



**ΤΕΙ Μεσολογγίου**

**Παράρτημα Ναυπάκτου**

**Τμήμα Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων και  
Δικτύων**

**Πτυχιακή Εργασία**

**«Εξαγωγή χωρητικότητας καναλιού MIMO - LTE»**

**Συγγραφέας: Κίτα Δήμητρα**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Λούβρος Σπυρίδων**

**Ναύπακτος, Απρίλιος 2011**

## Περίληψη

Η εξέλιξη του τομέα των δικτύων κινητών επικοινωνιών, ακόμα και σε περιόδους οικονομικής ύφεσης όπως αυτήν που διανύει η παγκόσμια οικονομία, είναι μεγάλη καθώς συμβάλουν στο μέγιστο οι απαιτήσεις των σύγχρονων καιρών σε συνδυασμό με την επιθυμία για δημιουργία ενός ενοποιημένου λειτουργικού συστήματος κινητής επικοινωνίας, το οποίο θα είναι ικανό να παρέχει πληθώρα υπηρεσιών στους πελάτες/χρήστες του.

Τα τελευταία χρόνια τα δίκτυα επικοινωνιών τρίτης γενιάς (3G) – Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) γνωρίζουν μεγάλη άνθηση και η χρήση τους έχει επεκταθεί στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες, όπως και στην Ελλάδα. Τα νέα αυτά κινητά δίκτυα αντικαθιστούν τα υπάρχοντα κινητά δίκτυα δεύτερης γενιάς και επιπλέον προσφέρουν προηγμένες υπηρεσίες στους κινητούς χρήστες. Ωστόσο, η αδήριτη ανάγκη για μεγαλύτερες (ευρυζωνικές) ταχύτητες πρόσβασης οδήγησε στην περαιτέρω ανάπτυξη των 3G δικτύων και στην υιοθέτηση νέων τεχνολογιών, με κυριότερο εκπρόσωπο τους την τεχνολογία High Speed Packet Access (HSPA). Η τεχνολογία HSPA αποτελεί τη φυσιολογική μετεξέλιξη του UMTS, η οποία πολλές φορές συναντάται και ως 3.5G ή 3G+, προκειμένου να δηλώσει την αναβάθμιση του 3G (UMTS) προτύπου.

Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι η τεχνολογία HSPA αναμένεται να προσφέρει τη δυνατότητα παροχής πληθώρας ευρυζωνικών υπηρεσιών, το 3rd Generation Partnership Project (3GPP), που αποτελεί τον οργανισμό που προτυποποιεί τις νέες τεχνολογίες και ορίζει τις προδιαγραφές τους, ήδη μελετά και επεξεργάζεται νέες τεχνολογίες που θα επικρατήσουν την αμέσως επόμενη δεκαετία στην αγορά των κινητών επικοινωνιών. Το νέο αυτό project αποκαλείται Long Term Evolution (LTE) και στοχεύει στην επίτευξη ακόμη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης σε συνδυασμό με την αξιοποίηση μεγαλύτερου εύρους ζώνης. Κύρια προοπτική του LTE αποτελεί η διασφάλιση της ανταγωνιστικότητας και η επικράτηση του προτύπου στο χρονικό ορίζοντα της επόμενης δεκαετίας.

Κατά συνέπεια, η αγορά κινητών επικοινωνιών σταδιακά μεταλλάσσεται προς τη δημιουργία δικτύων κινητών επικοινωνιών επόμενης γενιάς, με απώτερο σκοπό την επίτευξη του αποκαλούμενου «Mobile Broadband».

Ταυτόχρονα με την εκτεταμένη εξάπλωση των δικτύων κινητών επικοινωνιών επόμενης γενιάς καθώς και τις αυξημένες δυνατότητες των κινητών συσκευών, οι πάροχοι πολυμεσικού περιεχομένου και υπηρεσιών ενδιαφέρονται όλο και περισσότερο για την υποστήριξη της πολυεκπομπής δεδομένων (multicasting) στα δίκτυα αυτά με σκοπό την αποτελεσματική διαχείριση και επαναχρησιμοποίηση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου. Επιπρόσθετα, οι χρήστες των κινητών δικτύων έχουν πλέον την απαίτηση να προσπελαύνουν εφαρμογές και υπηρεσίες οι οποίες μέχρι σήμερα μπορούσαν να διατεθούν αποκλειστικά από τα συμβατικά ασύρματα δίκτυα. Έτσι λοιπόν στις μέρες μας γίνεται λόγος για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου όπως mobile TV, mobile gaming, mobile streaming κ.α.

Ένα από τα σημαντικότερα βήματα των δικτύων κινητών επικοινωνιών προς την κατεύθυνση της παροχής νέων, προηγμένων πολυμεσικών υπηρεσιών είναι η εισαγωγή της υπηρεσίας Multimedia Broadcast / Multicast Service (MBMS). Η MBMS υπηρεσία έχει σαν κύριο σκοπό την υποστήριξη IP εφαρμογών πανεκπομπής (broadcast) και πολυεκπομπής (multicast) επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την παροχή υπηρεσιών υψηλού ρυθμού μετάδοσης σε πολλαπλούς χρήστες με οικονομικό τρόπο. Η multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών είναι μια νέα λειτουργικότητα η οποία βρίσκεται ακόμη στο στάδιο των δοκιμών και της προτυποποίησης της. Ένας multicast μηχανισμός μεταδίδει τα δεδομένα μόνο μία φορά πάνω από κάθε ασύρματο σύνδεσμο που αποτελεί τμήμα των μονοπατιών προς τους προορισμούς-κινητούς χρήστες.

## **Abstract**

Due to rapid growth of mobile communications technology, the demand for wireless multimedia communications thrives in today's consumer and corporate market. The need to evolve multimedia applications and services is at a critical point given the proliferation and integration of wireless systems. Consequently, there is a great interest in using the IP-based networks to provide multimedia services. One of the most important areas in which the issues are being debated, is the development of standards for the Universal Mobile Telecommunications System (UMTS).

In the recent years, the usage of third generation (3G) - Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) cellular networks has begun to rise in most European countries, as in Greece. 3G networks replace the second generation mobile networks and moreover, are in position of offering advanced services to mobile users. However, the need for higher (broadband) speeds led to the further development of 3G networks and to the adoption of new technologies, with main representative the High Speed Packet Access (HSPA) technology. HSPA constitutes the evolution of UMTS and is known as 3.5G or 3G+ in order to indicate the upgrade from UMTS.

However, despite the fact that HSPA technology is expected to allow the provision of numerous broadband services, the 3rd Generation Partnership Project (3GPP), the authorized organization for the standardization of new mobile technologies, already examines new technologies that will prevail in the mobile communications industry over the next decades. This novel project is known as Long Term Evolution (LTE) and aims at achieving increased data rates and reduced latency compared to UMTS and HSPA networks. Therefore, the mobile communications industry progressively evolves to next generation networks, with main target the achievement of the so called "Mobile Broadband".

Simultaneously, multimedia content and service providers show an increased interest in supporting multicast data in order to effectively manage and re-use the available network resources. Additionally, more and more users require access to applications and services that until

today could only be accessed by conventional wired networks. Thus, real time applications and services may face low penetration today, however, they are expected to gain high interest in future mobile networks. These applications actually reflect a modern, future way of communication among mobile users. For instance, mobile TV is expected to be a ‘killer’ application for 3G’s.

One of the most significant steps towards the provision of such demanding services is the introduction of Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS). MBMS is a point-to-multipoint service in which data is transmitted from a single source entity to multiple destinations, allowing the networks resources to be shared. Actually, MBMS extends the existing UMTS infrastructure and efficiently uses network and radio resources, both in the core network and most importantly, in the air interface of UMTS, where the bottleneck is placed to a large group of users. Therefore, MBMS constitutes an efficient way to support the plethora of the emerging wireless multimedia and application services such as IP Video Conferencing and Video Streaming.

## Ευχαριστίες

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτελεί τον επίλογο των προπτυχιακών μου σπουδών του Τμήματος Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων και Δικτύων, παραρτήματος του ΤΕΙ Μεσολογγίου στην Ναύπακτο. Το περιεχόμενο της πτυχιακής μου εργασίας αποτελεί το επιστέγασμα των πολύτιμων γνώσεων που είχα την τύχη να αποκτήσω όλο αυτό το χρονικό διάστημα.

Πριν την παρουσίαση της πτυχιακής μου εργασίας αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους όσους με στήριξαν και μου συμπαραστάθηκαν σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου την συγκεκριμένη εργασία, κ. Λούβρο Σπυρίδων, καθηγητή του ΤΕΙ Ναυπάκτου.

Κατά την διάρκεια των σπουδών μου είχα την ευκαιρία να γνωρίσω καταπληκτικούς ανθρώπους, τους οποίους ευχαριστώ για τις πολύτιμες εμπειρίες που αποκτήσαμε μαζί.

Πάνω απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την αγάπη και την στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια και τον σύντροφο μου Δημήτρη για το κουράγιο, την κατανόηση και την εγκάρδια στήριξη του. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το Γιάννη και τη Χρυσούλα Σκαρτσάνη για τη εμπιστοσύνη και τη στήριξη τους.



## Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή .....	1
1.1	Δομή Πτυχιακής Εργασίας.....	2
2	Εξέλιξη Κινητών Επικοινωνιών.....	4
2.1	Δεύτερη Γενιά (2G) .....	4
2.2	Η 3Η ΓΕΝΙΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	5
2.3	Η ΓΕΝΙΑ 3,5 ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	7
2.4	Η εξέλιξη του 4G.....	9
2.5	Η τυποποιημένη διαδικασία του 3GPP .....	10
2.6	Απαιτήσεις της οποίες οφείλει να πληρεί το δίκτυο LTE .....	12
2.7	Βασικές Τεχνικές Μετάδοσης Πληροφορίας στο LTE .....	13
3	OFDM: Θεωρία και εφαρμογή.....	16
3.1	OFDM .....	18
3.2	Συγχρονισμός.....	23
3.3	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ OFDM.....	23
3.4	Πλεονεκτήματα OFDM.....	24
3.4.1	OFDMA.....	25
4	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ MIMO.....	28
4.1	Διάυλος MIMO.....	29
4.2	Κέρδος συστοιχίας, κέρδος πολυμορφίας και χωρική πολυπλεξία.....	31
4.3	Κέρδος συστοιχίας(Array Gain) .....	32
4.4	Κέρδος Πολυμορφίας ( Diversity Gain).....	32
4.5	Χωρικό κέρδος πολύπλεξης (Spatial Multiplexing Gain).....	33
4.6	Βασικές Αρχές Χωρητικότητας Διαύλου .....	35
4.6.1	Χωρητικότητα των διαύλων SISO και MIMO .....	35
4.6.2	Ανάλυση Ιδιοτιμών του Καναλιού (Eigenanalysis of channel) .....	37
4.6.3	Χωρητικότητα των διαύλων SISO και MIMO .....	39
4.6.4	Κανάλια με επιλεκτική φασματική απόκριση (Frequency selective channel).....	39



4.6.5	Αίτια της υπό-βέλτιστης χωρητικότητας (Cause of sub-optimal capacity) .....	40
4.6.6	Αποτέλεσμα μη πολλαπλών διαδρομών-Effect of no multipath.....	40
4.6.7	Αποτέλεσμα περιορισμένων σκεδαστών (Effect of limited scatterers) .....	41
4.6.8	Αποτέλεσμα της απώλειας διαδρομών κατά Ricean (Effect of Ricean fading) ....	42
4.6.9	Αποτέλεσμα φαινομένου διάδοσης οπής (Effect of keyholes) .....	42
4.6.10	Επιπτώσεις Συσχέτισης (Effect of correlation) .....	43
5	Μετρήσεις .....	46
6	Επίλογος .....	52
7	Βιβλιογραφία .....	54

## Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Η εξέλιξη των προτύπων για τα κυψελωτά κινητά δίκτυα έως το 3G.....	6
Εικόνα 2:Εξέλιξη των κυψελωτών συστημάτων .....	9
Εικόνα 3: Το 3GPP είναι μια παγκόσμια συνεργασία από έξι τοπικά SDOs .....	10
Εικόνα 4: Η δομή της ομάδας εργασίας του 3GPP .....	11
Εικόνα 5: Χρονολογική εξέλιξη κινητών δικτύων επόμενης γενιάς από το 3G έως το LTE .....	13
Εικόνα 6: Κάθε timeslot περιέχει κάποια OFDM σύμβολα, καθένα από αυτά σε διαφορετική συχνότητα .....	17
Εικόνα 7: Ο τρόπος λειτουργίας του OFDM .....	19
Εικόνα 8: Spectrum of three sub-carriers forming an OFDM signal .....	20
Εικόνα 9: Κυκλικό πρόθεμα .....	21
Εικόνα 10: Data block of an OFDM system.....	22
Εικόνα 11: OFDM multiple access scheme that exploits frequency diversity.....	26
Εικόνα 12: Η χρήση της τεχνικής OFDM η οποία χρησιμοποιεί την multi-user diversity .....	27
Εικόνα 13:Βασικό μοντέλο καναλιού .....	29
Εικόνα 14: MIMO χρησιμοποιούνται για Χωρικό κέρδος πολύπλεξης .....	34
Εικόνα 15: Παράδειγμα σύγκρισης της αύξησης της χωρητικότητας από 2*2 σύστημα MIMO πάνω σε σύστημα SISO .....	37
Εικόνα 16: Χωρητικότητα καναλιού για n συνδιασμούς καναλιών έναντι συσχέτισης.....	45

## Ακρωνύμια

CDMA	Code Division Multiple Access
CP	Cyclic Prefix
DFT	Discrete Fourier Transform
ETSI	European Telecommunication Standards Institute
FDD	Frequency Division Duplexing
FDM	Frequency Division Multiplexing
FFT	Fast Fourier Transform
GSM	Global System of Mobile communication
HSDPA	Hight Speed Downlink Packet Access
HS-DSCH	Hight Speed- Downlink Shared Channel
HSPA	Hight Speed Packet Access
HSUPA	Hight Speed Uplink Packet Access
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IP	Internet Protocol
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PARP	Peak-to-Average Power Ratio
PAR	Peak-to-Average Ratio
SC-OFDM	Single Carrier-OFDM
SDMA	Space Division Multiple Access
SIMO	Single Input Multiple Output
SINR	Signal Interference-plus-Noise Ratio

SISO	Single Input Single Output
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TCP/IP	Transmission Control Program/Internet Protocol
TDD	Time Division Duplexing
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
2G/3G/4G	2 <sup>nd</sup> /3 <sup>rd</sup> /4 <sup>th</sup> Generation
3GPP	3 <sup>rd</sup> Generation Partnership Project

## 1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες το Διαδίκτυο και τα δίκτυα κινητής επικοινωνίας υπήρξαν οι τομείς με την μεγαλύτερη ανάπτυξη στο πεδίο των τηλεπικοινωνιών. Το Διαδίκτυο, αρχικά σχεδιασμένο αποκλειστικά σαν ακαδημαϊκό εργαλείο για έρευνα και ανταλλαγή δεδομένων, έφτασε να αποτελεί καθημερινότητα για περίπου το 20% του πληθυσμού του πλανήτη[1]. Την ίδια στιγμή, ο συνολικός αριθμός των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας ξεπέρασε το φράγμα των τριών δις [2]με ολόένα και αυξητικές τάσεις. Είναι πραγματικά δύσκολο να φανταστεί κανείς τη λειτουργία της παγκόσμιας οικονομίας χωρίς τα κινητά ή το Διαδίκτυο.

Η ευρεία υιοθέτηση των τεχνολογιών αυτών επιτρέπει να φανταζόμαστε σενάρια όπου ένα κινητό τηλέφωνο εξελίσσεται σε μια πανίσχυρη τερματική συσκευή με εξελιγμένες δυνατότητες. Μάλιστα οι ραγδαίες εξελίξεις στον τεχνολογικό τομέα και η συνεχώς αυξανόμενη υπολογιστική δύναμη αυτών των συσκευών τείνει να μετατρέψει τις υποθέσεις αυτές σε πραγματικότητα [3].

Το Διαδίκτυο από την άλλη, βασισμένο σε πλήθος στιβαρών και εξαιρετικά επιτυχημένων τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων, ουσιαστικά οδηγεί τις εξελίξεις [4] σε ένα μέλλον όπου αποκλεισμός από τον φορέα αυτό θα αποτελεί πραγματικό πρόβλημα για όποιον τον υφίσταται.

Οι κινητές τηλεπικοινωνίες τώρα θεωρούνται ως αναγκαιότητα και είναι μία από τις πιο γρήγορα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες, με τα κινητά συστήματα ολόένα και να εξελίσσονται. Όταν μιλάμε για διαφορετικές αναπτύξεις εννοούμε γενιές συστημάτων.

Η πρόσφατη αύξηση της κινητής χρήσης δεδομένων και η εμφάνιση νέων εφαρμογών όπως MMOG (Multimedia Online Gaming ), mobile TV ,Web 2.0, περιεχόμενα streaming έχουν παρακινήσει το 3rd Generation Partnership Project (3GPP) για να εργαστεί πάνω στο Long Term Evolution(LTE).

Το Long Term Evolution του UMTS είναι ένα από τα πιο πρόσφατα βήματα σε μια σειρά προώθησης κινητών συστημάτων τηλεπικοινωνιών. Ο σκοπός του προγράμματος, το οποίο

ξεκίνησε τον Νοέμβριο του 2004 ,ήταν να καθορίσει την μακροπρόθεσμη εξέλιξη του Universal Mobile Telephone System του 3GPP. Το UMTS ήταν επίσης ένα 3GPP πρόγραμμα που μελέτησε διάφορες υποψήφιες τεχνολογίες πριν επιλεγεί το Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) για το Radio Access Network (RAN). Οι όροι UMTS και WCDMA είναι τώρα συμβατοί παρόλο που δεν ήταν σε καμία περίπτωση πριν επιλεγθεί αυτή η τεχνολογία. Με τον ίδιο τρόπο το πρόγραμμα LTE είναι αναπόφευκτα συνδεδεμένο με την υποκείμενη τεχνολογία η οποία περιγράφεται ως εξέλιξη του UMTS παρόλο που το LTE και το UMTS έχουν πολύ λίγα κοινά.

Το LTE έχει τεθεί σε απαιτήσεις απόδοσης που στηρίζονται στις τεχνολογίες του φυσικού επιπέδου όπως την ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)) και τα συστήματα πολλαπλής εισόδου-πολλαπλής εξόδου (Multiple-Input Multiple-Output -MIMO)), έξυπνες κεραιές για να επιτύχουν αυτούς τους στόχους.

Οι κύριοι στόχοι του LTE είναι ο υψηλότερος ρυθμός απόδοσης, χαμηλότερο κόστος και χαμηλότερο latency, να επιτρέπει ευέλικτη επέκταση φάσματος στο υπάρχον ή στο νέο φάσμα συχνότητας και να επιτρέπει την συνύπαρξη με άλλες 3GPP ράδιο τεχνολογίες πρόσβασης (Radio Access Technologies-RATs)[5].

