-AMPS), CDMA (Code Division Multiple Access) IS-95 καθώς και PDC (Personal Digital Cellular).

Το επόμενο βήμα στην εξέλιξη των ασύρματων δικτύων ήταν τα δίκτυα 2.5 γενιάς (*2.5 Generation-2.5G*), τα οποία περιελάμβαναν ουσιαστικά ένα σύνολο αναβαθμίσεων, που έγιναν στα κινητά δίκτυα δεύτερης γενιάς. Οι βελτιώσεις αυτές αφορούσαν κυρίως τη μεταφορά δεδομένων και των ρυθμών μετάδοσης. Πολλές από αυτές τις αναβαθμίσεις παρέχουν σχεδόν τις ίδιες δυνατότητες με αυτές των κινητών δικτύων τρίτης γενιάς. Παρόλο που η διαχωριστική γραμμή μεταξύ των κινητών δικτύων δεύτερης γενιάς και αυτών της γενιάς 2,5 είναι λεπτή, υπάρχουν ορισμένες τεχνολογίες οι οποίες χαρακτηρίζουν τη γενιά 2,5. Η λύση που προτάθηκε πρώτα, ήταν η τεχνολογία HSCSD (High-Speed Circuit-Switched Data). Με την τεχνολογία αυτή ένας χρήστης μπορεί να χρησιμοποιεί περισσότερες χρονοθυρίδες (time-slots) αντί μίας, για μία σύνδεση μεταφοράς δεδομένων. Το βασικότερο μειονέκτημα ήταν η χρήση μεταγωγής κυκλώματος. Αυτός ο τρόπος μεταγωγής είχε ως αποτέλεσμα, τη σπατάλη πόρων του δικτύου, αφού οι χρονοθυρίδες δεσμεύονταν ακόμα και όταν δεν χρησιμοποιούνταν. Η επόμενη λύση που προτάθηκε ήταν η τεχνολογία GPRS. Με αυτήν την τεχνολογία, μπορούν να επιτευχθούν ρυθμοί μετάδοσης των 115 Kbps ή και ακόμα μεγαλύτεροι, αν αγνοηθεί η διόρθωση σφαλμάτων. Αυτό που έχει μεγάλη σημασία, είναι ότι η τεχνολογία GPRS χρησιμοποιεί την τεχνολογία μεταγωγής πακέτου. Επομένως δεσμεύει τους πόρους του δικτύου, μόνο όταν υπάρχει ανάγκη για αποστολή δεδομένων. Κύριο μειονέκτημα της, είναι ότι η τεχνολογία αυτή είναι αρκετά πιο ακριβή από την τεχνολογία HSCSD και δεν ενδείκνυται για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, καθώς οι καθυστερήσεις είναι μεγαλύτερες.

Τα δίκτυα 3ης γενιάς (*3rd Generation-3G*), είναι τα δίκτυα που χρησιμοποιούνται σήμερα ευρύτατα στις κινητές επικοινωνίες, με βασικό στόχο την παροχή των κινητών υπηρεσιών, οπουδήποτε και κάθε στιγμή. Τα δίκτυα 3ης γενιάς, αποτέλεσαν αφορμή για την ανάπτυξη μιας πλειάδας εφαρμογών που περιλαμβάνουν, την ευρείας ζώνης ασύρματη τηλεφωνία, κινητή πρόσβαση στο Internet, πραγματοποίηση video - κλήσεων και κινητή τηλεόραση, όλα μέσα από μία κινητή συσκευή. Το UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) θεωρείται το κυρίαρχο πρότυπο στα 3G δίκτυα και έπεται το πρότυπο US CDMA2000 (Code Division Multiply Access). Στην Ιαπωνία, που είναι η πιο εξελιγμένη χώρα όσον αφορά την 3G τεχνολογία, η μετάβαση από τα 2G στα 3G δίκτυα ολοκληρώθηκε το 2006 και πλέον δύο συστήματα χρησιμοποιούνται, το W-CDMA (που είναι συμβατό με το σύστημα UMTS) και το CDMA2000.

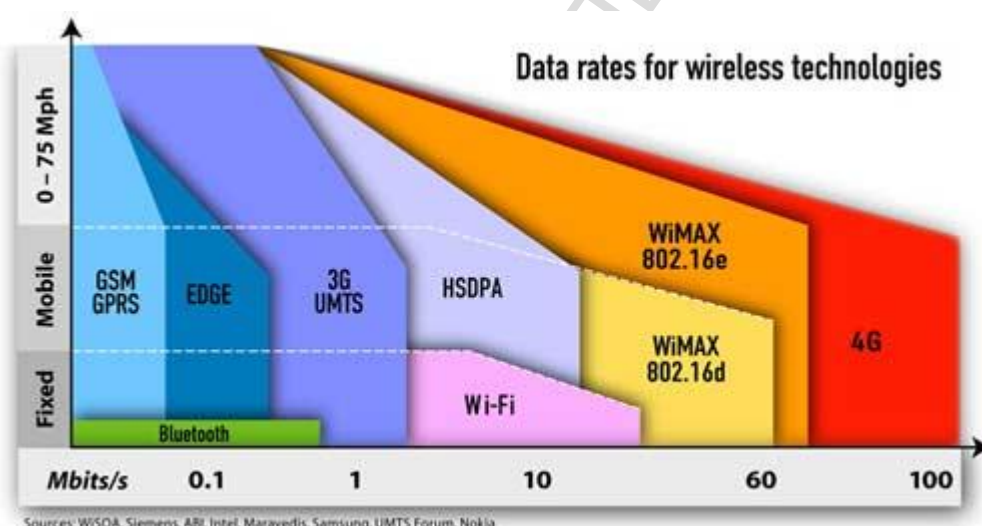
Η επόμενη γενιά μετά την 3G είναι η HSPA (*3.5 Generation - 3,5G*). Η γενιά

3.5, περιλαμβάνει τα δίκτυα εκείνα όπου, εκτός από την τεχνολογία WCDMA, έχουν ενσωματώσει και την τεχνολογία HSDPA (High Speed Downlink Packet Access). Το πρότυπο αυτό, αφορά την μετάδοση πακέτων από το σταθμό βάσης προς το χρήστη (downlink) με ρυθμό 5 φορές μεγαλύτερο του UMTS και 15 φορές μεγαλύτερο του GPRS. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι από τα 2 Mbps που μπορεί να προσφέρει το UMTS ο ρυθμός μπορεί να φτάσει θεωρητικά μέχρι και τα 14.4 Mbps. Το HSDPA θεωρείται ως μια εξέλιξη του UMTS προτύπου, παρέχοντας στους χρήστες υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και μεγαλύτερη χωρητικότητα, με ένα τρόπο ανάλογο με αυτό που προσφέρει το EDGE πρότυπο συγκρινόμενο με το GSM. Παρόλο που κάποια μέρη του προτύπου αυτού θεωρούνταν απλά στο να υλοποιηθούν με το υπάρχον hardware, το HSDPA σαν γενικότερη έννοια απαιτούσε επανασχεδιασμό στην αρχιτεκτονική του δικτύου και αναβάθμιση στο υλικό, όπως αυτό που χρησιμοποιήθηκε στους σταθμούς βάσης. Οι τελευταίοι, θα έπρεπε να ήταν ικανοί όχι μόνο να λειτουργούν αποδοτικά με τέτοιους υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, αλλά και να υποστηρίζουν τη λειτουργία περισσότερο πολύπλοκων πρωτοκόλλων. Η λειτουργία του HSDPA στηρίζεται στο γεγονός ότι αντί να χρησιμοποιούνται ξεχωριστά DCH (Dedicated Channel) κανάλια για την αποστολή δεδομένων, χρησιμοποιείται ένα DSCH (Downlink Shared Channel) κανάλι το οποίο μοιράζονται μεταξύ τους οι χρήστες για την μεταφορά των πακέτων. Το κανάλι αυτό έχει πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης (bandwidth) και για το λόγο αυτό καλείται HS-DSCH (high-speed DSCH).

Στη συνέχεια η 4G γενιά, η οποία είναι σε εξέλιξη. Η επίτευξη ενός 4G ολοκληρωμένου συστήματος ασυρμάτων επικοινωνιών ουσιαστικά επιτυγχάνεται με την τεχνολογική εξέλιξη με την ονομασία LTE. Σε σχέση με τις υπάρχουσες τεχνολογίες GSM, GPRS, EDGE, W-CDMA και το HSPA αυξάνει την χωρητικότητα του δικτύου, του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων ενώ ταυτόχρονα μειώνει τις καθυστερήσεις. Προχωρώντας προς τα 4G η ιδέα είναι τα all-IP δίκτυα, δηλαδή οποτεδήποτε και οπουδήποτε βρίσκεται ένας κινητός χρήστης να έχει κάλυψη από οποιοδήποτε IP δίκτυο, είτε πρόκειται για ασύρματο με κυψέλες, είτε για WLAN, είτε δορυφορικό. Συνεχώς γίνονται προσπάθειες βελτίωσης των υφιστάμενων τεχνολογιών των υπάρχοντων δικτύων για σύγκλιση τους προς τα all-IP δίκτυα και την απρόσκοπτη διασφάλιση της κινητικότητας του χρήστη.

Ο οργανισμός 3GPP, που είναι μια συνεργασία των οργανισμών τηλεπικοινωνιών παγκοσμίως με σκοπό την δημιουργία παγκόσμιου συστήματος κινητής τηλεφωνίας με τυποποιημένα τεχνικά χαρακτηριστικά, συγκεκριμενοποιεί τις προδιαγραφές του LTE στο Release 8 και στο Release 9 και υπόσχεται ρυθμούς μετάδοσης μέχρι και 300 Mbps στην κάτω ζεύξη με χρήση κεραίων MIMO 4x4 και 75Mbps στην άνω ζεύξη με απλή κεραία για κάθε 20 MHz του ταξινομημένου κατά ζεύγος φάσματος [11,12].

Τα πλεονεκτήματα της 4G είναι κυρίως η αποδοτικότητα φάσματος του συστήματος, η υψηλή χωρητικότητα του δικτύου, η υψηλή ποιότητα υπηρεσιών για την υποστήριξη των πολυμέσων της επόμενης γενιάς, η τεχνολογία για το packet switched network και το global roaming. Χρησιμοποιείται για να υποστηρίξει σε ποιότητα και αξία τις απαιτήσεις των εφαρμογών της τέταρτης γενιάς, όπως mobile TV και υπηρεσίες φωνής και δεδομένων, οπουδήποτε και σε οποιαδήποτε στιγμή. Στόχος της γενιάς αυτής είναι η ανάπτυξη συστημάτων πλήρως βασισμένα στην τεχνολογία IP. Αυτό πρόκειται να επιτευχθεί με την σύγκλιση ενσύρματων και ασύρματων τεχνολογιών και θα είναι δυνατόν να παρέχουν ταχύτητες μετάδοσης από 100 Mbps έως και 1 Gbps, με εξαιρετική ποιότητα και υψηλό επίπεδο ασφαλείας. Οι κυρίαρχες τεχνολογίες θα είναι η τεχνολογία OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) και επίσης OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) για την καλύτερη τοποθέτηση πολλαπλών χρηστών. Τέλος η 4G τεχνολογία βασίζεται μόνο σε μεταγωγή πακέτων, σε αντίθεση με τη 3G που υποστήριζε μετάδοση και με μεταγωγή κυκλωμάτων.



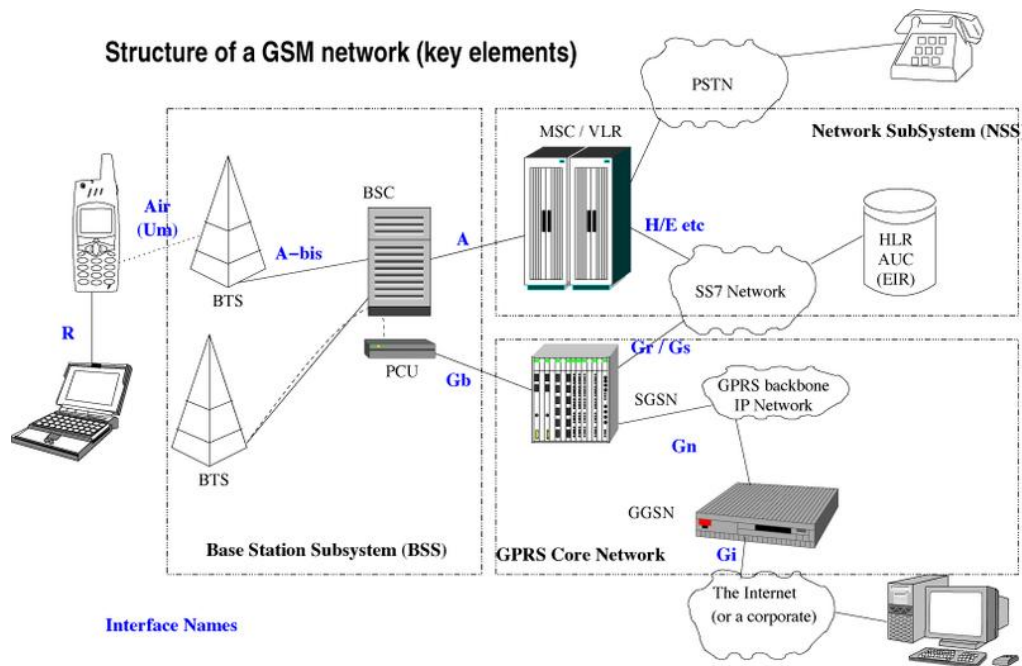
Σχήμα 1.2 Η ροή δεδομένων ανά τεχνολογία.

1.3 Ασύρματα δίκτυα υπολογιστών

1.3.1 Κυψελωτά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας

Τα κυψελωτά δίκτυα κινητών επικοινωνιών έχουν ως κύριο στόχο, την παροχή υπηρεσιών φωνής και δεδομένων σε τερματικά υψηλής κινητικότητας. Επιπλέον, ο τρόπος σχεδιασμού τους, επιτρέπει την εξυπηρέτηση μεγάλου πλήθους χρηστών, υπό την προϋπόθεση εγκατάστασης του απαραίτητου εξοπλισμού. Η λειτουργία τους βασίζεται στην ύπαρξη κυψελών και των αντίστοιχων σταθμών

βάσης (Base Transceiver Station-BTS), όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.3 Δομή ενός τυπικού κυψελωτού συστήματος

Πιο συγκεκριμένα το επίπεδο του ραδιοδικτύου περιλαμβάνει τα εξής :

Base Transceiver Station (BTS) - Σύστημα εκπομπής-λήψης Σταθμού Βάσης:

Πρόκειται για το σημείο ραδιοπρόσβασης του σταθμού βάσης. Η περιοχή κάλυψης ενός BTS είναι μια κυψέλη. Τα περιφερειακά στοιχεία, που συνήθως έχει ένας σταθμός βάσης, είναι τα εξής:

- **Κεραία (Antenna):** Μπορεί να είναι ομοιοκατευθυντική κεραία ή κατευθυντική.
- **Ενισχυτής Ισχύος (Power Amplifier):** Χρησιμοποιείται για να ενισχύσει το σήμα που θα μεταδοθεί από την κεραία.
- **Διπλέκτης (Duplexer):** Είναι ένα φίλτρο που επιτρέπει τη μετάδοση και τη λήψη σημάτων μιας συγκεκριμένης μάντας συχνοτήτων.
- **Συγκριτής (Comparator):** Χρησιμοποιείται για να ξεχωρίσει τα σήματα κατά την λήψη και να επιλέξει εκείνο με τον μεγαλύτερο σηματοθορυβικό λόγο (SNR).
- **Συνδυαστής (Combiner):** Συνδυάζει τις συχνότητες δύο η περισσότερων πομπών σε μια ενιαία μάντα συχνοτήτων.
- **Σύστημα πομποδεκτών (Transmitter/Receiver System):** Ένας BTS αποτελείται από ένα σύνολο πομποδεκτών, προκειμένου να εξυπηρετεί τους συνδρομητές μιας κυψέλης. Ο αριθμός των πομποδεκτών, εξαρτάται από τον αριθμό των συχνοτήτων που καταχωρούνται σε μια συγκεκριμένη κυψέλη.

Base Station Controller (BSC)-Ελεγκτήρας Σταθμού Βάσης: Η μονάδα αυτή

παρέχει και υποστηρίζει όλες τις λειτουργίες ελέγχου καθώς και τις φυσικές διασυνδέσεις μεταξύ του Ψηφιακού Κέντρου (*MSC*) και του Συστήματος Εκπομπής & Λήψης (*BTS*). Πρέπει να σημειωθεί, ότι ένας *BSC* έχει τη δυνατότητα να ελέγχει έναν αριθμό από *BTSs*, (π.χ μπορεί να ελέγξει μέχρι 84 πομποδέκτες) και ένα *MSC* μπορεί να ελέγχει έναν αριθμό *BSCs*.

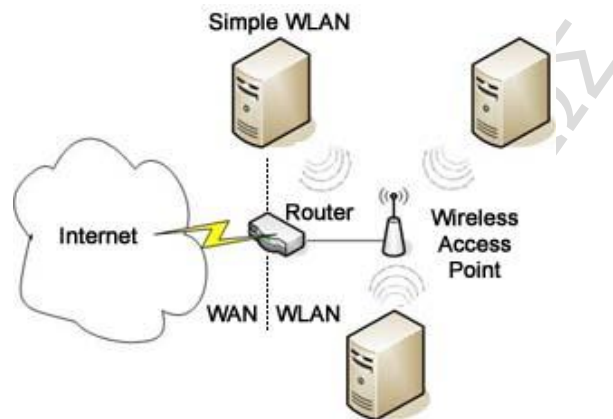
Η επικράτηση της κυψελωτής ιδέας επέλυσε κυρίαρχα προβλήματα στις ασύρματες επικοινωνίες, όπως την εξυπηρέτηση του συνεχώς αυξανόμενου συνδρομητικού φορτίου, αφού η κυψελωτή δομή αποτελεί τη βέλτιστη λύση, για την εξυπηρέτηση όσο το δυνατόν περισσότερων συνδρομητών, με το λιγότερο δυνατό φάσμα ραδιοσυχνοτήτων. Επίσης η χρησιμοποίηση ενός σταθμού βάσης μικρής ισχύος, για εκπομπή/λήψη σε κάθε κυψέλη, επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων λειτουργίας από σταθμούς βάσης, που εξυπηρετούν κυψέλες που δεν είναι γειτονικές. Η συνολική χωρητικότητα των συστημάτων γίνεται μεγαλύτερη με τη χρησιμοποίηση μικρότερων κυψελών, σε αντίθεση με τα πρώτα ασύρματα συστήματα κινητών επικοινωνιών τα οποία μεγιστοποιούσαν τη ραδιοκάλυψη ανά σταθμό βάσης, τοποθετώντας τις κεραιές στις κορυφές λόφων και κτιρίων και εκπέμποντας μεγαλύτερη ισχύ από εκείνη που χρησιμοποιείται στα κυψελωτά συστήματα. Τέλος, τα κυψελωτά συστήματα διαθέτουν την ικανότητα να μεταγουν την κίνηση από τον ραδιοδιάλο ενός σταθμού βάσης, σε κάποιο ραδιοδιάλο ενός άλλου γειτονικού σταθμού, καθώς το κινητό εξέρχεται από την περιοχή κάλυψης του πρώτου και μπαίνει στην περιοχή του άλλου, αναθέτοντάς του έτσι μια καινούργια συχνότητα (*handover*). Κάτι τέτοιο συμβαίνει και όταν για αδιευκρίνιστους λόγους, η ισχύς του σήματος που δέχεται ο δέκτης είναι πολύ κοντά στο κατώφλι ευαισθησίας του κινητού.

1.3.2 Ασύρματα τοπικά δίκτυα (*WLAN*)

Πρόκειται για δίκτυα εμβέλειας από λίγες δεκάδες έως λίγες εκατοντάδες μέτρα, δηλαδή για δίκτυα που χρησιμοποιούνται για την παροχή υπηρεσιών πρόσβασης τοπικά σε μια περιοχή, που συνηθίζει να ονομάζεται “hot spot “. Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία σε αυτή την κατηγορία δικτύων, είναι το *Wi-Fi* (*IEEE 802.11*). Η αναγκαιότητα ύπαρξης των *WLANs* αναδεικνύεται σε χώρους, όπου δεν υπάρχουν ενσύρματα μέσα και απαιτούνται συνδέσεις, που εγκαθίστανται ταχέως και προσφέρουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης.

Οι χρήστες των *WLANs*, μπορεί να διαθέτουν σταθερούς, φορητούς ή επιταλάμιους υπολογιστές. Οι βασικές διαφορές ανάμεσα στα *WLANs* και στα κυψελωτά συστήματα, έγκειται στον τρόπο μετάδοσης δεδομένων στους χρήστες, στους ρυθμούς μετάδοσης και στους κανονισμούς που διέπουν τη ζώνη λειτουργίας τους. Οι ρυθμοί μετάδοσης στους ασύρματους διαύλους των *WLANs* κυμαίνονται

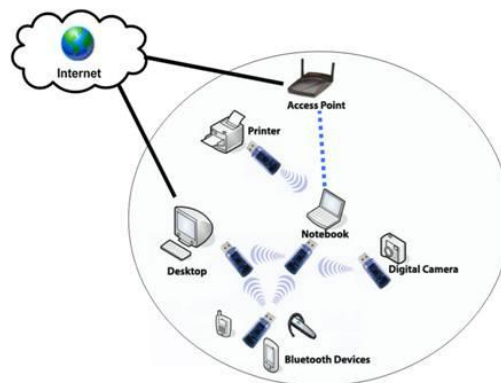
από μερικές δεκάδες Kbps μέχρι μερικές δεκάδες Mbps. Οι υπηρεσίες δεδομένων στα κυβελωτά συστήματα, προσφέρονται κυρίως από παρόχους υπηρεσίας, ενώ στα WLANs, οι χρήστες ανήκουν στο φορέα που διαχειρίζεται το δίκτυο. Επιπλέον, τα κυβελωτά συστήματα 3ης γενιάς, υποστηρίζουν ρυθμούς μετάδοσης περί τα 2 Mbps, ενώ τα ασύρματα LAN επιτυγχάνουν ρυθμούς μέχρι ακόμη και τα 108 Mbps. Για την τελευταία εξέλιξη, καθοριστική υπήρξε η συμβολή της τεχνολογίας MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), η οποία εισήγαγε τη χρήση πολλαπλών κεραιών εκπομπής και πολλαπλών κεραιών λήψης.



Σχήμα 1.4 Διάταξη ενός τυπικού WLAN

1.3.3 Ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN)

Πρόκειται για περιστασιακά δίκτυα που λειτουργούν ξεχωριστά από ένα σταθερό ή ασύρματο δίκτυο, δημιουργώντας ένα προσωρινό δίκτυο. Με τα προσωπικά δίκτυα δίνεται για παράδειγμα η δυνατότητα ανταλλαγής αρχείων σε απρομελέτητες συσκευές, η εκτύπωση εγγράφων χωρίς να συνδεθεί ο χρήστης σε ένα σταθερό ή ασύρματο δίκτυο όταν και η κοινή χρήση πληροφοριών με συσκευές Bluetooth (*IEEE 802.15.1*).



Σχήμα 1.5 Διάταξη ενός τυπικού WPAN

1.3.4 Ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN)

Τα δίκτυα αυτά είναι σχεδιασμένα, ώστε να παρέχουν κάλυψη σε μια εκτεταμένη περιοχή (*hot zone*) σε μέγεθος μιας μητροπολιτικής περιοχής. Η τυπική ακτίνα κάλυψης, κυμαίνεται από μερικές έως λίγες δεκάδες χιλιόμετρα, ενώ τα δίκτυα αυτά χρησιμοποιούνται από μια πληθώρα τερματικών συσκευών, όπως κινητές συσκευές, υπολογιστές κ.α. Στην κατηγορία των δικτύων WMAN, ανήκουν οι τεχνολογίες σταθερού(*IEEE 802.16-2004*) και κινητού(*IEEE 802.16-2005*) WIMAX, ενώ θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι ανήκουν σε αυτήν και κάποιες σύγχρονες τεχνολογίες δικτύων κινητής τηλεφωνίας τετάρτης γενιάς.



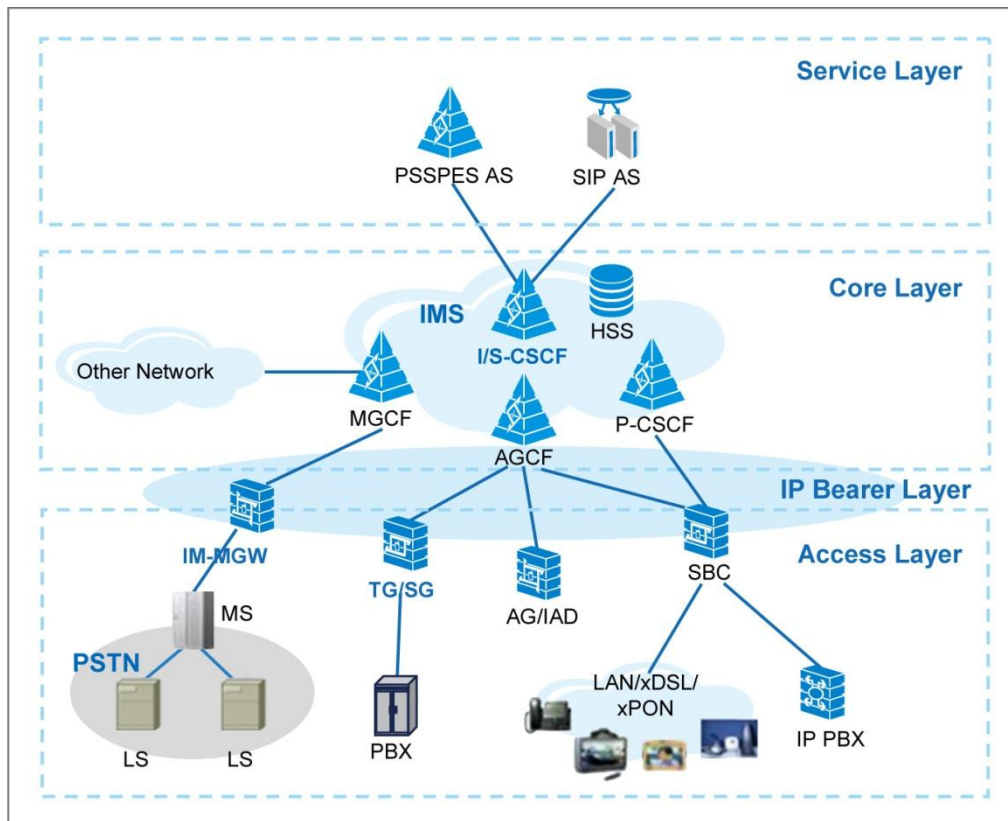
Σχήμα 1.6 Διάταξη ενός τυπικού WMAN

1.3.5 Κυψελωτά δίκτυα (IMS)

Μία κατηγορία ασυρμάτων δικτύων είναι τα κυψελωτά δίκτυα IMS (*IP Multimedia Subsystem*). Σκοπός του IMS είναι να προσφέρει υπηρεσίες πολυμέσων βασισμένες στο IP, δηλαδή τις υπηρεσίες που προσφέρει και το Διαδίκτυο. Το IMS ουσιαστικά είναι μία προσπάθεια και ένα μέρος του οράματος για την εξέλιξη των δικτύων κινητών επικοινωνιών πέρα από το GSM. Σχεδιάστηκε από το 3GPP (3rd Generation Partnership Project), μία συνεργασία ανάμεσα σε ομάδες τηλεπικοινωνιακών οργανισμών που είχε σαν στόχο να δημιουργήσει ένα ενιαίο παγκοσμίως πρότυπο κινητών επικοινωνιών τρίτης γενιάς. Παρόλα αυτά δεν είχε σκοπό να προτυποποιήσει εφαρμογές αλλά να ενισχύσει την πρόσβαση σε εφαρμογές πολυμέσων και φωνής μέσω ενσύρματων και ασύρματων τερματικών. Για να το επιτύχει αυτό χρησιμοποιεί πρότυπο βασισμένο στο πρωτόκολλο IP.