## ***1.1 Δομή Πτυχιακής Εργασίας***

Ο σκοπός της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας είναι να καλύψει την τεχνολογία και την αρχιτεκτονική του LTE. Αρχικά γίνεται αναφορά στην εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών στα δίκτυα 2<sup>ης</sup> ,3<sup>ης</sup> ,3,5<sup>ης</sup> γενιάς. Αναφέρετε αναλυτικά η τυποποίηση διαδικασίας του 3GPP το οποίο είναι το συνεργάσιμο πρότυπο τυποποίησης που τόσο επιτυχώς παρήγαγε το σύστημα GSM έγινε η βάση για την ανάπτυξη του συστήματος UMTS. Επίσης αναφέρετε η εξέλιξη του 4G. Θα δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις απαιτήσεις του LTE και στις τεχνικές μετάδοσης πληροφορίας του.

Στα επόμενα βήματα της πτυχιακής παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του συστήματος OFDM και OFDMA, οι τεχνικές μετάδοσης καθώς και τα πλεονεκτήματά τους. Στη συνέχεια αναφέρεται η τεχνολογία MIMO (Multiple Input Multiple Output). Γίνεται ανάλυση των τεχνικών μετάδοσης

με MIMO, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και ο τρόπος χρήσης της τεχνολογίας. Επίσης γίνεται μαθηματική ανάλυση της χωρητικότητας του διαύλου MIMO. Τέλος παρουσιάζονται οι μετρήσεις που έγιναν στην Teledrom Hellas με τη χρήση του συστήματος TEMPS ενός κεραιοσυστήματος LTE με τεχνολογία MIMO.

Πιο αναλυτικά, η εργασία έχει οργανωθεί ως εξής:

Το **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζει την εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών κατά την διάρκεια των ετών καθώς και την τυποποιημένη διαδικασία του 3GPP. Επίσης αναφέρονται αναλυτικά οι απαιτήσεις του LTE καθώς και οι βασικές τεχνικές μετάδοσης πληροφορία στο LTE.

Το **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζει την αρχιτεκτονική του OFDM και του OFDMA συστήματος καθώς και η λειτουργία τους και τα πλεονεκτήματα τους.

Το **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζει την τεχνολογία MIMO αναλύοντας τις τεχνικές και την αρχιτεκτονική της. Επίσης παρουσιάζεται μαθηματική ανάλυση της χωρητικότητας του διαύλου MIMO.

Το **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζει μετρήσεις που έγιναν σε ένα κεραιοσύστημα LTE με τεχνολογία MIMO.

## **2 Εξέλιξη Κινητών Επικοινωνιών**

### **2.1 Δεύτερη Γενιά (2G)**

Η κύρια διαφοροποίηση από τα προηγούμενα συστήματα κινητών τηλεφώνων, γνωστά ως πρώτης γενιάς 1G, είναι ότι τα ραδιοσήματα που χρησιμοποιούν τα δίκτυα πρώτης γενιάς είναι αναλογικά, ενώ τα δεύτερης γενιάς δίκτυα χρησιμοποιούν ψηφιακά. Και τα δύο συστήματα χρησιμοποιούν την ψηφιακή σηματοδότηση για να συνδέσουν τους ραδιοπύργους (που επικοινωνούν με τα μικρόφωνα) με το υπόλοιπο τηλεφωνικό σύστημα.

Η χρησιμοποίηση των ψηφιακών σημάτων μεταξύ των τηλεφώνων και των πύργων αυξάνει την ικανότητα των συστημάτων με δύο βασικούς τρόπους:

Τα ψηφιακά δεδομένα φωνής μπορούν να συμπιεστούν και πολυπλεχθούν αποτελεσματικότερα από τις αναλογικές κωδικοποιήσεις φωνής μέσω της χρήσης διάφορων κωδικοποιητών και έτσι επιτρέπεται σε περισσότερες κλήσεις να συγκεντρώνονται στο ίδιο ποσό εύρους ζώνης.

Τα ψηφιακά συστήματα σχεδιάστηκαν για να εκπέμπουν τα τηλέφωνα λιγότερα ραδιοκύματα. Αυτό σήμαινε ότι οι κυψέλες θα μπορούσαν να είναι μικρότερες επομένως θα μπορούσαν στον ίδιο χώρο να τοποθετηθούν περισσότερες. Επιπρόσθετα, οι τηλεπικοινωνιακές κυψέλες και ο σχετικός εξοπλισμός έγιναν λιγότερο δαπανηρά με αποτέλεσμα δημιουργία υποδομών μεγαλύτερης ισχύος με μικρότερο κόστος.

Τα τελευταία χρόνια τα δίκτυα επικοινωνιών τρίτης γενιάς (3G) - Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) γνωρίζουν μεγάλη άνθηση και η χρήση τους έχει επεκταθεί στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες, όπως και στην Ελλάδα. Τα νέα αυτά κινητά δίκτυα αντικαθιστούν τα υπάρχοντα κινητά δίκτυα δεύτερης γενιάς και επιπλέον προσφέρουν προηγμένες υπηρεσίες στους κινητούς χρήστες.



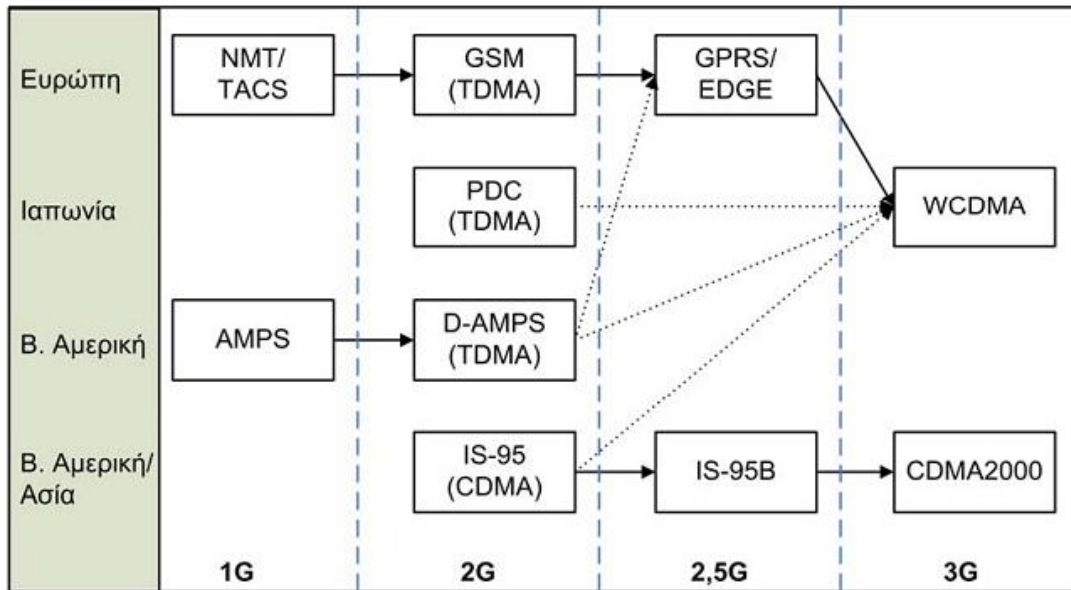
Ωστόσο, η αδήριτη ανάγκη για μεγαλύτερες (ευρυζωνικές) ταχύτητες πρόσβασης οδήγησε στην περαιτέρω ανάπτυξη των 3G δικτύων και στην υιοθέτηση νέων τεχνολογιών, με κυριότερο εκπρόσωπο τους την τεχνολογία High Speed Packet Access (HSPA). Η τεχνολογία HSPA αποτελεί τη φυσιολογική μετεξέλιξη του UMTS, η οποία πολλές φορές συναντάται και ως 3.5G ή 3G+, προκειμένου να δηλώσει την αναβάθμιση του 3G (UMTS) προτύπου. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι η τεχνολογία HSPA αναμένεται να προσφέρει τη δυνατότητα παροχής πληθώρας ευρυζωνικών υπηρεσιών, το 3rd Generation Partnership Project (3GPP), που αποτελεί τον οργανισμό που προτυποποιεί τις νέες τεχνολογίες και ορίζει τις προδιαγραφές τους, ήδη μελετά και επεξεργάζεται νέες τεχνολογίες που θα επικρατήσουν την αμέσως επόμενη δεκαετία στην αγορά των κινητών επικοινωνιών. Το νέο αυτό project αποκαλείται Long Term Evolution (LTE) και στοχεύει στην επίτευξη ακόμη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης σε συνδυασμό με την αξιοποίηση μεγαλύτερου εύρους ζώνης. Κύρια προοπτική του LTE αποτελεί η διασφάλιση της ανταγωνιστικότητας και η επικράτηση του προτύπου στο χρονικό ορίζοντα της επόμενης δεκαετίας.

## **2.2 Η 3Η ΓΕΝΙΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ**

Η γρήγορη εξέλιξη των κινητών τηλεπικοινωνιών ήταν ένα από τα αναμφισβήτητα γεγονότα της δεκαετίας του 1990. Το πρώτο εμπορικό δίκτυο GSM λειτούργησε στη Φινλανδία το 1991. Την ίδια χρονιά, το ίδρυμα ETSI ξεκινούσε την προτυποποίηση της επόμενης γενιάς δικτύων κινητών τηλεπικοινωνιών. Το σύστημα που προέκυψε από αυτή την προτυποποίηση ονομάστηκε Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). Η ανάπτυξη των κινητών δικτύων τρίτης γενιάς δεν έγινε μόνο στο ETSI. Υπήρξαν πολλοί οργανισμοί και ερευνητικά ιδρύματα, σε παγκόσμιο επίπεδο, που είχαν τον ίδιο σκοπό. Η Εικόνα 1 δείχνει σχηματικά την εξέλιξη των προτύπων για τα κυψελωτά κινητά δίκτυα μέχρι την τρίτη γενιά[10].

Ο βασικός στόχος της ανάπτυξης των κινητών δικτύων τρίτης γενιάς είναι η παροχή των κινητών υπηρεσιών «οπουδήποτε» και «κάθε στιγμή». Αυτό σημαίνει ότι ένας χρήστης δικτύων κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς μπορεί να μετακινείται οπουδήποτε και να

εξυπηρετείται ακόμα και σε περιοχές όπου δεν υπάρχει κάλυψη από συστήματα τρίτης γενιάς αλλά υπάρχουν άλλου είδους ασύρματα δίκτυα. Για την ακρίβεια, ο χρήστης θα μπορεί να εξυπηρετείται από οικιακά ασύρματα συστήματα, από άλλα κυψελωτά κινητά δίκτυα καθώς και από δορυφορικά δίκτυα.



Εικόνα 1: Η εξέλιξη των προτύπων για τα κυψελωτά κινητά δίκτυα έως το 3G

Επιπλέον, οι παρεχόμενες υπηρεσίες επεκτείνονται σε υπηρεσίες διαδικτύου και σε υπηρεσίες πολυμέσων με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (προβλέπονται ρυθμοί που ξεκινούν από τα 144 Kbps και φτάνουν ακόμα και σε ρυθμούς της τάξης των Mbps). Με τον όρο υπηρεσίες πολυμέσων αναφερόμαστε σε υπηρεσίες κατά τις οποίες υπάρχει συνδυασμός εικόνας, ήχου και κειμένου σε ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο ψηφιακό περιβάλλον. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθούν τα επικρατέστερα, προς το παρόν, συστήματα τρίτης γενιάς τα οποία είναι: το UMTS (Ευρώπη), το CDMA2000 και το NTT Docomo (Ιαπωνία) [5].

### **2.3 Η ΓΕΝΙΑ 3,5 ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ**

Με τον όρο «γενιά 3,5» (3.5G ή 3G+) αναφερόμαστε στη νέα γενιά κινητών δικτύων τα οποία εκτός από την τεχνολογία WCDMA έχουν ενσωματώσει την τεχνολογία High Speed Packet Access (HSPA). Η ορολογία HSPA αναφέρεται σε μία γενικότερη έννοια που υιοθετήθηκε από το UMTS Forum προκειμένου να τονίσει τις αναβαθμίσεις του UMTS Radio Interface στις εκδόσεις 5 και 6 του 3GPP στάνταρ και να προσδιορίσει τα δίκτυα επικοινωνιών επόμενης γενιάς.

Η HSPA αποτελεί μία νέα τεχνολογία η οποία σχεδιάστηκε προκειμένου να αυξήσει τη χωρητικότητα καταρχήν του κατερχόμενου και σε δεύτερη φάση του ανερχόμενου ασύρματου συνδέσμου για τα κινητά δίκτυα τρίτης γενιάς. Το γεγονός αυτό θεωρήθηκε απαραίτητο καθώς, στην πράξη, οι μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης για τα κινητά δίκτυα τρίτης γενιάς αποδείχθηκαν χαμηλοί για πολυμεσικές εφαρμογές. Ιδιαίτερα στην περίπτωση που θα υπήρχαν πολλοί χρήστες πολυμεσικών εφαρμογών στην ίδια κυψέλη, αυτό θα σήμαινε ραγδαία πτώση της απόδοσης του δικτύου στη συγκεκριμένη κυψέλη [6]

Το HSPA αναφέρεται σε βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν τόσο στον κατερχόμενο ασύρματο σύνδεσμο, μέσω του High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) όσο και στον ανερχόμενο, μέσω του High Speed Uplink Packet Access (HSUPA). Αξίζει να αναφερθεί ότι τόσο το HSDPA όσο και το HSUPA μπορούν να υλοποιηθούν στο ίδιο εύρος ζώνης με το UMTS (των 5 MHz), γεγονός που επιτρέπει την παράλληλη λειτουργία τόσο του HSPA όσο και του κλασσικού UMTS. Το HSDPA, προτάθηκε στην έκδοση 5 του 3GPP στάνταρ (ανακοινώθηκε το 2003 και υλοποιήθηκε το 2005) και υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης έως και 14,4 Mbps ανά χρήστη. Αναφορικά με τον ανερχόμενο ασύρματο σύνδεσμο, το HSUPA εισήχθη στην έκδοση 6 του 3GPP στάνταρ δίνοντας τη δυνατότητα υποστήριξης μέχρι και 5,8 Mbps μέσω ενός αφιερωμένου uplink καναλιού [7]

Η βασική ιδέα του HSPA είναι η προσθήκη ενός νέου τύπου ευρυζωνικού καναλιού το οποίο θα είναι βελτιστοποιημένο για πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Πρόκειται για το κανάλι High Speed – Downlink Shared Channel (HS-DSCH) το οποίο χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της

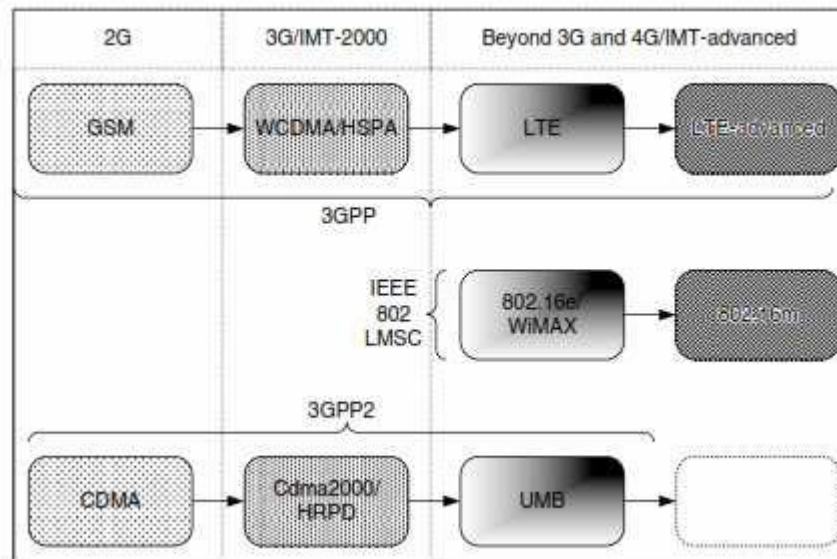
ρυθμαπόδοσης (throughput) μόνο του κατερχόμενου συνδέσμου. Στο κανάλι αυτό έχουν ενσωματωθεί διάφορες τεχνικές που αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση των δυνατοτήτων του όσον αφορά ρυθμό μετάδοσης. Προφανώς, η τεχνική HSPA δεν είναι κατάλληλη για όλα τα είδη υπηρεσιών. Για παράδειγμα, δεν παρέχει εγγυήσεις για την καθυστέρηση και συνεπώς, δεν ενδείκνυται για απαιτητικές εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Στην περίπτωση αυτή είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθούν αφιερωμένα κανάλια (όπως το Dedicated Channel). Αντίθετα, η χρήση του HSPA ενδείκνυται προκειμένου να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου σε σημεία με υψηλή κίνηση δεδομένων[8][9].

Ανάμεσα στα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας HSPA συγκαταλέγονται οι αυξημένες ταχύτητες για τους τελικούς χρήστες, η αυξημένη διαδραστικότητα των υπηρεσιών καθώς και η παροχή υψηλής χωρητικότητας του δικτύου προς όφελος κυρίως των παρόχων. Η μείωση των καθυστερήσεων μετάδοσης παράλληλα με τις αυξημένες πλέον ταχύτητες μετάδοσης στο ασύρματο μέσο μεταφράζονται στην δυνατότητα παροχής μίας μεγάλης γκάμας πολυμεσικών εφαρμογών. Κατά συνέπεια, οι κινητοί χρήστες έχουν πλέον την ικανότητα να απολαμβάνουν υπηρεσίες που μέχρι τώρα παρέχονταν μόνο σε χρήστες με ενσύρματη ευρυζωνική σύνδεση. Τέτοιες υπηρεσίες είναι η πολύ γρήγορη, ευρυζωνική σύνδεση στο διαδίκτυο, VoIP, multi-player παιχνίδια, Mobile TV, ενισχυμένη μετάδοση video/MP3 streaming, video telephony και video conferencing για κινητούς χρήστες.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ήδη μελετώνται περαιτέρω δυνατότητες αναβάθμισης της ίδιας της HSPA τεχνολογίας από το 3GPP, κατά κύριο λόγο προς τον τομέα της βελτιστοποίησης του ασύρματου μέσου μετάδοσης. όλες αυτές οι προσπάθειες αναβάθμισης προσδιορίζονται από την ορολογία HSPA+. Οι βασικές προσεγγίσεις προς την κατεύθυνση αυτή είναι η χρήση της τεχνολογίας MIMO και η χρήση 64 QAM κωδικοποίησης. Η MIMO τεχνική απαιτεί επιπρόσθετες κεραιές λήψης (συστοιχία κεραιών) καθώς και επιπλέον κεραιές μετάδοσης στους σταθμούς βάσης. Παράλληλα, η εφαρμογή 64 QAM κωδικοποίησης αναμένεται να αυξήσει σημαντικά τους ρυθμούς μετάδοσης υπό την προϋπόθεση ότι επικρατούν πολύ καλές συνθήκες μετάδοσης.

## 2.4 Η εξέλιξη του 4G

Οι αρμοδιότητες των ραδιοδιεπαφών για κινητά WiMax και UMB είναι πολύ παρόμοιες με εκείνους του LTE που δίνονται στην Εικόνα 2. Και τα τρία συστήματα υποστηρίζουν ευέλικτα εύρη ζώνης, FDD/TDD duplexing, OFDMA στην κατερχόμενη σύνδεση και σχήματα MIMO. Υπάρχουν μερικές διαφορές όπως στη ανερχόμενη σύνδεση του LTE που είναι βασισμένη στο SC-FDMA έναντι του OFDMA στα κινητά WiMax και UMB. Η απόδοση των τριών συστημάτων επομένως αναμένεται να είναι παρόμοια με μικρές διαφορές.

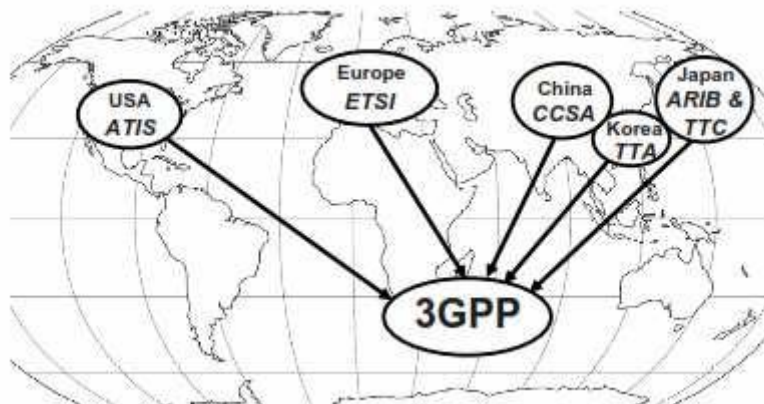


Εικόνα 2:Εξέλιξη των κυψελωτών συστημάτων

Παρόμοια με την πρωτοβουλία IMT-2000, η ομάδα εργασίας ITU-R 5D έχει εκφράσει τις απαιτήσεις για IMT-προηγμένα συστήματα. Μεταξύ των άλλων αυτές οι απαιτήσεις περιλαμβάνουν μέσους όρους ρυθμών δεδομένων κατερχόμενης σύνδεσης 100Mbit/s στο δίκτυο ευρείας περιοχής και μέχρι 1Gbit/s για τα σενάρια τοπικής πρόσβασης ή χαμηλής κινητικότητας. Επίσης στην διάσκεψη παγκόσμιων ραδιοεπικοινωνιών το 2007 (WRC- 2007), το μέγιστο ενός νέου φάσματος 428MHz προσδιορίζεται για τα IMT συστήματα που περιλαμβάνουν επίσης ένα φάσμα 136MHz κατανεμημένο σε συνολική βάση.

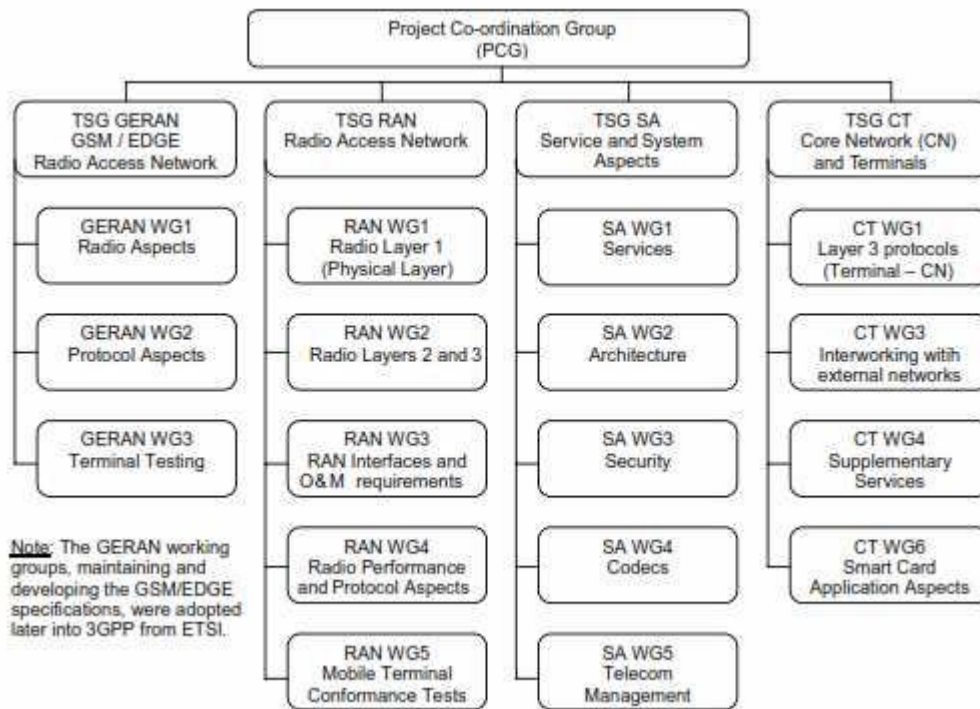
## 2.5 Η τυποποιημένη διαδικασία του 3GPP

Το συνεργάσιμο πρότυπο τυποποίησης που τόσο επιτυχώς παρήγαγε το σύστημα GSM έγινε η βάση για την ανάπτυξη του συστήματος UMTS. Προς όφελος της παραγωγής των παγκόσμιων προτύπων, η συνεργασία του UMTS και του GSM επεκτάθηκε πέρα από το ETSI για περιβάλλει τις τοπικές Οργανώσεις Ανάπτυξης Προτύπων (Standards Development Organizations (SDOs)) από την Ιαπωνία (ARIB και TTC), την Κορέα (TTA), την Βόρεια Αμερική (ATIS) και την Κίνα (CCSA), όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3: Το 3GPP είναι μια παγκόσμια συνεργασία από έξι τοπικά SDOs

Έτσι γεννήθηκε το 3GPP, το οποίο μέχρι το 2008 υπερηφανευόταν για πάνω από 300 μεμονωμένες επιχειρήσεις-μέλη. Η επιτυχής δημιουργία μιας τέτοιας μεγάλης και σύνθετης προδιαγραφής συστημάτων όπως αυτή για το UMTS ή το LTE απαιτεί ένα καλά δομημένο οργανισμό με πραγματικές εργασιακές διαδικασίες. Το 3GPP διαιρείται σε τέσσερις ομάδες τεχνικών προδιαγραφών (Technical Specification Groups-TSGs ), κάθε μια από τις οποίες αποτελείται από ένα αριθμό ομάδων εργασίας (Working Groups-WGs ) με την ευθύνη για μια συγκεκριμένη πτυχή των προδιαγραφών όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4: Η δομή της ομάδας εργασίας του 3GPP

Ένα διακριτικό χαρακτηριστικό των μεθόδων εργασίας αυτών των ομάδων είναι η με συναίνεση οδηγημένη προσέγγιση στη λήψη αποφάσεων. Αυτό διευκολύνει την ανοιχτή συζήτηση και την επαναληπτική βελτίωση των τεχνικών προσφορών, οδηγώντας συχνά στην συγχώνευση των προσφορών των πολλαπλάσιων επιχειρήσεων στην αναζήτηση για την βέλτιστη λύση. Όλα τα έγγραφα που υποβάλλονται στο 3GPP είναι διαθέσιμα δημόσια στη σελίδα του 3GPP, συμπεριλαμβανομένων των συνεισφορών από τις μεμονωμένες επιχειρήσεις, τις τεχνικές αναφορές και τις τεχνικές προδιαγραφές. Στην επίτευξη της συναίνεσης γύρω από μια τεχνολογία, τα WGs λαμβάνουν υπόψη ποικίλες εκτιμήσεις που περιλαμβάνουν αλλά που δεν περιορίζονται στην απόδοση, το κόστος εφαρμογής, την πολυπλοκότητα και τη συμβατότητα με τις προηγούμενες εκδόσεις ή επεκτάσεις.

Οι προσομοιώσεις συχνά χρησιμοποιούνται για να συγκρίνουν την απόδοση των διαφορετικών τεχνικών, ειδικά στα WGs που εστιάζουν στο φυσικό επίπεδο (air interface) και στις απαιτήσεις της απόδοσης. Αυτό απαιτεί την συναίνεση των εμπλεκόμενων για τις τιμές των παραμέτρων

προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται για την σύγκριση, με σκοπό να υλοποιηθούν τα σενάρια που θα ενδιαφέρουν τους παρόχους των δικτύων.

Η διαδικασία τυποποίησης του LTE εγκαινιάστηκε σε ένα εργαστήριο στο Τορόντο τον Νοέμβριο του 2004, όταν μια ευρεία σειρά των επιχειρήσεων που συμμετέχουν στην επιχείρηση κινητής επικοινωνίας παρουσίασαν τα οράματά τους για την μελλοντική εξέλιξη των προδιαγραφών που αναπτύσσονται στο 3GPP. Αυτά τα οράματα περιέλαβαν και τις δύο αρχικές αντιλήψεις για τις απαιτήσεις οι οποίες έπρεπε να ικανοποιηθούν και οι προτάσεις για τις κατάλληλες τεχνολογίες να ανταποκρίνονται με εκείνες τις απαιτήσεις[10].

## **2.6 Απαιτήσεις της οποίες οφείλει να πληρεί το δίκτυο LTE**

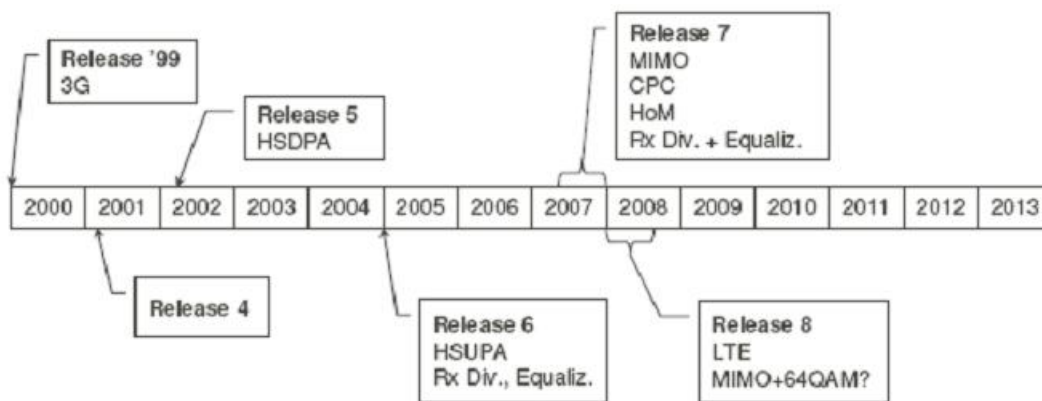
Το LTE εστιάζει αποκλειστικά στη βελτιστοποίηση υποστήριξης και μετάδοσης εφαρμογών μεταγωγής πακέτων (packet-switched), όπως είναι οι πολυμεσικές εφαρμογές. Επίσης, θέτει πολύ υψηλούς και φιλόδοξους στόχους προκειμένου να ξεπεράσει τα όρια των 14.4 Mbps και 5.8 Mbps που επιτυγχάνονται στο HSDPA και HSUPA αντίστοιχα. Οι βασικότερες απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί το πρότυπο LTE σταχυολογούνται στη συνέχεια[12][11]:

- **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 σύνδεσμο και 50 Mbps στον ανερχόμενο σύνδεσμο για εύρος ζώνης ίσο με 20 MHz.
- **Mode Λειτουργίας:** Η λειτουργία του LTE τόσο σε FDD όσο και TDD mode.
- **Throughput:** Επίτευξη 3-4 φορές μεγαλύτερου μέσου throughput χρήστη ανά MHz στον κατερχόμενο σύνδεσμο και αντίστοιχα 2-3 φορές μεγαλύτερου για τον ανερχόμενο σύνδεσμο συγκριτικά με τις εκδόσεις 6 και 7 του 3GPP στάνταρ (HSDPA και HSUPA).
- **Αποδοτικότητα φάσματος:** Επίτευξη 2-3 φορές μεγαλύτερης αποδοτικότητας φάσματος σε σχέση με την έκδοση 6 του 3GPP στάνταρ (HSDPA).



- **Καθυστέρηση:** Σημαντική μείωση της round-trip καθυστέρησης από το χρήστη έως το σταθμό βάσης στα 5ms-10ms.
- **Κινητικότητα:** Δυνατότητα βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος για χαμηλές ταχύτητες κίνησης των χρηστών (0-15 χλμ/ώρα) καθώς και δυνατότητα υποστήριξης χρηστών που κινούνται σε πολύ υψηλές ταχύτητες.
- **Διαλειτουργικότητα:** Δυνατότητα ταυτόχρονης λειτουργίας με μη-3GPP πρότυπα επικοινωνιών καθώς και με τα υπάρχοντα UTRAN/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 σε QoS υπηρεσιών όπως είναι οι VoIP εφαρμογές.

Συγκεντρωτικά, η χρονολογική εξέλιξη των 3GPP κυβελωτών προτύπων, ξεκινώντας από τα κινητά δίκτυα 3G έως και τα αντίστοιχα δίκτυα επόμενης γενιάς LTE, απεικονίζεται στην Εικόνα 5. Το πρότυπο 3G/UMTS υιοθετήθηκε αρχικά στην 3GPP Release '99 έκδοση, στην Release 5 πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή του HSDPA, στην Release 6 η εισαγωγή του HSUPA, ενώ μέσω της Release 7 φθάνουμε στο LTE που περιγράφεται και αναλύεται στην Release 8 και 9 του 3GPP[13].



Εικόνα 5: Χρονολογική εξέλιξη κινητών δικτύων επόμενης γενιάς από το 3G έως το LTE

## 2.7 Βασικές Τεχνικές Μετάδοσης Πληροφορίας στο LTE

Για την επίτευξη των παραπάνω απαιτήσεων είναι προφανές ότι το LTE πρέπει να βασιστεί σε βέλτιστες τεχνολογίες μετάδοσης πληροφορίας στο ασύρματο τμήμα του δικτύου πρόσβασης. Μία από τις κύριες τεχνολογίες αυτές που υιοθετεί το LTE είναι το OFDM. Κύριος λόγος υιοθέτησης του OFDM ως μοντέλου διαμόρφωσης για το LTE είναι η μεγάλη αντοχή που επιδεικνύει σε περιβάλλοντα εξασθένησης σήματος και παρεμβολών[14][15].

Ειδικότερα, για την περίπτωση της μετάδοσης δεδομένων στον κατερχόμενο σύνδεσμο, η OFDM τεχνολογία διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο, και είναι αυτή που προτείνεται από το 3GPP ως η πλέον κατάλληλη τεχνική. Η OFDM αποτελεί μία εξ' ολοκλήρου ψηφιακή προσέγγιση πολυπλεξίας πληροφορίας, η οποία κάνει χρήση του Fast Fourier Transform, (FFT) για να διαχωρίσει το σήμα σε μικρού εύρου ζώνης επικαλυπτόμενα κανάλια. Τα κανάλια αυτά χαρακτηρίζονται από την κοινή ιδιότητα της μεταξύ τους ορθογωνιότητας, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση φάσματος.

Παράλληλα, για τον ανερχόμενο σύνδεσμο, στο LTE προτείνεται η χρήση της τεχνολογίας Single Carrier OFDM (SC-OFDM). Στο σημείο αυτό, το 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, στο 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 το uplink, 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 στο uplink, κυρίως όταν ο χρήστης βρίσκεται κοντά στο σταθμό βάσης.

Τέλος, μια ακόμη τεχνολογία που υπόσχεται ακόμη μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, αυξημένη κάλυψη δικτύου και χωρητικότητα στο LTE είναι η MIMO τεχνική. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνολογία MIMO συνίσταται στην ύπαρξη πολλαπλών κεραιών

(κεραιοσυστημάτων) τόσο στον πομπό-σταθμό βάσης όσο και στο δέκτη-συσκευή του χρήστη. Για την περίπτωση του LTE, σε πρώτη φάση η ύπαρξη MIMO κεραιοσυστημάτων 2x2 (δύο κεραίες στο σταθμό βάσης και δύο κεραίες στη συσκευή του χρήστη) θεωρείται απαραίτητο στοιχείο για την επίτευξη υψηλής απόδοσης. Σε μεταγενέστερη φάση ανάπτυξης είναι δυνατόν να γίνει χρήση συστημάτων MIMO 4x4. Στο MIMO διακρίνουμε δύο διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας. Το Spatial Multiplexing (στο οποίο η πληροφορία διαχωρίζεται σε stream τα οποία μεταδίδονται ταυτόχρονα σε διαφορετικές κεραίες) και το Transmit Diversity [16]

### 3 OFDM: Θεωρία και εφαρμογή

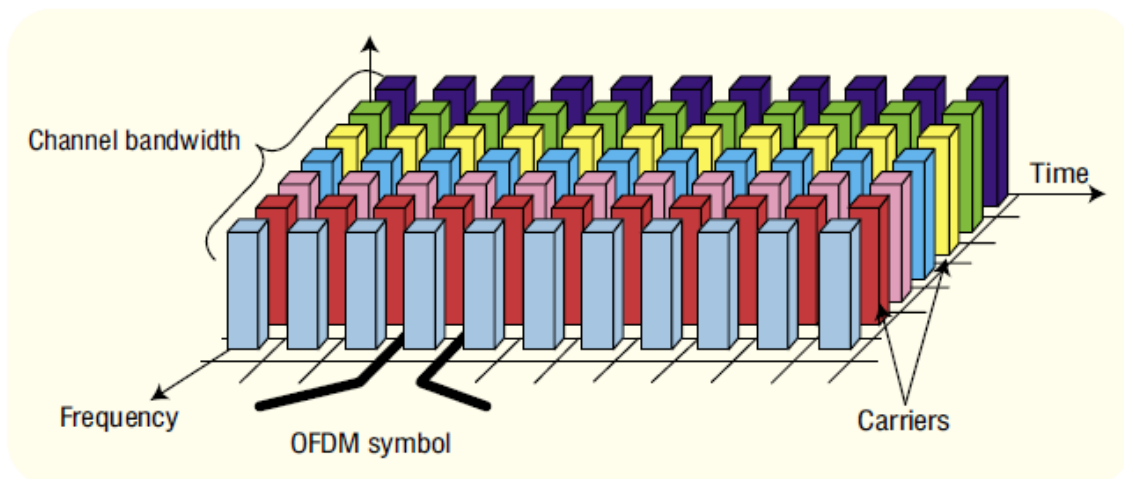
Το LTE χρησιμοποιεί OFDM για την κατερχόμενη σύνδεση, δηλαδή από το σταθμό βάσεων στο τερματικό, καθώς επίσης το OFDM καλύπτει την απαίτηση του LTE για ευελιξία φάσματος και επιτρέπει τις οικονομικά αποδοτικές λύσεις για τους ευρείς φορείς με υψηλούς ρυθμούς. Είναι μια καθιερωμένη τεχνολογία, για παράδειγμα στα πρότυπα όπως το Ινστιτούτο Ηλεκτρικών και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) 802.11a/b/g, 802.16, HiperLan-2, Video Broadcast (DVB) και Digital Audio Broadcast (DAB).