Τα χαρακτηριστικά των κυψελωτών δικτύων είναι τα εξής:

1. Δυνατότητα σύνδεσης σε κάθε είδους δίκτυο (ασύρματο ή ενσύρματο).
2. Δίνεται η δυνατότητα σε παροχείς και χρήστες να χρησιμοποιούν διαφορετικές αρχιτεκτονικές δικτύων.
3. Δυνατότητα μετακίνησης τερματικού και χρήστη.
4. Παρέχονται υπηρεσίες IP όπως VoIP, multiparty gaming, videoconferencing.



Σχήμα 1.4 Η δομή ενός δικτύου IMS.

1.4 Εφαρμογές Ασύρματης Επικοινωνίας

Τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα παρέχουν εύκολη διασύνδεση ετερογενών, φορητών ψηφιακών συσκευών τοποθετημένων σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Αν και είναι δίκτυα υπολογιστών, δεν σχεδιάζονται για ενσωμάτωση σε μεγαλύτερα δίκτυα καθώς στοχεύουν σε καταναλωτικές φορητές συσκευές περιορισμένων πόρων (κινητά τηλέφωνα, συσκευές αναπαραγωγής πολυμέσων κλπ). Αντιθέτως, τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (*WLAN*) συνήθως αποτελούν δίκτυα κανονικών υπολογιστών (κατ' ελάχιστον *PDA*) με δυνατότητα ενσωμάτωσης σε ευρύτερα (ενσύρματα ή ασύρματα) *WAN*.

Συγκριτικά με τα ενσύρματα τοπικά δίκτυα παρέχουν ευελιξία, κινητικότητα και -υπό προϋποθέσεις- χαμηλότερο κόστος. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

- Για ασύρματη επέκταση ενός προϋπάρχοντος ενσύρματου δικτύου, με έναν κύριο κόμβο να συνδέεται μέσω Ethernet με το LAN και να επικοινωνεί ασύρματα με άλλους σταθμούς.
- Για διασύνδεση LAN σε διαφορετικά κτίρια, συνήθως με συνδέσεις από σημείο σε σημείο μεταξύ γεφυρών ή δρομολογητών των επιμέρους LAN.
- Για παροδική ασύρματη ζεύξη μεταξύ LAN και κινητού τερματικού (νομαδική πρόσβαση).
- Για δικτύωση ad hoc/αδόμητη- ασύρματα δίκτυα ομότιμων κόμβων και αυθαίρετα μεταβαλλόμενης τοπολογίας τα οποία δεν απαιτούν καμία προϋπάρχουσα υποδομή και δημιουργούνται δυναμικά, με κόμβους να προστίθενται αυτομάτως στο δίκτυο όταν βρίσκονται εντός της εμβέλειάς του.

Τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας μπορούν και χρησιμοποιούνται στις ακόλουθες εφαρμογές:

- Ασύρματη Τηλεφωνία 1ης, 2ης, 3ης γενιάς (1G, 2G, 3G)
- Συστήματα Τηλεειδοποίησης (*paging*)
- Δορυφορικές Επικοινωνίες με Γεωστατικούς Δορυφόρους
- Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα (WLAN)
- Κυψελοειδής Τηλεφωνία Γενιάς 4ης γενιάς (4G)
- Ασύρματα Αδόμητα Δίκτυα (*Wireless Ad Hoc Networks*)
- Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (*Wireless Sensor Networks*)

Άλλες Εφαρμογές

- Στρατιωτικές Εφαρμογές: Παρακολούθηση πεδίου μάχης, Έλεγχος για τυχόν πυρηνική βιολογική ή χημική επίθεση.
- Περιβαλλοντικές εφαρμογές: Ανίχνευση υπερχειλίσσης σε ποτάμια, Ανίχνευση επικίνδυνων χημικών ουσιών, Ανίχνευση φωτιάς
- Εφαρμογές σε κτίρια: Ασφάλεια, Έλεγχος κλιματισμού, Δίκτυο επιταχυνσιομέτρων μπορεί να καταγράψει τον τρόπο κατάρρευσης κτιρίων

1.5 Μετάδοση σήματος

Για τη μετάδοση του σήματος υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι: η εκπομπή στενής ζώνης (*narrow band*) και η διασπορά φάσματος (*spread spectrum*). Η πρώτη είναι η παραδοσιακή μέθοδος χαμηλού κόστους, χαμηλής ασφάλειας και χαμηλής αξιοπιστίας, κατά την οποία το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου κύματος είναι κατά πολύ μικρότερο από την κεντρική συχνότητα σε Hz. Κάθε τεχνική στενής ζώνης συμπεριλαμβάνει και μία τυποποιημένη διαδικασία διαμόρφωσης με φέρον κύμα (*AM, FM για αναλογικά δεδομένα και ASK, FSK, PSK για ψηφιακά δεδομένα*).

Η δεύτερη μέθοδος είναι πιο πρόσφατη, παρέχει υψηλή αξιοπιστία και ασφάλεια σε υψηλό κόστος και βασίζεται στη διαμόρφωση της πληροφορίας προτού εκπεμφθεί με έναν κώδικα διασποράς ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα τη διασπορά του εκπεμπόμενου φάσματος σε μεγάλο εύρος ζώνης. Αυτή η διασπορά οδηγεί και σε πολλαπλασιασμό του δυνατού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων στο φυσικό επίπεδο, σύμφωνα με το θεώρημα Shannon. Οι διάφορες μέθοδοι διασποράς φάσματος συμπεριλαμβάνουν και μία τεχνική διαμόρφωσης, η τελευταία όμως έχει επικρατήσει να ονομάζεται διαμόρφωση μόνο σε εκπομπές στενής ζώνης.

Συνήθως η διασπορά φάσματος υλοποιείται με μία από τις παρακάτω τρεις μεθόδους:

- **Frequency Hopping (FHSS):** Το εύρος ζώνης χωρίζεται σε υποζώνες συχνοτήτων, καθεμία από τις οποίες έχει εύρος ανάλογο μίας εκπομπής στενής ζώνης, και ο κώδικας διασποράς ουσιαστικά καθορίζει σε ποια υποζώνη θα μεταπηδά η επικοινωνία σε τακτά χρονικά διαστήματα. Τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης θα πρέπει να συντονίζονται διαρκώς σε διαφορετική φέρουσα συχνότητα με τον ίδιο τρόπο (ο οποίος καθορίζεται από τον κώδικα) και στις ίδιες χρονικές στιγμές. Ως αποτέλεσμα κάποιος τρίτος που δε γνωρίζει τον κώδικα δεν μπορεί να υποκλέψει πληροφορία ή να παρεμβληθεί στη μετάδοση παρά ελάχιστα, αφού δε θα γνωρίζει πότε να συντονιστεί σε άλλη συχνότητα και σε ποια.
- **Direct Sequence (DSSS):** Για κάθε bit που πρόκειται να μεταδοθεί εκπέμπεται στην πραγματικότητα μία άλλη ακολουθία πολλών bit (η οποία εξαρτάται από τον κώδικα διασποράς). Ο μόνος τρόπος για να γίνει αυτό διατηρώντας τον ίδιο πραγματικό ρυθμό μετάδοσης είναι η διεύρυνση του χρησιμοποιούμενου φάσματος και η ταυτόχρονη ολική χρήση του. Το πλεονέκτημα είναι και εδώ η αυξημένη ασφάλεια, αφού ο κώδικας διασποράς κρυπτογραφεί κατά κάποιον τρόπο τα εκπεμπόμενα δεδομένα.
- **Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM):** Ένας από τους κυριότερους λόγους υιοθέτησης του OFDM ως του μοντέλου διαμόρφωσης για ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα είναι η μεγάλη αντοχή που επιδεικνύει σε περιβάλλοντα εξασθένησης σήματος και παρεμβολών. Σε συστήματα μονής φέρουσας ένας επίδοξος παρεμβολέας μπορεί να προκαλέσει ακόμα και την κατάρρευση μιας σύνδεσης, σε αντίθεση με τα συστήματα πολλών φερουσών, όπου ένα μικρό μόνο ποσοστό των φερουσών θα επηρεαστεί. Μία από τις προτεινόμενες λύσεις για βέλτιστη αντιμετώπιση του προβλήματος είναι η χρήση της Κωδικοποίησης Διόρθωσης Σφάλματος (*Error Correction Coding -ECC*).

1.6 Ασύρματη μετάδοση

Ραδιοκύματα ονομάζονται οι χαμηλές συχνότητες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, που εκτείνονται περίπου υπό τα 3 KHz ως το 300 GHz. Οι ασύρματες τηλεπικοινωνίες γίνονται συνήθως με ραδιοκύματα ευρείας εκπομπής (από 30 MHz ως 1 GHz), ή μικροκύματα (από 2 GHz ως 40 GHz). Τα ραδιοκύματα χαμηλότερων συχνοτήτων γενικά εξασθενούν σχετικά γρήγορα, αφού συγκριτικά μεταφέρουν λίγη ενέργεια αλλά έχουν την ικανότητα να διαπερνούν τα φυσικά εμπόδια. Τα κύματα υψηλότερων συχνοτήτων διαδίδονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις, αλλά ανακλώνται ευκολότερα από φυσικά εμπόδια. Επίσης, όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα ενός κύματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η κατευθυντικότητα του (μπορεί δηλαδή να εκπεμφθεί σε μία σχετικά στενή δέσμη αντί προς πάσα κατεύθυνση). Έτσι, μιλώντας γενικά, τα μικροκύματα είναι κατευθυντικά ενώ τα ραδιοκύματα ευρείας εκπομπής όχι.

Υπάρχουν τέσσερις βασικοί τρόποι διάδοσης κυμάτων για τις ασύρματες τηλεπικοινωνίες:

- Διάδοση εδάφους (Ground-Wave Propagation). Χαμηλές συχνότητες (ως 2 MHz), που όμως ακολουθούν την κυρτή επιφάνεια της Γης λόγω διάθλασης τους από την ατμόσφαιρα, κι έτσι καλύπτουν ικανοποιητικές αποστάσεις. Έχουν το μειονέκτημα της ταχείας εξασθένησης.
- Ατμοσφαιρική διάδοση (Sky-Wave Propagation). Υψηλές συχνότητες, δεν εξασθενεί η ισχύς τους εύκολα, μεταδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις μέσω διαδοχικών ανακλάσεων τους από την ιονόσφαιρα στο έδαφος και το αντίθετο, ώσπου να φτάσουν στον παραλήπτη.
- Διάδοση Γραμμής Όρασης (Line-Of-Sight Propagation). Πολύ μεγάλες συχνότητες, που δεν ανακλώνται από τις επιφάνειες. Οι κεραίες βρίσκονται σε οπτική επαφή και το κύμα εκπέμπεται κατευθυνόμενο από τη μία στην άλλη. Πρέπει να ληφθεί υπ όψιν η διάθλαση λόγω της ατμόσφαιρας και έτσι, αυτός ο τρόπος αποδίδει καλύτερα για επικοινωνίες μακριά από την επιφάνεια της γης.
- Ανάκλαση εδάφους δύο ακτινών (Two-Ray Ground Reflection). Η διάδοση από τον πομπό στο δέκτη γίνεται με δύο συνιστώσες: Απευθείας μετάδοση μέσω οπτικής επαφής και έμμεση λήψη μετά από ανάκλαση στο έδαφος. Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που η επικοινωνία γίνεται σε μικρή απόσταση και κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (π. χ. ασύρματα τοπικά δίκτυα υπολογιστών).

Η ασύρματη μετάδοση εμπεριέχει διάφορους παράγοντες, που δημιουργούν προβλήματα στην επικοινωνία: η κατάσταση της ατμόσφαιρας και η διάθλαση επηρεάζουν τα σήμα, η μεγάλη απόσταση εξασθενεί την ισχύ του σήματος κλπ. Όλοι

αυτοί οι παράγοντες (απώλειες ελεύθερου χώρου) επιδρούν διαφορετικά σε σήματα διαφορετικών συχνοτήτων. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται στρέβλωση και πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπ' όψιν όταν μεταδίδονται σήματα που εμπεριέχουν διαφορετικές συχνότητες. Ότι δεν ανήκει στην προς μετάδοση πληροφορία ονομάζεται θόρυβος και είναι είτε θερμικός (προκαλείται από τις κεραιές εξαρτάται από τη θερμοκρασία και δεν μπορεί να εξαλειφθεί) είτε από εξωτερικές πηγές (εκπομπές που προκαλούνται ακούσια από διάφορες ηλεκτρικές συσκευές λόγω κατασκευαστικών ατελειών) είτε από παρεμβολές άλλων εκπομπών σε επικαλυπτόμενες συχνότητες. Ο θόρυβος είναι εξίσου σημαντική επιβάρυνση στην επικοινωνία, με τις απώλειες ελεύθερου χώρου.

Ένα άλλο φαινόμενο που ενυπήρχε στην ασύρματη μετάδοση και επιβαρύνει την επικοινωνία είναι οι πολλαπλές οδεύσεις, που οφείλονται στην ανάκλιση, διάθλαση και σκέδαση του σήματος κατά τη διάδοση του και έχουν ως αποτέλεσμα ένα σήμα να φτάνει στον αποδέκτη πολλές φορές ή σε δόσεις, με χρονική διαφορά και διαφορετικά σήματα να φτάνουν την ίδια χρονική στιγμή παρεμβαλλόμενα το ένα στο άλλα. Το φαινόμενο όμως που δημιουργεί τα περισσότερα προβλήματα είναι οι διαλείψεις, η απότομη μεταβολή του πλάτους του σήματος, οι οποίες διαχωρίζονται σε υψίσυχνες και αργές, ενώ αντιμετωπίζονται με κάποιες τεχνικές που εκμεταλλεύονται τις πολλαπλές οδεύσεις.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

2

Δίκτυα 4ης γενιάς

2.1 Εισαγωγή στο LTE

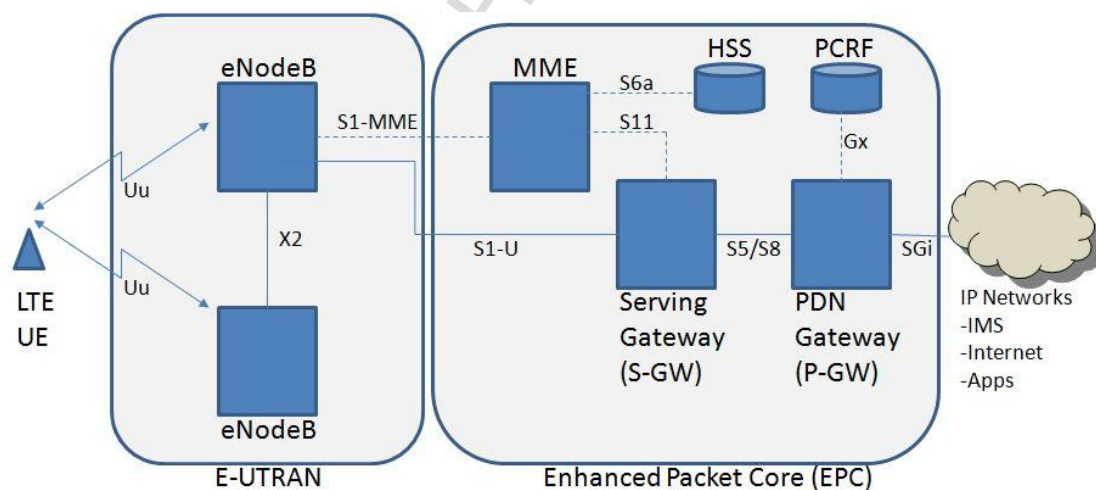
LTE (*Long Term Evolution*) είναι το όνομα που δόθηκε σε ένα νέο επίπεδο τεχνολογιών που αναπτύχθηκε από την 3GPP για να ανταπεξέλθει στην συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση διέλευσης της αγοράς. Το LTE είναι η εξέλιξη των συστημάτων δεύτερης και τρίτης γενιάς, ενώ ταυτόχρονα είναι και το επόμενο βήμα για την επίτευξη και παροχή ασύρματων ρυθμών μεταφοράς δεδομένων παραπλήσιων με αυτούς που συναντάμε στα ενσύρματα μέσα. Οι κύριοι στόχοι που τέθηκαν κατά το σχεδιασμό του ήταν:

- **Εύρος Ζώνης:** Κλιμακωτή χρήση φάσματος εύρους ζώνης της τάξης των 5, 10, 15 και 20 MHz. Επίσης, μπορεί να γίνει και χρήση εύρους ζώνης μικρότερου των 5 MHz (*1.5 MHz και 2.5 MHz*) για επιπλέον ευελιξία.
- **Ρυθμοί Μετάδοσης:** Επίτευξη μέγιστων ρυθμών μετάδοσης της τάξης των 100 Mbps στον κατερχόμενο και 50 Mbps στον ανερχόμενο σύνδεσμο για εύρος ζώνης ίσο με 20 MHz.
- **Mode Λειτουργίας:** Λειτουργία της τεχνολογίας *LTE* τόσο σε *FDD* όσο και *TDD*.
- **Throughput (Ρυθμοαπόδοση):** Επίτευξη 3-4 φορές μεγαλύτερου μέσου throughput χρήστη ανά MHz στον κατερχόμενο σύνδεσμο και αντίστοιχα 2-3 φορές μεγαλύτερο για τον ανερχόμενο σύνδεσμο συγκριτικά με τα *HSDPA* και *HSUPA*.
- **Αποδοτικότητα φάσματος:** Επίτευξη 2-3 φορές μεγαλύτερης αποδοτικότητας φάσματος σε σχέση με το *HSDPA*.
- **Καθυστέρηση:** Σημαντική μείωση του χρόνου RTT (*Round Trip Time*) από το χρήστη έως το σταθμό βάσης στα 5 ms - 10 ms.

- **Κινητικότητα Χρηστών:** Δυνατότητα βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος για χαμηλές ταχύτητες κίνησης των χρηστών (0-15 χμ/ώρα) καθώς και δυνατότητα υποστήριξης χρηστών που κινούνται σε πολύ υψηλές ταχύτητες μέχρι και 350km/h.
- **Διαλειτουργικότητα:** Δυνατότητα ταυτόχρονης λειτουργίας με μη-3GPP πρότυπα επικοινωνιών καθώς και με τα υπάρχοντα UTRAN (*Universal Terrestrial Radio Access Network*) / GSM / GERAN (EDGE Radio Access Network), GSM/EDGE (*EDGE - Enhanced Data Rates for Global Evolution*), Radio Access Network (GERAN) συστήματα κινητών επικοινωνιών. Επίσης, υποστήριξη δυνατότητας handover από και προς τα συστήματα αυτά.
- **Ποιότητα Υπηρεσίας:** Υποστήριξη από άκρο σε άκρο ποιότητας υπηρεσίας QoS, για την υποστήριξη απαιτητικών υπηρεσιών σε QoS όπως είναι οι VoIP εφαρμογές.

Για την επίτευξη των στόχων αυτών ήταν αναγκαίο να γίνει ένας συνδυασμός μιας νέας αρχιτεκτονικής συστήματος μαζί με μια ενδυναμωμένη τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης. Βασισμένοι στους διαφορετικούς τύπους λειτουργιών μέσα σε ένα κυψελωτό σύστημα μπορούμε να χωρίσουμε το δίκτυο σε δύο βασικά μέρη.

- Τμήμα Ασύρματης Πρόσβασης στο δίκτυο.
- Τμήμα Πυρήνα του δικτύου.



Σχήμα 2.1 Δομή και αρχιτεκτονική των LTE

2.1.1 Δίκτυο Πρόσβασης

Το δίκτυο πρόσβασης του LTE, E-UTRAN αποτελείται απλά από ένα δίκτυο με eNodeBs, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Για μια κανονική χρήση (σε αντίθεση με το *broadcast*) δεν υπάρχει κανένας κεντρικός ελεγκτής σε E-UTRAN. Κατά συνέπεια η αρχιτεκτονική E-UTRAN λέγεται ότι είναι επίπεδη. Τα eNodeBs διασυνδέονται

κανονικά το ένα με το άλλο μέσω μιας διεπαφής γνωστής ως X2 και στο EPC μέσω της διεπαφής S1-ιδιαίτερα στην MME μέσω της S1-MME διεπαφής και στην S-GW μέσω της S1-U. Τα πρωτόκολλα που τρέχουν μεταξύ των eNodeBs και του UE είναι γνωστά ως Access Stratum (AS) πρωτόκολλα. Το E-UTRAN είναι υπεύθυνο για όλες τις ραδιοσυνδεδεμένες λειτουργίες όπως:

- **Radio Resource Management:** Αυτό καλύπτει όλες τις λειτουργίες σχετικές με τους φορείς όπως ο ράδιο-έλεγχος φορέων, ο ράδιο-έλεγχος αποδοχής, ο ράδιο-έλεγχος κινητικότητας, ο σχεδιασμός και η δυναμική κατανομή των πόρων στους UE και στην ανερχόμενη και κατερχόμενη σύνδεση.
- **Header Compression:** Αυτό βοηθά να εξασφαλίζει αποδοτική χρήση του radio interface με την συμπίεση των headers των IP πακέτων οι οποίες θα μπορούσαν διαφορετικά να αντιπροσωπεύουν μία ενδεικτική δαπάνη, ειδικά για τα μικρά πακέτα όπως το VoIP.
- **Security:** Όλα τα πακέτα στέλνονται πάνω σε μια κρυπτογραφημένη ράδιο διεπαφή.
- **Συνδεσιμότητα στο EPC:** Αυτό περιέχει την σηματοδότηση προς το MME και το διαδρομή φορέα προς το S-GW.

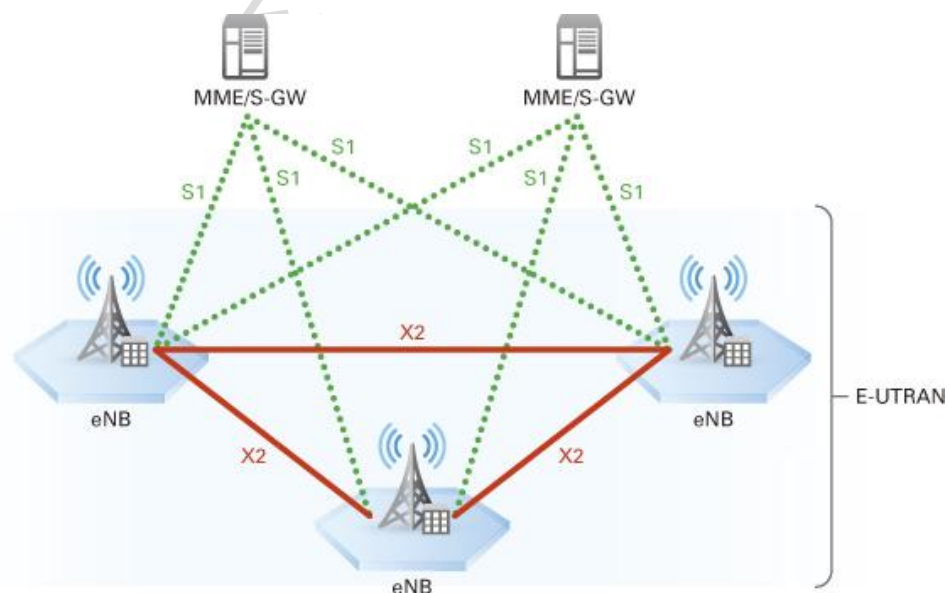
Από την πλευρά των δικτύων, όλες αυτές οι λειτουργίες βρίσκονται στα eNodeBs, κάθε ένα από αυτά μπορεί να είναι υπεύθυνο για την διαχείριση πολλαπλών κυψελών. Αντίθετα από μερικές προηγούμενες τεχνολογίες 2G και 3G, το LTE ενσωματώνει την λειτουργία των ράδιο-ελεγκτών στο eNodeB. Αυτό επιτρέπει την σφιχτή αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών στρωμάτων πρωτοκόλλων του δικτύου πρόσβασης, μειώνοντας την λανθάνουσα κατάσταση και βελτιώνοντας την αποδοτικότητα.

Τέτοιος κατανεμημένος έλεγχος εξαλείφει την ανάγκη για υψηλή διαθεσιμότητα, εντατική επεξεργασία η οποία έχει στην συνέχεια την δυνατότητα να μειώσει το κόστος και να αποφύγει τα 'μοναδικά σημεία αποτυχίας'. Επιπλέον, δεδομένου ότι το LTE δεν υποστηρίζει την soft handover δεν υπάρχει καμία ανάγκη για μια συγκεντρωμένη datacombining λειτουργία στο δίκτυο. Μια συνέπεια της έλλειψης ενός κεντρικού κόμβου ελέγχου είναι ότι, όπως το UE κινείται το δίκτυο πρέπει να μεταφέρει όλες τις σχετικές πληροφορίες με ένα UE δηλ. το πλαίσιο UE μαζί με οποιαδήποτε αποθηκευμένα στοιχεία από το ένα eNodeB στο άλλο. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμα της διεπαφής S1 που συνδέει το δίκτυο πρόσβασης με το CN είναι γνωστό ως S1-flex. Αυτό είναι μια έννοια με το οποίο οι πολλαπλοί CN κόμβοι (MME/S-GWs) μπορούν να εξυπηρετήσουν μια κοινή γεωγραφική περιοχή, που συνδέεται με ένα δίκτυο πλέγματος με το σύνολο των eNodeBs σε εκείνη την περιοχή. Ένα eNodeB μπορεί να εξυπηρετηθεί από πολλαπλά MME/S-GWs. Το σύνολο των MME/S-GWnodes που εξυπηρετεί μια κοινή περιοχή καλείται δεξαμενή MME/S-GWs και η περιοχή που καλύπτεται από μια τέτοια δεξαμενή καλείται περιοχή δεξαμενών.