Η συχνότητα πολυπλεξίας (FDM) είναι μια τεχνολογία που μεταδίδει πολλαπλά σήματα ταυτόχρονα πάνω από ένα μονοπάτι (κανάλι) μετάδοσης, όπως ένα καλώδιο ή μια ασύρματη ζεύξη. Κάθε σήμα έχει τη δική του μοναδική γκάμα συχνοτήτων (φορέας), το οποίο διαφοροποιείται από τα δεδομένα (κειμένο, φωνή, βίντεο, κλπ). Η (OFDM) κατανέμει τα δεδομένα σε πλήθος φορέων που χωρίζονται σε φασματικά διαστήματα συγκεκριμένων συχνοτήτων[18]. Αυτός ο φασματικός διαχωρισμός παρέχει την απαιτούμενη ορθογωνιότητα που εμποδίζει τους αποδιαμορφωτές από το να δουν άλλες συχνότητες εκτός από τη δική τους. Τα οφέλη από την OFDM είναι: υψηλή φασματική απόδοση, ανθεκτικότητα σε παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων, και λιγότερη παραμόρφωση.

Λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική διασπορά (φαινόμενο σε περιβάλλοντα εντός των οποίων τα συστήματα ραδιοεπικοινωνιών που λειτουργούν όλο και περισσότερο) και η απαίτηση για μεγαλύτερο εύρος ζώνης, είναι λύσεις που βασίζονται σε δέκτες ικανούς να αντιμετωπίσουν τις επιπτώσεις των στρεβλώσεων καναλιού που είναι εξαιρετικά πολύπλοκο. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα πολύ-φέροντα συστήματα, όπως OFDM, έχουν πραγματικά πλεονεκτήματα. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην επίγεια μετάδοση, όπου το σήμα αντανακλάται από διάφορα μέρη, με αποτέλεσμα τα σήματα που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και καθιστούν πολύ δύσκολο για το δέκτη να εξαγάγει το αρχικό σήμα.[17].

Σε ψηφιακά συστήματα, οι πληροφορίες είναι σε μορφή δυαδικών ψηφίων (bits), ή ομάδες από bits ονομάζονται σύμβολα που διαφοροποιούνται στο φορέα. Όσο υψηλότερο είναι το ποσοστό της μετάδοσης των πληροφοριών, τόσο μικρότερη η διάρκεια των συμβόλων, καθιστώντας το σύστημα πιο επιρρεπές στην απώλεια πληροφοριών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι συχνά αδύνατη η ανάκτηση των πληροφοριών που διαβιβάζονται.

Με τη χρήση της τεχνικής OFDM, ένα υπό-φέρον περιέχει ένα τμήμα των πληροφοριών που μεταφέρονται σε κάθε ζώνη συχνοτήτων. Κάθε υπό-φέρουσα είναι ορθογώνια (ανεξάρτητες μεταξύ τους). Τα βασικά πολλαπλά σήματα αποστέλλονται σε διαφορετικές συχνότητες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.



**Εικόνα 6: Κάθε timeslot περιέχει κάποια OFDM σύμβολα, καθένα από αυτά σε διαφορετική συχνότητα**

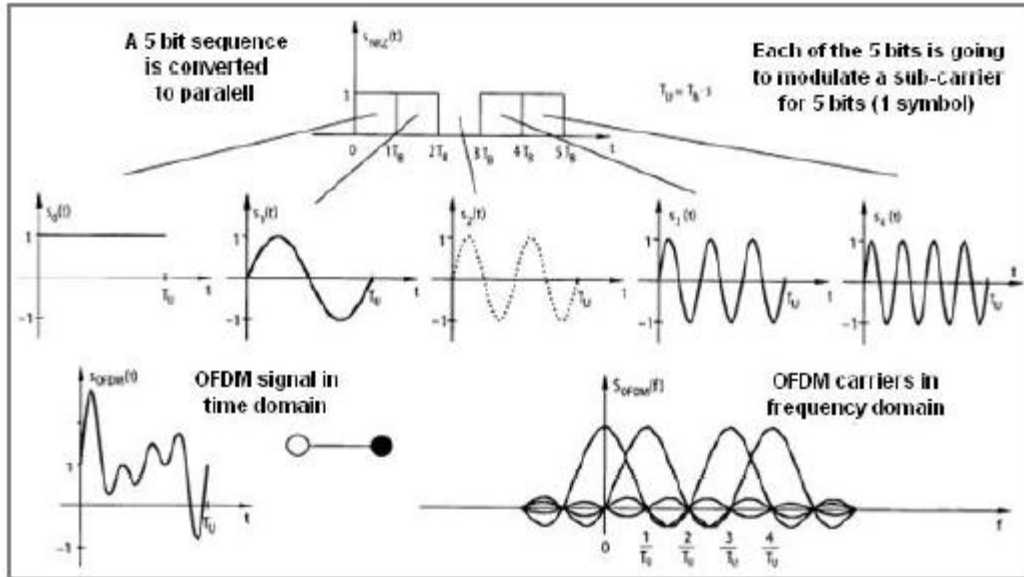
Η τεχνική OFDM μετριάζει το πρόβλημα των παρεμβολών μεταξύ των συμβόλων μέσω της διασπορας του καναλιού σε διάφορες ζώνες συχνοτήτων του ίδιου πλάτους. Οι ζώνες αυτές έχουν χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης (bit rate) από το αρχικό σήμα. Η γενιά των ορθογώνιων υπό-φερουσών αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος, αλλά το πρόβλημα αυτό επιλύεται με Αντίστροφο Διακριτό Μετασχηματισμό Fourier/ Διακριτό Μετασχηματισμό Fourier (Inverse Discrete Fourier Transform / Discrete Fourier Transform (IDFT / DFT))[17]. Παρακάτω περιγράφουμε τον τρόπο λειτουργίας της τεχνολογίας OFDM και OFDM Access

(OFDMA). Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές του OFDM, όπως διανυσματικό ή κωδικοποιημένο OFDM.

### **3.1 OFDM**

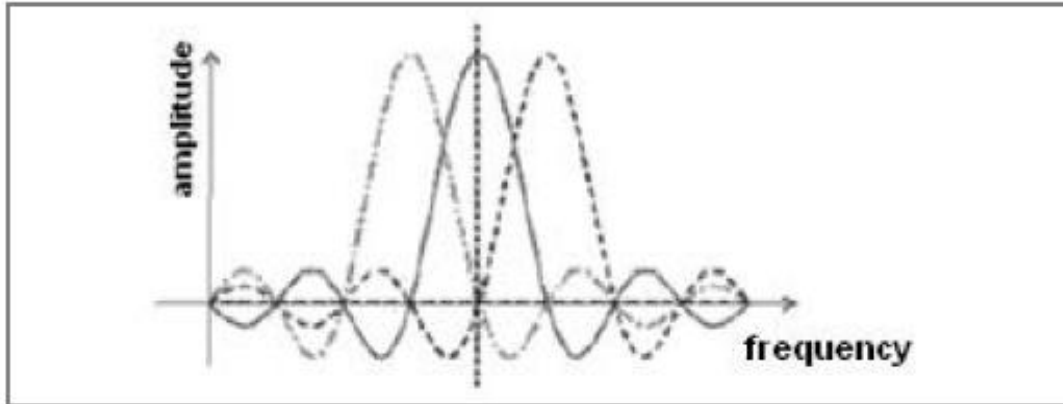
Σύμφωνα με τη θεωρία των συστημάτων και των σημάτων, τα ημιτονοειδή σήματα του μετασχηματισμού Fourier είναι ορθογώνια στο χώρο και το σήμα του μετασχηματιστικού διανύσματος μπορεί να παρουσιαστεί ως γραμμικός συνδυασμός των ορθογώνιων ημιτονοειδών. Με άλλα λόγια, ο μετασχηματισμός συσχετίζει το σήμα με κάθε μία από τις αρμονικές συναρτήσεις. Αν το σήμα έχει κάποια ενέργεια σε μια συγκεκριμένη συχνότητα, υπάρχει μια αιχμή κατά τη συσχέτιση του σήματος με το ημιτονοειδές που είναι στην ίδια συχνότητα με το σήμα.

Ο βασικός τρόπος λειτουργίας του OFDM φαίνεται στην Εικόνα 7. Ένα OFDM σύστημα παίρνει τα σύμβολα προς μετάδοση στο πεδίο της συχνότητας. Τα σύμβολα αυτά υπόκεινται σε Γρήγορο Αντίστροφο Μετασχηματισμό Fourier (Inverse Fast Fourier Transform (IFFT)), λειτουργία η οποία μετατρέπει το σήμα στο πεδίο του χρόνου. Το IFFT λειτουργεί με  $N$  ταυτόχρονα σύμβολα (όπου  $N$  είναι ο αριθμός των υπό-φερουσών του συστήματος), κάθε ένα έχει μία περίοδο  $T$  δευτερόλεπτων, παράγοντας ένα ενιαίο και μοναδικό σύμβολο OFDM. Τα βασικά στοιχεία ενός IFFT είναι  $N$  ορθογώνια ημιτονοειδή, το καθένα με διαφορετική συχνότητα. Κάθε σύμβολο λειτουργεί ως ένα μιγαδικής μορφής συντελεστής βάρους ανταποκριτή τους. Δεδομένου ότι τα σύμβολα είναι πολύπλοκα, τις τιμές τους καθορίζουν τόσο το εύρος και η φάση του ημιτονοειδούς υπό-φερουσών. Η έξοδος του IFFT είναι το άθροισμα των  $N$  ημιτονοειδών. Στο τέλος, έχουμε ένα ενιαίο OFDM σύμβολο μήκους  $N \times T$ . Το τελικό σήμα στην έξοδο του IFFT θα σταλεί στο πεδίο του χρόνου πάνω από το κανάλι μετάδοσης στο δέκτη όπου ο Γρήγορος Μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transform (FFT)) μετατρέπει το σήμα στο πεδίο της συχνότητας.



Εικόνα 7: Ο τρόπος λειτουργίας του OFDM

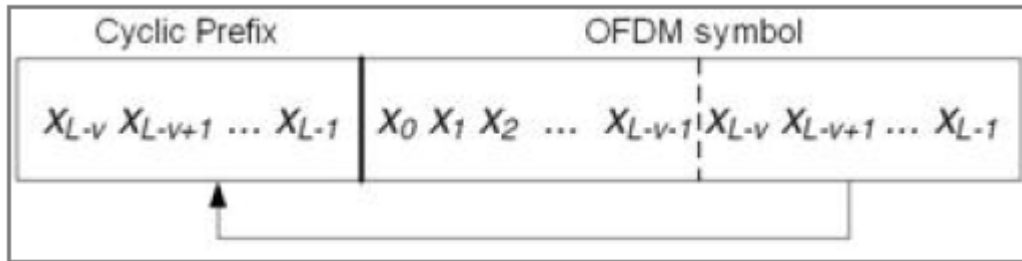
Λόγω των ιδιοτήτων του IFFT, οι υπό-διάλυτοι μορφοποιούνται σε  $\sin(x)/x$ . Για παράδειγμα, το φάσμα των τριών OFDM υπό-φερουσών απεικονίζεται στην Εικόνα 8 που ακολουθεί και δείχνει ότι το φάσμα εν μέρει αλληλεπικαλύπτεται, οδηγώντας σε μεγαλύτερη φασματική απόδοση σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνικές των πολύ-φερόντων (multi-carrier). Ωστόσο, ο διαχωρισμός των διαφόρων υπό-φερουσών δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με φιλτράρισμα στο πεδίο των συχνοτήτων, αλλά μάλλον με τεχνικές επεξεργασίας σήματος βασικής ζώνης (base band processing) οι οποίες και διατηρούν την ορθογωνιότητα των υπό-φερουσών. Η ιδιότητα αυτή είναι επίσης εμφανής στην παρακάτω εικόνα, όπου το μέγιστο πλάτος μίας υπό-φέρουσας επιτυγχάνεται όταν το γειτονικό υπό-φέρον έχει μηδενικό πλάτος.



Εικόνα 8: Spectrum of three sub-carriers forming an OFDM signal

Σε ένα σύστημα OFDM σε ένα περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών, η παρεμβολή μεταξύ των συμβόλων μπορεί να συμβεί στο λαμβανόμενο OFDM σύμβολο το οποίο μπορεί να στρεβλωθεί εξαιτίας του προηγούμενου σύμβολο που διαβιβαζόταν. Ενώ σε ένα ενιαίο σύστημα μεταφοράς υπάρχουν  $R$  σύμβολα ανά δευτερόλεπτο, σε ένα OFDM σύστημα, υπάρχουν  $N$  υπό-φέρουσες, καθένα με τα  $R/M$  σύμβολα ανά δευτερόλεπτο. Δεδομένου ότι ο ρυθμός μειώνεται κατά ένα συντελεστή  $N$ , την περίοδο του OFDM συμβόλου αυξάνεται κατά ένα συντελεστή  $N$ . Ωστόσο, το μήκος του OFDM συμβόλου μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το μήκος του καναλιού στην οποία περίπτωση η αρχή του OFDM συμβόλου θα αλλοιωθεί από το προηγούμενο σύμβολο που διαβιβαζόταν. Για την αποφυγή των επιπτώσεων των πολλαπλών αλλοιώσεων, ένα χρονικό διάστημα προστασίας παρέχεται μεταξύ των συμβόλων – συνήθως χρησιμοποιούν ένα κυκλικό πρόθεμα (CP), στο οποίο στο τέλος το σύμβολο αναπαράγεται κατά την έναρξη κάθε σύμβολου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 9.





Εικόνα 9: Κυκλικό πρόθεμα

Η προσθήκη ενός μεγάλου διαστήματος CP είναι αποτελεσματική στην αντιμετώπιση των επιπτώσεων των πολλαπλών διαδρομών, αλλά, από την άλλη πλευρά, αυτό οδηγεί σε σημαντική απώλεια της ισχύς. Υπάρχει λοιπόν μια ισορροπία που πρέπει να επιτευχθεί για την επίτευξη της βέλτιστης χρήσης των CP.

Αν η μέγιστη καθυστέρηση έχει  $\nu$  διάρκεια, προσθέτοντας μια ζώνη προστασίας, διάρκειας τουλάχιστον  $\nu + 1$  θα εξασφαλίσει ότι κάθε OFDM σύμβολο είναι ανεξάρτητο από το προηγούμενο και το επόμενο σύμβολο. Ένα σύμβολο του OFDM χρόνου μπορεί να αναπαρασταθεί ως μια σειρά μήκους  $L$  ως εξής:

$$X = [X_0, X_1, \dots, X_{L-1}]$$

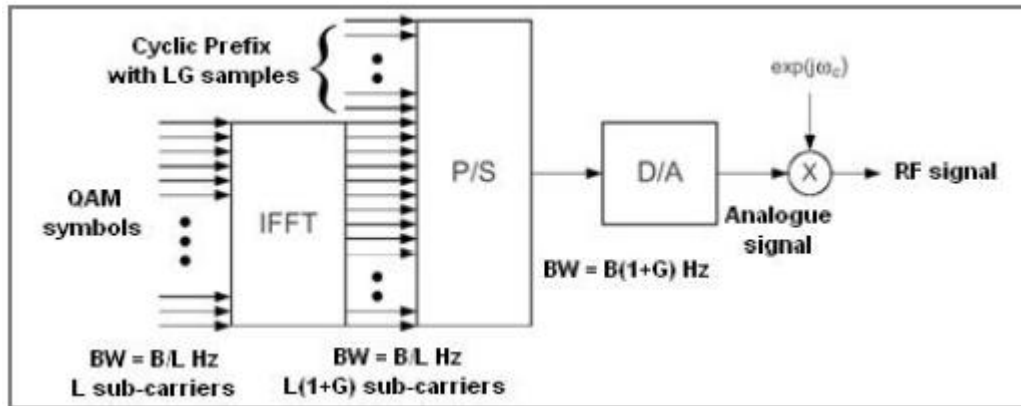
Μετά τη χρησιμοποίηση της CP η σειρά θα γίνει:

$$X = [X_{L-\nu}, X_{L-\nu+1}, \dots, X_{L-1}, X_0, X_1, \dots, X_{L-1}]$$

Η έξοδος του καναλιού είναι  $H * X$ , όπου  $H$  είναι ένα διάνυσμα μήκους  $\nu + 1$  που προκύπτει από κρουστική απόκριση του καναλιού κατά τη διάρκεια του OFDM συμβόλου και το  $*$  αντιπροσωπεύει την συνέλιξη μεταξύ  $H$  και  $X$ .  $H * X$  έχει  $(L + \nu) + (\nu + 1) - 1$  δείγματα, όπου τα πρώτα δείγματα  $\nu$  είναι από το προηγούμενο OFDM σύμβολο, έτσι ώστε να απορριφθούν και τα τελευταία δείγματα από το CP. Στο τέλος τα  $L$  δείγματα που παραμένουν αντιστοιχούν ακριβώς με τα στοιχεία του OFDM συμβόλου. Ωστόσο, αυτό δημιουργεί ένα σοβαρό πρόβλημα σε αυτό το εύρος ζώνης, θα αυξηθεί από  $B$  έως  $(L + \nu / L) B$  που οδηγεί σε

απώλειες. Οι απώλειες προέκυψαν από  $\nu/L$ , όπου  $L$  είναι το μέγεθος του FFT που χρησιμοποιείται (τυπικές τιμές είναι 128, 256, 1024 ή 2048). Όσο υψηλότερη είναι η τιμή, τόσο πιο αποτελεσματικό είναι το OFDM σύστημα, ενώ μεγαλύτερο εύρος ζώνης απαιτείται για να διατηρηθεί ο ρυθμός bit.

Μετά την εισαγωγή ενός διαστήματος προστασίας κατά την μετατροπή από παράλληλη σε σειριακή (P / S) στον πομπό με CPs, οι προστατευτικές ζώνες (και μαζί τους τα κυκλικά προθέματα) αφαιρούνται στο δέκτη, πριν από την μετατροπή τους με επεξεργασία σειριακή σε παράλληλη (S / P). Η έξοδος της μετατροπής του S / P του δέκτη υπόκεινται στη συνέχεια με τη λειτουργία DFT. Η διαδικασία μπορεί καλύτερα να γίνει κατανοητή εξετάζοντας, την Εικόνα 10, ένα μπλοκ δεδομένων από ένα σύστημα OFDM.



Εικόνα 10: Data block of an OFDM system

Οι  $L$  υπό-φέρουσες παρουσιάζονται παράλληλα στη λειτουργική μονάδα IFFT όπου μετατρέπονται σε πεδίο του χρόνου. Μετά από αυτό,  $L$  CPs μεγέθους  $G$  (LG συνολικά δείγματα) προστίθενται στην κάθε μία. Στη συνέχεια ζήτησε από το P / S μετατροπή. Ο ρυθμός μετάδοσης είναι:

$$R = \frac{B \log_2(M)}{L (1+G)}$$

Κάθε μια από τις  $L$  υπό-φέρουσες με εύρος ζώνης  $B/L$  έχει  $\log_2(M)$  bits δεδομένων. Η μείωση του ρυθμού μετάδοσης κατά  $1/(1+G)$ , οφείλεται στο τιμήμα που οφείλουμε να πληρώσουμε λόγω χρήσης διαστήματος ασφαλείας CP. Τέλος, πραγματοποιείται η μετατροπή από ψηφιακό σε αναλογικό και η ακολουθία των δεδομένων είναι αυξημένη στις ράδιο-συχνότητες. Ο OFDM δέκτης εκτελεί την ίδια ακολουθία των λειτουργιών του πομπού, αλλά με την αντίστροφη σειρά.

Αν και OFDM είναι μια πολύπλοκη τεχνολογία, προηγουμένως περιέγραψε τα βασικά στοιχεία του τρόπου λειτουργίας της. Παρ'όλα αυτά, είναι χρήσιμο να γίνει κατανοητό πώς η διαδικασία συγχρονισμού λειτουργεί και να εκτιμήσουν τις βασικές μελέτες του OFDM σχεδιασμού.

### 3.2 Συγχρονισμός

Η αποδιαμόρφωση των OFDM συμβόλων περιλαμβάνει δύο τύπους συγχρονισμού:

- **Χρονικός συγχρονισμός** - Η χρονική αντιστάθμιση των συμβόλων δεν είναι πολύ επιζήμια για το OFDM, έτσι ώστε η χρονικές απαιτήσεις συγχρονισμού είναι χαλαρές.
- **Συγχρονισμός στο πεδίο των συχνοτήτων** - Οι απαιτήσεις για συγχρονισμό στο πεδίο της συχνότητας είναι πολύ πιο άκαμπτες σε σχέση με το πεδίο του χρόνου λόγω της βασικής απαίτησης ορθογωνιότητας.

### 3.3 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ OFDM

Ένα από τα προβλήματα του OFDM είναι ότι ένα σύστημα με πολλές υπό-φέρουσες θα έχει υψηλό (Peak-to-Average Power Ratio (PAPR)). Αυτό δυσχεραίνει σε μεγάλο βαθμό τη μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό και αντίστροφα, για την επιβολή περιορισμών στους ενισχυτές ισχύος. Το υψηλό PAPR παρουσιάζεται επειδή, στο πεδίο του χρόνου, το σήμα είναι το άθροισμα του συνόλου των σημάτων από πολλές υπό-φέρουσες και η τιμή της θα διαφέρει, αν η τιμή αιχμής είναι πολύ υψηλότερη από τον μέσο όρο. Αυτό και άλλοι παράγοντες που αναφέρονται παρακάτω πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος που βασίζεται σε OFDM:

- **Διαθεσιμότητα εύρους ζώνης** - όσο μεγαλύτερο εύρος ζώνης, τόσο περισσότερους υπό-φορείς είναι δυνατόν να φιλοξενήσει με ένα λογικό-reasonable CP,
- **Ρυθμός μετάδοσης** - Το σύστημα πρέπει να είναι σε θέση να προσφέρει τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης,
- **Καθυστέρηση** - Η μέγιστη καθυστέρηση πρέπει να είναι γνωστή εκ των προτέρων, προκειμένου να καθοριστεί η κατάλληλη τιμή του CP,
- **Αριθμός των υπό-φερουσών** - Όσο περισσότερες, τόσο καλύτερα για την καταπολέμηση των επιπτώσεων των πολλαπλών διαδρομών. Ωστόσο, όσο περισσότερες, τόσο πιο δύσκολο θα είναι ο συγχρονισμός στο δέκτη,
- **Διάρκεια του συμβόλου και το μήκος του CP** - επιλογή των κατάλληλων τιμών για να αποφευχθεί η μείωση του εύρους ζώνης,
- **Προώθηση κωδικοποίησης για τη διόρθωση σφαλμάτων** -Για την αποφυγή σφαλμάτων.

### 3.4 Πλεονεκτήματα OFDM

Τα πλεονεκτήματα με χρήση OFDM τεχνικής όπως αναφέραμε είναι πολλαπλά όπως :

- **Μειωμένη πολυπλοκότητα** - Το OFDM μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί με τη χρήση FFT / IFFT, καθώς και οι απαιτήσεις επεξεργασίας να αυξηθούν μόνον ελαφρώς ταχύτερα από ό, τι η γραμμική ταχύτητα επεξεργασίας των δεδομένων.
- **Αξιοποίηση της διαφορετικής συχνότητας** – Το OFDM διευκολύνει την κωδικοποίηση και (interleaving) από την τοποθέτηση δεδομένων σε μη συνεχόμενο τρόπο που χρησιμοποιούν οι υπό-φέρουσες στο πεδίο της συχνότητας παρέχοντας έτσι ανθεκτικότητα σε σφάλματα μετάδοσης.
- **Αξιοποίηση σε πολλαπλά συστήματα πρόσβασης** – Το OFDM μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πολλαπλάσιο σύστημα πρόσβασης στο οποίο οι διάφορες επιμέρους υπό-φέρουσες κατανομούνται σε πολλαπλούς χρήστες (OFDMA).
- **Ανθεκτικότητα έναντι παρεμβολών στενής ζώνης** – Το OFDM είναι σχετικά ανθεκτικό στις παρεμβολές της στενής ζώνης (το εύρος ζώνης δεν υπερβαίνει σημαντικά

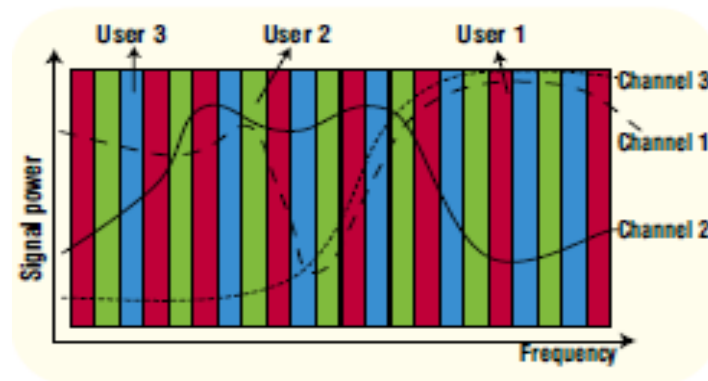
το εύρος ζώνης συνοχής του καναλιού), δεδομένου ότι μια τέτοια παρέμβαση επηρεάζει μόνο ένα μικρό μέρος από τις υπό-φέρουσες.

### **3.4.1 OFDMA**

Όπως προαναφέρθηκε, στις ιδιότητες του OFDM η ανθεκτικότητα των πολλαπλών διαδρομών μπορεί επίσης να αξιοποιηθεί για πολλαπλή πρόσβαση με αποτέλεσμα το OFDMA. Σε αντίθεση με το συμβατικό OFDM, όπου όλες οι υπό-φέρουσες έχουν ανατεθεί σε έναν μόνο χρήστη, στο OFDMA οι υπό-φέρουσες χωρίζονται μεταξύ πολλών χρηστών. Τα κύρια επιχειρήματα υπέρ της OFDMA είναι ότι επιτρέπει την τεχνική multi-user diversity[19].

Όπως και με το OFDM, για κάθε χρονοθυρίδα (timeslot) υπάρχει ένα αντίστοιχο OFDM σύμβολο, το οποίο με τη σειρά του αντιστοιχεί σε ένα σύνολο ορθογωνίων υπό-φερουσών. Τώρα, όμως, κάθε υπό-φέρουσα μπορεί να ανατεθεί σε ένα διαφορετικό χρήστη με πολλούς χρήστες που υποστηρίζονται σε μια χρονοθυρίδα (timeslot). Αν και εννοιολογικά απλό, το OFDMA έχει τις λεπτομέρειες εφαρμογής που αξίζουν ιδιαίτερης προσοχής, όπως οι στρατηγικές για την κατανομή των υπό-φερουσών. Οι υπό-φέρουσες μπορούν να χωριστούν σε διάφορες ομάδες των υπό-φερουσών (ή υπό-διάυλοι). Οι υπό-διάυλοι μπορούν να αποτελούνται από συνεχόμενα ή να διανεμηθούν σε υπό-φέρουσες. Απαντώντας σε ερωτήσεις όπως "πώς να αναθέσετε τα υπό-κανάλια στους χρήστες;" ή "ποια κριτήρια χρησιμοποιεί;" είναι κρίσιμα για την απόδοση του συστήματος.

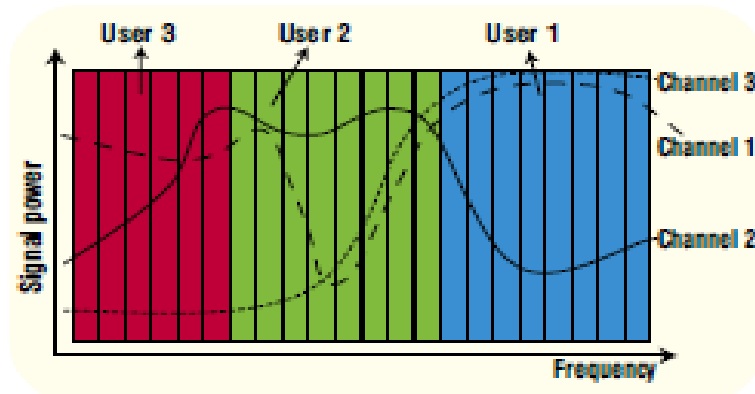
Οι υπό-διάυλοι των διατεταγμένων υπό-φερουσών επωφελούνται από την πολυμορφία της συχνότητας που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε κινητές εφαρμογές. Η Εικόνα 11 παρουσιάζει αυτό το είδος σεναρίου για την κατανομή του σε μόνο τρεις χρήστες. Οι υπό-φέρουσες του κάθε χρήστη είναι διασκορπισμένες σε όλο το φάσμα. Υπάρχουν υπό-φέρουσες που διατίθενται για τους τομείς στους οποίους η απόκριση συχνότητας του καναλιού είναι χαμηλή, αλλά υπάρχουν και άλλες στις οποίες η λειτουργία μεταφοράς είναι καλύτερη. Σε γενικές γραμμές, οι συνεχόμενοι υπό-διάυλοι είναι πιο κατάλληλα για τις σταθερές εφαρμογές ή με χαμηλή κινητικότητα[17].



Εικόνα 11: OFDM multiple access scheme that exploits frequency diversity

Δεδομένου ότι όλοι οι χρήστες έχουν μια συγκεκριμένη θέση, όλες οι κρουστικές αποκρίσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικούς χρήστες θα είναι διαφορετικές. Το OFDMA εκμεταλλεύεται αυτό με την απόδοση των υπό-φερουσών προς τους χρήστες στις συχνότητες, όπου η συνάρτηση μεταφοράς του καναλιού είναι πιο ευνοϊκή. Ακόμη και έτσι, κάποια γνώση είναι απαραίτητη για τη συνάρτηση μεταφοράς του καναλιού, αλλά και για τους αλγόριθμους που μπορούν να τροποποιήσουν την κατανομή των υπό-φερουσών με αποτέλεσμα την αυξημένη πολυπλοκότητα του υλικού (hardware).

Ο τρόπος λειτουργίας του OFDMA φαίνεται στην Εικόνα 12, που αντιπροσωπεύει ένα σύστημα με τρεις χρήστες. Το μπλοκ των υπό-φερουσών στην αριστερή πλευρά έχει εκχωρηθεί στο χρήστη 1, το μεσαίο μπλοκ προς το χρήστη 2 και το αντιστοιχό στο χρήστη 3. Σημειώστε ότι, αν και το κανάλι 1 έχει το μέγιστο στη δεξιά πλευρά το μπλοκ των υπό-φερουσών, αυτό το κανάλι βρίσκεται στον αναμεταδότη χρήστη 1, διότι το κανάλι 3 είναι χειρότερο στο μπλοκ της αριστερής πλευράς όταν το κανάλι 1 εξακολουθεί να είναι αποδεκτό. Το πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας στο OFDMA είναι ότι πολλοί χρήστες μπορούν να κάνουν λήψη / αποστολή ταυτοχρόνως με τη συνάρτηση μεταφοράς του καναλιού βελτιστοποιημένη για κάθε συνδυασμό των χρηστών. Στην πραγματικότητα, η ύπαρξη πολλών χρηστών μπορεί να προσφέρει σημαντικά κέρδη στη συνολική χωρητικότητα του συστήματος αν το σύστημα είναι προγραμματισμένο να δίνει προτεραιότητα στους χρήστες των οποίων τα υπό-κανάλια μεγιστοποιούν το λαμβανόμενο σήμα σε Interference - plus - Noise Ratio (SINR).



Εικόνα 12: Η χρήση της τεχνικής OFDM η οποία χρησιμοποιεί την multi-user diversity

Υπάρχουν αρκετοί αλγόριθμοι για την κατανομή των υπό-φερουσών (scheduling algorithms). Κάποιοι προσπαθούν να βελτιώσουν την ικανότητα του συστήματος τυφλά δίνοντας προτεραιότητα στο χρήστη με το καλύτερο κανάλι αν και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καταστάσεις 'πεινας'. Άλλοι προσπαθούν να είναι όσο το δυνατό δίκαιοι με την ελαχιστοποίηση του μέγιστου χρόνου αναμονής ή αναζητώντας τον καλύτερο συμβιβασμό μεταξύ δίκαιης διανομής και της απόδοσης του ρυθμού μετάδοσης. Ο αλγόριθμος κατανομής συνδέεται συχνά με την επιλογή της διαμόρφωσης και κωδικοποίησης με την υψηλότερη ταχύτητα που μπορούν να υποστηριχθούν από το SINR του δέκτη, έτσι ώστε κάθε δέκτης να έχει την καλύτερη δυνατή ταχύτητα.

## 4 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ MIMO

Κεντρικό ρόλο στο LTE είναι η έννοια των τεχνικών πολλαπλών κεραιών, τα οποία χρησιμοποιούνται για την αύξηση της εμβέλειας και της χωρητικότητας του φυσικού επιπέδου. Προσθέτοντας περισσότερες κεραιές σε ένα ράδιο σύστημα δίνει τη δυνατότητα βελτίωσης των επιδόσεων, διότι τα εκπεμπόμενα σήματα θα λάβουν διαφορετικά φυσικά μονοπάτια.

Τα συστήματα MIMO (Multiple Input Multiple Output) [21] πολλαπλής εισόδου και πολλαπλής εξόδου δεδομένων, όπου περισσότερες από μια κεραιές είναι διαθέσιμες στο κάθε άκρο της σύνδεσης μετάδοσης έχει γίνει ένα εξαιρετικά ερευνημένο πεδίο από τότε που η καινοτόμος προκαταρκτική εργασία κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του ενενήντα έδειξε ότι μεγάλες αυξήσεις στην χωρητικότητα πάνω από το όριο Shannon ήταν διαθέσιμες χωρίς αύξηση στην ισχύ ή στην ευρύτητα της ζώνης[21][20].

Τα συστήματα SIMO (Single Input Multiple Output) [22] μονής εισόδου και πολλαπλής εξόδου δεδομένων και τα συστήματα MISO (Multiple Input Single Output) πολλαπλής εισόδου και μονής εξόδου δεδομένων έχουν χρησιμοποιηθεί στα κινητά μέσα επικοινωνίας για πολλά χρόνια για να προσφέρουν ποικιλία συστοιχίας. Επιπροσθέτως η λήψη και η εκπομπή από πολλαπλές κεραιές (γνωστές ως “έξυπνες κεραιές”) έχουν χρησιμοποιηθεί για να μειώσουν τις παρεμβολές σε ένα περιβάλλον περιορισμένης κυτταρικής κάλυψης και για καταμερισμό χώρου πολλαπλής πρόσβασης (SDMA) παρέχοντας αύξηση γραμμών προς τα ζητούμενα κινητά τηλέφωνα και κατάργηση γραμμών για μη επιθυμητές εκροές. Όμως αυτή η απαίτηση δεν είναι πάντα διαθέσιμη και εφικτή σε ένα περιβάλλον διάσπαρτο με εισερχόμενα μονοπάτια που φτάνουν με σημαντική καθυστέρηση καθώς και με γωνιακές διαχύσεις διάδοσης στο χώρο-(spatial angular spreads)[20].

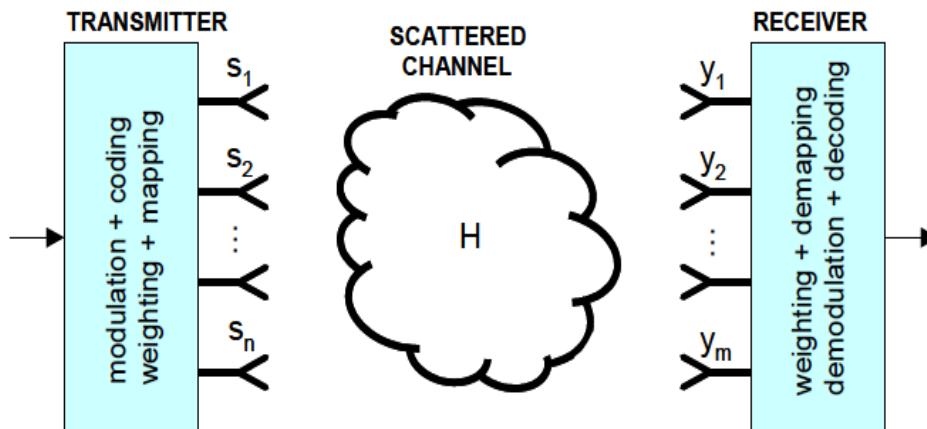
Η τεχνολογία MIMO μπορεί να παρέχει αυξημένη πολυμορφία και κέρδος συστοιχίας που προηγουμένως σχετιζόταν με τα συστήματα SIMO και MISO αλλά επίσης προσθέτει μία καινούργια διάσταση στην αύξηση χωρητικότητας μέσω της χωρικής πολύπλεξης (spatial



multiplexing), όπου ένα εξαιρετικά διάσπαρτο-(scattered) (NLOS) περιβάλλον είναι όφελος αντί για εμπόδιο. Εδώ, διαφορετικά δεδομένα μεταδίδονται ταυτόχρονα από κάθε στοιχείο κεραίας στον ίδιο χρόνο και συχνότητα. Προηγμένοι αλγόριθμοι συσκευών λήψεων είναι ικανοί να διαχωρίζουν κάθε διάυλο επειδή το αραιό περιβάλλον γίνεται αιτία αυτοί οι διάυλοι να είναι εν μέρει ορθογώνια, αυτή η ορθογωνικότητα είναι μια τυχαία μεταβλητή καθώς οι παράμετροι των διαύλων είναι ευμετάβλητοι και γι αυτό το λόγο η χωρητικότητα είναι μία επίσης τυχαία μεταβλητή.