Αυτή η έννοια επιτρέπει σε UEs στη κυψέλη που ελέγχεται από ένα eNodeB να μοιραστεί μεταξύ πολλαπλών CN κόμβων, παρέχοντας την δυνατότητα για την διανομή φορτίου και επίσης στην εξάλειψη των ενιαίων σημείων αποτυχίας για τους CN κόμβους. Το πλαίσιο του UE παραμένει κανονικά με την ίδια MME εφόσον το UE βρίσκεται μέσα στην περιοχή δεξαμενών.

Κάποια βασικά χαρακτηριστικά του E-UTRAN είναι:

- Downlink OFDM 100Mbps (20MHz φάσμα)
- Uplink SC-FDMA 50 Mbps (20MHz φάσμα)
- Χρησιμοποιούνται τεχνολογίες βασισμένες στην OFDM με αποτέλεσμα να υπάρχει διάσπαση των δεδομένων σε πολλά φέροντα σήματα, γεγονός που παρέχει ανοσία στην εξασθένηση και οδηγεί στην αύξηση της αξιοπιστίας παράδοσης.
- Καθυστέρηση Τελικού Χρήστη μικρότερη από 10ms
- Ευέλικτο και Κλιμακούμενο Εύρος Ζώνης
- Επιλογή φάσματος συχνότητας για υποστήριξη προγενέστερων τεχνολογιών ίσως διαφορετικών και από χώρα σε χώρα.
- Θα υποστηρίζεται η κίνηση ακόμη και σε ταχύτητες που φτάνουν τα 500kmph.
- Η κάλυψη θα επεκτείνεται από 5 – 100 km με κλιμάκωση μετά τα 30km
- Η χωρητικότητα για υπηρεσίες τηλεφωνίας που θα δώσει το VoIP θα είναι περίπου τριπλάσια από αυτή που μας δίνει το UMTS.
- Ποιότητα Υπηρεσίας απ' άκρο σ' άκρο το οποίο θα διαχωρίζει την προτεραιότητα για την κάθε κλάση υπηρεσίας.



Σχήμα 2.2 Το δίκτυο πρόσβασης

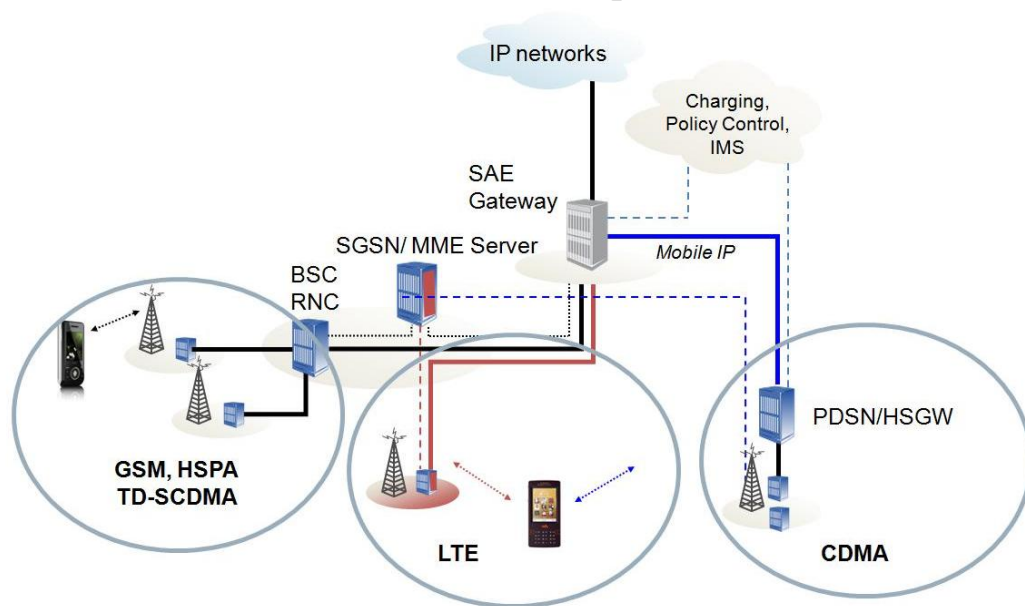
2.1.2 Πυρήνας του δικτύου

Ο Πυρήνας Δικτύου είναι πρακτικά η σταδιακή εξέλιξη των πυρήνων που συναντήσαμε και στα δίκτυα τρίτης γενιάς. Στην προκειμένη περίπτωση καλύπτει μόνο το τμήμα μεταγωγής πακέτων και για το λόγο αυτό έχει το όνομα Evolved Packet Core. Πρόκειται για έναν πυρήνα δικτύου υψηλής απόδοσης και χωρητικότητας, ο οποίος χρησιμοποιεί τεχνολογίες καθολικού IP. Έχει τη δυνατότητα να παρέχει ανεπτυγμένες υπηρεσίες πραγματικού χρόνου αλλά και υψηλών απαιτήσεων multimedia υπηρεσίες με αποτέλεσμα την ενδυνάμωση της ποιότητας υπηρεσιών που λαμβάνει ο χρήστης. Με την χρήση του υπάρχει βελτίωση στην απόδοση του δικτύου καθώς γίνεται διαχωρισμός ανάμεσα στον έλεγχο και στην διαχείριση των δεδομένων.

Οι βασικές αλλαγές που έφερε η χρήση του EPC και τα δίκτυα LTE στις επικοινωνίες είναι:

- Λήξη υπηρεσιών ομιλίας με μεταγωγή κυκλώματος. Ο νέος τρόπος μεταφοράς πληροφορίας φωνής γίνεται με την χρήση τεχνολογιών VoIP. Ο EPC αντιμετωπίζει την φωνή σαν μία από τις πολλές εφαρμογές που βασίζονται στο IP.
- Αυξημένη Ασύρματη Ευρυζωνικότητα. Το LTE πρέπει να πετύχει την ποιότητα υπηρεσιών που παρέχουν τα ενσύρματα δίκτυα. Αυτό διαφέρει από την παροχή υπηρεσιών βέλτιστης προσπάθειας αλλά και χαμηλής ταχύτητας περιήγηση στο διαδίκτυο. Οι υπηρεσίες αυτές έχουν ήδη ικανοποιήσει τις απαιτήσεις τους από προγενέστερα δίκτυα. Για το λόγο αυτό το LTE στρέφεται στην υποστήριξη πιο απαιτητικών υπηρεσιών.
- Η Ποιότητα Υπηρεσίας απ' άκρο σ' άκρο είναι πλέον απαραίτητη. Το LTE παρέχει υψηλή διαχείριση και ενδυνάμωση της ποιότητας υπηρεσίας απ' άκρο σ' άκρο με σκοπό την παράδοση υψηλού περιεχομένου και χαμηλής καθυστέρησης υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Υπάρχει η μετάβαση από τις τέσσερις κλάσεις υπηρεσιών που ορίστηκαν για τα δίκτυα τρίτης γενιάς (Conversational, Interactive, Streaming, Background) σε εννέα διαφορετικά προφίλ ποιότητας υπηρεσίας. Αυτό επιτυγχάνεται με την ταυτόχρονη κλιμάκωση των χρηστών, των υπηρεσιών και των συνόδων μεταφοράς δεδομένων.
- Παγκόσμια προσέγγιση. Το LTE είναι πλέον πλήρως αναγνωρισμένο από την ITU και αναγνωρίζει όλες τις ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται ανά τον κόσμο παρέχοντας έτσι δυνατότητες περιαγωγής παρόμοιες με αυτές που παρέχουν τα δίκτυα GSM και UMTS. Εξ αιτίας της συμβατότητας που θα έχουν οι συσκευές LTE με τα προγενέστερα δίκτυα οι συνδρομητές θα μπορούν να απολαύσουν συνεχή επικοινωνία ανεξαρτήτως της χώρας στην οποία βρίσκονται.

- Μικρότερο Κόστος ανά bit. Ο συνδυασμός της αυξημένης αποδοτικότητας και ευελιξίας του φάσματος που επιτυγχάνεται από ένα δίκτυο LTE με την προστιθέμενη χωρητικότητα είναι πιθανό να προκαλέσει μείωση του κόστους για την μεταδιδόμενη πληροφορία. Για παράδειγμα κάθε E-UTRAN κυψέλη θα μπορεί να εξυπηρετήσει μέχρι και 4 φορές μεγαλύτερο φορτίο σε σχέση με μια κυψέλη που χρησιμοποιεί HSxPA. Ο συνδυασμός της αυξημένης χωρητικότητας, με την βελτιωμένη κάλυψη που θα προκύψει από την χρήση ζωνών χαμηλότερων συχνοτήτων, αλλά και την χρήση εξελιγμένων κεραιών δίνει στα δίκτυα LTE την δυνατότητα να μειώσουν κατά πολύ το κόστος μεταδιδόμενου bit.
- Μειωμένη Καθυστέρηση. Επιπρόσθετα με την αύξηση των ρυθμών μετάδοσης και διέλευσης, τα LTE δίκτυα αναμένεται να παρέχουν βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσίας στους τελικούς χρήστες με την μείωση της καθυστέρησης για την μετάδοση των πακέτων πληροφορίας. Εφαρμογές πραγματικού χρόνου αλλά και υπηρεσίες αλληλεπίδρασης όπως είναι το online gaming και το VoIP θα παρέχουν υψηλότερης ποιότητας εμπειρία για τους τελικούς χρήστες έχοντας μειωμένη καθυστέρηση μετάδοσης.



Σχήμα 2.3 Evolved Packet Core

2.2 Αρχιτεκτονική LTE

2.2.1 Evolved Radio Access Network (RAN)

Το Evolved – RAN στα LTE αποτελείται από έναν κόμβο, τον κόμβο eNodeB. Ο κόμβος eNB φιλοξενεί πρωτόκολλα Φυσικού στρώματος, στρώματος MAC, Radio Link Control πρωτόκολλα και Packet Data Control Protocol. Επίσης

παρέχει Radio Resource Control λειτουργίες οι οποίες εντάσσονται στο πεδίο ελέγχου. Εκτελεί λειτουργίες διαχείρισης ασύρματων πόρων, ελέγχου εισόδου, χρονοπρογραμματισμού, βελτίωσης ποιότητας υπηρεσίας, μετάδοσης πληροφοριών κυψέλης, κρυπτογράφησης και αποκρυπτογράφησης πληροφοριών στο επίπεδο των χρηστών καθώς και συμπίεση και από-συμπίεση επικεφαλίδων κατά το download – upload.

2.2.2 Serving Gateway (SGW)

Η Serving Gateway (S-GW) δρομολογεί και προωθεί τα πακέτα δεδομένων του χρήστη, ενώ επίσης ενεργεί ως σημείο αναφοράς όταν ο χρήστης κινείται μεταξύ των eNodeBs ή μεταξύ του LTE και άλλων 3GPP τεχνολογιών (*handover*). Η Mobility Management Entity (MME) δίνει εντολή στη S-GW να αλλάξει τη σύνδεση από τον ένα eNodeB στον άλλο. Επίσης, μπορεί να ζητήσει από τη S-GW να παρέχει πόρους σύνδεσης για τη διαβίβαση δεδομένων, αν υπάρχει ανάγκη, από τον αρχικό eNodeB στον επόμενο. Άλλο ένα σενάριο είναι η αλλαγή από μια S-GW σε άλλη, με την MME να ελέγχει τη μετακίνηση αυτή αναλόγως με την κατάργηση συνδέσεων στην παλιά S-GW και την εγκατάστασή τους στην νέα S-GW.

Για όλες τις ροές δεδομένων που ανήκουν σε ένα UE ο οποίος βρίσκεται σε λειτουργία, η S-GW μεταβιβάζει τα δεδομένα μεταξύ του eNodeB και της Packet Data Network Gateway (P-GW). Ωστόσο, όταν ένας UE είναι σε κατάσταση αδράνειας οι πόροι στον eNodeB απελευθερώνονται και η πορεία των δεδομένων τερματίζει στην S-GW. Εάν η S-GW λάβει πακέτα δεδομένων από την P-GW, τότε θα αποθηκεύσει τα πακέτα και θα ζητήσει από την MME να αρχικοποιήσει τη διαδικασία τηλεειδοποίησης του UE. Αυτό θα παρακινεί τον UE να ξανασυνδεθεί και όταν οι συνδέσεις ξαναπραγματοποιηθούν, τα αποθηκευμένα πακέτα θα σταλούν.

Η S-GW παρακολουθεί τα δεδομένα στις συνδέσεις και μπορεί επίσης να συλλέγει δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό της χρέωσης των χρηστών. Επιπρόσθετα περιλαμβάνει τη λειτουργία νόμιμης παρακολούθησης, η οποία δίνει τη δυνατότητα να παρέχονται τα δεδομένα, του χρήστη που παρακολουθείται, στις αρχές για περαιτέρω έλεγχο.

Μια S-GW μπορεί να εξυπηρετεί μόνο μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή με ένα περιορισμένο σύνολο eNodeBs και επίσης μπορεί να υπάρχει ένα περιορισμένο σύνολο MMEs που ελέγχουν αυτή την περιοχή. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι θα πρέπει να είναι σε θέση να συνδέεται με οποιαδήποτε P-GW σε όλο το δίκτυο, αφού η P-GW δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια της μετακίνησης, αντιθέτως το S-GW μπορεί να μεταφερθεί.

2.2.3 Mobility Management Entity (MME)

Η οντότητα MME είναι ο κόμβος κλειδί για τον έλεγχο πρόσβασης στο LTE δίκτυο. Είναι υπεύθυνη για την παρακολούθηση των συσκευών που βρίσκονται σε αδράνεια και για τη διαδικασία τηλεειδοποίησης, συμπεριλαμβανομένων των αναμεταδόσεων. Συμμετέχει στη διαδικασία ενεργοποίησης και απενεργοποίησης του φορέα/καναλιού και επίσης είναι υπεύθυνη για την επιλογή του S-GW για ένα UE κατά την αρχική σύνδεση και τη στιγμή του ενδο-LTE handover συμπεριλαμβάνοντας τη μετεγκατάσταση του CN.

Επίσης, είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο ταυτότητας των χρηστών (μέσω αλληλεπίδρασης με το HSS). Οι Non Access Stratum (NAS) διαδικασίες τερματίζουν στο MME και είναι υπεύθυνες για την παραγωγή και την κατανομή προσωρινών ταυτοτήτων για τους UEs. Ελέγχουν την άδεια του UE για το αν μπορεί να συμμετέχει στην υπηρεσία που προσφέρει ο πάροχος (*Public Land Mobile Network*) και επιβάλλει περιορισμούς περιαγωγής στον UE. Η MME είναι το τελικό σημείο του δικτύου για κρυπτογράφηση/προστασία ακεραιότητας για τις NAS διαδικασίες και αναλαμβάνει την διαχείριση του κλειδιού ασφαλείας. Επίσης παρέχει τη λειτουργία control plane για κινητικότητα μεταξύ LTE και 2G/3G δικτύων μέσω της S3 διεπαφής. Τέλος τερματίζει την διεπαφή S6a προς το HSS για τις συσκευές χρηστών με περιαγωγή.

2.2.4 Packet Data Network Gateway (PDN GW)

Η P-GW παρέχει δυνατότητα σύνδεσης του UE με εξωτερικά δίκτυα πακέτων δεδομένων με το να δρα ως σημείο εξόδου και εισόδου της κυκλοφορίας για τον UE. Ένας UE μπορεί να έχει ταυτόχρονη σύνδεση με περισσότερες από μια P-GW για πρόσβαση σε πολλαπλά Packet Data Networks (PDNs). Επίσης, είναι το σημείο όπου δίνεται η IP σε κάθε UE. Συνήθως διανέμει μια IP διεύθυνση στον UE, και αυτός τη χρησιμοποιεί για να επικοινωνεί με άλλους IP hosts σε εξωτερικά δίκτυα, π.χ. στο Διαδίκτυο.

Ένας άλλος βασικός ρόλος της P-GW είναι να ενεργεί ως σημείο αναφοράς για την κινητικότητα μεταξύ 3GPP και μη τεχνολογίες (όπως το *WiMAX*). Όταν ένας UE μετακινείται από μια S-GW σε άλλη, οι φορείς/κανάλια πρέπει να αλλάξουν στο P-GW. Η P-GW θα λάβει ένδειξη για να αλλάξει τις ροές δεδομένων από το νέο S-GW. Τέλος, περιλαμβάνει το PCEF (*Policy Control Enforcement Function*), πράγμα που σημαίνει ότι εκτελεί gating και filtering λειτουργίες όπως απαιτείται από τις πολιτικές που καθορίζονται για τον UE και την εν λόγω υπηρεσία, ενώ συλλέγει και αναφέρει και τις σχετικές πληροφορίες χρέωσης.

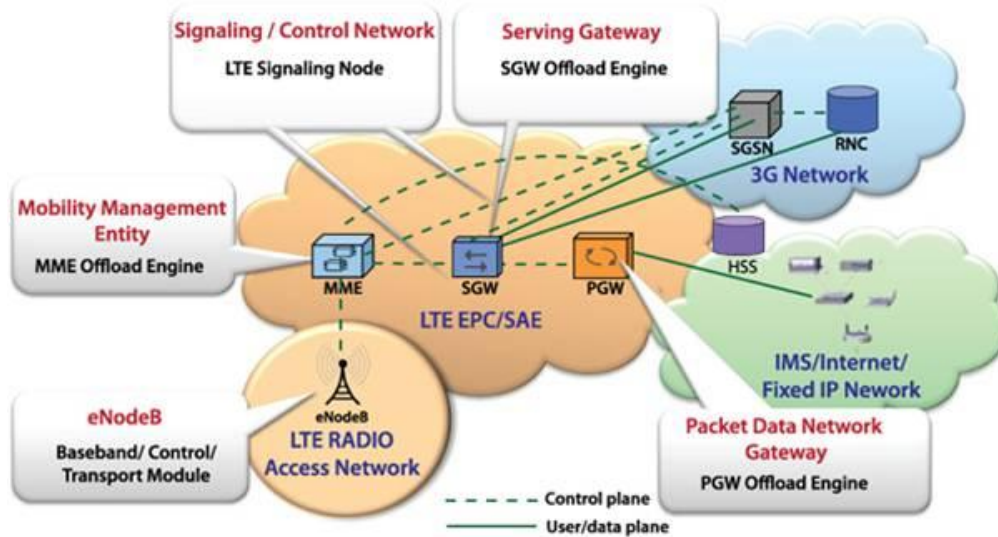
2.2.5 Policy and Charging Resource Function (PCRF)

Το Policy and Charging Resource Function (PCRF) είναι ένα στοιχείο του δικτύου που είναι υπεύθυνο για την Πολιτική και τον Έλεγχο Χρέωσης (*Policy Control and Charging*). Λαμβάνει αποφάσεις σχετικά με το πώς να δρουν οι υπηρεσίες όσον αφορά στο QoS και παρέχει πληροφορίες στο PCEF, που βρίσκεται στο P-GW, έτσι ώστε κατάλληλοι φορείς και ανάλογη τακτική να μπορούν να οριστούν. Οι πληροφορίες που παρέχει το PCRF στην PCEF ονομάζονται κανόνες PCC. Το PCRF θα στείλει τους κανόνες PCC κάθε φορά που ένας νέος φορέας/κανάλι θα πρέπει να εγκατασταθεί. Για παράδειγμα, όταν ο UE συνδέεται για πρώτη φορά στο δίκτυο και ο αρχικός φορέας εγκατασταθεί και στην συνέχεια ένας ή περισσότεροι αφιερωμένοι φορείς εγκαθίστανται.

2.2.6 Home Subscription Server (HSS)

Ο Home Subscription Server (HSS) είναι η “αποθήκη” δεδομένων με τις εγγραφές όλων των μόνιμων χρηστών. Είναι μια βάση δεδομένων αποθηκευμένη σε κάποιο εξυπηρετητή, ο οποίος βρίσκεται σε κεντρικό σημείο στις εγκαταστάσεις του παρόχου. Ο HSS κρατάει το κύριο αντίγραφο του προφίλ του συνδρομητή, το οποίο περιέχει πληροφορίες σχετικά με τις υπηρεσίες που ισχύουν για το χρήστη, καθώς και σχετικά με τις επιτρεπόμενες PDN συνδέσεις και το αν επιτρέπεται ή όχι περιαγωγή σε ένα δίκτυο που έχει επισκεφθεί. Για την υποστήριξη handover μεταξύ των μη-3GPP δικτύων, ο HSS αποθηκεύει επίσης τις ταυτότητες των P-GWs που είναι διαθέσιμες προς χρήση.

Ακόμα μία οντότητα που μπορεί να είναι ενσωματωμένη στο HSS είναι το Κέντρο Ταυτοποίησης (*Authentication Centre*) το οποίο παράγει τα διανύσματα για την ταυτοποίηση και τα κλειδιά ασφαλείας. Σε όλες τις διαδικασίες που σχετίζονται με αυτές τις λειτουργίες ο HSS αλληλεπιδρά με την MME, επομένως θα πρέπει να είναι σε θέση να συνδέεται με κάθε MME σε όλο το δίκτυο, προκειμένου να παρέχεται στο χρήστη η δυνατότητα να μετακινείται. Για κάθε UE, οι εγγραφές του HSS θα δείχνουν σε ένα MME που του προσφέρει υπηρεσίες κάθε στιγμή, και μόλις ένα νέο MME αναφέρει ότι προσφέρει υπηρεσίες στον UE, το HSS θα ακυρώσει την τοποθεσία της προηγούμενης MME.

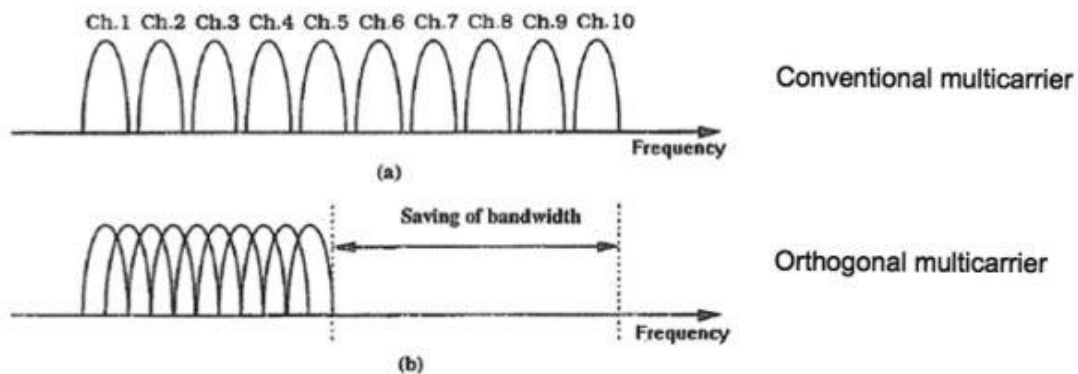


Σχήμα 2.4 Αρχιτεκτονική Δικτύου LTE

2.3 OFDM

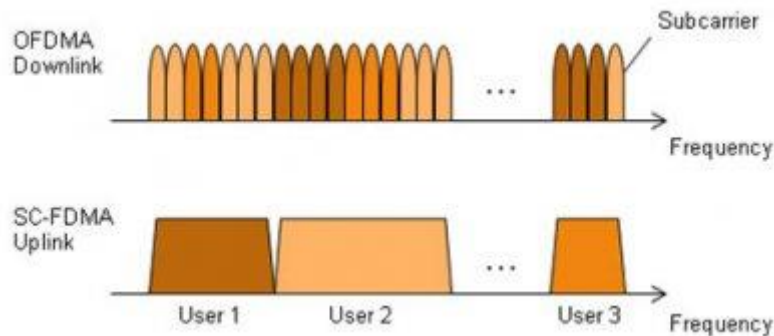
Για την επίτευξη των παραπάνω απαιτήσεων είναι προφανές ότι η τεχνολογία LTE πρέπει να βασιστεί σε βέλτιστες τεχνολογίες μετάδοσης πληροφορίας στο ασύρματο τμήμα του δικτύου πρόσβασης.

Μία από τις κύριες τεχνολογίες που υιοθετεί η τεχνολογία LTE είναι το OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Κύριος λόγος υιοθέτησής του ως μοντέλου διαμόρφωσης για το LTE είναι η μεγάλη αντοχή που επιδεικνύει σε περιβάλλοντα εξασθένησης σήματος και παρεμβολών. Επίσης, ιδιαίτερης σημασίας είναι το γεγονός ότι επιτυγχάνει καλύτερη αξιοποίηση του εύρους ζώνης του καναλιού, χωρίζοντας αυτό σε υποκανάλια (*subchannels*) που είναι μεν επικαλυπτόμενα αλλά ακολουθούν την αρχή της ορθογωνιότητας.



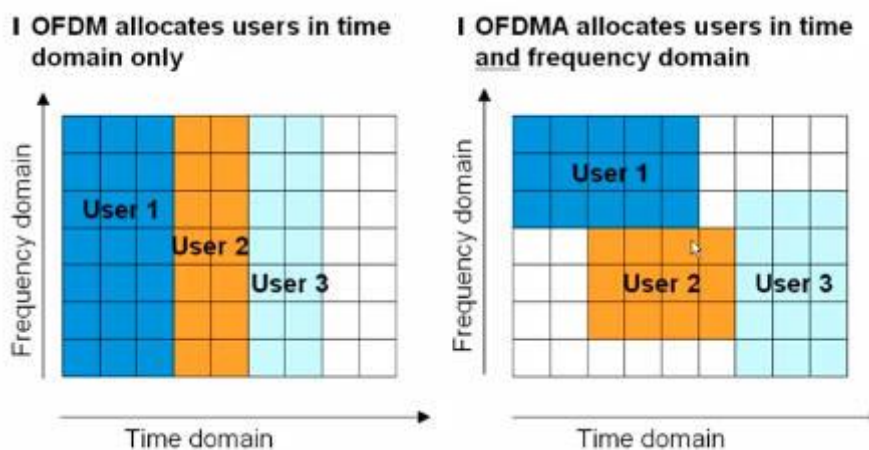
Σχήμα 2.5 α) Απλός διαχωρισμός εύρους ζώνης καναλιού β) OFDM διαχωρισμός εύρους ζώνης καναλιού

Αυτό απαλλάσσει τους κατασκευαστές από την ανάγκη να διαχωρίσουν τους φορείς (carriers) με τη χρήση guard-bands, αποφεύγοντας την άσκοπη σπατάλη του παρεχόμενου εύρους ζώνης. Ειδικότερα, για την περίπτωση της μετάδοσης δεδομένων στον κατερχόμενο σύνδεσμο χρησιμοποιείται η Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA) τεχνολογία, ενώ για την περίπτωση του ανερχόμενου συνδέσμου προτείνεται η χρήση της τεχνολογίας Single Carrier OFDM (SC-OFDM). Οι δύο αυτές τεχνολογίες χρησιμοποιούν το επίπεδο της συχνότητας σα μία νέα παράμετρο, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία στη σχεδίαση.