#### 4.1 Δίαυλος MIMO

Για να εξηγήσουμε την αρχή του MIMO, αρχίζουμε με ένα παράδειγμα ενός χρήστη σε ένα frequency-flat κανάλι απόκρισης με  $n$  κεραίες εκπομπής και  $m$  κεραίες λήψης όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 13)[23]:



Εικόνα 13:Βασικό μοντέλο καναλιού

Η σχέση εισόδου-εξόδου δίνεται από:

$$y = H \cdot s + w$$

Όπου το  $n \times 1$  διάνυσμα μεταφοράς είναι  $s = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_n]^T$ , ο  $m \times n$  διάυλος μεταφοράς είναι:

$$\mathbf{H} \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1} & h_{m2} & \dots & h_{mn} \end{bmatrix}$$

το  $m \times 1$  το διάνυσμα λήψης δίνεται από το  $y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_m]^T$ , και το  $m \times 1$  διάνυσμα θορύβου δίνεται από το  $w = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_m]^T$ . Η ωφέλιμη χωρητικότητα, βασίζεται πολύ στην μεταβολή του  $\mathbf{H}$ , τον διάλο MIMO και επιπροσθέτως στον αριθμό των κεραιών εκπομπής και λήψης και το SNR.

Στον τομέα του χρόνου, η έξοδος από ένα σύνδεσμο SISO μπορεί να εκφραστεί ως έλικας εισόδου δεδομένων και δίαυλου (ελαττώνοντας την συμβολή του θορύβου για διαύγεια (clarity)).

$$y(t) = h(\tau, t) * s(t) = \int_0^{\tau_{\max}} h(\tau, t) s(t - \tau) dt$$

Σε προσομοίωση υπολογιστή, είναι βολικό να δουλεύουμε με ένα δειγματοληπτικό σύστημα και αυτό γίνεται:

$$y[k] = \sum_l h[k - l] s[l]$$

Όπου το  $s[l]$  ( $l = 0, 1, 2, \dots$ ) είναι τα στοιχεία που εκπέμπονται  $h[l]$  ( $l = 0, 1, 2, \dots, L - 1$ ) είναι δίαυλος και  $L$  είναι το μήκος του δίαυλου που μετριέται σε δειγματοληπτικές περιόδους. Το λαμβανόμενο δείγμα σήματος είναι συνεπώς:

$$y[k] = [h[L-1] \dots h[1]h[0]] \begin{bmatrix} s[k-L+1] \\ \vdots \\ s[k-1] \\ s[k] \end{bmatrix}$$

Στην περίπτωση MIMO απεικονίζουμε τον διάυλο με ένα (n x m) δομή-matrix  $\mathbf{H}[k]$  κι έτσι:

$$y[k] = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{m1} & \dots & h_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1[k-L+1] \\ \vdots \\ s_1[k] \\ \vdots \\ s_n[k-L+1] \\ \vdots \\ s_n[k-1] \\ s_n[k] \end{bmatrix}$$

όπου είναι το (m by 1) διάνυσμα λήψης και το διάνυσμα διάυλου δίνεται από:

$$h_{ij} = [h_{ij}[L-1] \dots h_{ij}[0]]$$

#### 4.2 Κέρδος συστοιχίας, κέρδος πολυμορφίας και χωρική πολυπλεξία

Οι διάυλοι MIMO προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους διαύλους SISO όπως κέρδος συστοιχίας, κέρδος πολυμορφίας και κέρδος πολυπλεξίας. Αν και τα συστήματα SIMO και MISO μπορούν να προσφέρουν αύξηση γραμμών και αύξηση ποικιλίας, μόνο τα MIMO μπορούν να προσφέρουν κέρδος πολυπλεξίας με την συσχετιζόμενη αύξηση τους στην χωρητικότητα πέρα από το όριο Shannon. Η κωδικοποίηση του (space-time) και οι αλγόριθμοι

λήψης μπορούν να συμβιβάσουν αυτές τις αυξήσεις διατηρώντας επαρκή bit-error-rate πάντα σε ένα σύστημα περιορισμένων θορύβων και παρεμβολών, αλλά μεγιστοποιώντας το throughput σε ευνοϊκές συνθήκες. Βελτιστοποιώντας τον συμβιβασμό ανάμεσα στο κέρδος συστοιχίας, κέρδος πολυμορφίας και στο κέρδος πολυπλεξίας είναι μία κατά πολύ ενεργή περιοχή έρευνας και αρχίζει να αποκτά δύναμη στην τυποποίηση για κινητές επικοινωνίες, εσωτερικής ασύρματης πρόσβασης.

### 4.3 Κέρδος συστοιχίας (Array Gain)

Το κέρδος συστοιχίας έχει ερευνηθεί πολύ κατά την διάρκεια των τελευταίων δεκαπέντε ετών υπό τον τίτλο “έξυπνες κεραιές” ή “προσαρμοστικές (adaptive) κεραιές”. Σε ένα κυτταρικό περιβάλλον οι έξυπνες κεραιές προσφέρουν αυξημένη εμβέλεια, μειωμένες παρεμβολές και για αυτό το λόγο αυξημένη χωρητικότητα, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στις μπαταρίες των κινητών λόγω της μειωμένης δύναμης εκπομπής, μειωμένη διαυλική επιβράδυνση εξάπλωσης και μειωμένο μέσο όρο ανθρώπινης έκθεσης στην εκβολή ακτινοβολίας. Στην τεχνική spatial filtering για μείωση παρεμβολών (SFIR), βάρη εφαρμόζονται σε κάθε κεραία για να κατευθύνουν την ακτίνα προς το επιθυμητό κινητό και να καταργήσουν τις παρεμβολές και έχουν ως αποτέλεσμα την μία επιθυμητή έξοδο[24].

### 4.4 Κέρδος Πολυμορφίας ( Diversity Gain)

Ένα σύστημα SISO σε ένα διάυλο Rayleigh μπορεί να αντιμετωπίσει  $-40dB$  κάτω από τον μέσο όρο εξασθένησης με 0.01% πιθανότητα, να αυξηθεί στο  $-20dB$  εξασθένηση με 1% πιθανότητα. Τεχνικές ποικιλίας χρόνου, ποικιλίας συχνότητας ή ποικιλίας χώρου συχνά χρησιμοποιούνται για να μειώσουν πολύ την πιθανότητα μιας έντονης εξασθένησης  $10dB$  αύξησης ποικιλία. Μπορούν να επιτευχθούν για διπλή χωρητικότητα στην πιθανότητα 1% εξασθένησης αυξάνοντας το βάθος εξασθένησης έως  $10dB$ .

Στη πολυμορφία του χρόνου τα δεδομένα εκπέμπονται μετά από μία καθυστέρηση συνοχής χρόνου του δίαυλου τουλάχιστον (συνεπώς είναι ένας μη συσχετισμένος δίαυλος). Ωστόσο, αυτό μειώνει το ποσοστό των δεδομένων καθώς στέλνονται αντίγραφα των δεδομένων.

Στην πολυμορφία συχνότητας, τα δεδομένα εκπέμπονται ταυτόχρονα σε διαφορετικές συχνότητες τουλάχιστον η συνοχή εύρους ζώνης χωριστά (συνεπώς εξασφαλίζοντας ένα μη συσχετισμένο δίαυλο). Ωστόσο, κι αυτό είναι συχνά ανεπιθύμητο καθώς σπαταλάει πολύτιμο εύρος ζώνης. Η επιλογή καλών υπό-φορέων στα συστήματα OFDM είναι ένας τύπος ποικιλίας συχνότητας.

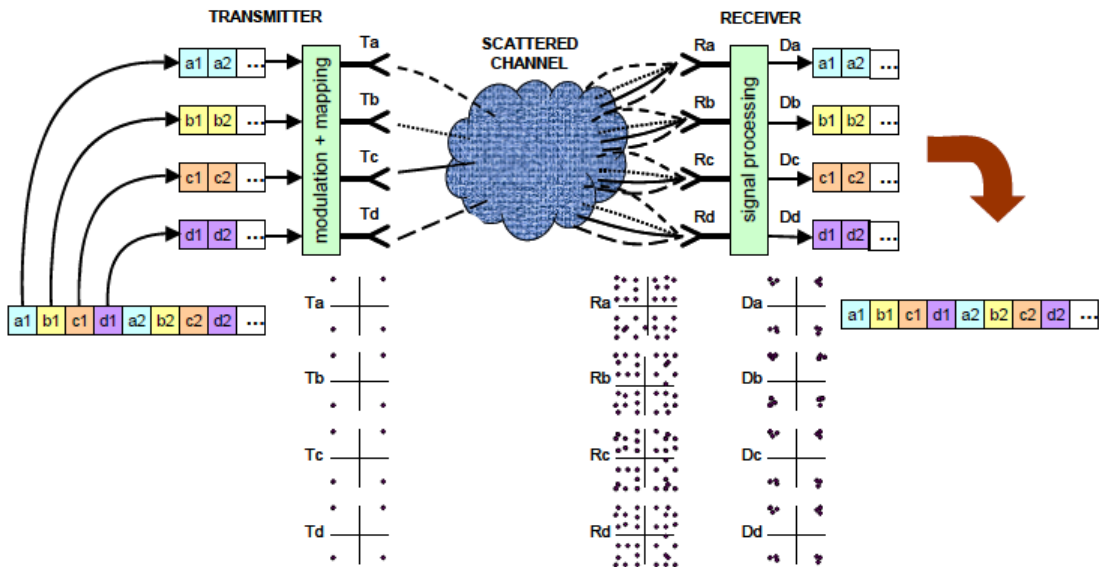
Στη διαφορική λήψη χώρου όπου δύο ή περισσότερες κεραιές χρησιμοποιούνται στον πομπό (MISO), στον δέκτη (SIMO) ή και στα δύο (MIMO) δεν χρησιμοποιεί επιπλέον εύρος ζώνης, αλλά προσθέτει πολυπλοκότητα και κοστίζει στον σταθμό βάσης στο κινητό τηλέφωνο ή και στα δύο. Ωστόσο είναι συχνά προτιμότερο και η διαφορική λήψη χώρου του σταθμού βάσης μελετάται και αναπτύσσεται για πάνω από μία δεκαετία.

Για να συνδυάσουμε σήματα από δύο ή περισσότερες κεραιές ένας συμβιβασμός γίνεται ανάμεσα στην πολυπλοκότητα, το κόστος και την απόδοση[25]. Απλώς επιλέγεται η κεραιά με την υψηλότερη στιγμιαία SNR. Το μειονέκτημα είναι ότι κάθε κεραιά SNR πρέπει να ελέγχεται ταυτόχρονα. Η τεχνική της switched combining, όπου μία νέα κεραιά επιλέγεται όταν το SNR πέφτει κάτω από ένα προκαθορισμένο όριο είναι πολύ απλούστερος, δεδομένου μάλιστα ότι απαιτείται μόνο ένας RF πομποδέκτης. Ωστόσο, ένας δίαυλος με χαμηλό SNR μπορεί να επηρεάσει τους άλλους δίαυλους κι έτσι η ιδανική μεθόδους συγκερασμού (combining) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μεγιστοποιήσει το ολικό SNR σταθμίζοντας κάθε δίαυλο στο πλάτος και φάση.

#### **4.5 Χωρικό κέρδος πολύπλεξης (Spatial Multiplexing Gain)**

Το χωρικό κέρδος αυξάνει το bit-rate χωρίς να χρησιμοποιεί περισσότερη ενέργεια ή ευρύτητα ζώνης και απαιτεί πολλαπλές κεραιές και στα δύο άκρα της σύνδεσης. Τα δεδομένα

πολυπλέκονται πάνω από κάθε κεραία μετάδοσης όπως απεικονίζεται παρακάτω (Εικόνα 14)[25][26]:



Εικόνα 14: MIMO χρησιμοποιούντα για Χωρικό κέρδος πολύπλεξης

## 4.6 Βασικές Αρχές Χωρητικότητας Διαύλου

### 4.6.1 Χωρητικότητα των διαύλων SISO και MIMO

Το ανώτερο όριο Shannon στην χωρητικότητα δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$C = \log_2 [1 + SNR] bps / Hz$$

Ή όταν περιλαμβάνεται ένας διάυλος SISO μπορεί να εκφραστεί ως:

$$C = \log_2 [1 + SNR |h|^2] bps / Hz$$

Όπου  $h$  είναι μία ομαλοποιημένη ισχύς ( $E[|h|^2] = 1$ ) διαύλου. Σε αυτή την περίπτωση,  $3dB$  περισσότερο SNR δίνει ακόμα ένα  $bps / Hz$  χωρητικότητας.

Αυτή η χωρητικότητα μπορεί να προσεγγιστεί με προηγμένη ρύθμιση και τεχνικές κωδικοποίησης διαύλων το έβλεπαν, ως ένα ανώτερο όριο μέχρι μισό αιώνα αργότερα, όταν η πρωτοποριακή εργασία στα Bell-Labs άλλαξε την πορεία στην έρευνα των επικοινωνιών. Το 1987 ο J.Winters δημοσίευσε την ιδέα μιας νέας τεχνικής που χρησιμοποιούσε πολλαπλές κεραιές και στον πομπό και στον δέκτη, τώρα γνωστή ως MIMO. Το 1995 ο I.E.Teleatar δημοσίευσε παράγωγα των χωρητικότητων σε Gaussian και εξασθενημένους διαύλους για τα συστήματα MIMO[23]. Το 1996 ο G.Faschmi παρουσίασε την παραγωγή του για το ανώτερο όριο χωρητικότητας για τους διαύλους MIMO:

$$C = \log_2 \det \left[ \mathbf{I}_m + \left( \frac{SNR}{n} \right) \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right] bps / Hz$$

όπου  $\det$  είναι ο καθοριστικός παράγοντας  $\mathbf{I}_m$  είναι ο μοναδιαίος πίνακας  $m$  by  $n$ ,  $m$  είναι ο αριθμός των κεραιών που λαμβάνουν στοιχεία και  $n$  είναι ο αριθμός των κεραιών που

εκπέμπουν στοιχεία. Θεωρείται ως δεδομένο ότι ο δέκτης αλλά και όχι ο πομπός έχει γνώση του διαύλου και ότι ο διάυλος είναι μη επιλεκτικός στην συχνότητα (επίπεδη εξασθένιση-flat fading) στο εύρος ζώνης του σήματος.  $\mathbf{H}$  είναι ο πίνακας του διαύλου-(channel matrix) και  $\mathbf{H}^H$  είναι η ο πίνακας Hermitian adjoint:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1} & h_{m2} & \cdots & h_{mn} \end{bmatrix} \quad \mathbf{H}^H = \begin{bmatrix} h_{11}^* & h_{21}^* & \cdots & h_{m1}^* \\ h_{12}^* & h_{22}^* & \cdots & h_{m2}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{1n}^* & h_{2n}^* & \cdots & h_{mn}^* \end{bmatrix}$$

Εάν, πράγμα που συμβαίνει συχνά σε συνθήκες NLOS κάθε ένα από τα στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{H}$ , που δηλώνεται από το  $h_{mn}$  είναι ανεξάρτητα όμοια διανεμημένο πολύπλοκες μηδενικές μέσου όρου, τυχαίες μεταβλητές μονάδας διακύμανσης δίνονται από:

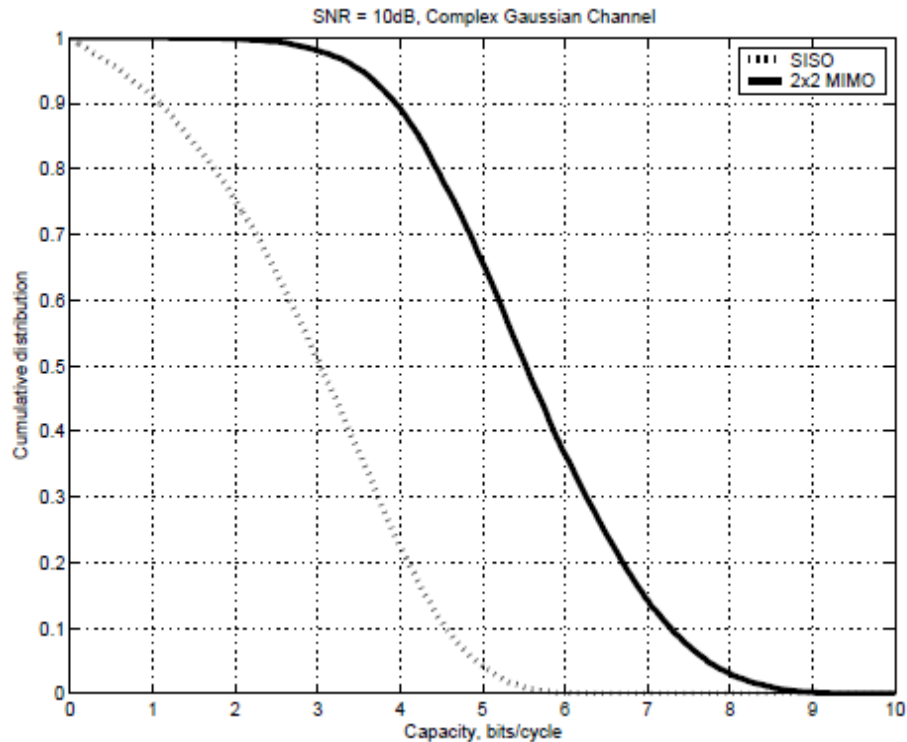
$$h_{nm} = \text{Normal}(0, \frac{1}{\sqrt{2}}) + \sqrt{-1}\text{Normal}(0, \frac{1}{\sqrt{2}})$$

φαινόταν ότι για μία σύνδεση SISO με  $\Gamma = 12\text{dB}$ , η μέγιστη χωρητικότητα που επιτυγχάνεται είναι 4.1bps/Hz. Ωστόσο για ένα σύστημα MIMO  $16 \times 16$ , το ίδιο SNR παρέχει περίπου 45bps/Hz. Αυτό κερδίζεται χωρίς αυξήσεις στην συνολική ισχύ μετάδοσης και αποδίδεται στο φαινόμενο της ορθογωνιότητα λόγω πολλαπλών διαδρομών σκέδασης (orthogonality due to rich multipath scattering).

Για παράδειγμα, στο MAPLE η ακόλουθη γραφική παράσταση στην Εικόνα 15 δείχνει την αθροιστική κατανομή χωρητικότητας  $2 \times 2$  MIMO συστήματος συγκρινόμενο με ένα σύστημα SISO. Στην περίπτωση του SISO, μία μηδενικού μέσου όρου, πολύπλοκη μονάδα διακύμανσης διαύλου Gaussian χρησιμοποιείται με ένα λαμβανόμενο SNR των 10dB. Στην περίπτωση MIMO,



4 ανεξάρτητες περιπτώσεις του διαύλου SISO χρησιμοποιούνται με μία μέση λήψη SNR των  $10dB$ .



**Εικόνα 15: Παράδειγμα σύγκρισης της αύξησης της χωρητικότητας από 2\*2 σύστημα MIMO πάνω σε σύστημα SISO**

Μπορούμε να δούμε ότι μια σημαντική αύξηση στην χωρητικότητα είναι πιθανή για την ίδια ισχύ και ευρύτητα ζώνης. Οι μονάδες χωρητικότητας δίνονται σε bits/cycle που είναι πανομοιότυπα με bits/s/Hz.

#### 4.6.2 Ανάλυση Ιδιοτιμών του Καναλιού (Eigenanalysis of channel)

Ο δίαυλος MIMO μπορεί επίσης να εξηγηθεί ως μία σειρά  $\min(n, m)$  ιδιοδιανοσμάτων (eigen-channels),[27] όπου το εύρος κάθε υπό-διαύλου δίνεται από  $\lambda_i$ , το  $i^{th}$  είναι η ιδιόλυση του

πίνακα  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ . Όταν το  $\mathbf{H}$  είναι άγνωστο στον πομπό, ίση ισχύ εκπέμπεται από τις αντιστάσεις κάθε κεραίας. Η χωρητικότητα μπορεί να διατυπωθεί ως:

$$C = \sum_{i=1}^k \log_2 \left[ 1 + \frac{SNR}{n} \lambda_i \right] bps / Hz$$

όπου  $k$  είναι ο βαθμός (rank) του  $\mathbf{H}$  το οποίο είναι κατ' ανώτατο όριο  $\min(m, n)$ . Ο βαθμός ενός πίνακα είναι ο αριθμός των γραμμικά ανεξάρτητων γραμμών ή στηλών. Χρησιμοποιώντας τις σηματοδοσίες ανάδρασης ο πίνακας  $\mathbf{H}$  είναι γνωστό στον πομπό όπως επίσης και στον δέκτη. Ο πομπός μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτές τις πληροφορίες αυξάνοντας την ισχύ στους πιο ισχυρούς υπό-δίαυλους. Σε αυτή την περίπτωση, η χωρητικότητα:

$$C = \sum_{i=1}^k \log_2 \left[ 1 + \frac{P_i}{\sigma^2} \lambda_i \right] bps / Hz$$

όπου  $P_i$  είναι η ισχύς στον  $i^{th}$  υπό-δίαυλο και  $\sigma^2$  είναι η ισχύς του θορύβου και

$$SNR = \frac{P_T}{\sigma^2} \text{ όπου } P_T = \sum_{i=1}^k P_i = \sum_{i=1}^k \left( \nu - \frac{1}{\lambda_i} \right)^+ . \text{ Αυτή η τεχνική είναι γνωστή ως waterfilling}$$

και σημαίνει: ξεκινά με το πιο ισχυρό υπό-δίαυλο κάνε κατανομή της ισχύς:  $P_i = \nu - \frac{1}{\lambda_i}$

,όπου το  $\nu$  είναι ένα αμετάβλητο αρχικό στάδιο. Μετά επανέλαβε την διαδικασία για τον αμέσως επόμενο πιο ισχυρό υπό-δίαυλο, και ούτω καθ' εξής .

### 4.6.3 Χωρητικότητα των δίαυλων *SISO* και *MIMO*

Σε πολυμορφία λήψης (μονή είσοδος δεδομένων πολλαπλή έξοδος) περίπτωση SIMO, όταν ο δέκτης χρησιμοποιεί τον καλύτερο συνδυασμό (maximum ratio combining) η χωρητικότητα μπορεί να δοθεί από:

$$C = \log_2 \left[ 1 + SNR \sum_{i=1}^m |h_i|^2 \right] bps / Hz$$

όταν χρησιμοποιεί ποικιλία επιλογής, όπου επιλεγεί το ισχυρότερο κανάλι, η χωρητικότητα δίνεται από:

$$C = \max_m \log_2 \left[ 1 + SNR |h_m|^2 \right] = \log_2 \left[ 1 + SNR \max_m |h_m|^2 \right] bps / Hz$$

Για εκπεμπόμενη πολυμορφία σε ένα σύστημα MISO (πολλαπλή είσοδος δεδομένων μονή έξοδος), εάν υποθέτει ότι η συνολική ισχύς μετάδοσης κατά πλάτος όλων των κεραιών είναι συνεχής τότε η χωρητικότητα γίνεται:

$$C = \log_2 \left[ 1 + \frac{SNR}{n} \sum_{i=1}^n |h_i|^2 \right] bps / Hz$$

### 4.6.4 Κανάλια με επιλεκτική φασματική απόκριση (*Frequency selective channel*)

Όταν η συνοχή ευρύτητας ζώνης  $\ll 1/$  σύμβολο διάρκειας ή ο χρόνος συνοχής  $\ll$  σύμβολο διάρκειας, ο διάυλος μπορεί να χαρακτηριστεί επιλεκτικός ως προς τη συχνότητα. Μια έκφραση για χωρητικότητα μπορεί να αποκτηθεί διοχετεύοντας την ευρύτητα ζώνης σε μικρά χωρία, υπολογίζοντας την χωρητικότητα σε κάθε χωρίο και προσθέτοντας τα μαζί. Η συχνότητα επίπεδης εξασθένησης μπορεί τότε να εφαρμοστεί σε κάθε χωρίο. Στο όριο καθώς η ευρύτητα

ζώνης του χωρίου γίνεται πολύ μικρή, είναι το ίδιο σαν να ενσωματώνεται πάνω απ' την ευρύτητα της ζώνης  $B$  :

$$C = \frac{1}{B} \int \log_2 \det \left( I + \frac{SNR}{n} H(f) H^H(f) \right) df \text{ bps/Hz}$$

#### 4.6.5 Αίτια της υπό-βέλτιστης χωρητικότητας (Cause of sub-optimal capacity)

Στην πράξη η βέλτιστη χωρητικότητα που επιτυγχάνεται παραπάνω τεχνική δεν είναι πιθανόν να συμβεί εξαιτίας ενός αριθμού παραγόντων: μη-ύπαρξη πολλαπλών διαδρομών ή περιορισμένος αριθμός σκεδαστών, συνιστώσες LOS (Ricean fading), γκρίζες ζώνες κάλυψης (keyholes).

#### 4.6.6 Αποτέλεσμα μη πολλαπλών διαδρομών-Effect of no multipath

Όπου υπάρχει μόνο μια μονή συνιστώσα LOS, υπάρχει το σενάριο απώλειας ελεύθερου χώρου πολλαπλασιασμός με εξασθένιση :

$$FSL = \frac{G_1 G_2 \lambda^2}{(4 \pi R)^2}$$

προκύπτει ένας τύπος που συσχετίζει τους συντελεστές του δίαυλου με την απόσταση στοιχείου κεραίας:

$$h_{ik} = (T_i - R_k) \exp \left[ \frac{(-j2\pi |T_i - R_k| / \lambda)}{|T_i - R_k|} \right]$$

όπου  $T_i$ ,  $R_k$  είναι συντεταγμένες διανυσμάτων για το  $i^{th}$  στοιχείο του  $T$ ,  $R$  και  $h_{ik}$  εξομαλύνεται ανάμεσα στο  $T_i, R_k$  έτσι ώστε  $h_{1=1}$  και  $n = m$ .

Εφόσον δεν υπάρχει μεγάλη σκέδαση σε πολλαπλές διαδρομές, η χωρητικότητα μειώνεται. Στην περίπτωση που τα στοιχεία της κεραίας και στα δύο άκρα απέχουν λιγότερο από μισό μήκος κύματος, οι φάσεις γίνονται σχεδόν ίσες και γι αυτό οι συντελεστές του δίαυλου γίνονται όλοι ίσοι:  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H \approx n$  και  $\mathbf{H}$  είναι της τάξεως-rank 1 και η αύξηση χωρητικότητας οφείλεται ουσιαστικά σε n-πλασία αύξησης συστοιχιών και γίνεται:  $C = \log_2(1 + n SNR)$ . Όταν η απόσταση συστοιχίας-array spacing είναι ευρύτερη, τα σύνθετα αυξανόμενα επίπεδα  $h_{ik}$  όλα έχουν μέγεθος κοντά στο ένα αλλά με διαφορετικές φάσεις έτσι ώστε:  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H \approx n\mathbf{I}_n$ . Σ' αυτή την περίπτωση  $\mathbf{H}$  είναι της τάξεως  $n$  και  $C = n \log_2(1 + SNR)$ .

#### 4.6.7 Αποτέλεσμα περιορισμένων σκεδαστών (Effect of limited scatterers)

Οι σχηματισμοί για τους δίαυλους με πεπερασμένη διασκόρπιση, χρησιμοποιώντας μεθόδους εντοπισμού ακτινών. Το πεπερασμένο μοντέλο σκεδαστή δείχνει ότι για την περίπτωση όταν  $n, m \rightarrow \infty$  για  $\lambda/2$  κατανεμημένα στοιχεία της κεραίας:

$$C = \sum_{i=1}^{n_s} \log_2 \left[ 1 + SNR m |\xi_i|^2 \right] \text{bps / Hz}$$

όπου  $n_s$  είναι ο αριθμός των σκεδαστών και  $\xi_i$  είναι η αύξηση ενέργειας του  $i^{th}$  σκεδαστή όπου  $\lambda_i$  το  $i^{th}$  ιδιοκατάσταση  $m.n. |\xi_i|^2$ . Η τάξη-rank του  $\mathbf{H}$  είναι περιορισμένη σε  $\min(n, m, n_s)$ .

Μια απλή προσέγγιση εντοπισμού ακτίνας χρησιμοποιείται για να παράγουμε τα στοιχεία του  $\mathbf{H}$  όπως :

$$h_{ik} = \sum_p \left[ \gamma_p \exp\left(\frac{2\pi j i l}{\lambda} \sin(\phi_{R,p})\right) \exp\left(\frac{2\pi j k l}{\lambda} \sin(\phi_{T,p})\right) \right]$$

Όπου  $p$  είναι ο δείκτης πολλαπλών διαδρομών  $\phi_{R,p}$  είναι η γωνία άφιξης στον δέκτη και  $\phi_{T,p}$  είναι η γωνία της αναχώρησης στον πομπό, το  $l$  υποδηλώνει την απόσταση των στοιχείων της κεραίας και  $\gamma_p$  είναι το σύμπλεγμα διαδρομής μετάδοσης.

#### 4.6.8 Αποτέλεσμα της απώλειας διαδρομών κατά Ricean (Effect of Ricean fading)

Ο διάυλος Ricean MIMO μπορεί να διαμορφωθεί ως το άθροισμα μιας παραμορφωμένης δομής:

$$H = \sqrt{\frac{K}{1+K}} \bar{H} + \sqrt{\frac{1}{1+K}} H_w$$

όπου το  $H_w$  είναι στατιστικά ανεξάρτητη μονάδα διακύμανσης συμπλέγματος Gaussian τυχαίων μεταβλητών, ενώ  $\bar{H} = a(\theta_i) a(\theta_r)^T$ , όπου  $a(\theta_i)$  και  $a(\theta_r)$  είναι η συστοιχία κατοπτρικών ανταποκρίσεων στον πομπό και στον δέκτη αντιστοίχως. Όταν  $K = 0$ , έχουμε την παραμόρφωση Rayleigh και όταν  $K \rightarrow \infty$ , έχουμε μια μη παραμορφωμένη περίπτωση.

#### 4.6.9 Αποτέλεσμα φαινομένου διάδοσης οπής (Effect of keyholes)

Οι γκριζες ζώνες κάλυψης (keyholes) περιγράφουν ένα σενάριο μειωμένης χωρητικότητας. Θεωρητικά αυτή η κατάσταση ανακύπτει όταν υπάρχει μία μεταλλική οθόνη ανάμεσα στο Tx και

Rx με μία μικρή τρύπα διαμέσου της οποίας περνούν όλες οι ακτίνες. Στην πράξη αυτό μπορεί να προκληθεί όταν το κινητό τηλέφωνο διέρχεται από ένα τούνελ ή σε ένα περιβάλλον εσωτερικού χώρου, όταν οι ακτίνες διασπείρονται σε ένα προθάλαμο.

Το ηλεκτρικό περιστατικό πεδίου της γκριζας ζώνης κάλυψης είναι:

$$\mathbf{E}_{inc} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix},$$

όπου το  $S_1$  και  $S_2$  είναι τα εκπεμπόμενα σήματα και  $a_1, a_2$  είναι οι συντελεστές του διαύλου πριν τη γκριζα ζώνη. Υποθέτοντας άφθονη διασκόρπισή γύρω από τον πομπό τα  $a_1, a_2$  είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές Gaussian. Το πεδίο που εκπέμπεται μέσω της οπής είναι:  $\sigma \cdot \mathbf{E}_{inc}$ . Υποδηλώνοντας το γύρω διασκορπισμό η ληφθείσα συστοιχία  $b_1, b_2$  επίσης ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές Gaussian η δύναμη του ληφθέντος ηλεκτρικού πεδίου είναι:

$$\mathbf{E}_{rec} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \sigma \mathbf{E}_{inc}$$

Ο πίνακας του διαύλου  $\mathbf{H}$  είναι συνεπώς :

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \sigma \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \end{bmatrix} = \sigma \begin{bmatrix} a_1 b_1 & a_2 b_1 \\ a_1 b_2 & a_2 b_2 \end{bmatrix}$$

Γράφοντας  $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x}$ , έχουμε:

Ως εκ τούτου το  $\mathbf{H}$  είναι ασυσχέτιστο κι όμως έχει ένα βαθμό ελευθερίας και η χωρητικότητα μειώνεται.

#### 4.6.10 Επιπτώσεις Συσχέτισης (Effect of correlation)

Υποθετικά συμπεραίνουμε ότι κάθε στοιχείο  $h_{mn}$  δομής  $\mathbf{H}$  είναι ανεξάρτητο για αυτό οποιαδήποτε δύο στοιχεία είναι ασυσχέτιστα. Ο συσχετισμός δίαυλου είναι το αποτέλεσμα μικρής γωνιακής κατανομής (angular spread) στο  $T_x$  ή στο Rx ή και στα δύο, μικρός διαχωρισμός στοιχείων κεραίας και γεωμετρίας κεραίας. Θεωρητικά το  $\mathbf{N}$  είναι ίσο ποσοστό και ίση επιμέρους δύναμη παράλληλων υπό-δίαυλων (με  $n=m$ ), όπου ο συντελεστής συσχετισμού,  $r$  είναι ανάμεσα σε δύο οποιουδήποτε δίαυλους. Η χωρητικότητα ως μία λειτουργία του SNR,  $n$  και  $r$  δίνονται ως:

$$C_{nm}(r) = n \log_2 \left( 1 + \frac{SNR}{n} (1-r) \right) + \log_2 \left( 1 + \frac{n SNR r}{n + SNR(1-r)} \right)$$

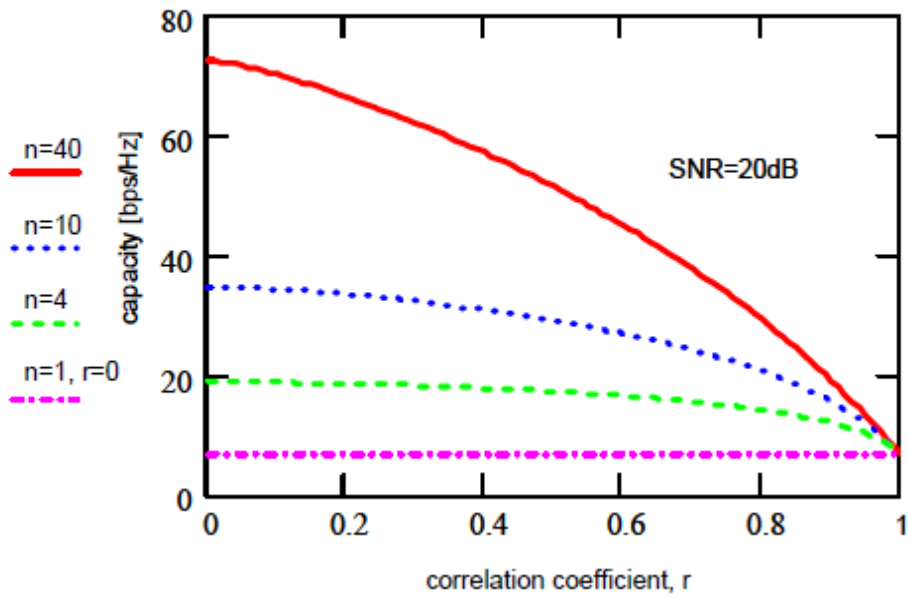
Αυτό δείχνει για παράδειγμα ότι  $r=0,7$  ισούται με μία μείωση  $3dB$  στο SNR. Όταν  $r=0$  η δομή του δίαυλου  $\mathbf{H}$  γίνεται ίση με  $\mathbf{I}$  και μειώνεται σε:

$$C_{nm} = n \log_2 \left( 1 + \frac{SNR}{n} \right) bps / Hz$$

Σε περιπτώσεις όπου  $r < 0.6$  μπορεί να προσεγγιστεί από:

$$C_{nm} \approx n \log_2 \left( 1 + \frac{SNR}{n} (1-r) \right) bps / Hz$$





Εικόνα 16: Χωρητικότητα καναλιού για  $n$  συνδιασμούς καναλιών έναντι συσχέτισης

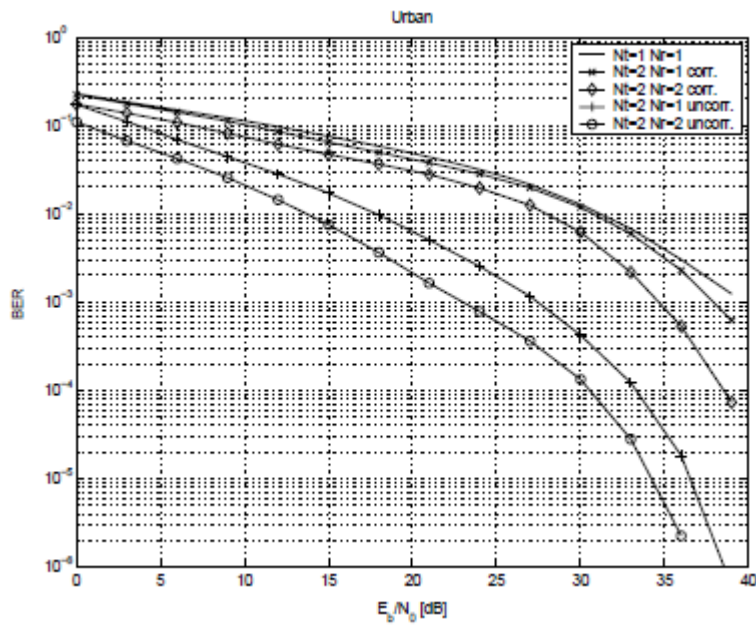
## 5 Μετρήσεις

*Delay Spread:* Στις τηλεπικοινωνίες το *delay spread* είναι μια μέτρηση των *multipath* διαδρομών ενός καναλιού. Σε γενικές γραμμές μπορεί να ερμηνευθεί ως η διαφορά μεταξύ του χρόνου άφιξης του πρώτου στοιχείου πολλαπλών διαδρομών (συνήθως το *line-of-sight*) και το χρόνο άφιξης του τελευταίου στοιχείου της *multipath* διαδρομής. Χρησιμοποιείται κυρίως στο χαρακτηρισμό των ασύρματων καναλιών αλλά η ίδια αντίληψη ισχυει και για οποιαδήποτε άλλο κανάλι πολλαπλών διαδρομών (π.χ οπτικέςζίνες)[29].