Σχήμα 2.6 Τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης στο LTE

Η OFDMA είναι μια multiuser έκδοση του δημοφιλούς OFDM ψηφιακού modulation. Η πολλαπλή πρόσβαση επιτυγχάνεται στην OFDMA με την ανάθεση των υποσυνόλων των υπομεταφορέων (*subcarrier*) στους μεμονωμένους χρήστες. Αυτό επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση από διάφορους χρήστες, αλλά και τη μετάδοση των πιλοτικών συμβόλων (*pilot symbols*) και των δεδομένων των καναλιών ελέγχου (*control channels*) χωρίς παρεμβολές.



Σχήμα 2.7 Δέσμευση πόρων στο πεδίο του χώρο-χρόνου

Όσο αφορά στο SC-OFDM και στον ανερχόμενο σύνδεσμο, χρήζει αναφοράς το γεγονός ότι η τεχνολογία LTE διαφοροποιείται από το πρότυπο WiMAX, το οποίο

χρησιμοποιεί την OFDMA τεχνική για τον ανερχόμενο σύνδεσμο. Η OFDMA τεχνική, παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά της, μπορεί να αποβεί ανασταλτικός παράγοντας για τη μπαταρία των κινητών συσκευών των χρηστών, καθώς απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ισχύος. Για το λόγο αυτό, στην τεχνολογία LTE υιοθετείται η SC-OFDM τεχνική. Η SC-OFDM τεχνική παρουσιάζει ιδιαίτερα καλή απόδοση, αφού έχει και πολύ υψηλό λόγο Peak-to-Average Ratio (*PAR*) σήματος. Ο λόγος *PAR* είναι πολύ κρίσιμη μετρική για τον ανερχόμενο σύνδεσμο, και σχετίζεται άμεσα με την κατανάλωση ισχύος. Επιπλέον, η SC-OFDM τεχνική επιτρέπει υψηλή απόδοση και μικρή πολυπλοκότητα υλοποίησης της κεραίας του σταθμού βάσης. Εν γένει, η SC-OFDM τεχνική επιφέρει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης στον ανερχόμενο σύνδεσμο, κυρίως όταν ο χρήστης βρίσκεται κοντά στο σταθμό βάσης.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

3

MIMO τεχνολογίες σε *LTE*

3.1 MIMO

Οι ασύρματες τηλεπικοινωνίες παρουσιάζουν ραγδαία εξέλιξη, φτάνοντας στα σημερινά χρόνια, όπου αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητάς μας. Η αλματώδης ανάπτυξη τους τα τελευταία χρόνια, που συμβαδίζει με τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για μεγαλύτερη ταχύτητα και καλύτερη ποιότητα μετάδοσης δεδομένων, λιγότερη ενέργεια, μικρότερες και φθηνότερες διατάξεις επιβάλλει την εστίαση της επιστημονικής έρευνας προς αυτή την κατεύθυνση. Νέες τεχνικές ασύρματης μετάδοσης έχουν επινοηθεί με σκοπό τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Τα συστήματα πολλαπλών κεραιών εκπομπής και λήψης (*MIMO*) αποτελούν μια αξιόπιστη λύση καθώς βελτιώνουν την ποιότητα μετάδοσης του συστήματος διατηρώντας ταυτόχρονα την ταχύτητα μετάδοσης σε υψηλά επίπεδα.

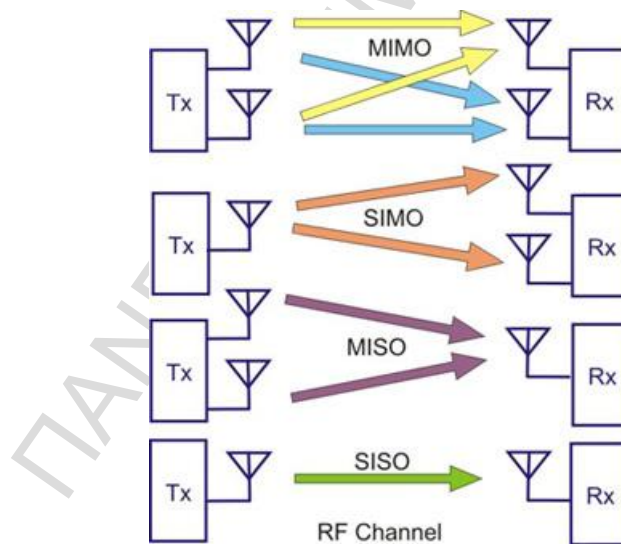
Η αρχική σύλληψη της ιδέας για την ανάπτυξη των *MIMO* συστημάτων έγινε από τους A.R. Kaye και D.A. George (1970). Την ιδέα τους εξέλιξαν λίγα χρόνια αργότερα οι Branderburg and Wyner (1974) και W. van Etten (1975, 1976). Για πρώτη φορά το 1984 σχεδιάστηκε διάταξη με πολλαπλές κεραιές από τον Jack Winters και Jack Salz στα εργαστήρια Bell. Το 1993 οι Arogyaswami Paulraj και Thomas Kailath εισήγαγαν την έννοια της χωρικής πολυπλεξίας χρησιμοποιώντας *MIMO* συστήματα. ενώ το 1996 ο Greg Rayleigh και ο Gerard Foschini επινόησαν μία νέα προσέγγιση των συστημάτων *MIMO* που έμελλε να βελτιώσει την αποδοτικότητά τους. Στην αγορά κυκλοφόρησε το 2001 από την εταιρεία Iospan Wireless Inc. το πρώτο σύστημα που χρησιμοποιούσε *MIMO-OFDMA* τεχνολογία ενώ υποστήριζε τόσο diversity coding όσο και spatial multiplexing.

Το χαρακτηριστικό των *MIMO* συστημάτων είναι η ικανότητα να μετατρέπουν το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης, που είναι παραδοσιακά το μελανό σημείο της ασύρματης μετάδοσης, σε πλεονέκτημα για το χρήστη [10]. Η επιτυχία της τεχνολογίας των *MIMO* κεραιών έγκειται στο γεγονός της ενίσχυσης τον πλάτους του σήματος κατά πολλές τάξεις μεγέθους χωρίς ταυτόχρονο κόστος σε

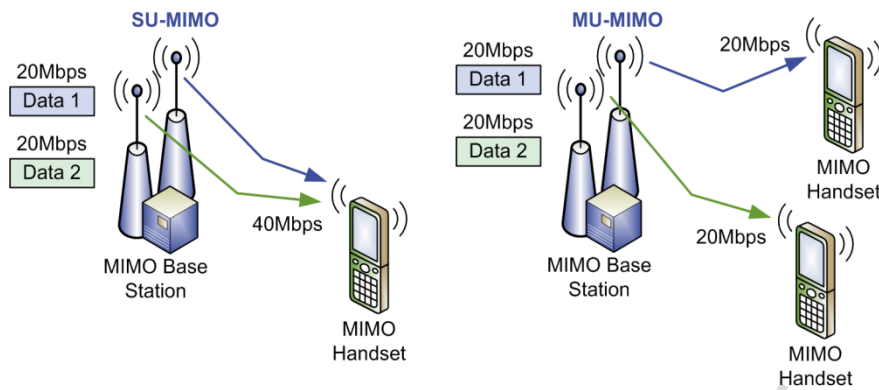
φάσμα (παρά μόνο σε επίπεδο hardware και πολυπλοκότητας). Έτσι η ιδέα αυτή έχει γίνει αντικείμενο περαιτέρω επιστημονικής έρευνας και έχει ενθαρρύνει και τη διερεύνηση διαφορετικών πεδίων όπως η μοντελοποίηση καναλιών, η θεωρία της πληροφορίας και η κωδικοποίηση-επεξεργασία σήματος και ο σχεδιασμός κεραιών.

Ανάλογα την διαθεσιμότητα των κεραιών στον πομπό και στον δέκτη διακρίνονται οι εξής κατηγορίες:

- **Single-Input Multiple-Output (SIMO):** είναι μια απλή μετάδοση ανοδικής ζεύξης κατά την οποία πολλαπλές κεραιές στο σταθμό βάσης επικοινωνούν με μια μόνο κεραιά στον εξοπλισμό χρήστη.
- **Multiple-Input Single-Output (MISO):** είναι μια μετάδοση καθοδικής ζεύξης κατά την οποία πολλαπλές κεραιές στον σταθμό βάσης επικοινωνούν με μια μόνο κεραιά στον εξοπλισμό χρήστη.
- **Single-User Multiple Input Multiple Output (SU-MIMO):** είναι μια από σημείο σε σημείο ζεύξη πολλαπλών κεραιών μεταξύ ενός σταθμού βάσης και ενός εξοπλισμού χρήστη.
- **Multi-User Multiple Input Multiple Output (MU-MIMO):** χαρακτηρίζει την επικοινωνία αρκετών εξοπλισμών χρήστη ταυτόχρονα με ένα κοινό σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας τους ίδιους συχνοτικούς και χρονικούς πόρους.



Σχήμα 3.1 Διάταξη ενός MIMO συστήματος



Σχήμα 3.2 Η εξέλιξη ενός MIMO συστήματος

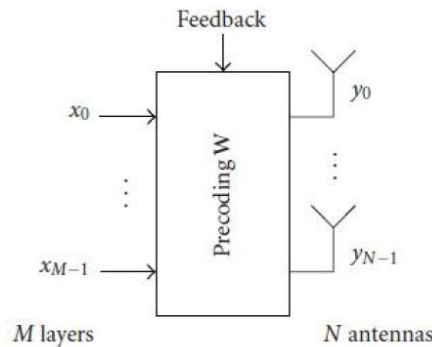
Για την επίτευξη αυτής της ποικιλίας, η LTE τεχνολογία υιοθέτησε διάφορες MIMO τεχνικές, συμπεριλαμβανομένου την ποικιλία μετάδοσης (*transmit diversity*), έναν χρήστη (*SU-MIMO*), πολλοί χρήστες (*MU-MIMO*), κλειστού βρόχου τάξης 1 (*closed loop rank 1*) προκωδικοποίησης και *beamforming* [7,8]. Η περίπτωση *SU-MIMO* έχει οριστεί για τον σχηματισμό με δύο ή περισσότερες κεραιές μετάδοσης κατά την κατερχόμενη μετάδοση, το οποίο υποστηρίζει μετάδοση πολλαπλών χωρικών επιπέδων μέχρι τέσσερα επίπεδα για έναν δεδομένο εξοπλισμό χρήστη (*User Equipment, UE*). Η περίπτωση του διαφορισμού εκπομπής (*transmit diversity*) ορίστηκε για τον σχηματισμό με δύο ή τέσσερις κεραιές μετάδοσης στην κατερχόμενη ζεύξη και με δύο κεραιές λήψης στην ανερχόμενη ζεύξη. Η περίπτωση *MU-MIMO* επιτρέπει την καταμερισμό των διαφόρων χωρικών επιπέδων στους διάφορους χρήστες στο ίδιο πεδίο χρόνου- συχνότητας και υποστηρίζεται σε κατερχόμενη και ανερχόμενη μετάδοση. Η κλειστού βρόχου τάξης 1 προκωδικοποίηση χρησιμοποιείται για την βελτίωση της χρησιμοποιούμενης κάλυψης δεδομένων στην τεχνολογία *SU-MIMO*, η οποία βασίζεται στα σήματα αναφοράς οριζόμενου κυττάρου (*cell-specific*) και κοινό σήμα αναφοράς (*common reference signal*) ενώ εισάγεται ένα μήνυμα σήματος ελέγχου στα αφιερωμένα σήματα αναφοράς που έχει μικρότερη επικεφαλίδα.

3.2 Downlink SU-MIMO στο LTE

Η τεχνική *SU-MIMO* εφαρμόζεται στο Physical Downlink Shared Channel (*PDSCH*), το οποίο είναι το κανάλι του φυσικού στρώματος που μεταφέρει τα δεδομένα πληροφορίας από το δίκτυο στο UE. Με το *SU-MIMO* χωρικής πολύπλεξης (*spatial multiplexing*), το LTE σύστημα παρέχει ένα μέγιστο ρυθμό των 150Mbps για δύο κεραιές μεταφοράς και 300Mbps για τέσσερις. Υπάρχουν δύο καταστάσεις λειτουργίας στο *SU-MIMO* χωρικής πολύπλεξης: κλειστού βρόχου (*closed loop*) και ανοιχτού βρόχου (*open loop*).

Στην περίπτωση της κλειστού βρόχου χωρικής πολύπλεξης, ο σταθμός βάσης (*eNodeB*) εφαρμόζει την προκωδικοποίηση στο πεδίο του χώρου στο μεταδιδόμενο σήμα λαμβάνοντας υπόψη το πίνακα προκωδικοποίησης (*Precoding Matrix*

Indicator-PMI) που αναφέρεται από τον UE, έτσι ώστε το μεταδιδόμενο σήμα να ταιριάζει με το χωρικό κανάλι που είναι γνωστό από τον UE. Η κλειστού βρόχου χωρικής πολύπλεξης με M επίπεδα και N κεραίες μετάδοσης απεικονίζεται στο σχήμα 3.1.



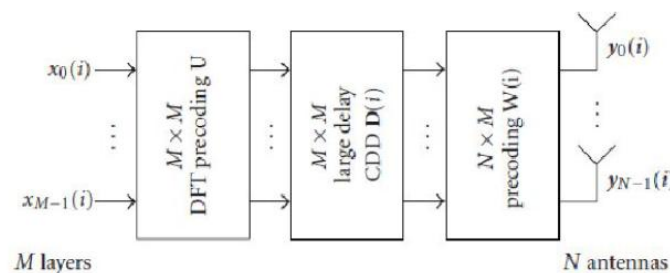
Σχήμα 3.3 Κλειστού βρόχου χωρική πολύπλεξη

Για την περίπτωση της χωρικής πολύπλεξης (*spatial multiplexing*), πολλαπλές κωδικολέξεις μπορούν να χαρτογραφηθούν σε πολλαπλά επίπεδα, εξαρτώμενα από την τάξη μετάδοσης που θα χρησιμοποιηθεί. Στο LTE κατά την κατερχόμενη μετάδοση, η διαδικασία hybrid automatic repeat request (*HARQ*) εκτελείται για κάθε κωδικολέξη. Κάθε τη διαδικασία HARQ απαιτείται μια ACK/NAK σηματοδότηση ανάδρασης στην ανερχόμενη μετάδοση (*uplink*). Για να μειωθεί το επίβαρο (*overhead*) της ανερχόμενης ανάδρασης, μεταδίδονται μόνο μέχρι δύο κωδικολέξεις ακόμα κι αν μπορούν να μεταδώσουν περισσότερα από δύο επίπεδα κατά την κατερχόμενη μετάδοση σε ένα δεδομένο υποπλαίσιο, δημιουργώντας την ανάγκη ορισμού ενός κανόνα χαρτογράφησης μιας κωδικολέξης στα επίπεδά της. Γενικά, εάν υπάρχει ένα επίπεδο, υπάρχει μια κωδικολέξη. Εάν υπάρχουν δύο επίπεδα, η βασική κατάσταση λειτουργίας είναι να μεταφέρει μια κωδικολέξη για κάθε επίπεδο. Η περίπτωση μεταφοράς μιας μόνο κωδικολέξης χρησιμοποιώντας δύο επίπεδα, είναι εφαρμόσιμη μόνο για τον eNodeB που έχει τέσσερις κεραίες μεταφοράς. Στην περίπτωση τριών επιπέδων μετάδοσης, το πρώτο επίπεδο μεταφέρει την πρώτη κωδικολέξη ενώ το δεύτερο και το τρίτο επίπεδο μεταφέρει τη δεύτερη κωδικολέξη. Σε αυτή την περίπτωση η δεύτερη κωδικολέξη έχει δύο φορές διαμορφωμένα σύμβολα σε σχέση με την πρώτη. Όταν χρησιμοποιούνται τέσσερα επίπεδα, μεταδίδονται δύο κωδικολέξεις, κάθε μια από τις οποίες μεταδίδεται χρησιμοποιώντας δύο επίπεδα.

Για την κλειστού βρόχου (*closed loop spatial multiplexing*) περίπτωση, ο eNodeB στέλνει στον UE την απαραίτητη πληροφορία σχετικά με τον ποιο πίνακα προκωδικοποίησης χρησιμοποιήθηκε ως μέρος της κατερχόμενης πληροφορίας ελέγχου, χρησιμοποιώντας ένα πεδίο τριών bit πληροφορίας για δύο κεραίες μετάδοσης κι ένα πεδίο έξι bit πληροφορίας για τέσσερις κεραίες μετάδοσης. Το πεδίο της πληροφορίας αυτής αναφέρεται ως δείκτης πίνακα προκωδικοποίησης μετάδοσης (*transmit precoding matrix indication - TPM*). Για να αντιμετωπιστεί η κατάσταση όπου η χωρική πολύπλεξη (*spatial multiplexing*) δεν είναι δυνατή εξαιτίας

της ποικιλίας καναλιού, ο eNodeB μπορεί στιγμιαία να προγραμματίσει την κατερχόμενη μετάδοση χρησιμοποιώντας την transmit diversity ακόμα κι αν ο UE έχει σχεδιαστεί να είναι στην spatial multiplexing κατάσταση.

Η ανοιχτού βρόχου διαστηματική πολύπλεξη (*open loop spatial multiplexing*) μπορεί να λειτουργήσει όταν δεν είναι διαθέσιμη αξιόπιστη PMI ανάδραση στον eNodeB, για παράδειγμα, όταν η ταχύτητα του UE δεν είναι αρκετά αργή ή όταν το overhead της ανάδρασης στο uplink δεν είναι και τόσο υψηλό. Η open loop spatial multiplexing με M επίπεδα και N κεραιές μετάδοσης φαίνεται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4 Ανοιχτού βρόχου χωρική πολύπλεξη

3.3 Transmit Diversity στο LTE

Για την LTE τεχνολογία κατά την κατερχόμενη μετάδοση, η περίπτωση της transmit diversity μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα φυσικά κανάλια όπως PDSCH, Physical Broadcast Channel (*PBCH*), Physical Control Format Indicator Channel (*PCFICH*), Physical Downlink Control Channel (*PDCCH*) και Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (*PHICH*) ενώ οι άλλες περιπτώσεις MIMO είναι εφαρμόσιμες μόνο στο PDSCH.

Ένας UE μπορεί να αναγνωρίσει τον αριθμό των κεραιών μετάδοσης στον eNodeB αποκωδικοποιώντας τυφλά το PBCH, αφού δεν υπάρχει καμία εξήγηση σηματοδότησης. Επίσης, δεν εφαρμόζεται η transmit diversity στα πρωτεύοντα και δευτερεύοντα σήματα συγχρονισμού που ορίζονται για το LTE. Όταν ο αριθμός των κεραιών μετάδοσης στον eNodeB ανιχνεύεται, καθορίζεται μια άλλη ειδική περίπτωση transmit diversity εφαρμόσιμη σε άλλα φυσικά κατερχόμενα κανάλια.

Η transmit diversity περίπτωση ορίστηκε για την κατερχόμενη LTE μετάδοση όπως απεικονίζεται στα σχήματα 3.5-3.7. Ο χωρο-συχνотικός block κώδικας (SFBC) όπως φαίνεται και σχήμα 3.5 χρησιμοποιείται εάν ο eNodeB έχει δύο κεραιές μετάδοσης. Για τον eNodeB με τέσσερις κεραιές μετάδοσης, ένας συνδυασμός από SFBC και frequency-switched transmit diversity (FSTD) όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6 χρησιμοποιείται για να παρέχει ευρωστία κατά της συσχέτισης μεταξύ των καναλιών από τις διάφορες κεραιές μετάδοσης και για πιο εύκολη εφαρμογή του δέκτη του UE. Η περίπτωση του transmit diversity που φαίνεται στο σχήμα 3.6 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλα τα κατερχόμενα κανάλια εκτός από PHICH. Η

transmit diversity που χρησιμοποιείται για κανάλι PHICH φαίνεται στο σχήμα 3.7. Σε αυτή την περίπτωση τέσσερα διαφορετικά ACK/NAK bits πολυπλέκονται χρησιμοποιώντας ορθογώνιους κώδικες, πάνω σε μια ομάδα από τέσσερις υποφορείς και η τελική ομάδα επαναλαμβάνεται τρεις φορές στο πεδίο συχνότητας για να επιτευχθεί το κέρδος συχνοτικού εύρους.

$$\begin{array}{c} \text{Subcarrier} \\ \rightarrow \\ \text{Antenna 0} \\ \text{Antenna 1} \end{array} \begin{bmatrix} S_0 & S_1 \\ -S_1^* & S_1^* \end{bmatrix}$$

Σχήμα 3.5 SFBC με δύο κεραίες μετάδοσης

$$\begin{array}{c} \text{Subcarrier} \\ \rightarrow \\ \text{Antenna 0} \\ \text{Antenna 1} \\ \text{Antenna 2} \\ \text{Antenna 3} \end{array} \begin{bmatrix} S_0 & S_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_2 & S_3 \\ -S_1^* & S_0^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -S_3^* & S_2^* \end{bmatrix}$$

Σχήμα 3.6 SFBC+FSTD με τέσσερις κεραίες μετάδοσης κατά το downlink

$$\begin{array}{c} \text{Subcarrier} \\ \rightarrow \\ \text{Type1:} \\ \text{Antenna 0} \\ \text{Antenna 1} \\ \text{Antenna 2} \\ \text{Antenna 3} \end{array} \begin{bmatrix} S_0 & S_1 & S_2 & S_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_1^* & S_0^* & S_3^* & S_2^* \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_0 & S_1 & S_2 & S_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -S_1^* & S_0^* & -S_3^* & S_2^* \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} S_0 & S_1 & S_2 & S_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_1^* & S_0^* & S_3^* & S_2^* \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

1st repetition 2nd repetition 3rd repetition

(a)

$$\begin{array}{c} \text{Subcarrier} \\ \rightarrow \\ \text{Type2:} \\ \text{Antenna 0} \\ \text{Antenna 1} \\ \text{Antenna 2} \\ \text{Antenna 3} \end{array} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_0 & S_1 & S_2 & S_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -S_1^* & S_0^* & -S_3^* & S_2^* \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} S_0 & S_1 & S_2 & S_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -S_1^* & S_0^* & -S_3^* & S_2^* \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_0 & S_1 & S_2 & S_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -S_1^* & S_0^* & -S_3^* & S_2^* \end{bmatrix}$$

1st repetition 2nd repetition 3rd repetition

(b)

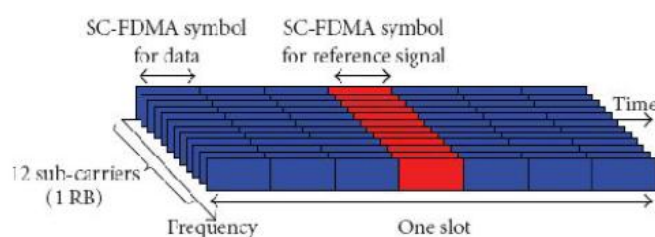
Σχήμα 3.7 Τροποποιημένο SFBC+FSTD για PHICH με τέσσερις κεραίες μετάδοσης κατά το downlink

Για την περίπτωση της ανερχόμενης μετάδοσης (uplink) γίνεται επιλογή κεραιών μετάδοσης για τον UE, με δύο κεραίες μετάδοσης καθορισμένες. Στην περίπτωση του κλειστού βρόχου (closed-loop), ο eNodeB επιλέγει την κεραία που πρόκειται να χρησιμοποιήσει για ανερχόμενη μετάδοση και 'συζητάει' αυτή την επιλογή με τον UE χρησιμοποιώντας το κατερχόμενο μήνυμα ελέγχου. Για την επιλογή κεραιάς μετάδοσης στην περίπτωση ανοιχτού βρόχου, ο UE αυτόνομα

επιλέγει την κεραία μετάδοσης που πρόκειται να χρησιμοποιήσει για μετάδοση χωρίς την παρέμβαση του eNodeB. Αυτός ο τύπος SFBC transmit diversity τεχνικής δεν χρησιμοποιείται για την ανερχόμενη μετάδοση του LTE προκειμένου να αποφευχθεί επιπλέον κόστος που απαιτείται για την υλοποίηση δύο ενισχυτών στον UE.

3.4 MU-MIMO στο LTE

Η περίπτωση πολλαπλών χρηστών με MIMO (*MU-MIMO*) υποστηρίζεται και στο πρότυπο του LTE και για ανερχόμενη και για κατερχόμενη μετάδοση. Κατά την ανερχόμενη μετάδοση, ο eNodeB μπορεί πάντα να προγραμματίσει περισσότερους από έναν UE να μεταδώσουν στον ίδιο χρονο-συχνотικό πόρο, το οποίο σχηματίζει μια MU-MIMO μετάδοση. Παρόλα αυτά, προκειμένου για έναν eNodeB να μπορεί να διαφορίσει σωστά και να αποδιαμορφώσει αυτά τα σήματα, ο eNodeB χρειάζεται να εφαρμόσει ορθογώνια σήματα αναφοράς για αυτούς τους UEs που σχεδιάστηκαν να μεταδώσουν για την περίπτωση των MU-MIMO. Στο σχήμα 3.8 φαίνεται η δομή του uplink slot όπου το σήμα αναφοράς μεταδίδεται χρησιμοποιώντας το τέταρτο σύμβολο και τα δεδομένα μεταδίδονται χρησιμοποιώντας τα άλλα.



Σχήμα 3.8 Πολύπλεξη των δεδομένων και των σημάτων αναφοράς στην ανερχόμενη κατάσταση

3.5 Πλεονεκτήματα του MIMO

Τα οφέλη της τεχνολογίας MIMO που συμβάλει στην επίτευξη αυτού του σημαντικού κέρδους απόδοσης είναι το κέρδος της συστοιχίας, το κέρδος χώρου διαφορισμού, το κέρδος της χωρικής πολυπλεξίας και η μείωση παρεμβολής. Σε γενικές γραμμές, μπορεί να μην είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν ταυτόχρονα όλα τα οφέλη που περιγράφεται κατωτέρω λόγω των αντιφατικών απαιτήσεων για τους βαθμούς χώρου ελευθερίας. Όμως, χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό από τα οφέλη σε ένα ασύρματο δίκτυο θα έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της ικανότητάς, την κάλυψη και την αξιοπιστία. Τα οφέλη περιγράφονται εν συντομία παρακάτω.

3.5.1 Κέρδος συστοιχίας (*Array gain*)

Το κέρδος συστοιχίας είναι η αύξηση του λαμβανόμενου SNR που προκύπτει από ένα συνεκτικό αποτέλεσμα των ασύρματων σημάτων στο δέκτη. Ο συνεπής

συνδυασμός μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της χωρικής επεξεργασίας κατά τη συστοιχία κεραιών λήψης ή / και χωρικών προεπεξεργασία στην συστοιχία κεραιών εκπομπής . Το κέρδος συστοιχίας βελτιώνει την αντοχή στο θόρυβο, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της κάλυψης και της εμβέλειας του ασύρματου δικτύου.

3.5.2 Χωρικός διαφορισμός κέρδους (*Spatial diversity gain*)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η στάθμη του σήματος σε έναν δέκτη σε ένα ασύρματο σύστημα αυξομειώνεται ή εξασθενεί. Το κέρδος χωρικού διαφορισμού μετριάζει την εξασθένιση και πραγματοποιείται από την παροχή του δέκτη με πολλαπλά αντίγραφα του εκπεμπόμενου σήματος στο χώρο, τη συχνότητα ή το χρόνο. Με ένα αυξανόμενο αριθμό των ανεξάρτητων αντίγραφων (*ο αριθμός των αντιγράφων συχνά αναφέρεται ως η σειρά ποικιλομορφίας*), την πιθανότητα ότι τουλάχιστον ένα από τα αντίγραφα δεν βιώνει μια βαθιά αύξηση εξασθένησης, βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα και την αξιοπιστία της υποδοχής.

3.5.3 Μείωση και αποφυγή παρεμβολών

Η παρεμβολή σε ασύρματα δίκτυα είναι αποτελέσματα από πολλούς χρήστες που μοιράζονται το χρόνο και τους πόρους. Η παρεμβολή μπορεί να μετριάσει σε συστήματα MIMO, αξιοποιώντας τη χωρική διάσταση για την αύξηση του διαχωρισμού μεταξύ των χρηστών. Για παράδειγμα, με την παρουσία της παρεμβολής, το κέρδος συστοιχίας αυξάνει την ανοχή στο θόρυβο, καθώς και η παρεμβολή ισχύος, ως εκ τούτου, η βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο συν παρεμβολή (*SINR*). Επιπλέον, η χωρική διάσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σκοπούς αποφυγής παρεμβολών, δηλαδή, κατευθύνοντας την ενέργεια του σήματος προς τον προβλεπόμενο χρήστη και την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών σε άλλους χρήστες.

3.6 MIMO σε ασύρματα δίκτυα

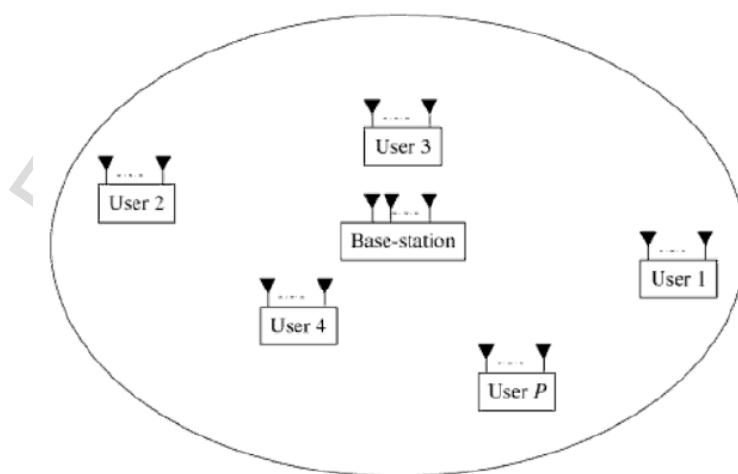
Τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να ταξινομηθούν ευρέως ως κυψελωτά ή ad hoc δίκτυα. Ένα κυψελοειδές δίκτυο χαρακτηρίζεται από την κεντρική επικοινωνία πολλαπλών χρηστών μέσα σε μια κυψέλη που επικοινωνεί με ένα σταθμό βάσης που ελέγχει όλη τη μετάδοση / λήψη δεδομένων και την προωθεί στους χρήστες. Αντιθέτως, σε ένα ad hoc δίκτυο, όλοι οι τερματικοί σταθμοί επί ίσοις όροις - οποιοδήποτε τερματικό μπορεί να λειτουργήσει ως αποστολέας ή παραλήπτης των δεδομένων. Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται εν συντομία τη χρήση της τεχνολογίας MIMO σε κάθε ένα από αυτά τα δίκτυα.

3.6.1 MIMO σε κυψελωτά δίκτυα

Σε ένα κυψελωτό δίκτυο ασύρματης επικοινωνίας, πολλαπλοί χρήστες μπορούν να επικοινωνήσουν στον ίδιο χρόνο και/ή συχνότητα. Η πιο επιθετική

επαναχρησιμοποίηση των πόρων του χρόνου και των συχνοτήτων, η μεγαλύτερη χωρητικότητα του δικτύου, παρέχει ότι τα μεταδίδονται τα σήματα μπορούν να ανιχνευθούν με αξιόπιστο τρόπο. Οι πολλαπλοί χρήστες μπορούν να χωριστούν σε χρόνο (διαίρεση χρόνου) ή σε συχνότητα (διαίρεση συχνότητας) ή σε κώδικα (διαίρεση κώδικα). Η χωρική διάσταση των καναλιών MIMO, παρέχουν μια επιπλέον διάσταση για διαχωρισμό χρηστών, επιτρέποντας πιο επιθετική επαναχρησιμοποίηση των πόρων του χρόνου και της συχνότητας, αυξάνοντας έτσι την χωρητικότητα του δικτύου. Στο σχήμα φαίνεται μια κυψέλη ενός MIMO κυψελωτού δικτύου. Ο σταθμός βάσης είναι εξοπλισμένος με L κεραιές που επικοινωνούν με P χρήστες καθένας εξοπλισμένος με M κεραιές. Το κανάλι από τον σταθμό βάσης στους χρήστες (*downlink*) είναι αναμεταδιδόμενο κανάλι (*broadcast channel-BS*) ενώ το κανάλι από τους χρήστες στο σταθμό βάσης (*uplink*) είναι πολλαπλής πρόσβασης κανάλι (*Multiple Access Channel-MAC*). Για να γίνει κατανοητό το πιθανό κέρδος από την τεχνολογία MIMO σε ένα περιβάλλον πολλών χρηστών, θεωρούμε το uplink ενός κυψελωτού συστήματος MIMO όπου όλοι οι χρήστες μεταδίδουν ταυτόχρονα ανεξάρτητα δεδομένα από κάθε εκπεμπόμενη κεραιά τους. Έστω ότι κάθε χρήστης σηματοδοτείται με χωρική πολυπλεξία. Στον σταθμό βάσης, οι χρήστες ενώνονται, εμφανίζονται ως μια πολλαπλή κεραιά πομπού με PM κεραιές. Έτσι το αποτελεσματικό κανάλι του uplink έχει μια διάσταση $L \times PM$. Αυτό το αποτελεσματικό κανάλι θα έχει μια σημαντική διαφορά δομής από το κανάλι απλού χρήστη H_w MIMO λόγω των διαφορών path-loss και της σκίασης (*shadowing*) μεταξύ των χρηστών. Ωστόσο, με την πλούσια διασπορά και $L \geq PM$, μπορούμε να αναμένουμε ότι η χωρική υπογραφή των χρηστών είναι καλά διαχωρισμένοι για να επιτρέπουν την αξιόπιστη ανίχνευση.

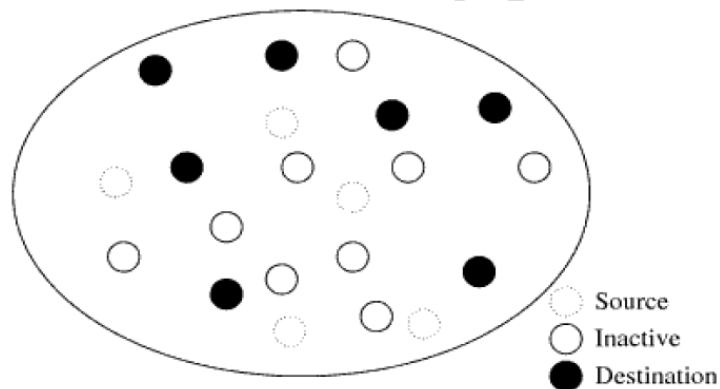
Χρησιμοποιώντας ένα πολυχρηστικό ZF δέκτη θα επιτρέψει τέλει διαχωρισμό όλων των ροών δεδομένων στο σταθμό βάσης, αποφέροντας ένα πολυχρηστικό κέρδος πολυπλεξίας του PM .



Σχήμα 3.9 MIMO κυψελωτό δίκτυο

3.6.2 MIMO σε ad hoc δίκτυα

Το σχήμα 3.10 δείχνει ένα ασύρματο ad hoc δίκτυο. Σε μια δεδομένη στιγμή του χρόνου, ένα υποσύνολο των τερματικών θα είναι πηγές δεδομένων και ένα άλλο υποσύνολο του προορισμός. Οι τερματικοί σταθμοί του δικτύου που δεν είναι ούτε πηγές ούτε προορισμοί μπορούν να λειτουργήσουν ως κέντρα για να βοηθήσει τη διαβίβαση των δεδομένων στο δίκτυο. Έτσι, ο αριθμός των λειτουργούντων τρόπων σε ένα δίκτυο ad hoc είναι πολύ μεγάλη και θα είναι, γενικά, αποτελούνται από συνδυασμούς πολλαπλής πρόσβασης, μετάδοση, αναμετάδοση και τα κανάλια παρεμβολών. Μολονότι το τελικό όριο επίδοσης ενός ad hoc δικτύου είναι άγνωστο, είναι σαφές ότι θα εκμεταλλεύονται την χωρική διάσταση μέσα από τη χρήση της τεχνολογίας MIMO σε κάθε ένα από τα δομικά στοιχεία (δηλαδή τα συστατικά πολλαπλής πρόσβασης, μετάδοση, αναμετάδοση και τα κανάλια παρεμβολών) θα αυξηθεί της συνολικής χωρητικότητας του δικτύου.



Σχήμα 3.10 Ad hoc δίκτυο

4

Network- Cooperative MIMO

4.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ένα τέλμα στο φάσμα του ασύρματου δικτύου, ενώ αντιθέτως οι απαιτήσεις των χρηστών συνεχώς αυξάνουν. Τα ασύρματα δίκτυα όπως για παράδειγμα σε αίθουσες διαλέξεων, ξενοδοχεία και γενικά σε χώρους συγκεντρώσεις πολλών χρηστών είναι αδύνατο να ακολουθήσουν τις απαιτήσεις των τελευταίων, προκαλώντας ακόμη και καταρρεύσεις δικτύων όπως αυτή που συνέβη κατά την παρουσίαση του iPhone 4 από τον Steve Jobs. Τα κυψελωτά δίκτυα έχουν και αυτά τις ίδιες δυσκολίες και αναμένεται στα επόμενα χρόνια οι απαιτήσεις των χρηστών να μην καλύπτονται από την υπάρχουσα χωρητικότητα.

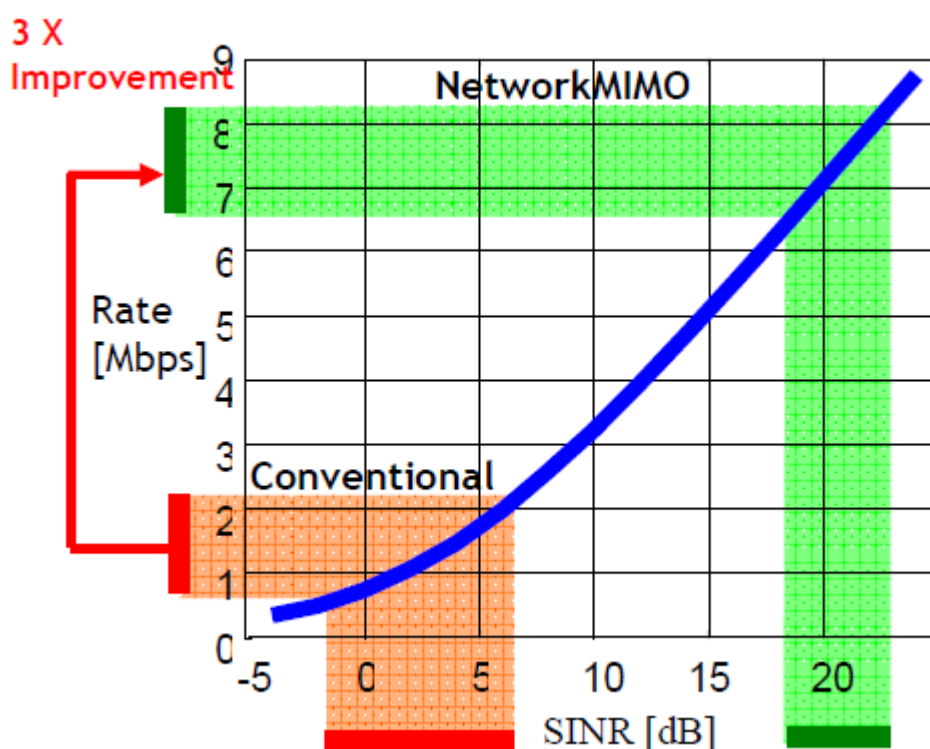
Αιτία των φαινομένων αυτών δεν είναι η ελλιπής ανάπτυξη στην απόδοση των ασύρματων συσκευών αλλά επικεντρώνεται στο γεγονός ότι οι ασύρματες συσκευές έχουν εξελιχθεί δραματικά τα τελευταία χρόνια και ότι υπάρχει μια αναντιστοιχία μεταξύ των απαιτήσεων των χρηστών και του διαθέσιμου throughput του καναλιού.

Πολλοί επιστήμονες θέλοντας να δώσουν λύση στο υφιστάμενο πρόβλημα, δημοσίευσαν έρευνες προσεγγίζοντας ο καθένας τους από την δική του σκοπιά το πρόβλημα. Μια από αυτές είναι και το Network MIMO.

4.2 Network MIMO

Το Network MIMO (*Net-MIMO*) γνωστό και ως Cooperative MIMO (*Co-MIMO*) χρησιμοποιεί κατανεμημένες κεραιές που ανήκουν σε άλλους χρήστες σε αντίθεση με το κλασικό MIMO που χρησιμοποιεί τις κεραιές που ανήκουν στο τοπικό τερματικό για την μετάδοση δεδομένων [9]. Ουσιαστικά πρόκειται για εξέλιξη του κλασικού MIMO συστήματος κατά την οποία οι κόμβοι που επιθυμούν να

μεταδώσουν και να λάβουν δεδομένα συνεργάζονται μεταξύ τους. Το Net-MIMO βελτιώνει την απόδοση του ασύρματου δικτύου εισάγοντας τα πλεονεκτήματα των πολλαπλών κεραιών όπως πολυπλεξία, διαφορισμό και beamforming. Χρησιμοποιεί καλύτερα το υπάρχον φάσμα και παρέχει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης [6]. Είναι μια τεχνική που θα χρησιμοποιηθεί στα μελλοντικά κυψελοειδή δίκτυα, τα οποία φέρουν δικτύωση mesh ή ασύρματη δικτύωση ad hoc. Στα ασύρματα ad hoc δίκτυα, οι πολλαπλοί κόμβοι μετάδοσης επικοινωνούν με πολλαπλούς κόμβους λήψης.



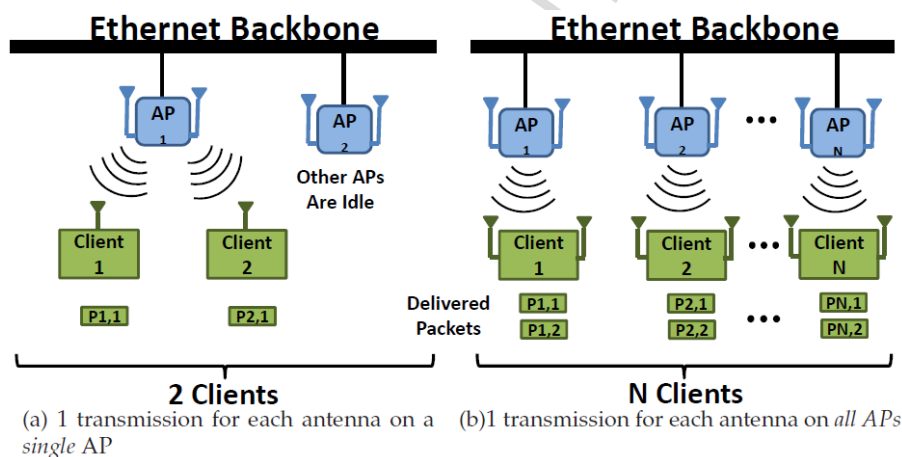
Σχήμα 4.1 Κλασικό MIMO vs. Network MIMO

Ένα σύστημα μετάδοσης όπου οι συνεργαζόμενοι πομποί χρησιμοποιούν το Network MIMO λαμβάνει σήμερα μεγάλη προσοχή εξαιτίας της ικανότητάς του να μειώνει την διακυτταρική παρεμβολή (ICI) και να βελτιώνει την φασματική απόδοση του συστήματος [2]. Πράγματι, για ένα δεδομένο αριθμό κεραιών ανά σταθμό βάσης (BS), τα συνεργαζόμενα συστήματα μπορούν να παρέχουν σημαντικά οφέλη σε σχέση με τα συμβατικά κυψελοειδή. Η χωρητικότητα που υπόσχονται τα MIMO συστήματα δεν είναι πλήρως εφικτή με τις συμβατικές αρχιτεκτονικές στα κυψελοειδή χωρίς επιπλέον έλεγχο της διακυτταρικής παρεμβολής, η οποία περιορίζει το throughput. Η μετάδοση που γίνεται μέσω συνεργαζόμενων πομπών μπορεί να περιορίσει και να εξαλείψει το φαινόμενο αυτό. Μια αξιόλογη έρευνα πάνω στο Cooperative MIMO είναι η [1], η οποία ονομάζει το σύστημα που αναπτύσσει MegaMIMO.

4.3 Εφαρμογή Network MIMO σε ασύρματο δίκτυο

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται ένα σύστημα με το οποίο το δίκτυο αυξάνει το throughput του σε σχέση με τον αριθμό των συσκευών που μεταδίδουν. Μελετούνται οι περιπτώσεις όπου παρατηρείται έντονη παρουσία χρηστών όπως αίθουσες συνεδριάσεων, ξενοδοχεία, κ.ά.

Η βασική ιδέα πίσω από αυτό το σύστημα είναι το joint multi-user beamforming. Η τεχνική αυτή επιτρέπει σε έναν πομπό MIMO να μεταδώσει πολλά ανεξάρτητα πακέτα σε δέκτες που έχουν λιγότερες κεραιές όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2 (a), όπου ένα σημείο πρόσβασης (AP), που αποτελείται από 2 κεραιές, μεταδίδει δυο πακέτα ταυτόχρονα σε δυο δέκτες, που διαθέτουν από μια κεραιά. Σε αντίθεση το σύστημα του σχήματος 4.2 (b) επιτρέπει σε πολλαπλά σημεία πρόσβασης στο ίδιο κανάλι να μεταδώσουν τα πακέτα τους ταυτόχρονα σε πολλαπλούς δέκτες, χωρίς να έχουμε επικάλυψη μεταξύ τους. Αυτό το σύστημα αυξάνει το throughput του καναλιού σε σχέση με τον αριθμό των συσκευών και μεταδίδει τόσα ταυτόχρονα πακέτα όσες είναι και οι συνολικές κεραιές των σημείων πρόσβασης (AP).



Σχήμα 4.2 Traditional vs. Joint Multi-User Beamforming

Το νέο αυτό σύστημα είναι σχεδιασμένο για το ασύρματο κανάλι καθόδου (*wireless downlink channel*). Είναι εφαρμόσιμο σε ασύρματα LANs ειδικά σε σημεία, όπου παρατηρείται μεγάλος όγκος φορτίου. Τα σημεία πρόσβασής του (APs) είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με δίκτυο υψηλού throughput, πχ GigE. Τα πακέτα που προορίζονται για τους δέκτες είναι μοιρασμένα σε όλα τα σημεία πρόσβασης (APs). Τα APs μεταδίδουν ταυτόχρονα σε πολλαπλούς δέκτες και συμπεριφέρονται σαν να ήταν ένας μεγάλος MIMO κόμβος, παραδίδοντας τόσα πακέτα όσα και ο συνολικός αριθμός των κεραιών σε όλα τα σημεία πρόσβασης (APs).

Στόχος του συστήματος είναι να εγγυηθεί ότι κάθε δέκτης μπορεί να αποκωδικοποιήσει το σήμα, που προορίζεται για αυτόν, χωρίς παρεμβολή.

Ουσιαστικά πρέπει να εγγυηθεί τον συγχρονισμό των φάσεων των κατανεμημένων πομπών ώστε σε κάθε δέκτη τα σήματα που προορίζονται για άλλους να αλληλοεξουδετερώνονται. Αυτό απαιτεί από τους πομπούς να ελέγχουν τις σχετικές φάσεις των εκπεμπόμενων σημάτων ώστε να πραγματοποιηθεί αυτή η αλληλοεξουδετέρωση. Στην περίπτωση μας οι πομποί έχουν ανεξάρτητους ταλαντωτές, οι οποίοι δημιουργούν μια διαφορά φάσης μεταξύ των φερόντων (carriers). Αν κάποιος προσπαθήσει να μεταδώσει ταυτόχρονα αυτά τα ανεξάρτητα σήματα από ανεξάρτητους πομπούς, η ολίσθηση μεταξύ των ταλαντωτών θα υποχρεώσει τα σήματα να περιστραφούν με διαφορετική γωνιακή ταχύτητα μεταξύ τους, με αποτέλεσμα οι φάσεις να αποκλίνουν και να προστατεύεται έτσι η μετάδοση.

Αρχικά θα μπορούσε να θεωρηθεί ικανοποιητικό να υπολογίσουμε την διαφορά κυκλικής συχνότητας $\Delta\omega$ μεταξύ των πομπών και κατ' επέκταση την διαφορά φάσης $\Delta\phi = \Delta\omega t$, όπου t ο χρόνος που παρήλθε. Ωστόσο μια τέτοια προσέγγιση προκαλεί συσσωρευμένα σφάλματα με την πάροδο του χρόνου [4]. Ακόμα και ένα μικρό λάθος των 10Hz μπορεί να οδηγήσει σε ένα μεγάλο λάθος 20 μοιρών (0,35 ακτίνια) μέσα σε ένα μικρό χρονικό διάστημα των 5,5 ms. Ένα τόσο μεγάλο λάθος στην φάση των εκπεμπόμενων σημάτων θα δημιουργήσει σημαντική παρεμβολή στους δέκτες, εμποδίζοντάς του την αποκωδικοποίηση.

Το σύστημα που μελετάμε παρουσιάζει μια απλή και πρακτική προσέγγιση στον συγχρονισμό των φάσεων των πολλαπλά κατανεμημένων πομπών. Η βασική ιδέα είναι να επιλέγεται ένα από τα σημεία πρόσβασης (APs) σαν "οδηγός" (leader) και να χρησιμοποιηθεί η φάση του σαν σημείο αναφοράς για όλο το σύστημα. Τα άλλα APs (slaves) αμέσως μετρούν την φάση του "οδηγού" και αλλάζουν την φάση των σημάτων τους ώστε να διατηρήσουν την επιθυμητή ευθυγράμμιση σε σχέση πάντα με αυτή του "οδηγού". Συγκεκριμένα το σύστημα προσθέτει σε κάθε πακέτο δεδομένων ένα ζεύγος συμβόλων που μεταδίδονται από τον "οδηγό" AP. Τα υπόλοιπα APs (slaves) χρησιμοποιούν αυτά τα σύμβολα και διορθώνουν άμεσα την φάση τους ώστε να έχουμε κατάλληλη μετάδοση. Δεδομένου ότι αυτό γίνεται με άμεση μέτρηση της φάσης δεν έχει συσσωρευμένα σφάλματα. Αφού διορθώσουν την φάση τους χρησιμοποιούν την εκτίμηση της απόκλισης συχνότητας για να προβλέψουν κάθε αλλαγή φάσης σε όλο το πακέτο και να την διορθώσουν. Αυτό οριοθετεί τη μέγιστη συσσώρευση σφάλματος φάσεως με τη διάρκεια ενός πακέτου.

4.3.1 Σύγκριση με υπάρχοντα συστήματα

Τα τελευταία χρόνια έχουν παρουσιαστεί πολλά συστήματα που προσπάθησαν να επιτύχουν μεγάλα κέρδη στο throughput του καναλιού μέσω κατανεμημένης μετάδοσης πολλών χρηστών (*distributed multi-user beamforming*) [5,6]. Αυτά τα συστήματα όμως δεν

διευθετούν τον συγχρονισμό της φάσης, το οποίο είναι σημαντικό πρόβλημα ώστε να επιτευχθεί ένα τέτοιο αποτέλεσμα [6].

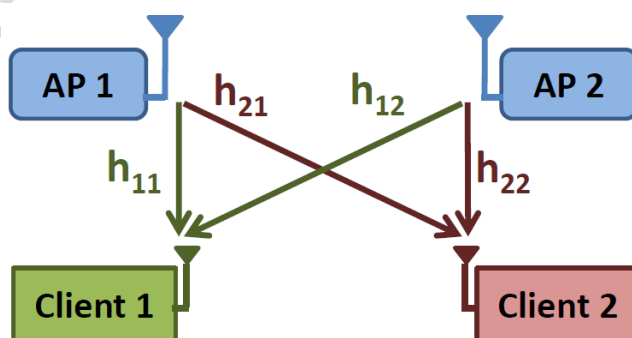
Σε αντίθεση το νέο αυτό σύστημα επιτυγχάνει συγχρονισμό φάσης, χρησιμοποιώντας ανεξάρτητους ταλαντωτές στις συσκευές του δικτύου. Αποτέλεσμα αυτού είναι πως οι συσκευές αυτές λειτουργούν αυτόνομα χωρίς κάποιο κοινό ρολόι ή χρησιμοποιώντας το παγκόσμιο ρολόι GPS. Τέλος επειδή δεν απαιτείται καμία τροποποίηση στο υπάρχον υλικό (hardware), μπορεί να δουλέψει και με τις κάρτες δικτύου off-the-shelf 802.11n.

Το throughput όλων των συστημάτων ήταν περιορισμένο είτε από τον αριθμό των κεραιών των σημείων πρόσβασης (APs) είτε από το μέγιστο (ή το διπλάσιο) αριθμό των κεραιών στην κάθε συσκευή του δικτύου. Τα συστήματα αυτά, εκμεταλλευόμενα την νέα αυτή ιδέα, μπορούν να μεταδίδουν ανεξάρτητα από τον αριθμό των κεραιών σε μια συσκευή, δηλαδή μπορούν πολλαπλά ανεξάρτητα σημεία πρόσβασης (APs) να επικοινωνούν ταυτόχρονα με πολλαπλούς ανεξάρτητους δέκτες (clients). Επιτυγχάνεται γραμμική αύξηση του throughput του δικτύου σε σχέση με τον αριθμό των πομπών.

4.3.2 Συγχρονισμός κατανεμημένης φάσης

Ο κύριος στόχος του συγχρονισμού κατανεμημένης φάσης είναι να επιτρέψει σε διαφορετικούς πομπούς που τροφοδοτούνται από διαφορετικούς ταλαντωτές να συμπεριφέρονται σαν έναν πομπό πολλαπλών κεραιών, οι οποίες τροφοδοτούνται από τον ίδιο ταλαντωτή. Η λύση είναι απλή: Ορίζουμε ένα σημείο πρόσβασης (APs) ως "οδηγό" και αναγκάζουμε όλους τους άλλους πομπούς να συγχρονιστούν με αυτόν. Κάθε πομπός μετράει την απόκλιση μεταξύ του δικού του ταλαντωτή και του "οδηγού" και καταλλήλως διορθώνει την φάση του δικού του μεταδιδόμενου σήματος. Αυτή η συμπεριφορά κάνει όλους τους πομπούς να ενεργούν σαν να ήταν κεραιές στο ίδιο τσιπ που ελέγχονται από τον ίδιο ταλαντωτή.

Παρακάτω θα παρουσιάσουμε πως λειτουργεί ένα σύστημα 2x2, δηλαδή δυο APs με απλή κεραία και δυο δέκτες με απλή κεραία επίσης, όπως φαίνεται και στο παρακάτω



σχήμα.

Σχήμα 4.3 Σύστημα 2 APs με 2 clients

Ορίζουμε σαν h_{ij} , όπου $i, j \in \{1,2\}$, το κανάλι προς τον δέκτη i από το AP j , $x_j(t)$ το σύμβολο που πρέπει να παραδοθεί στον δέκτη j την χρονική στιγμή t και $y_j(t)$ το σύμβολο που λαμβάνεται από τον δέκτη j την χρονική στιγμή t . Αντίστοιχα $H = [h_{ij}]$, $i, j \in \{1,2\}$ είναι η μήτρα του 2×2 καναλιού, $\vec{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t)]^T$ είναι το επιθυμητό διάνυσμα συμβόλων και $\vec{y}(t) = [y_1(t) \ y_2(t)]^T$ είναι το λαμβανόμενο.

Υποθέτουμε πρώτα πως δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ των ταλαντωτών των APs και των δεκτών (clients). Εάν κάθε AP_i μεταδίδει ένα σήμα $x_i(t)$ ο κάθε δέκτης θα λαμβάνει ένα γραμμικό συνδυασμό των μεταδιδόμενων σημάτων. Αφού ο κάθε δέκτης έχει μία κεραία, ο δέκτης 1 (Client 1) λαμβάνει $y_1(t) = h_{11}x_1(t) + h_{12}x_2(t)$ και ο δέκτης 2 (Client 2) $y_2(t) = h_{21}x_1(t) + h_{22}x_2(t)$. Κάθε εξίσωση έχει δυο αγνώστους και ως εκ τούτου κανένας δέκτης δεν μπορεί να αποκωδικοποιήσει τα δικά του δεδομένα.

Προκειμένου να παραδοθούν ταυτόχρονα δυο πακέτα στους δυο δέκτες, θα πρέπει οι πομποί (APs) να εξασφαλίσουν ότι ο κάθε δέκτης λαμβάνει το σήμα που προορίζεται μόνο για αυτόν. Συγκεκριμένα χρειαζόμαστε η μήτρα του καναλιού, μέσα στο οποίο γίνεται η μετάδοση, να είναι διαγώνια. Δηλαδή

$$\begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{11} & 0 \\ 0 & g_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} \quad (1)$$

όπου g_{11} και g_{22} είναι μη μηδενικοί μιγαδικοί αριθμοί. Τα APs μπορούν να πετύχουν αυτό το αποτέλεσμα χρησιμοποιώντας beamforming. Αντί να μεταδίδουν απευθείας τα $x_1(t)$ και $x_2(t)$ μεταδίδουν

$$\begin{pmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \end{pmatrix} = H^{-1} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} \quad (2)$$

Σε αυτή την περίπτωση οι δυο δέκτες λαμβάνουν:

$$\begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \end{pmatrix} = HH^{-1} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix}$$

Αφού $HH^{-1} = I$, η μήτρα του καναλιού είναι διαγώνια και επομένως ικανοποιείται η εξίσωση (1). Ως εκ τούτου κάθε δέκτης μπορεί να αποκωδικοποιήσει τα δεδομένα που προορίζονται για αυτόν χωρίς παρεμβολές από τα σήματα των άλλων δεκτών.

Στην περίπτωση όπου οι ταλαντωτές των APs και των δεκτών έχουν διαφορετικές συχνότητες, ορίζουμε ως ω_{Ti} την συχνότητα ταλαντωτή του AP_i και ω_{Ri} την συχνότητα ταλαντωτή του δέκτη j , όπου $i, j \in \{1,2\}$. Σε αυτή την περίπτωση η μήτρα του καναλιού σε κάποια χρονική στιγμή t μπορεί να γραφτεί ως:

$$H(t) = \begin{pmatrix} h_{11}e^{j(\omega_{T1}-\omega_{R1})t} & h_{12}e^{j(\omega_{T2}-\omega_{R1})t} \\ h_{21}e^{j(\omega_{T1}-\omega_{R2})t} & h_{22}e^{j(\omega_{T2}-\omega_{R2})t} \end{pmatrix}$$

όπου $j = \sqrt{-1}$. Επειδή οι ταλαντωτές περιστρέφονται σε συνάρτηση ο ένας με τον άλλον το κανάλι δεν έχει πλέον μια σταθερή φάση.

Αν τα APs προσπαθήσουν να μεταδώσουν όπως πριν (beamforming) οι δέκτες θα λάβουν

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = H(t)H^{-1} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

Το γινόμενο $H(t)H^{-1}$ δεν είναι πλέον διαγώνιος πίνακας και ως εκ τούτου οι δέκτες δεν μπορούν να αποκωδικοποιήσουν τα σήματα τους. Για αυτό το κανονικό MIMO beamforming δεν λειτουργεί σε αυτή την περίπτωση.

Μια απλοϊκή λύση ώστε να μεταδώσουμε σε ένα τέτοιο χρονικά μεταβαλλόμενο κανάλι είναι να αναγκάσουμε τον κάθε πομπό να υπολογίσει την $H(t)$ σε κάθε χρονική στιγμή t και να πολλαπλασιάσει το σήμα του με $H(t)^{-1}$. Έστω πως το δίκτυο έχει N APs και N δέκτες. Τότε μια τέτοια προσέγγιση θα απαιτούσε ο κάθε πομπός να υπολογίζει N^2 μετατοπίσεις συχνότητας

$$\Delta\omega_{ij} = \omega_{Tj} - \omega_{Ri}$$

Ο αριθμός αυτός μπορεί να μειωθεί σε N αν οι κόμβοι μετράνε μόνο την απόκλιση συχνότητας ($\Delta\omega$) σε σχέση με τους άλλους κόμβους και όχι τις απόλυτες συχνότητες των ταλαντωτών τους. Τα λάθη στις μετρήσεις αυτές θα συσσωρευτούν προκαλώντας παρεμβολές στους δέκτες.

Αντίθετα παρατηρούμε πως μπορούμε να αναλύσουμε την μήτρα του καναλιού μας ως $H(t) = R(t)HT(t)$ όπου ο πίνακας H είναι ανεξάρτητος του χρόνου και οι $R(t)$ και $T(t)$ είναι διαγώνιοι πίνακες που ορίζονται ως:

$$R(t) = \begin{pmatrix} e^{-j\omega_{R1}t} & 0 \\ 0 & e^{-j\omega_{R2}t} \end{pmatrix}$$

$$T(t) = \begin{pmatrix} e^{j\omega_{T1}t} & 0 \\ 0 & e^{j\omega_{T2}t} \end{pmatrix}$$

Αφού ο πίνακας $R(t)$ είναι διαγώνιος και αν το μεταδιδόμενο σήμα είναι της μορφής $T(t)^{-1}H^{-1}\vec{x}$ τότε το λαμβανόμενο σήμα μπορεί να γραφεί:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = R(t)HT(t)T(t)^{-1}H^{-1} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

η οποία καταλήγει στην επιθυμητή μορφή της εξίσωσης (1)

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = R(t) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

Παρατηρούμε ότι ο πίνακας $T(t)$ είναι διαγώνιος επομένως και ο αντίστροφος αυτού επίσης

$$T(t)^{-1} = \begin{pmatrix} e^{-j\omega_{T1}t} & 0 \\ 0 & e^{-j\omega_{T2}t} \end{pmatrix}$$

Επιπλέον η διόρθωση φάσης του κάθε AP εξαρτάται από την φάση του ταλαντωτή του συγκεκριμένου AP. Αυτό σημαίνει ότι αν κάθε AP_i γνωρίζει την φάση του $e^{j\omega_{Ti}t}$ σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή t τότε δεν θα χρειαζόταν επιπλέον μετρήσεις της φάσης ή της συχνότητας. Δυστυχώς όμως αυτό είναι ανέφικτο. Δεν υπάρχει τρόπος να μπορεί να μετρά ένα AP την ακριβή αλλαγή φάσης του ταλαντωτή του τοπικά.

Παρατηρούμε πως η μήτρα του καναλιού $H(t)$ παραμένει αμετάβλητη όταν πολλαπλασιάσουμε με $1 = e^{j\omega_{T1}t}e^{-j\omega_{T1}t}$ δηλαδή

$$\begin{aligned} H(t) &= R(t)HT(t) \\ &= e^{j\omega_{T1}t}R(t)HT(t)e^{-j\omega_{T1}t} \\ &= \begin{pmatrix} e^{j(\omega_{T1}-\omega_{R1})t} & 0 \\ 0 & e^{-j(\omega_{T1}-\omega_{R2})t} \end{pmatrix} H \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{j(\omega_{T2}-\omega_{T1})t} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

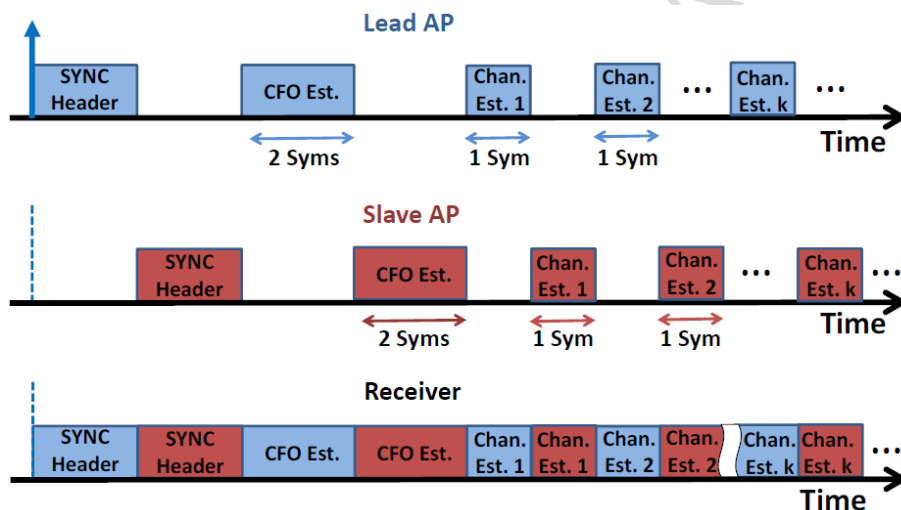
Αφού και η προκύπτουσα μήτρα του καναλιού είναι και αυτή διαγώνια, οι δέκτες συνεχίζουν να αποκωδικοποιούν τα λαμβανόμενα σήματα όπως πριν.

4.3.3 Το πρωτόκολλο του MegaMIMO

Το πρωτόκολλο του νέου συστήματος δουλεύει σε δυο φάσεις:

- Το σύστημα ξεκινά με την φάση μέτρησης του καναλιού, στην οποία οι APs μετράνε τα κανάλια από αυτούς προς τους δέκτες και τα κανάλια από τον "οδηγό" AP προς τα υπόλοιπα APs (slave APs).
- Εν συνεχεία ακολουθεί η φάση μετάδοσης δεδομένων. Σε αυτή την φάση τα APs μεταδίδουν ταυτόχρονα πακέτα ώστε να παραδώσουν σε πολλαπλούς δέκτες.

Τα σύμβολα μέτρησης καναλιού είναι χωρισμένα από ένα σταθερό κενό, του οποίου η τιμή είναι επιλεγμένη ώστε να επιτρέπει στους "σκλάβους" APs να στέλνουν τα δικά τους σύμβολα μέτρησης του καναλιού μαζί με αυτά του "οδηγού" AP. Όταν οι "σκλάβοι" APs ακούσουν την κεφαλίδα (header) συγχρονισμού, γνωρίζουν τότε να μεταδώσουν τα σύμβολα τους όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3. Κατά την παραλαβή του πακέτου κάθε δέκτης πραγματοποιεί τρεις διεργασίες: Πρώτα υπολογίζει την απόκλιση φάσης του φέροντος (carrier frequency offset -CFO) σε καθένα AP, μετά χρησιμοποιώντας τα εκπεμπόμενα σύμβολα και το CFO υπολογίζει το κανάλι από κάθε AP προς αυτόν και τέλος χρησιμοποιεί τα CFOs ώστε να περιστρέψει την φάση των καναλιών ώστε να φαίνεται ότι αυτά μετρήθηκαν την ίδια χρονική στιγμή.



Σχήμα 4.4 Η δομή του πακέτου των AP και του δέκτη

Κατά την μετάδοση δεδομένων τα APs πρέπει να συμφωνήσουν ποιά πακέτα θα σταλούν ταυτόχρονα σε ένα πλαίσιο μετάδοσης (beamforming frame). Ο "οδηγός" AP παίρνει όλες τις αποφάσεις ελέγχου και τις κοινοποιεί στους "σκλάβους" APs μέσω του Ethernet και μεταδίδει δεδομένα χρησιμοποιώντας μια κεφαλίδα συγχρονισμού, όπως στην εκτίμηση του καναλιού. Κάθε "σκλάβος" AP χρησιμοποιεί την κεφαλίδα συγχρονισμού για να μετρήσει το υπάρχον κανάλι $h_i^{head}(t)$ από τον "οδηγό" AP προς αυτόν. Επισημαίνουμε πως το υπάρχον κανάλι θα περιστραφεί σε σχέση με το κανάλι αναφοράς λόγω της διαφοράς μεταξύ των δυο ταλαντωτών. Ειδικότερα $h_i^{head}(t) = h_i^{head}(0)e^{j(\omega_{T1}-\omega_{T2})t}$. Κάθε "σκλάβος" AP μπορεί να υπολογίσει απευθείας τον όρο $e^{j(\omega_{T1}-\omega_{T2})t}$, από τις δυο μετρήσεις του καναλιού του "οδηγού" AP. Μια τέτοια εκτίμηση δεν έχει συσσωρευμένα λάθη γιατί είναι μια καθαρή διαίρεση δυο απευθείας μετρήσεων. Ο "σκλάβος" AP έπειτα πολλαπλασιάζει το προς μετάδοση σήμα του με αυτή την ποσότητα.

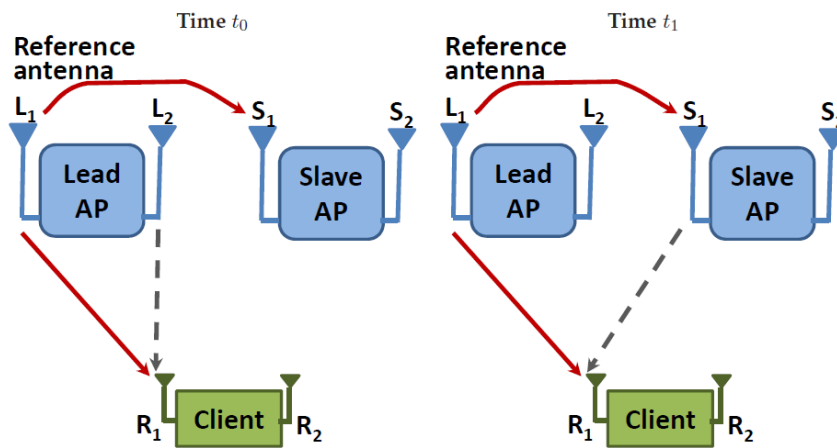
Επισημαίνεται ότι μια φάση μέτρησης του καναλιού μπορεί να ακολουθηθεί από πολλές φάσεις μεταφοράς δεδομένων.

4.3.4 Συμβατότητα με 802.11

Για να λειτουργήσει η νέα αυτή ιδέα χρησιμοποιώντας κάρτες δικτύου 802.11 πρέπει να διευθετηθούν δυο θέματα:

Sync header: Το sync header που μεταδίδεται από τον "οδηγό" AP και επιτρέπει στους "σκλάβους" APs να υπολογίσουν την απόκλιση των ταλαντωτών τους δεν υποστηρίζεται από τα 802.11 δίκτυα. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό χρησιμοποιείται ένα είδους 802.11n πακέτο που αποτελείται από κλασικό 802.11n πακέτο, έχοντας ως πρόθεμα 5 σύμβολα. Αυτά τα σύμβολα χρησιμοποιούνται από τους κόμβους των 802.11a/g για trigger carrier sense ενώ δεν χρησιμοποιούνται από τους δέκτες του 802.11n. Έτσι μπορεί ο "οδηγός" AP να χρησιμοποιήσει τα σύμβολα αυτά ως κεφαλίδα συγχρονισμού.

Μέτρηση καναλιού: Υπενθυμίζουμε πως απαιτείται ένα στιγμιότυπο των καναλιών όλων των πομπών προς όλους τους δέκτες την ίδια χρονική στιγμή. Για να γίνει αυτό απαιτείται μια ειδική δομή (format) του μηνύματος που δεν υποστηρίζεται από τα 802.11 δίκτυα και κατ' επέκταση οι κάρτες των δικτύων αυτών δεν μπορούν να μετρήσουν τα κανάλια των APs την ίδια χρονική στιγμή. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται εκτελώντας μια ευρεία μέτρηση του καναλιού "εξαπατώντας" τον δέκτη. Έτσι μπορούμε να μετρήσουμε το κανάλι από κάθε κεραία του πομπού σε κάθε δέκτη σε συνδυασμό με ένα κοινό κανάλι αναφοράς προς τον δέκτη.



Σχήμα 4.5 Μέτρηση καναλιού δικτύου 802.11

Στο παραπάνω σχήμα την χρονική στιγμή t_0 , οι L_1 και L_2 μεταδίδουν ταυτόχρονα ένα πακέτο (2-stream packet) στο R_1 . Αυτή η μέτρηση μας δίνει τα κανάλια $L_1 \rightarrow R_1$ και $L_2 \rightarrow R_1$ την χρονική στιγμή t_0 . Επιπροσθέτως το S_1 μετρά το κανάλι $L_1 \rightarrow S_1$ χρησιμοποιώντας την κεφαλίδα συγχρονισμού.

Την χρονική στιγμή t_1 , οι L_1 και S_1 ξεγελούν τον δέκτη με την ταυτόχρονη μετάδοση δυο πακέτων (2-stream packet) από δυο διαφορετικά APs. Αυτή η μέτρηση μας δίνει τα κανάλια $L_1 \rightarrow R_1$ και $S_1 \rightarrow R_1$ την χρονική στιγμή t_1 . Ξανά το S_1 μετρά το κανάλι $L_1 \rightarrow S_1$ χρησιμοποιώντας την κεφαλίδα συγχρονισμού.

Η πρόκληση τώρα είναι να μετρήσουμε το κανάλι $S_1 \rightarrow R_1$ την χρονική στιγμή t_0 με την βοήθεια του ήδη μετρημένου καναλιού $S_1 \rightarrow R_1$ την χρονική στιγμή t_1 .

Για αυτό τον λόγο θέλουμε να διορθώσουμε το μετρούμενο κανάλι μας με την συσσωρευμένη απόκλιση φάσης μεταξύ L_1 και R_1 , και μεταξύ L_1 και S_1 στο χρονικό διάστημα μεταξύ t_0 και t_1 .

- **L_1 και R_1 :** Μπορούμε να υπολογίσουμε την συσσωρευμένη απόκλιση φάσης χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του καναλιού $L_1 \rightarrow R_1$ την χρονική στιγμή t_0 και t_1 .
- **L_1 και S_1 :** Μπορούμε να υπολογίσουμε την συσσωρευμένη απόκλιση φάσης χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του καναλιού $L_1 \rightarrow S_1$ την χρονική στιγμή t_0 και t_1 .

Η διαφορά μεταξύ αυτών των δυο συσσωρευμένων αποκλίσεων φάσης μας δίνει την επιθυμητή συσσωρευμένη απόκλιση φάσης μεταξύ S_1 και R_1 στο χρονικό διάστημα μεταξύ t_0 και t_1 .

Αντίστοιχα μπορούμε να υπολογίσουμε το κανάλι $S_2 \rightarrow R_1$ την επόμενη χρονική στιγμή t_2 και να το στρέψουμε πίσω σε χρόνο t_0 . Μπορούμε να επαναλάβουμε αυτή την διαδικασία για όλες τις κεραίες των APs.

4.3.5 Διαχωρισμός μετρήσεων σε διαφορετικούς δέκτες

Θα αποδειχθεί παρακάτω πως χρησιμοποιώντας μια κοινή αναφορά, μπορούμε να μετρήσουμε τα κανάλια προς διαφορετικούς δέκτες σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και να εξακολουθεί να λειτουργεί σωστά το multi-user beamforming χρησιμοποιώντας συγχρονισμό κατανεμημένης φάσης (distributed phase synchronization).

Θεωρούμε με βάση το σχήμα 4.3 ένα σύστημα όπου τα κανάλια, h_{11} και h_{12} , προς τον δέκτη 1 είναι μετρημένα την χρονική στιγμή t_1 και τα κανάλια, h_{21} και h_{22} , προς τον δέκτη 2 είναι μετρημένα την χρονική στιγμή t_2 . Σε μια τυχαία χρονική στιγμή t η μήτρα του κυκλώματος μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$H(t) = \begin{pmatrix} h_{11}e^{j(\omega_{R1}-\omega_{T1})(t-t_1)} & h_{12}e^{j(\omega_{R1}-\omega_{T2})(t-t_1)} \\ h_{21}e^{j(\omega_{R2}-\omega_{T1})(t-t_2)} & h_{22}e^{j(\omega_{R2}-\omega_{T2})(t-t_2)} \end{pmatrix}$$

Υπενθυμίζουμε ότι για να εφαρμοστεί ο συγχρονισμός της κατανεμημένης φάσης, πρέπει να αναχθεί η μήτρα $H(t)$ στην μορφή $R(t)HT(t)$, όπου ο πίνακας H είναι ανεξάρτητος του χρόνου και οι χρονικά εξαρτημένοι πίνακες $R(t)$ και $T(t)$ είναι διαγώνιοι.

Μπορούμε να αναγάγουμε την μήτρα του καναλιού $H(t)$ στην μορφή $R(t)HT(t)$ ως εξής:

$$R(t) = \begin{pmatrix} e^{j(\omega_{R1}-\omega_{T1})(t-t_1)} & 0 \\ 0 & e^{j(\omega_{R2}-\omega_{T1})(t-t_2)} \end{pmatrix}$$

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22}e^{-j(\omega_{T1}-\omega_{T2})(t_2-t_1)} \end{pmatrix}$$

$$T(t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{j(\omega_{T1}-\omega_{T2})(t-t_1)} \end{pmatrix}$$

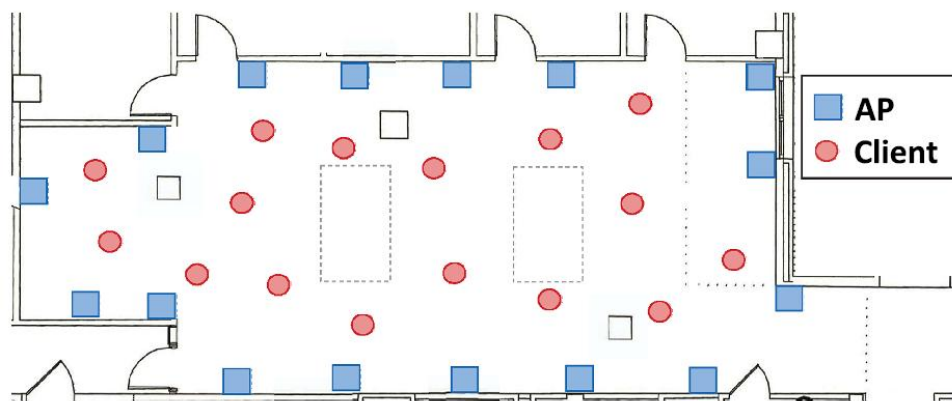
Παρατηρούμε πως ο πίνακας H είναι χρονικά ανεξάρτητος και πως τα στοιχεία του εξαρτώνται μόνο από την απόκλιση του ταλαντωτή μεταξύ των χρονικών στιγμών t_1 και t_2 . Ο "σκλάβος" APi μπορεί εύκολα να υπολογίσει αυτή την απόκλιση χρησιμοποιώντας το κανάλι αναφοράς, h_i^{lead} , το οποίο έχει μετρηθεί τις χρονικές στιγμές t_1 και t_2 .

Επιπλέον παρατηρούμε πως τα στοιχεία του διαγώνιου πίνακα $T(t)$ εξαρτώνται μόνο από την ολίσθηση φάσης του αντίστοιχου "σκλάβου" AP από τον "οδηγό" AP. Ως εκ τούτου κάθε "σκλάβος" AP μπορεί να παρακολουθεί το κανάλι και να βρίσκει την κεφαλίδα συγχρονισμού (sync header), να υπολογίζει την ολίσθηση του ταλαντωτή χρησιμοποιώντας ως αναφορά το κανάλι που μετρήθηκε στην χρονική στιγμή t_1 και να διορθώνει την μετάδοσή του κατάλληλα.

Για να το καταλάβουμε καλύτερα θα μπορούσαμε να πούμε πως ο "σκλάβος" AP στρέφει το μετρούμενο κανάλι του προς τον δέκτη 2 πίσω στην χρονική στιγμή t_1 πολλαπλασιάζοντας το h_{22} με $e^{-j(\omega_{T1}-\omega_{T2})(t_2-t_1)}$ και μετά να διορθώσει όλα τα μετέπειτα κανάλια σε σχέση με τον χρόνο t_1 . Γι' αυτό εμφανίζεται ο όρος $e^{j(\omega_{T1}-\omega_{T2})(t-t_1)}$ στον πίνακα $T(t)$.

4.3.6 Πλατφόρμα δοκιμών και εφαρμογής

Ο νέος αυτός αλγόριθμος αξιολογήθηκε σε ένα περιβάλλον που ουσιαστικά προσομοίαζε μια αίθουσα διαλέξεων.



Σχήμα 4.6 Τοπολογία πλατφόρμας δοκιμών

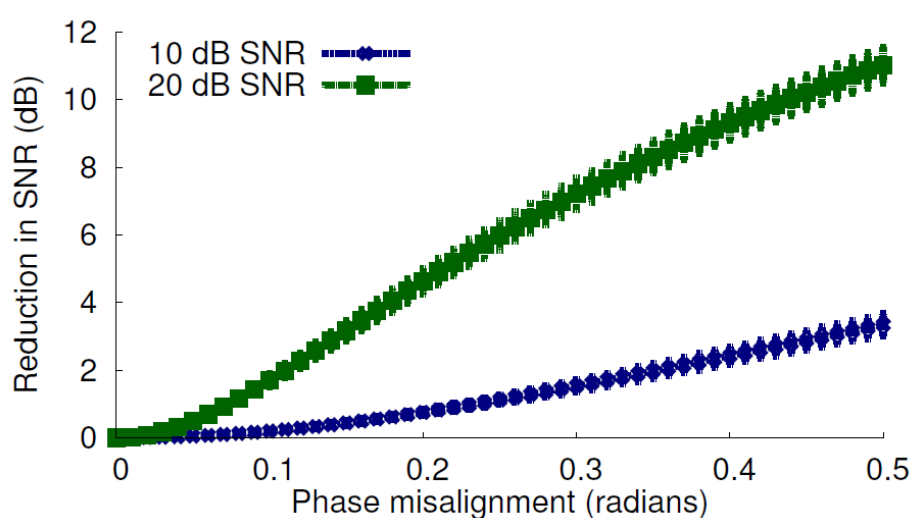
Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα τα APs ήταν τοποθετημένα κατά μήκος του τοίχου της αίθουσας και οι δέκτες σκορπισμένοι μέσα στην αίθουσα. Να σημειωθεί ότι η πλατφόρμα δοκιμών εμφανίζει σημαντικά διαφορετικά SNRs καθώς επίσης και line-of-sight και non line-of-sight μονοπάτια λόγω των εμποδίων, όπως κολώνες, έπιπλα, γωνίες κλπ. Οι APs μεταδίδουν πακέτα των 1500 byte προς όλους τους δέκτες σε όλα τα πειράματα.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε αυτό το περιβάλλον παρουσιάζονται αναλυτικότερα παρακάτω:

α) Αναγκαιότητα της ευθυγράμμισης φάσης: Σε αυτήν την ενότητα θα δούμε τις επιπτώσεις της απόκλισης μεταξύ των πομπών στο λαμβανόμενο SNR.

Μέθοδος. Προσομοιώνουμε ένα 2x2 σύστημα όπου διαφορετικά δεδομένα προορίζονται για διαφορετικούς δέκτες. Εισάγουμε στον "σκλάβο" πομπό μια εσφαλμένη ευθυγράμμιση της φάσης (*phase misalignment*) και υπολογίζουμε την μείωση του SNR σε κάθε δέκτη ως αποτέλεσμα αυτής της ενέργειας. Επαναλαμβάνουμε αυτή την διαδικασία για 100 διαφορετικές μήτρες του καναλιού, μη ευθυγράμμιση της φάσης από 0 μέχρι 0,5 ακτίνια, και για δυο συστήματα, το ένα με μέσο SNR ίσο με 10 dB και το άλλο με μέσο SNR 20 dB.

Αποτελέσματα. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η μέση μείωση του SNR σε συνάρτηση με την μη ευθυγράμμιση της φάσης.



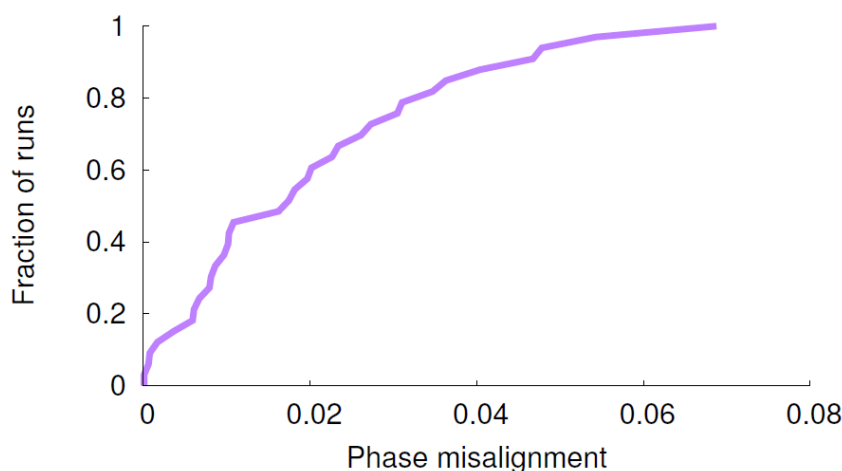
Σχήμα 4.7 Μείωση του SNR σε σχέση με την μη ευθυγράμμιση της φάσης

Όπως περιμέναμε η αύξηση της απόκλισης φάσης μεταξύ των πομπών αυξάνει και την παρεμβολή στον κάθε δέκτη. Παρατηρούμε πως ακόμα και μια μικρή αύξηση της απόκλισης των φάσεων της τάξης των 0,35 ακτίνια μπορεί να προκαλέσει μια μείωση 8 dB στο SNR (αρχική τιμή 20 dB). Αυτή η μείωση στο SNR μεγαλώνει ακόμα περισσότερο με την προσθήκη ακόμα περισσότερων πομπών. Επίσης μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι όσο πιο μεγάλο SNR έχουμε τόσο πιο μεγάλη μείωση παρατηρούμε. Μια απόκλιση των φάσεων των πομπών κατά 0,35 ακτίνια οδηγεί σε πτώση του SNR κατά 8 dB (στα 20 dB) και κατά 1,8 dB (στα 10 dB). Αυτό συμβαίνει γιατί η επιρροή του επιπρόσθετου θορύβου που προστίθεται με την παρεμβολή είναι μεγαλύτερη όταν ο πραγματικός θόρυβος είναι μικρός και κατ' επέκταση το SNR μεγάλο.

β) Ακρίβεια στην ευθυγράμμιση της φάσης: Τώρα εξετάστηκε την ακρίβεια του αλγορίθμου του συστήματος, ο οποίος ευθυγραμμίζει τις φάσεις.

Μέθοδος. Τοποθετούμε δυο κόμβους σε τυχαίες θέσεις των APs και έναν τρίτο στην θέση του δέκτη. Τυχαία επιλέγουμε το ένα AP να είναι ο "οδηγός" και το άλλο ο "σκλάβος". Ο "σκλάβος" πομπός εφαρμόζει τον αλγόριθμο συγχρονισμού της φάσης και διορθώνει την φάση του πριν προσχωρήσει στην μετάδοση δεδομένων μαζί με τον "οδηγό" πομπό.

Αποτελέσματα. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (CDF) της απόλυτης τιμής της απόκλισης της σχετικής φάσης κατά την διάρκεια όλων των πειραμάτων.



Σχήμα 4.8 CDF της μη ευθυγράμμισης της φάσης

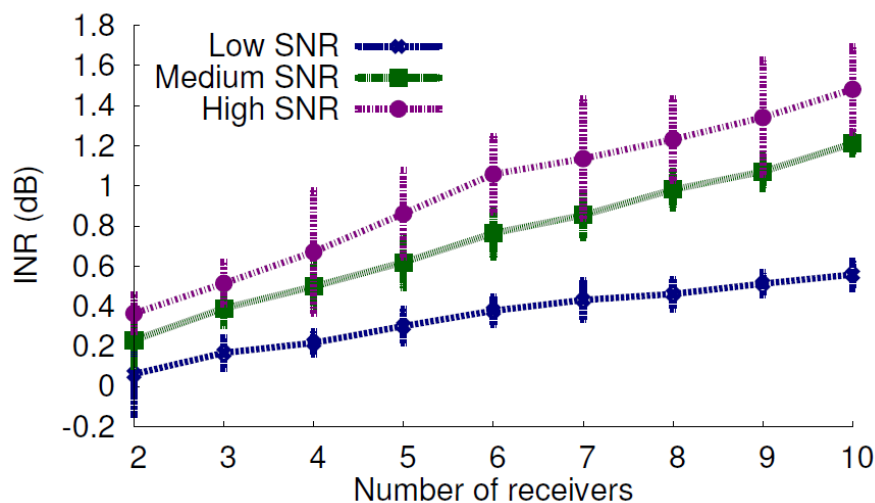
Εάν ο "οδηγός" και ο "σκλάβος" είναι πάντα απόλυτα ευθυγραμμισμένοι η απόκλιση των δυο θα είναι 0. Ωστόσο λάθη υπολογισμού εξαιτίας του θορύβου, της ολίσθησης-απόκλισης του ταλαντωτή εξαιτίας της καθυστέρησης του "σκλάβου" πομπού να μετρήσει το κανάλι του "οδηγού" πομπού και να μεταδώσει ταυτόχρονα δεδομένα, προκαλούν μη ευθυγράμμιση της φάσης. Όπως μπορεί να φανεί, όμως, η μέση τιμή της μη ευθυγράμμισης της φάσης είναι μικρότερη από 0.017 ακτίνια και στο 95% των μετρήσεων είναι μικρότερο από 0,05 ακτίνια. Τότε βάσει του σχήματος 4.7, με δύο πομπούς, ο αλγόριθμος ευθυγράμμισης της φάσης μπορεί να εξασφαλίσει ότι το SNR της ταυτόχρονης μετάδοσης δεν μειώνεται κατά 0,4 dB στο 95% των μετρήσεων.

γ) Κλιμάκωση του SNR; Σε αυτή την ενότητα μελετήθηκε πως μεγαλώνει η μείωση του SNR σε συνάρτηση με την αύξηση του αριθμού των πομπών στο σύστημα.

Μέθοδος. Αξιολογούμε την μείωση του SNR ενός συστήματος σε τρία εύρη διακύμανσης του ενεργού SNR: χαμηλό (6-12 dB), μέσο (12-18 dB) και υψηλό (> 18 dB). Για κάθε τοποθέτηση, επιλέγουμε έναν δέκτη στον οποίο όλοι οι APs μηδενίζουν

την παρεμβολή τους, δηλαδή το αναμενόμενο σήμα για αυτόν τον δέκτη είναι μηδέν και μετράμε την λαμβανόμενη ισχύ του σήματος. Εάν η ευθυγράμμιση της φάσης είναι τέλεια, η λαμβανόμενη ισχύς του σήματος είναι συγκρίσιμη με τον θόρυβο δηλαδή το SNR θα είναι ίσο με 0. Κάθε μη ακριβή ευθυγράμμιση της φάσης οδηγεί σε παρεμβολές και επομένως σε μείωση του SNR εάν τα δεδομένα μεταδίδονται πραγματικά σε αυτόν τον δέκτη. Σε κάθε τοπολογία υπολογίζουμε την μέση τιμή του λόγου της παρεμβολής προς τον θόρυβο (*INR*) στους δέκτες.

Αποτελέσματα. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η μεταβολή του INR σε σχέση με τον αριθμό των δεκτών στο σύστημα.



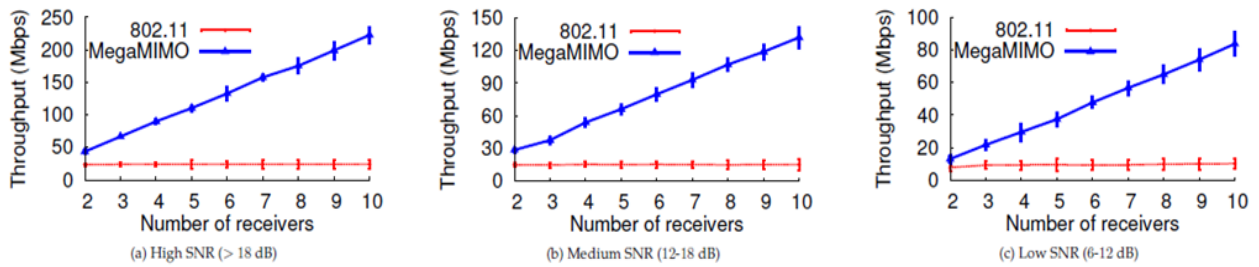
Σχήμα 4.9 Ακρίβεια της ευθυγράμμισης φάσης

Εύκολα μπορεί να παρατηρήσει κανείς πως η μείωση του SNR μεγαλώνει με το SNR (*Low, Medium, High*), όπως είχαμε παρατηρήσει και πριν, αλλά είναι κάτω από 1,5 dB ακόμα και για υψηλό SNR. Το INR επίσης αυξάνεται με τον αριθμό των APs, μιας και ο αριθμός των παρεμβαλλομένων αυξάνει, αλλά αυξάνει σταδιακά: ~ 0,13 dB για κάθε επιπρόσθετο ζευγάρι AP-δέκτη ακόμα και για υψηλό SNR.

δ) Αύξηση του throughput του δικτύου με τον αριθμό των APs. Εξετάζουμε την γραμμική αύξηση στο throughput του καναλιού με την αύξηση των APs.

Μέθοδος. Αξιολογείται η απόδοση του νέου συστήματος σε τρία εύρη διακύμανσης του ενεργού SNR: χαμηλό (6-12 dB), μέσο (12-18 dB) και υψηλό (> 18 dB). Για κάθε τοπολογία μετρούμε το throughput που επιτυγχάνουμε στο κανονικό 802.11 και στο MegaMIMO. Το πείραμα επαναλαμβάνεται 20 φορές με διαφορετική τοπολογία και επίσης διαφέρει και ο αριθμός των APs για κάθε εύρος του SNR.

Αποτελέσματα. Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζεται το ολικό throughput των δυο δικτύων (κανονικό 802.11 και MegaMIMO) σε σχέση με τον αριθμό των δεκτών και σε διαφορετικά εύρη του SNR.



Σχήμα 4.10 Μεταβολή του throughput σε σχέση με τα APs

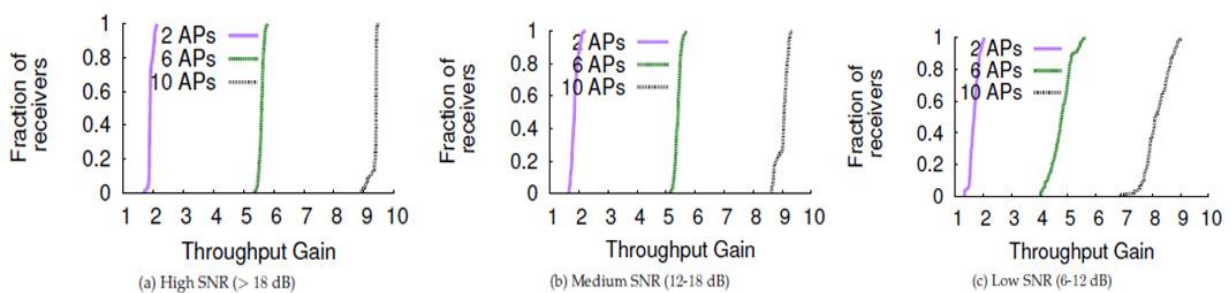
Παρατηρούμε πως το throughput καναλιού μεγαλώνει με το SNR (το throughput του 802.11 είναι για χαμηλό SNR 7,75 Mbps, για μέσο SNR γύρω στα 14,9 Mbps και για υψηλό SNR 23,6 Mbps). Δυο σημεία αξίζει να επισημανθούν:

- Το 802.11 δεν μπορεί να επωφεληθεί από την προσθήκη APs που λειτουργούν στο ίδιο κανάλι και επιτρέπει μόνο σε ένα AP να είναι ενεργό οποιαδήποτε στιγμή. Αποτέλεσμα αυτού είναι το throughput του να παραμένει σταθερό και ανεπηρέαστο από την προσθήκη APs. Αντίθετα στο MegaMIMO όταν προστίθενται επιπλέον APs αυτό τα χρησιμοποιεί για ταυτόχρονη μετάδοση πακέτων σε περισσότερους δέκτες. Κατά συνέπεια βλέπουμε το throughput του νέου συστήματος να αυξάνει γραμμικά με την προσθήκη νέων APs.
- Τα κέρδη που παρέχονται στο throughput είναι πολύ μεγαλύτερα από αυτά του κανονικού 802.11 (περίπου 9,4 φορές μεγαλύτερο για υψηλό SNR και για 10 APs, περίπου 9,1 φορές μεγαλύτερο για μέσο SNR και περίπου 8,1 φορές μεγαλύτερο για χαμηλό SNR).

ε) Δικαιοσύνη. Σε αυτή την ενότητα θα εξετάσουμε εάν το σύστημά μας είναι δίκαιο, δηλαδή εάν αποδίδει το αναμενόμενο κέρδος στο throughput σε όλους τους κόμβους.

Μέθοδος. Διεξάγουμε το ίδιο πείραμα με την προηγούμενη ενότητα. Στην συνέχεια υπολογίζουμε το κέρδος του throughput σε κάθε κόμβο ως τον λόγο του throughput και του κανονικού 802.11 throughput. Όπως και πριν ο αριθμός των APs κυμαίνεται από 2 έως 10 και χρησιμοποιείται όλο το εύρη του SNR.

Αποτελέσματα. Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζεται το CDF του κέρδους του throughput για 2, 6 και 10 APs.



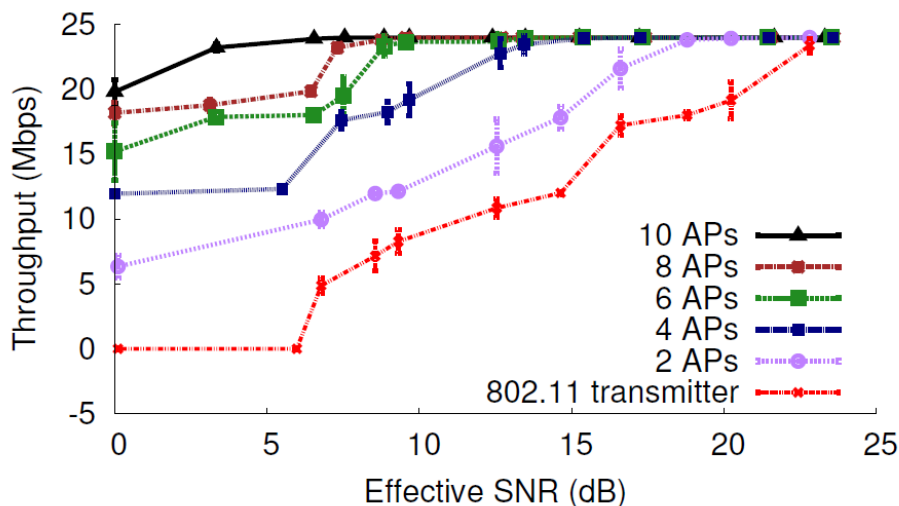
Σχήμα 4.11 CDF του κέρδους του throughput

Τα αποτελέσματα δείχνουν πως το σύστημά μας είναι δίκαιο και πως όλοι οι κόμβοι έχουν το ίδιο κέρδος αλλά και ότι αυτά τα κέρδη ταιριάζουν με αυτά του ολικού throughput που βρήκαμε στην ενότητα (δ). Παρατηρούμε επίσης ότι το CDF είναι πλατύτερο όσο μικρότερο είναι το SNR. Αυτό είναι συνέπεια του γεγονότος ότι μεγαλύτερη μέτρηση θορύβου σε χαμηλά SNR προκαλεί μεγαλύτερες διαφορές στο throughput μεταξύ των δεκτών.

ζ) Διαφορισμός. Όπως έχει ήδη αναπτυχθεί το νέο σύστημα δεν προσφέρει κέρδος στο throughput μόνο λόγω πολυπλεξίας αλλά και λόγω διαφορισμού.

Μέθοδος. Αρκετά APs τοποθετούνται τυχαία σε θέσεις AP μέσα στην πλατφόρμα δοκιμών και ένα στην θέση δέκτη, εξασφαλίζοντας πως όλα τα APs θα έχουν περίπου το ίδιο SNR στην θέση αυτή. Κατόπιν υπολογίζεται το throughput τόσο για το κανονικό 802.11 όσο και για το MegaMIMO. Επαναλαμβάνουμε το πείραμα με τον αριθμό των APs να κυμαίνεται από 2 έως 10.

Αποτελέσματα. Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται το throughput ενός δέκτη σε σχέση με το ενεργό SNR.



Σχήμα 4.12 Throughput ενός δέκτη

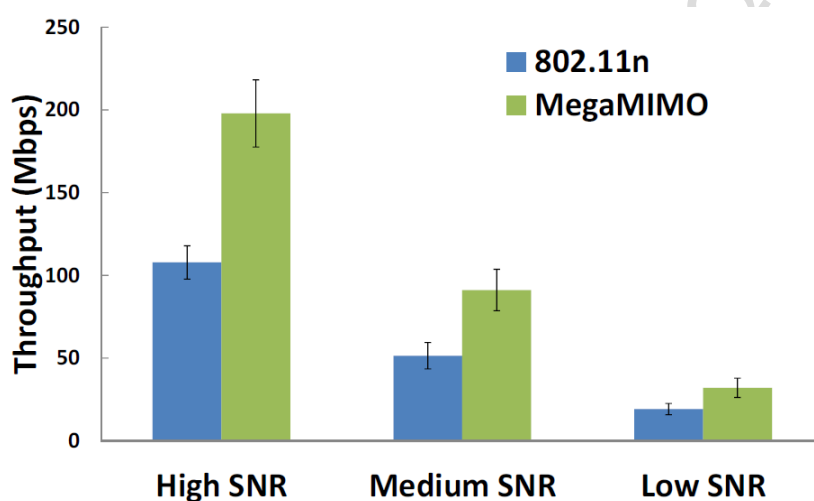
Παρατηρούμε σημαντικά κέρδη στο throughput σε σχέση με το κλασικό 802.11, ειδικά όταν έχουμε χαμηλό SNR. Για παράδειγμα, ένας δέκτης που έχει κανάλια των 0 dB με όλα τα APs (δηλαδή η λαμβανόμενη από αυτόν τον δέκτη ισχύς από κάθε AP είναι ίση με τον θόρυβο) δεν μπορεί να πάρει καθόλου throughput με το 802.11. Ωστόσο το γράφημα δείχνει πως με 10 APs ένας τέτοιος δέκτης μπορεί να πετύχει 21 Mbps throughput χρησιμοποιώντας το νέο σύστημα.

η) Συμβατότητα με 802.11. Σε αυτή την ενότητα εξερευνείται κατά πόσο ο αλγόριθμος επιφέρει σημαντικά κέρδη στο throughput χρησιμοποιώντας κάρτες

δικτύου 802.11n. Επιπλέον αφού κάθε AP και κάθε 802.11n κάρτα έχει δυο κεραίες, με αυτό το πείραμα αποδεικνύεται ότι ο αλγόριθμός μας παρέχει τα αναμενόμενα κέρδη σε συστήματα όπου οι πομποί και οι δέκτες φέρουν πολλαπλές κεραίες.

Μέθοδος. Δυο κόμβοι τοποθετούνται σε τυχαίες θέσεις των APs στην πλατφόρμα δοκιμών και αντίστοιχα δυο 802.11n δέκτες. Για κάθε τοπολογία, υπολογίζεται το ολικό throughput τόσο στους MegaMIMO κόμβους όσο και στους 802.11n. Όπως και πριν ο υπολογισμός του throughput του 802.11n γίνεται με την προϋπόθεση ότι κάθε πομπούς χρησιμοποιεί ισόποσα το μέσο διάδοσης.

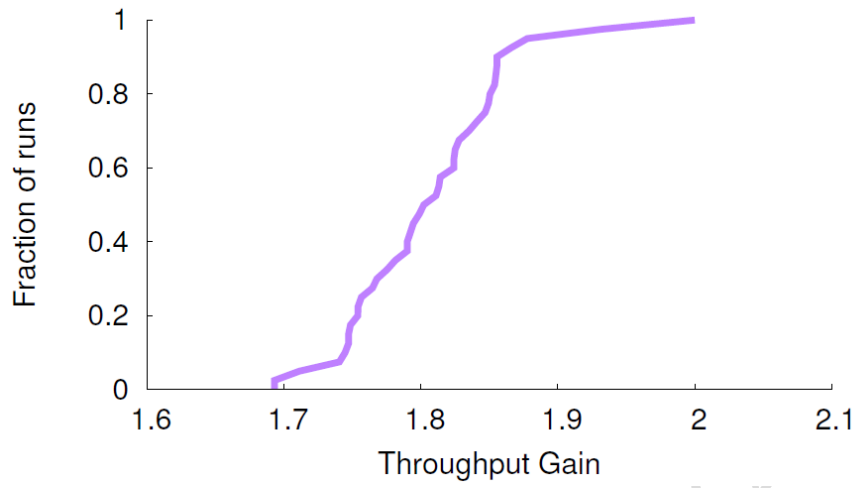
Αποτελέσματα. Στο γράφημα που ακολουθεί παρουσιάζεται το ολικό throughput με ή χωρίς την χρήση του αλγορίθμου για χαμηλό, μέσο και υψηλό SNR.



Σχήμα 4.13 Throughput με ή χωρίς του αλγορίθμου

Αφού κατά την διάρκεια του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν δυο δέκτες, θεωρητικά το κέρδος του νέου συστήματος σε σχέση με αυτό του 802.11n θα πρέπει να είναι διπλάσιο. Με βάση το γράφημα παρατηρούμε πως το μέσο κέρδος δηλαδή το κέρδος και στα τρία SNRs κυμαίνεται από 1,67 έως 1,83 φορές μεγαλύτερο.

Σε αυτή την ενότητα βλέπουμε επίσης τον λόγο του throughput των δυο συστημάτων MegaMIMO και 802.11n. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως το πρώτο αποδίδει 1,65 έως 2 φορές μεγαλύτερο κέρδος στο throughput όλων των APs με μέση τιμή το 1,8.



Σχήμα 4.14 CDF του throughput μεταξύ MegaMIMO και 802.11n

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

5

Αξιολόγηση Network MIMO με προσομοίωση

5.1 Εισαγωγή

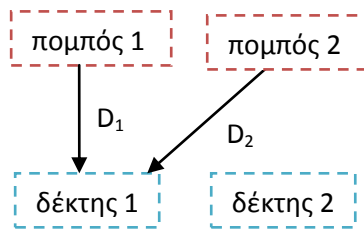
Στο προηγούμενο κεφάλαιο μελετήσαμε τα οφέλη ενός Network MIMO. Θέλοντας να αποδείξουμε και πειραματικά την θεωρία των συνεργαζόμενων πομπών εξετάσαμε την συμπεριφορά ενός 2x2 Zero Forcing MIMO και δυο ανεξάρτητων Zero Forcing SISO συστημάτων, τα οποία μεταδίδουν ταυτόχρονα. Χρησιμοποιώντας την τεχνική του Zero Forcing precoding, τεχνική κατά την οποία τα μεταδιδόμενα σήματα πολλαπλασιάζονται από πριν με τον ανάστροφο της μήτρας του καναλιού, μπορούμε να εξαλείψουμε πλήρως την επίδραση του τελευταίου. Ουσιαστικά την γνώση του καναλιού την έχει ο πομπός, πράγμα που είναι και επιθυμητό μιας και ο δέκτης δεν επιβαρύνεται με επιπλέον διεργασίες (*equalization*). Τα κανάλια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν Rayleigh ενώ τα σήματα ήταν κωδικοποιημένα κατά BPSK. Η μελέτη-προσομοίωση έγινε με την βοήθεια του λογισμικού Matlab.

Σύστημα:	<ul style="list-style-type: none">• 2x2 Network MIMO• 2 SISO
Τεχνική:	Zero Forcing
Κανάλια:	Rayleigh
Κωδικοποίηση:	BPSK
Προσομοίωση:	Matlab

5.2 Σύστημα με και χωρίς συνεργαζόμενους πομπούς

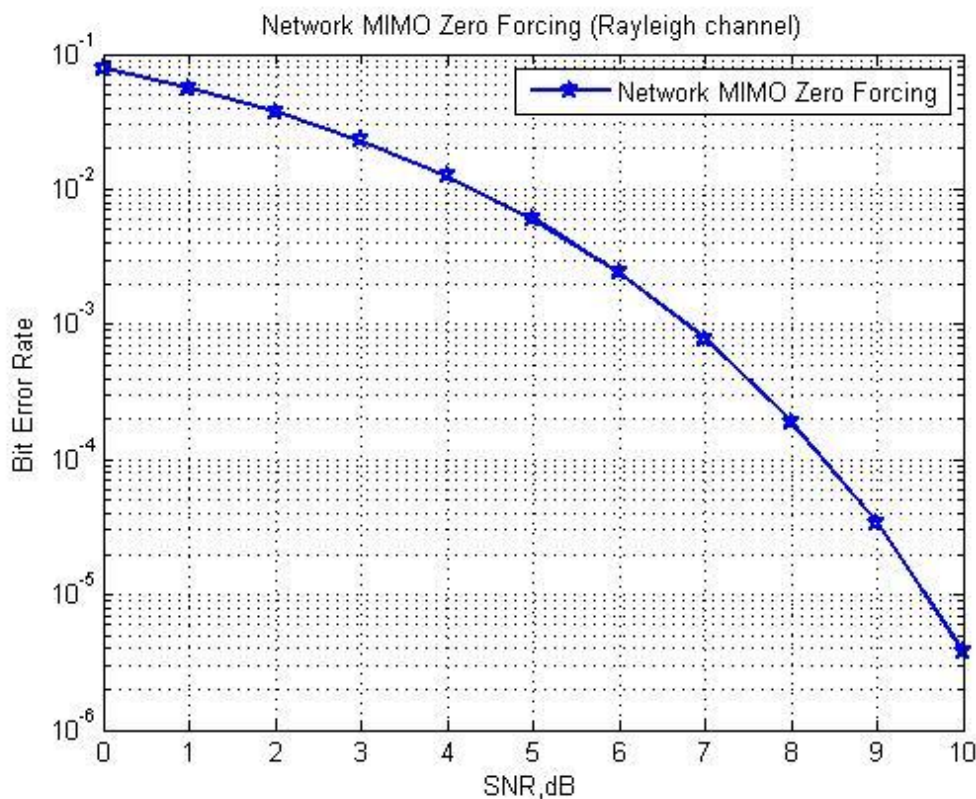
Σε αυτή την περίπτωση συγκρίναμε το BER του 2x2 Zero Forcing Network MIMO και των δυο ανεξάρτητων SISO καθώς το SNR μεταβαλλόταν από 0 ως 10

dB. Ο λόγος της απόστασης του πομπού 1 και του πομπού 2 ως προς τον δέκτη είναι ίσος με 1 ($D_1 = D_2$, συμμετρική απόσταση δέκτη από τους πομπούς).



Σχήμα 5.1 Απεικόνιση λόγου αποστάσεων πομπών με δέκτη

Κατά την κωδικοποίηση ο πομπός στέλνει 10^6 σήματα στον δέκτη χρησιμοποιώντας 100 διαφορετικά κανάλια (100 φορές δηλαδή). Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και στο σχήμα 5.2 το BER του 2x2 Zero Forcing Network MIMO μεταβάλλεται εκθετικά συναρτήσει του SNR και λαμβάνει τιμές από $7,86 \times 10^{-2}$ ως $4,06 \times 10^{-6}$.



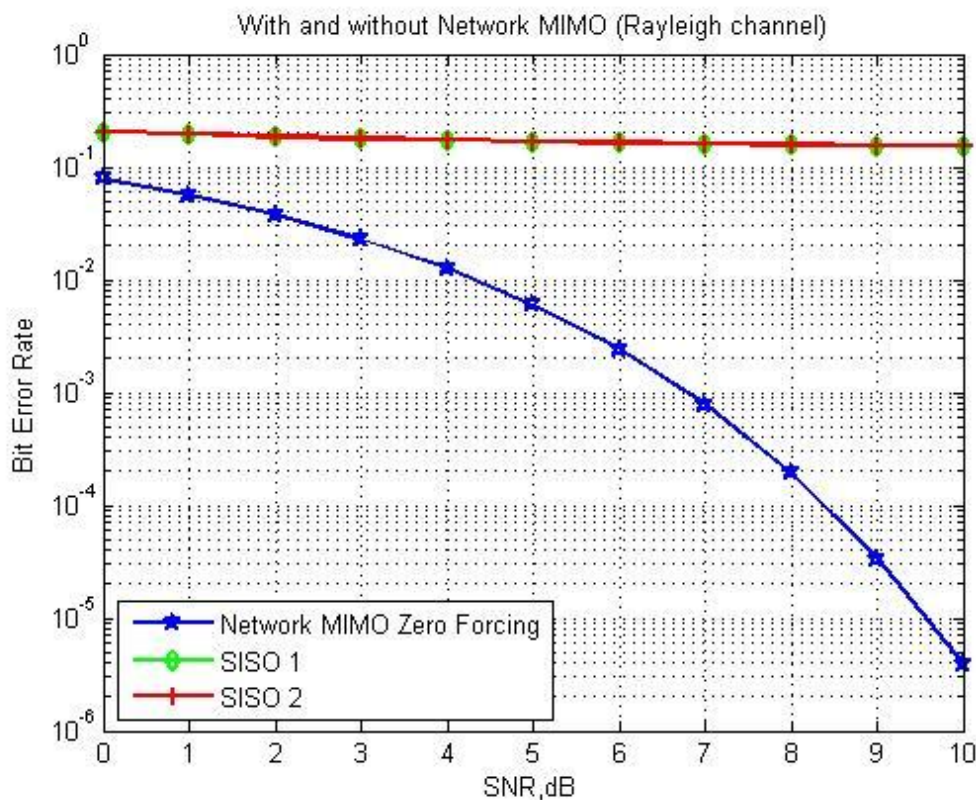
Σχήμα 5.2 BER ενός 2x2 MIMO ως προς SNR

Προσομοιώνοντας τώρα τα δυο ανεξάρτητα Zero Forcing SISO, στο λαμβανόμενο σήμα προσθέτουμε την παρεμβολή που προκαλεί ο ένας πομπός στον άλλον και θεωρούμε ότι $R = \frac{D_1}{D_2} = 1$. Υπολογίζουμε εκ νέου το BER ως προς το SNR, όπου και σε αυτή την περίπτωση ο κάθε πομπός στέλνει 10^6 σήματα στον δέκτη

χρησιμοποιώντας 100 διαφορετικά κανάλια (100 φορές δηλαδή) και προκύπτει η γραφική παράσταση του σχήματος 5.3.

Μελετώντας πιο προσεκτικά την συμπεριφορά των Zero Forcing SISO συστημάτων παρατηρούμε αρχικά μια μικρή αλλά σταδιακή μείωση της τιμής του BER μέχρι το σημείο στο οποίο ο θόρυβος είναι ακόμα συγκρίσιμος με την παρεμβολή. Πέρα της τιμής αυτής ($SNR = 9dB$), ο συνολικός θόρυβος επηρεάζεται κυρίως από την παρεμβολή και έτσι το λαμβανόμενο BER παραμένει σχεδόν σταθερό και ίσο με $1,532 \times 10^{-1}$

Παραθέτοντας τις δυο γραφικές μαζί μπορούμε να παρατηρήσουμε την υπεροχή του Network MIMO συστήματος και να επισημάνουμε την αναγκαιότητα συνεργασίας των πομπών. Ουσιαστικά αποδεικνύεται και η αναγκαιότητα ύπαρξης της έρευνας της Katabi, δηλαδή την συνεργασία των πομπών ακόμα και αν αυτοί δεν ανήκουν σε κάποιο Network MIMO σύστημα ή οι κεραιές τους δεν ελέγχονται από ένα chip αλλά βρίσκονται σε αποστάσεις μεγαλύτερες του $\lambda/2$.



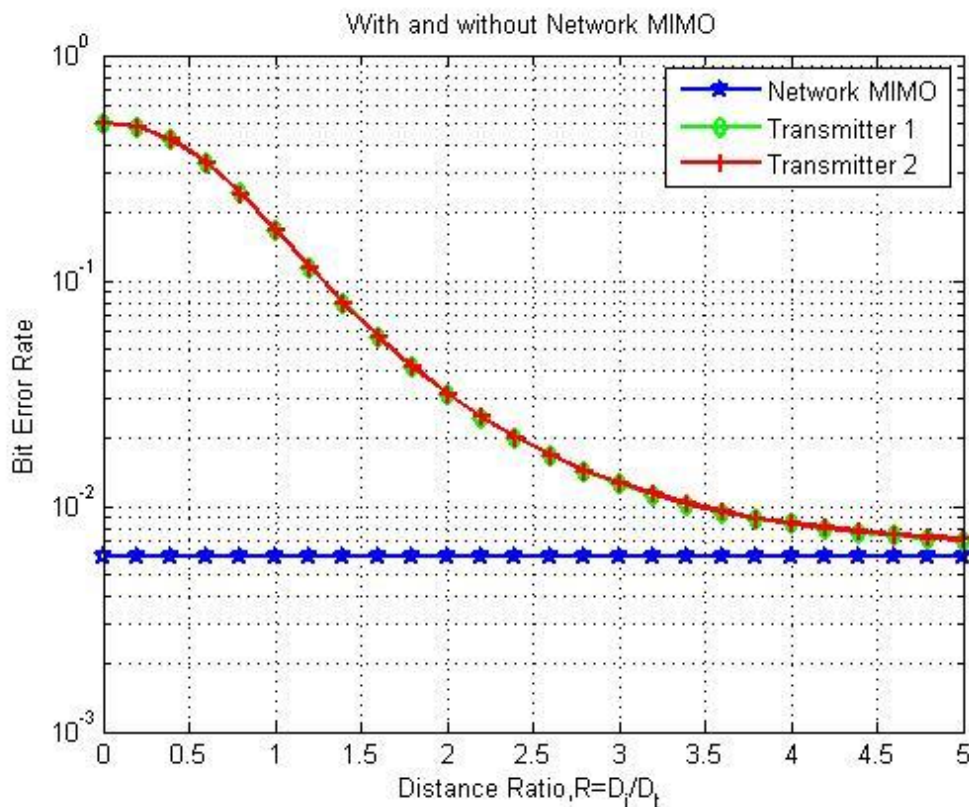
Σχήμα 5.3 BER ενός συστήματος με και χωρίς Network MIMO ως προς SNR

5.3 Συμπεριφορά μη συνεργαζόμενων πομπών

Θέλοντας να μελετήσουμε την συμπεριφορά των δυο ανεξάρτητων SISO σε σχέση με τον λόγο $R = \frac{D1}{D2}$ της απόστασης των πομπών (σχήμα 5.1). Κρατώντας σταθερό το SNR ($SNR = 5dB$) και ενώ το R μεταβάλλεται από 0 ως 5, προσθέτουμε

στο λαμβανόμενο σήμα την παρεμβολή πολλαπλασιασμένη με τον παράγοντα $R^{-\frac{\alpha}{2}}$, όπου $\alpha = 4$. Από την προηγούμενη προσομοίωση υπολογίσαμε την τιμή του BER ενός 2x2 Network MIMO συστήματος για την δεδομένη τιμή του SNR. Στο σχήμα 5.4 παραθέτουμε το BER του 2x2 Network MIMO και των δυο ανεξάρτητων SISO συστημάτων σε σχέση με τον λόγο της απόστασης των πομπών από τους δέκτες.

Μελετώντας την προκύπτουσα γραφική παράσταση μπορούμε να παρατηρήσουμε μια εκθετική μείωση του BER των SISO και μια σύγκλιση τιμών με αυτές του Network MIMO για τιμές στον λόγο των αποστάσεων πέρα του 5. Πιο συγκεκριμένα όταν ο λόγος είναι 0, δηλαδή ο πομπός 2 βρίσκεται πάρα πολύ κοντά σε σχέση με τον πομπό 1 στον δέκτη, το BER είναι τεράστιο της τάξης του 5×10^{-1} . Καθώς ο λόγος αυξάνει και γίνεται ίσος με 1 (προηγούμενη προσομοίωση) παρατηρούμε μια μείωση του BER ($1,6 \times 10^{-1}$). Η προκύπτουσα τιμή είναι πολύ κοντά στην υπολογισθείσα τιμή από την προηγούμενη ενότητα $1,532 \times 10^{-1}$. Όταν η απόσταση του πομπού 2 είναι πενταπλάσια αυτής του πομπού 1 ($D_2 = 5D_1$, σχήμα 5.1), δηλαδή ο πομπός που παρεμβάλλεται βρίσκεται αρκετά μακριά σε σχέση με τον πομπό που εκπέμπει, παρατηρούμε μια σύγκλιση των τιμών του BER των SISO συστημάτων με αυτές του 2x2 MIMO.



Σχήμα 5.4 BER των SISO και MIMO ως προς τον λόγο αποστάσεων

Πρακτικά θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε πως η συμπεριφορά των SISO συστημάτων είναι αντίστοιχη με αυτή του Network MIMO για λόγο αποστάσεων μεγαλύτερο του 5. Για λόγο αποστάσεων μικρότερο του 5 η λειτουργία των SISO συστημάτων λογίζεται καταστροφική μιας και το BER αυξάνεται γραμμικά και ξεπερνά κατά πολύ τα επιτρεπτά όρια. Σε μια τέτοια περίπτωση είναι επιτακτική η χρησιμοποίηση ενός Network MIMO συστήματος ή για να το γενικεύσουμε ενός συστήματος με συμπεριφορά MIMO, δηλαδή ενός συστήματος που να βασίζεται στην συνεργασία των πομπών.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

6

Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

6.1 Σύνοψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής μελετήθηκε η απόκριση μεταξύ ενός Network MIMO συστήματος και δυο ανεξάρτητων SISO ως προς την απόδοσή τους. Χρησιμοποιήθηκαν Rayleigh κανάλια και σήματα με BPSK κωδικοποίηση καθώς και η μέθοδος Zero Forcing Precoding για την μετάδοση των δεδομένων. Η προσομοίωση έγινε με την χρήση του λογισμικού Matlab. Αποδείξαμε στην πράξη τα πλεονεκτήματα μιας συνεργασίας μεταξύ των πομπών καθώς επίσης και της τεχνικής του Zero Forcing Precoding, μιας και την γνώση του καναλιού την έχει ο πομπός και ο δέκτης δεν επιβαρύνεται με επιπλέον διεργασίες (*equalization*). Τέλος δείξαμε την εξάρτηση του BER ενός SISO συστήματος από τον λόγο της απόστασης μεταξύ πομπού δεδομένων και πομπού παρεμβολών.

6.2 Συμπεράσματα

Βάσει των αποτελεσμάτων και των γραφημάτων μπορούμε να συμπεράνουμε την ανάγκη συνεργασίας των πομπών ακόμα και αν αυτοί βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους, μιας και μας οδηγούν σε πολύ καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με αυτά των ανεξάρτητων πομπών. Μεταβάλλοντας το SNR από 0 ως 10 dB δείξαμε την υπεροχή ενός 2x2 Network MIMO έναντι των δυο ανεξάρτητων SISO συστημάτων. Στα SISO συστήματα η απόσταση του δέκτη από τους 2 πομπούς θεωρήθηκε συμμετρική.

Θέλοντας να πειραματιστούμε να δούμε την συμπεριφορά των δυο SISO συστημάτων σε αποστάσεις όχι συμμετρικές πραγματοποιήσαμε μια ακόμα προσομοίωση. Συγκεκριμένα κρατώντας σταθερό το SNR = 5 dB και μεταβάλλοντας το λόγο των αποστάσεων παρεμβολέα και πομπού από 0 ως 5, παρατηρούμε πως υπάρχει μια σύγκλιση όσο αφορά το BER τόσο του 2x2 Network MIMO όσο και των δυο SISO συστημάτων. Η σύγκλιση αυτή επιτυγχάνεται όταν η απόσταση που

παρεμβαλλόμενου πομπού είναι πενταπλάσια από αυτήν του πομπού ως προς τον δέκτη. Απεναντίας όταν ο λόγος συγκλίνει προς το 0 δηλαδή η απόσταση του πομπού που παρεμβάλλεται είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με αυτή του πομπού που εκπέμπει, το BER αυξάνεται δραματικά και ουσιαστικά μας δείχνει την ανορθόδοξη λειτουργία του without Network MIMO συστήματος. Σε περιπτώσεις επομένως όπου οι δυο πομποί είναι κοντά μεταξύ τους δεν ενδείκνυται η χρήση τέτοιων συστημάτων αλλά κάποιου Network MIMO ή δυο συνεργαζόμενων πομπών που θα συμπεριφέρονται σαν MIMO.

6.3 Μελλοντική εργασία

Στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκε η συμπεριφορά ενός 2x2 Network MIMO συστήματος με τον πομπό να γνωρίζει τα κανάλια μέσω των οποίων έγινε η εκπομπή των σημάτων. Αποτελεί πρόκληση για έρευνα η συμπεριφορά ενός μεγαλύτερου MIMO συστήματος, ακόμα και ενός NxN, καθώς και η περίπτωση κατά την οποία τα κανάλια παρουσίαζαν μεγάλη μεταβλητότητα και θα ήταν αδύνατη η γνώση τους ανά πάσα στιγμή από τον πομπό.

Τέλος κατά την προσομοίωση υπήρχε η παραδοχή πως ο πομπός παρεμβολής ισαπέχει σε σχέση με τον πομπό εκπομπής από τον δέκτη. Αξιόλογα συμπεράσματα θα μπορούσαν να προκύψουν στην περίπτωση όπου αυτή η απόσταση κυμαινόταν.

Βιβλιογραφία

- [1] Hariharan Rahul Swarun Kumar Dina Katabi, *MegaMIMO: Scaling Wireless Capacity with User Demands*
- [2] *Cellular vs. Network MIMO: A Comparison Including the Channel State Information Overhead*, Sean A. Ramprashad and Giuseppe Caire
- [3] Sesia, S., Toufik, I., Baker, M. *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons. 2009
- [4] *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 5: Enhancements for higher throughput*.
- [5] A. Forenza, R.W. H. Jr., and S. G. Perlman. *System and Method For Distributed Input-Distributed Output Wireless Communications*
- [6] *Network MIMO* http://www.alcatel-lucent.com/wps/DocumentStreamerServlet?LMSG_CABINET=Docs_and_Resource_Ctr&LMSG_CONTENT_FILE=Data_Sheets/Network_MIMO.pdf, Alcatel Lucent
- [7] *PCTEL simplifying wireless, Maximizing LTE Performance Through MIMO Optimization, White Paper*
- [8] *Julo Lee, Jin-Kyu Han and Jianzhong (Charlie) Zhang, MIMO Technologies in 3Gpp LTE an LTE-Advanced,*
- [9] *Wikipedia Multi User MIMO*, http://en.wikipedia.org/wiki/Multi-user_MIMO#MU-MIMO
- [10] *Wikipedia MIMO*, <http://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>
- [11] *3GPP Release 8*: <http://www.3gpp.org/specifications/releases/72-release-8>
- [12] *3GPP Release 9*: <http://www.3gpp.org/specifications/releases/71-release-9>

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Παράρτημα Matlab κώδικας

zf_MIMO.m

```
%-----  
% Υπολογισμός του BER συναρτήσει του Eb/No για BPSK διαμόρφωση σε  
% Rayleigh κανάλια με 2Tx, 2Rx MIMO  
% -----  
  
clear all  
clc  
  
N = 10^6;  
SNR = 0:10; % multiple Eb/No values  
nTx = 2;  
nRx = 2;  
nErr = zeros(1,length(SNR)); % define nErr array  
  
for ii=1:100  
  
    % Transmitter  
    ip = rand(1,N)>0.5; % generating 0,1 with equal probability  
    s = 2*ip-1; % BPSK modulation 0 -> -1; 1 -> 0  
  
    ip2 = rand(1,N)>0.5; % generating 0,1 with equal probability  
    s2 = 2*ip2-1; % BPSK modulation 0 -> -1; 1 -> 0  
  
    sMod = [s;s2];  
  
    h = 1/sqrt(2)*(randn(nRx,nTx) + 1i*randn(nRx,nTx)); % Rayleigh  
channel  
    n = 1/sqrt(2)*(randn(nRx,N) + 1i*randn(nRx,N)); % white gaussian  
noise, 0dB variance  
  
    x = inv(h)*sMod; % multiply signal by inv(h)  
  
    for i = 1:length(SNR)  
  
        % Channel and noise Noise addition  
        y = h*x + 10^(-SNR(i)/20)*n;  
  
        % receiver - hard decision decoding  
        ipHat = real(y(1,:))>0;  
  
        % counting the errors  
        nErr(i) = nErr(i) + size(find((ip- ipHat)),2);  
    end  
end  
  
nErr = nErr/(100*N);  
close all  
figure  
semilogy(SNR,nErr,'bp-','LineWidth',2);  
grid on  
legend('MIMO Zero Forcing');  
xlabel('SNR,dB');
```

```
ylabel('Bit Error Rate');
title('Network MIMO Zero Forcing (Rayleigh channel)');
```

zf_MIMO_SISO.m

```
%-----
% Υπολογισμός του BER συναρτήσεως του SNR για BPSK διαμόρφωση σε
% Rayleigh κανάλια με 2Tx, 2Rx MIMO και 2 ανεξάρτητους πομπούς με
% zero forcing precoding
%-----

clear all
clc

N = 10^6;
SNR = 0:10; % multiple SNR values
nTx = 2;
nRx = 2;
nErr = zeros(1,length(SNR)); % define nErr array
nErr2 = zeros(1,length(SNR)); % define nErr2 array
nErr3 = zeros(1,length(SNR)); % define nErr3 array

for ii=1:100

    % Transmitter
    ip = rand(1,N)>0.5; % generating 0,1 with equal probability
    s = 2*ip-1; % BPSK modulation 0 -> -1; 1 -> 0

    ip2 = rand(1,N)>0.5; % generating 0,1 with equal probability
    s2 = 2*ip2-1; % BPSK modulation 0 -> -1; 1 -> 0

    sMod = [s;s2];

    h = 1/sqrt(2)*(randn(nRx,nTx) + 1i*randn(nRx,nTx)); % Rayleigh
channel
    n = 1/sqrt(2)*(randn(nRx,N) + 1i*randn(nRx,N)); % white gaussian
noise, 0dB variance

    % Concurrent SISO transmission
    h2 = 1/sqrt(2)*(randn(1,N,4) + 1i*randn(1,N,4)); % Rayleigh
channel
    n2 = 1/sqrt(2)*(randn(1,N) + 1i*randn(1,N)); % white gaussian
noise, 0dB variance

    % Sended signal
    x = inv(h)*sMod;
    x2 = (h2(:, :, 1).^-1).*s;
    x3 = (h2(:, :, 2).^-1).*s2;

    for i = 1:length(SNR)

        % Channel and noise Noise addition
        y = h*x + 10^(-SNR(i)/20)*n;

        y2 = h2(:, :, 1).*x2 + 10^(-SNR(i)/20)*n2 + h2(:, :, 3).*x3;
        y3 = h2(:, :, 2).*x3 + 10^(-SNR(i)/20)*n2 + h2(:, :, 4).*x2;
```

```

    % receiver - hard decision decoding
    ipHat = real(y(1,:))>0;
    ipHat2 = real(y2)>0;
    ipHat3 = real(y3)>0;

    % counting the errors
    nErr(i) = nErr(i) + size(find((ip- ipHat)),2);
    nErr2(i) = nErr2(i) + size(find((ip- ipHat2)),2);
    nErr3(i) = nErr3(i) + size(find((ip2- ipHat3)),2);
    end

end

Ber = nErr/(100*N); % simulated ber
Ber2 = nErr2/(100*N); % simulated ber
Ber3 = nErr3/(100*N); % simulated ber
close all
figure
semilogy(SNR,Ber,'bp-',SNR,Ber2,'gd-',SNR,Ber3,'r+', 'LineWidth',2);
grid on
legend('Network MIMO Zero Forcing','SISO 1','SISO
2','Location','SouthWest');
xlabel('SNR,dB');
ylabel('Bit Error Rate');
title('With and without Network MIMO (Rayleigh channel)');

```

apostasi_paremvolis.m

```

%-----
% Υπολογισμός του BER συναρτήσει της απόστασης των πομπών για BPSK
% διαμόρφωση σε Rayleigh κανάλια με 2Tx, 2Rx MIMO και 2 ανεξάρτητους
% πομπούς
%-----

clear all
clc

N = 10^6; % number of bits or symbols
SNR = 5; % multiple Eb/N0 values
nTx = 2;
nRx = 2;
a = 4;
R = 0:0.2:5; % transmitters distance Ratio
D_interfernce/D_transmitter
nErr = zeros(1,length(SNR));
nErr2 = zeros(1,length(SNR));
nErr3 = zeros(1,length(SNR));

% Transmitter
ip = rand(1,N)>0.5; % generating 0,1 with equal probability
s = 2*ip-1; % BPSK modulation 0 -> -1; 1 -> 0

ip2 = rand(1,N)>0.5; % generating 0,1 with equal probability
s2 = 2*ip2-1; % BPSK modulation 0 -> -1; 1 -> 0

```

```

    % Concurrent SISO transmission
    h2 = 1/sqrt(2)*(randn(1,N,4) + 1i*randn(1,N,4)); % Rayleigh
channel
    n2 = 1/sqrt(2)*(randn(1,N,2) + 1i*randn(1,N,2)); % white gaussian
noise, 0dB variance

    % Sended signal
    x2 = (h2(:, :, 1).^-1).*s;
    x3 = (h2(:, :, 2).^-1).*s2;

for ii = 1:length(R)

    % Channel Noise, Noise and Interference addition
    y1 = h2(:, :, 1).*x2 + 10^(-SNR/20)*n2(:, :, 1) + (R(ii)^(a/2)).*h2(:, :, 3).*x3;
    y2 = h2(:, :, 2).*x3 + 10^(-SNR/20)*n2(:, :, 2) + (R(ii)^(a/2)).*h2(:, :, 4).*x2;

    % receiver - hard decision decoding

    ipHat1 = real(y1)>0;
    ipHat2 = real(y2)>0;

    % counting the errors
    nErr(ii) = 5.95461*10.^3; % This measurement is taken with
zf_MIMO.m
    nErr2(ii) = size(find((ip- ipHat1)),2);
    nErr3(ii) = size(find((ip2- ipHat2)),2);

end

Ber = nErr/N; % simulated ber
Ber2 = nErr2/N; % simulated ber
Ber3 = nErr3/N; % simulated ber

close all
figure
semilogy(R,Ber, 'bp-',R,Ber2, 'gd-',R,Ber3, 'r-', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Network MIMO', 'Transmitter 1', 'Transmitter 2');
xlabel('Distance Ratio,R=D_i/D_t');
ylabel('Bit Error Rate');
title('With and without Network MIMO');

```