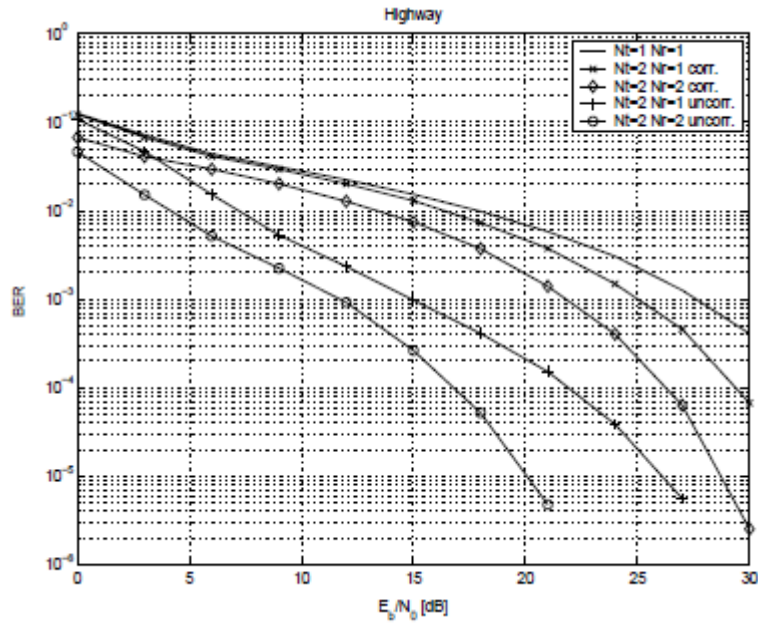
*Doppler Shift:* Το **φαινόμενο Ντόπλερ** που πήρε το όνομά του από τον Κρίστιαν Ντόπλερ (*Christian Doppler*), είναι η παρατηρούμενη αλλαγή στη συχνότητα και το μήκος κύματος ενός κύματος από παρατηρητή που βρίσκεται σε σχετική κίνηση με την πηγή των κυμάτων. Για κύματα όπως τα ηχητικά κύματα, που διαδίδονται μέσα σε κάποιο υλικό μέσο, η ταχύτητα τόσο του παρατηρητή όσο και της πηγής, πρέπει να προσδιορίζεται σε σχέση με το μέσο διάδοσης. Το τελικό φαινόμενο Ντόπλερ μπορεί επομένως να προκύψει είτε από την κίνηση του παρατηρητή, είτε από την κίνηση της πηγής, είτε και των δύο, ως προς το μέσο διάδοσης. Καθεμιά από αυτές τις δύο επιδράσεις αναλύεται ξεχωριστά. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι η συχνότητα του εκπεμπόμενου κύματος δεν αλλάζει. Αυτό που αλλάζει είναι η συχνότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής, δηλαδή η συχνότητα με την οποία φτάνουν σ' αυτόν τα μέτωπα του κύματος. Ειδικότερα, στην περίπτωση που κινείται η πηγή ως προς το μέσο διάδοσης, αλλάζει και το μήκος κύματος (η απόσταση που «μετράει» ο παρατηρητής ανάμεσα σε δύο διαδοχικά μέτωπα κύματος), ενώ όταν η πηγή είναι ακίνητη το μήκος κύματος δεν μεταβάλλεται[30].

Στα γραφεία της Teledrom Hellas πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ενός κεραιοσυστήματος LTE με τεχνολογία MIMO. Χρησιμοποιήθηκε το σύστημα TEMS με δυνατότητες μέτρησης MIMO.

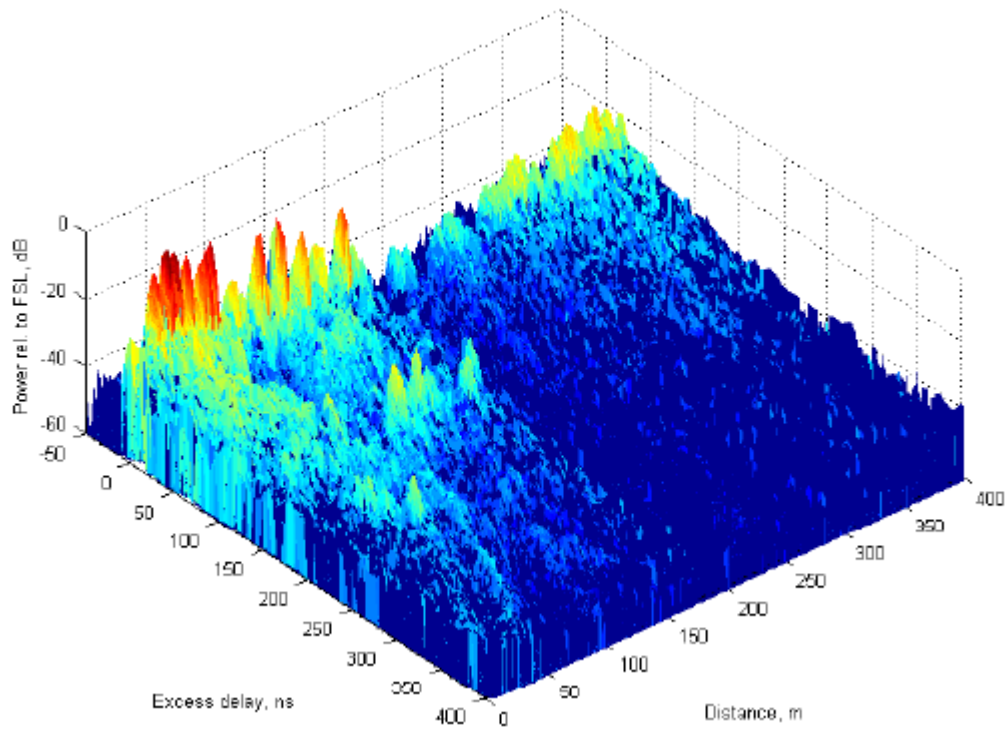
Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει τα σφάλματα BER που παρουσιάστηκαν στο σύστημα μέτρησης συναρτήσει του ηλικίου SNR ( $E_b/N_0$ ). Οι ελάττωση του SNR επιτεύχθηκε με μετακίνηση του συστήματος λήψης εντός αστικού περιβάλλοντος (μετακίνηση σε παράπλευρο πεζόδρομο). Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν όλους τους σχετικούς συνδυασμούς  $N_t \times N_r$  κεραιών με μέγιστο το  $2 \times 2$



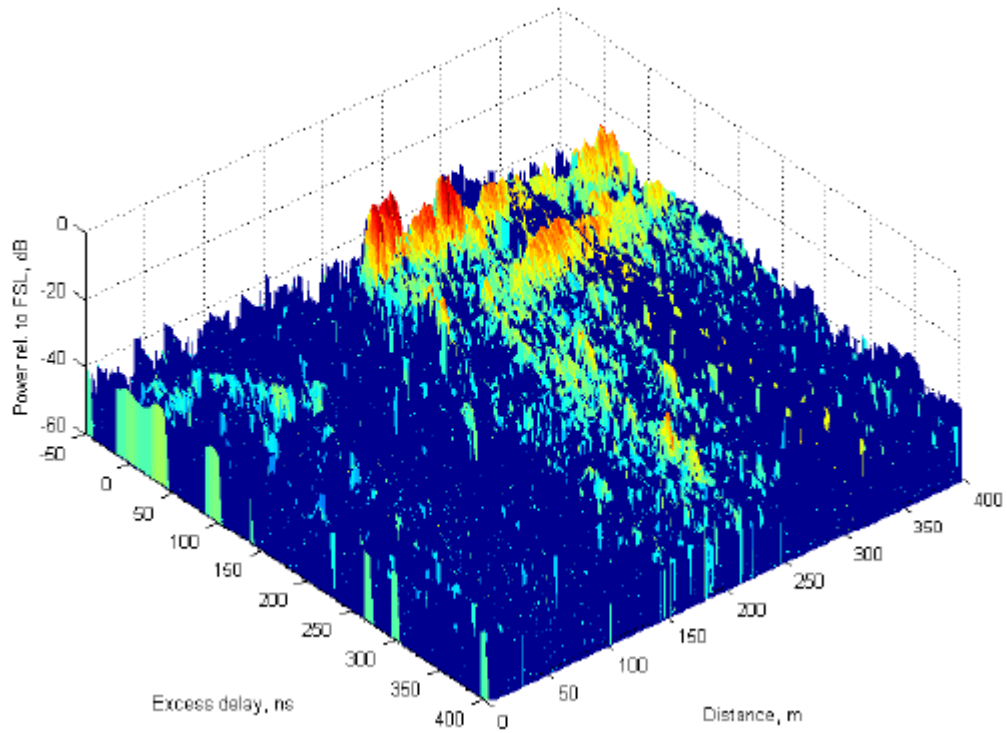
Εν συνεχεία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε παρακαίμενο αυτοκινητόδρομο εντός οχήματος, το οποίο και επηρεάζει προφανώς τον λόγο SNR



Εκτελέσαμε μία μέτρηση του delay-spread του καναλιού ώστε να δούμε την επίπτωση των πολυοδεύσεων (multipath) εντός πόλεως και εντός του οικήματος που υπήρχε το κεραιοσύστημα με χαρακτηριστικά LOS.

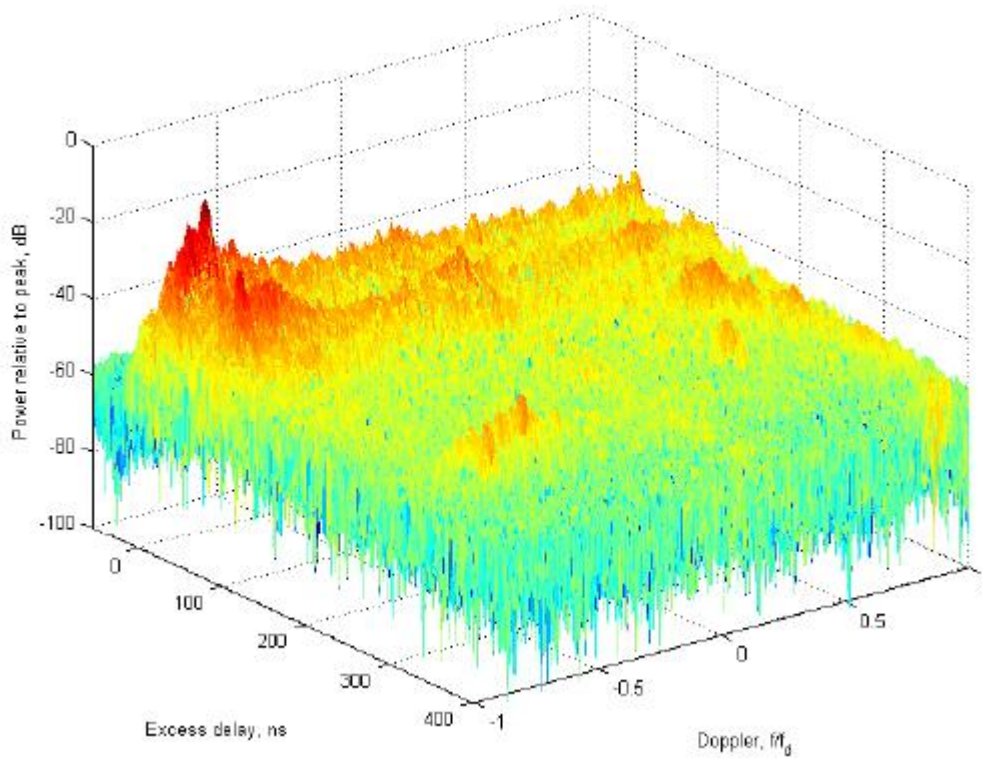


Εντός πόλεως σε παρακείμενο πεζόδρομο



Εντός οικήματος με LOS χαρακτηριστικά

Τέλος εκτελέσαμε μία μέτρηση του Doppler shift – delay spread εντός οχήματος σε παρακείμενο αυτοκινητόδρομο



## 6 Επίλογος

Η τεχνολογία των κινητών επικοινωνιών εξελίχθηκε ραγδαία τα τελευταία χρόνια λόγω των αυξανόμενων απαιτήσεων, όπως η πρόσβαση σε υπηρεσίες διαδικτύου στα κινητά τηλέφωνα με καλύτερη ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο η βιομηχανία ασύρματων επικοινωνιών εργάστηκε σκληρά και όρισε ένα νέο air interface για τις κινητές επικοινωνίες το οποίο αυξάνει την χωρητικότητα του συστήματος μαζί με την βελτίωση του φάσματος καθώς και μείωση των latencies (χρόνοι απόκρισης) καταστάσεων.

Το 3rd Generation Partnership Project (3GPP) έχει ερευνήσει το long term evolution του UMTS (LTE) για την κάλυψη μελλοντικών απαιτήσεων και την διασφάλιση της ανταγωνιστικότητας του προτύπου. Όπως αναλύσαμε παραπάνω το LTE έχει τεθεί σε απαιτήσεις απόδοσης που στηρίζονται στις τεχνολογίες του φυσικού επιπέδου όπως την ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)) και τα συστήματα πολλαπλής εισόδου-πολλαπλής εξόδου (Multiple-Input Multiple-Output -MIMO)), έξυπνες κεραιές για να επιτύχουν αυτούς τους στόχους.

Έγινε εκτεταμένη αναφορά στις απαιτήσεις που πρέπει να πληρεί το LTE και στις βασικές τεχνικές μετάδοσης πληροφορίας του. Αναλύθηκε η τεχνολογία του φυσικού επιπέδου OFDM τρόπος λειτουργίας του και η αρχιτεκτονική του. Αναφέρθηκαν παραδείγματα μετάδοσης δεδομένων με τις τεχνικές OFDM και OFDMA όπως επίσης και τα πλεονεκτήματα των παραπάνω τεχνικών.

Στη συνέχεια της πτυχιακής εργασίας αναλύσαμε την τεχνική μετάδοσης MIMO. Αναφέραμε τα πλεονεκτήματα της και αναφέραμε τη χωρητικότητα του διαύλου MIMO μαθηματικές αποδείξεις.

Τέλος έγιναν μετρήσεις με το σύστημα TEMS σε ένα κεραιοσύστημα LTE με τεχνολογία MIMO.





## 7 Βιβλιογραφία

- [1] “World internet usage statistics news and population stats” [online]. Available from: <http://www.internetworldstats.com/stats.htm> [cited March 2008].
- [2] “Global mobile penetration hits 50 November 2007. Available from: <http://www.telecoms.com/itmgcontent/tcoms/news/articles/20017483752.html> [cited March 2008].
- [3] M. Poikselkä, G. Mayer, H. Khartabil, and A. Niemi, The IMS, IP Multimedia Concepts and Services. Wiley, 2006.
- [4] B. M. Leiner, V. G. Cerf, D. D. Clark, R. E. Kahn, L. Kleinrock, D. C. Lynch, J. Postel, L. G. Roberts, and S. Wolff, “A brief history of the internet.”Internet Society, December 2003.
- [5] Motorola White Paper: Long Term Evolution(LTE)
- [6] Holma, H., & Toskala, A. (2007). WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE. 4<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons.
- [7] UMTS Forum (<http://www.ums-forum.org/>).
- [8] Holma, H., & Toskala, A. (2007). WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE. 4<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons.
- [9] Holma, H., & Toskala, A.(2006). HSPDA/HSUPA for UMTS: High Speed Radio Access for Mobile Communications. John Wiley & Sons.
- [10] 3GPP TR 25.858. (2002). Physical layer aspects of UTRA High Speed Downlink Packet Access. Version 5.0.0.
- [11] 3GPP TS 25.308. (2009). High Speed Downlink Packet Access (HSDPA); Overall description; Stage 2. Version 9.0.0.
- [12] Ericsson White Paper: LTE- an introduction
- [13] Lescuyer, P., & Lucidarme, T. (2008). Evolved Packet System (EPS): The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS. John Wiley & Sons
- [14] Sesia, S., Toufik, I., & Baker, M. (2009). LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. John Wiley & Sons.

- [15] Third Generation Partnership Project - 3GPP (<http://www.3gpp.org>).
- [16] Malkowski, C. (2003). UTRAN Enhancements for Multicast. In Proceedings of HyWiN workshop, Turin, Italy.
- [17] OFDM:THEORY AND APPLICATION [Marco Araujo and Marcio Melo, Telecommunication Institute, University of Aveiro, Portugal]
- [18] <http://en.wikipedia.org/wiki/OFDM>
- [19] <http://en.wikipedia.org/wiki/OFDMA>
- [20] “Modelling and Measurement of the Land Mobile Satellite MIMO Radio Propagation Channel” P.R.King Centre for Communication Systems Research School of Electronics and Physical Sciences University of Surrey Guildford, Surrey GU2 7XH, UK, April 2007.
- [21] <http://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>
- [22] <http://en.wikipedia.org/wiki/SIMO>
- [23] Foschini, G.J. and Gans, M.J. On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas, Wireless Personal Communications, Kluwer 1998, pp.311-335
- [24] Beach, M.A., Swales, S.C., Bateman, A., Edwards, D.J. and McGeehan, J.P.: “Adversity combining antenna array for land mobile satellite communications”, IEEE VTC 1989, pp.749-756
- [25] Saunders, S.R.: Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems., J.Wiley & Sons, 1999
- [26] Gesbert, D., Shafi, M., Shiu, S., Smith, P. and Naguib, A.: “From theory to practice: an overview of MIMO space – time coded wireless systems”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.21, no.3, Apr.2003, pp.281-302
- [27] Teletar, I.E.: “Capacity of Multi-antenna Gaussian Channels”, European Transactions on Telecommunications, vol.10, no.6, 1995, pp.585-595
- [28] Kermoal, J.P.: “Measurement, Modelling and Performance Evaluation of the MIMO Radio Channel”, Ph.D. thesis, Centra for PersonKommunikation – Aalborg University, Denmark, 2002
- [29] [http://en.wikipedia.org/wiki/Delay\\_spread](http://en.wikipedia.org/wiki/Delay_spread)

[30] [http://en.wikipedia.org/wiki/Doppler\\_effect](http://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect)