



**ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ**

**Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής ΤΕ**

**( Πρών Τμήμα Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων  
και Δικτύων )**

**Πτυχιακή Εργασία**

**Βελτιστοποίηση χωρητικότητας ρυθμαπόδοσης**

**σε Δίκτυα 4G**

**Συγγραφέας: Φυραρίδης Κωνσταντίνος**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Ασαρίδης Ηλίας**

**Πάτρα 2014**





**ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ**

**Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής ΤΕ**

**( Πρών Τμήμα Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων  
και Δικτύων )**

**Πτυχιακή Εργασία**

**Βελτιστοποίηση χωρητικότητας ρυθμαπόδοσης**

**σε Δίκτυα 4G**

**Συγγραφέας: Φυραρίδης Κωνσταντίνος**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Ασαρίδης Ηλίας**

**Πάτρα 2014**

## Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον πρώτο επιβλέποντα καθηγητή κ. Σπύρο Λούβρο καθώς και τον μετέπειτα ορισθέντα καθηγητή κ. Ηλία Ασαρίδη, για την υπόδειξη του θέματος της πτυχιακής μου εργασίας και την βοήθεια που απλόχερα μου προσέφεραν όταν την ζητούσα. Με τις γνώσεις που πήρα από ένα σύγχρονο πρόγραμμα σπουδών του τμήματος που υλοποίησαν οι καθηγητές του τμήματος με άριστη διδακτική, ερευνητική και παιδαγωγική κατάρτιση.

Τους ευχαριστώ όλους θερμά. Ιδιαίτερα θα αναφερθώ και στον Πρόεδρο του Τμήματος κ. Βασίλη Τριανταφύλλου που μαζί με όλους τους άλλους κατόρθωσαν ένα νεοσύστατο Τμήμα να το ανεβάσουν ψηλά και να διεκδικεί σήμερα την αριστεία μεταξύ άλλων τμημάτων.

Ευχαριστώ επίσης ολόψυχα τον καθηγητή Ογκολογίας της Ιατρικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων κ. Ευάγγελο Μπριασούλη που μου εμπιστεύθηκε την διαχείριση προσωπικών δεδομένων εδώ και 3 χρόνια της Βιοτράπεζας Καρκίνου της Ιατρικής Σχολής υπό την επίβλεψη πάντα του καθηγητή του Παν/μίου Πατρών και συνεργάτη του Ι.Τ.Υ.Ε. σε θέματα Κρυπτογραφίας – ασφάλειας πληροφοριακών συστημάτων κ. Ιωάννη Σταματίου.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου που με άπειρη αγάπη με στήριξαν όλα αυτά τα δύσκολα για την οικογένειά μας χρόνια και μου έμαθαν να έχω υπομονή και επιμονή στη ζωή μου. Αποτελούν για μένα θησαυρό σωτηρίας με ιδιαίτερα αναφορά στον σεβαστό μου πατέρα, φίλο, αδερφό (ποντιακής καταγωγής, όπως και εγώ) για την αγάπη του όχι μόνο για μένα, αλλά και για χιλιάδες φοιτητές που πέρασαν από το Μαθηματικό Τμήμα του Παν/μίου Ιωαννίνων.

Κωνσταντίνος Φυραρίδης

## Αφιέρωση

Στον αγαπητό μου αδερφό Σταύρο Φυραρίδη που σύμφωνα με  
στίχο του ποιητή Γιάννη Ρίτσου

« άρμεγε με τα μάτια του το φως της οικουμένης »

Τον ευγνωμονώ γιατί ποτέ δεν δίστασε να μου προσφέρει  
βοήθεια, συμβουλές, ενθάρρυνση και παρότρυνση να ασχοληθώ  
με αυτά που αγαπούσα την Πληροφορική, την Κρυπτογραφία –  
ασφάλεια πληροφοριακών συστημάτων αλλά και την μουσική.  
Συνεχώς μου έλεγε « Πρέπει να μάθουμε, και θα μάθουμε ».

Κωνσταντίνος Φυραρίδης

## Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή.....	8
2 Σύντομη αναφορά στην εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών.....	11
3 Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του LTE.....	17
4 Η τεχνική OFDM.....	20
5 Συμβατότητα με άλλα πρότυπα και στοιχεία απόδοσης.....	33
6 Χαρακτηριστικά και τοπολογία δικτύων υποστήριξης LTE .....	35
7. Μαθηματική Μοντελοποίηση .....	37
8 Βιβλιογραφία.....	45

## Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Η εξέλιξη των προτύπων για τα κυψελωτά κινητά δίκτυα έως το 3G.....	12
Εικόνα 2: Οι εξελίξεις στην τεχνολογία των κυψελωτών συστημάτων 4G.....	14
Εικόνα 3: Το 3GPP και οι έξι SDOs .....	15
Εικόνα 4: Η δομή της ομάδας εργασίας του 3GPP .....	16
Εικόνα 5: Χρονολογική εξέλιξη κινητών δικτύων επόμενης γενιάς από το 3G έως το LTE.....	18
Εικόνα 6: Κάθε ένα από τα timeslots περιέχει OFDM σύμβολα, καθένα από τα οποία σε διαφορετική συχνότητα .....	22
Εικόνα 7: Ο τρόπος λειτουργίας του OFDM.....	24
Εικόνα 8: Το φάσμα τριών υπο-φερουσών που απαρτίζουν ένα OFDM σήμα.....	25
Εικόνα 9: Κυκλικό πρόθεμα.....	26
Εικόνα 10: Το Data block ενός συστήματος OFDM.....	27
Εικόνα 11: Η χρήση της τεχνικής OFDM (multi-user diversity) .....	32

## 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	High Speed Downlink Packet Access
HS-DSCH	High Speed- Downlink Shared Channel
HSPA	High Speed Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IP	Internet Protocol
LMS-SIMO	Linear Multistep Method-SIMO
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
NLOS	Non Line of Sight
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

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία αλματώδης ανάπτυξη του Διαδικτύου και των τεχνολογιών του καθώς και μία όλο και αυξανόμενη διείσδυσή του σε κάθε περιοχή της γης. Αυτό το γεγονός, σε συνδυασμό με την παράλληλη ανάπτυξη των τεχνολογιών κινητής τηλεφωνίας και κινητών δικτύων καθώς και τη μείωση του κόστους χρήσης τους κατέστησε σαφές ότι ο συνδυασμός τους, δηλαδή παροχή υπηρεσιών Διαδικτύου σε κινητές συσκευές, αποτελεί μία σημαντική περιοχή επικερδούς δραστηριοποίησης από τους πάροχους διαδικτυακών υπηρεσιών. Ενδεικτικά αναφέρουμε ένα ποσοστό περίπου 20% του πληθυσμού της γης χρησιμοποιεί, καθημερινά, υπηρεσίες Διαδικτύου ενώ ο αριθμός των χρηστών κινητής τηλεφωνίας ξεπερνά τα 3 δισεκατομμύρια σε παγκόσμιο επίπεδο ενώ αυξάνεται με γοργούς ρυθμούς.

Το συμπέρασμα είναι ότι το κινητό τηλέφωνο έχει εξελιχθεί, πέρα από μία απλή τηλεπικοινωνιακή συσκευή, σε έναν ισχυρό ηλεκτρονικό υπολογιστή με μεγάλες δυνατότητες διαχείρισης διαδικτυακού περιεχομένου 0. Παράλληλα, το Διαδίκτυο καθίσταται, βαθμιαία, σε σημαντικό πόρο πληροφόρησης για κάθε επαγγελματία, οργανισμό ή κοινό χρήστη σε σημείο που σήμερα να μιλάμε για την εποχή του *Digital Enlightenment* δηλαδή τον *Ψηφιακό Διαφωτισμό* (δείτε την ιστοσελίδα <http://www.digitalenlightenment.org/> του ευρωπαϊκού οργανισμού για τον Ψηφιακό Διαφωτισμό).

Φυσικά, η αυξανόμενη χρήση υπηρεσιών κινητών συσκευών για υπηρεσίες που ξεφεύγουν από την απλή ανταλλαγή email ή την ανάγνωση πληροφοριών ιστοσελίδων και φτάνουν μέχρι το online streaming (π.χ. παρακολούθηση ταινιών ή ζωντανού τηλεοπτικού προγράμματος) επέφερε την ανάπτυξη νέων τύπων εφαρμογών όπως είναι το MMOG (Multimedia Online Gaming), mobile TV, τεχνολογίες Web 2.0 κλπ. Οι νέες αυτές εφαρμογές έδωσαν το έναυσμα για την εκκίνηση του *3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project* (3GPP) για τη δημιουργία του Long Term Evolution (LTE) προτύπου. Το πρότυπο αυτό προτάθηκε για πρώτη φορά στην Ιαπωνία το 2004 ενώ έφτασε σε τελική μορφή το 2008. Η εξέλιξη του LTE ονομάζεται LTE Advanced, του οποίου η προτυποποίηση έγινε το Μάρτιο του 2011. Οι αναβαθμισμένες LTE υπηρεσίες αναμένεται να διατεθούν μέχρι το τέλος του 2013.

Ο στόχος της προσπάθειας δημιουργίας του LTE ήταν να προδιαγράψει την μελλοντική εξέλιξη του Universal Mobile Telephone System (UMTS) του 3GPP. Το UMTS ήταν, επίσης, ένα πρόγραμμα του 3GPP που διερεύνησε και αξιολόγησε τις διαθέσιμες τεχνολογίες πριν, τελικά, επιλέξει την τεχνολογία Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) για τις ανάγκες του Radio Access Network (RAN). Οι όροι UMTS και WCDMA χρησιμοποιούνται, τώρα, ως συνώνυμοι ενώ δεν ήταν έτσι πριν επιλεγεί η τεχνολογία WCDMA. Με παρόμοιο τρόπο, το LTE είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την τεχνολογία που το υποστηρίζει και η οποία θεωρείται ως εξέλιξη του UMTS παρόλο που μεταξύ LTE και UMTS υπάρχουν λίγα κοινά χαρακτηριστικά.

Οι κύριοι στόχοι του προτύπου LTE είναι ο υψηλότερος ρυθμός απόδοσης μεταφοράς δεδομένων με χαμηλότερο κόστος και μικρότερη καθυστέρηση (latency). Βασικοί στόχοι, επίσης, είναι η ευέλικτη επέκταση φάσματος στο υπάρχον ή στο νέο φάσμα συχνότητας καθώς και η συνύπαρξη με άλλες τεχνολογίες πρόσβασης του 3GPP ραδιο τεχνολογίες πρόσβασης (Radio Access Technologies ή RATs) 0.

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 κεφάλαια της πτυχιακής παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του συστήματος OFDM και OFDMA, οι τεχνικές μετάδοσης καθώς και τα πλεονεκτήματά τους.

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 πλεονεκτήματά 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 την συμβατότητα με άλλα πρότυπα και στοιχεία απόδοσης.

Το **Κεφάλαιο 6** αναφέρεται στα χαρακτηριστικά και την τοπολογία δικτύων υποστήριξης LTE.

Το **Κεφάλαιο 7** καταγράφονται οι γραφικές παραστάσεις τριών βασικών συναρτήσεων που έγιναν με αναλυτικό αλλά δύσκολο υπολογιστικό τρόπο, ως μια μαθηματική μοντελοποίηση των δικτύων υπηρεσιών LTE.

## 2 Σύντομη αναφορά στην εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών

### 2.1 Η 2<sup>η</sup> γενιά (2G) κινητών δικτύων

Τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας 2<sup>ης</sup> γενιάς διαφέρουν ως προς αυτά της 1<sup>ης</sup> στο ότι τα σήματα που εκπέμπονται στα δίκτυα 1<sup>ης</sup> γενιάς είναι αναλογικά ενώ τα συστήματα 2<sup>ης</sup> γενιάς είναι αναλογικά. Όμως και τα δύο συστήματα χρησιμοποιούν ψηφιακή τεχνολογία για τη διασύνδεση των σταθμών βάσης με το τηλεφωνικό δίκτυο του πάροχου.

Η χρήση ψηφιακής τεχνολογίας για τη σύνδεση μεταξύ κινητών τηλεφώνων και σταθμών βάσης βελτιώνει τις επικοινωνίες στα συστήματα 2<sup>ης</sup> γενιάς με δύο τρόπους:

1. Η ψηφιακή τεχνολογία επιτρέπει μεγάλο λόγο συμπίεσης καθώς και εκτεταμένη πολυπλεξία των ψηφιακών δεδομένων φωνής, μέσα από την κωδικοποίησή τους. Αυτό οδηγεί πιο αποδοτική χρήση του εύρους ζώνης της συχνότητας επιτρέποντας μεγαλύτερο αριθμό παράλληλα εξελισσόμενων τηλεφωνικών κλήσεων.
2. Τα ψηφιακά συστήματα εκπέμπουν ραδιοκύματα μικρότερης ισχύος με αποτέλεσμα οι τηλεπικοινωνιακές κυψέλες και οι σταθμοί υποστήριξής τους να μπορούν να κατασκευαστούν με μικρότερο κόστος. Συνεπώς, έχουμε υποδομές μεγαλύτερων δυνατοτήτων κάλυψης κινητών σταθμών με μικρότερο κόστος κατασκευής.

Τα δίκτυα 2<sup>ης</sup> γενιάς, όμως αντικαταστάθηκαν σταδιακά από τα δίκτυα επικοινωνιών *τρίτης* γενιάς (3G) - Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) σχεδόν σε παγκόσμιο επίπεδο, παρέχοντας προηγμένες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες φωνής και δεδομένων.

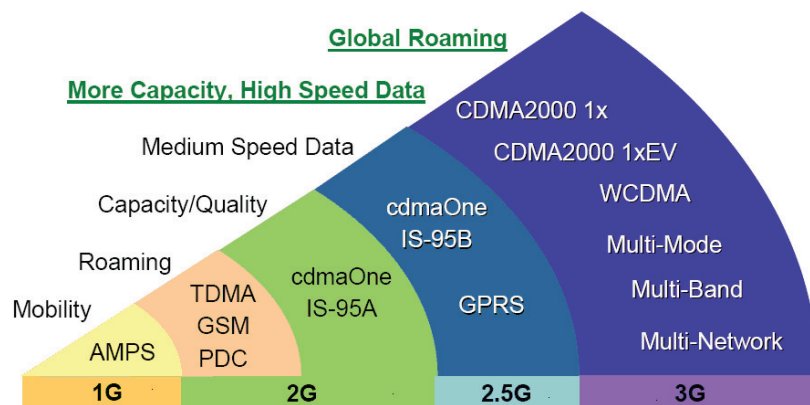
Όμως η ανάγκη προσφοράς όλο και μεγαλύτερων ταχυτήτων πρόσβασης (ευρυζωνικές συνδέσεις) ώθησε τα 3G δίκτυα σε περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωση, μέσω νέων τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών, κυριότερη από τις οποίες είναι η τεχνολογία High Speed Packet Access (HSPA) τεχνολογία. Αυτή η τεχνολογία αποτελεί τη φυσική εξέλιξη του προτύπου UMTS και, συνήθως, συναντάται με την ονομασία 3.5G ή 3G+, η οποία είναι δηλωτική του ότι αναβαθμίζεται το πρότυπο 3G (UMTS). Όμως το 3rd Generation Partnership Project (3GPP) ήδη διερευνά νέες τεχνολογίες, πέρα από το πρότυπο HSPA, οι οποίες αναμένονται να το βελτιώσουν και να

αποτελέσουν το πρότυπο της επόμενης δεκαετίας στην κινητή τηλεφωνία. Η διερεύνηση αυτή, με την ονομασία *Long Term Evolution* (LTE), έχει ως στόχο την δημιουργία προτύπων που μπορούν να επιτύχουν ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων με την αξιοποίηση μεγαλύτερου εύρους ζώνης συχνοτήτων.

## 2.2 Η 3<sup>η</sup> γενιά (3G) κινητών δικτύων

Η Εικόνα 1 (από [www.xcellextech.com](http://www.xcellextech.com)) δείχνει, σχηματικά, την εξέλιξη των προτύπων για τα *Κυψελωτά Κινητά Δίκτυα* (Cellular Mobile Networks) μέχρι την τρίτη γενιά.

Τα δίκτυα τρίτης γενιάς είχαν ως στόχο την παροχή *αδιάλειπτων* κινητών υπηρεσιών σε *κάθε* σημείο που μπορεί να βρεθεί ο χρήστης. Αυτό σημαίνει ότι ακόμη και όταν ο χρήστης υπηρεσιών των δικτύων αυτών βρεθεί σε περιοχή χωρίς κάλυψη από αυτά, τότε με αυτόματο και διαφανή στο χρήστη τρόπο (αυτόματη μεταγωγή δικτύου) γίνεται σύνδεση της κινητής του συσκευής με οποιοδήποτε δίκτυο είναι διαθέσιμο (π.χ. WLAN, WiFi, δορυφορικό κλπ.) και, μέσω αυτού, στις υπηρεσίες δικτύου τρίτης γενιάς.



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

Επιπρόσθετα, τα δίκτυα 3<sup>ης</sup> γενιάς προσφέρουν, πέρα από τις συμβατικές υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας, και υπηρεσίες διαδικτύου καθώς και πολυμεσικές υπηρεσίες σε εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες που ξεκινούν από τα 144 Kbps – KiloBit per second – και φτάνουν σε αρκετά Mbps. Με τον όρο «πολυμεσικές υπηρεσίες» χαρακτηρίζουμε εκείνες τις υπηρεσίες όπου παρέχεται

περιεχόμενο με εικόνες, κείμενο, και βίντεο. Όσον αφορά τα συστήματα 3<sup>ης</sup> γενιάς, τα επικρατέστερα είναι το UMTS (Ευρώπη), το CDMA2000 και το NTT Docomo (Ιαπωνία).

### 2.3 Η γενιά 3,5G κινητών δικτύων

Με τον όρο «γενιά 3,5» (3.5G ή 3G+) αναφερόμαστε σε μία νέα γενιά κινητών δικτύων τα οποία, πέρα από την τεχνολογία WCDMA, έχουν ενσωματωμένη και την τεχνολογία *High Speed Packet Access* (HSPA). Η έννοια HSPA, που προτάθηκε από τον οργανισμό UMTS, χαρακτηρίζει τις αναβαθμίσεις του UMTS Radio Interface των εκδόσεων 5 και 6 του προτύπου 3GPP, προσδιορίζοντας τα δίκτυα κινητών τηλεπικοινωνιών της επόμενης γενιάς.

Η τεχνολογία HSPA είναι μια νέα τεχνολογία που σχεδιάστηκε για να αυξήσει την ταχύτητα κατεβάσματος περιεχομένου (content download) κατά κύριο λόγο και, δευτερευόντως, και του ανεβάσματος περιεχομένου (content upload) για τα κινητά δίκτυα τρίτης γενιάς. Αυτό κρίθηκε μεγάλης σημασίας καθώς τα υπάρχοντα κινητά δίκτυα τρίτης γενιάς δεν μπορούσαν να υποστηρίξουν αποδοτικά «βαριές» (σε όγκο δεδομένων) εφαρμογές όπως είναι οι πολυμεσικές, ιδιαίτερα όταν πρέπει να εξυπηρετηθεί, ταυτόχρονα, μεγάλος αριθμός χρηστών. Τελικά, η τεχνολογία HSPA επέφερε βελτιώσεις και στο «κατέβασμα» περιεχομένου μέσω του *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) και του «ανεβάσματος», μέσω του *High Speed Uplink Packet Access* (HSUPA). Τα HSDPA και HSUPA μπορούν να λειτουργήσουν στο ίδιο εύρος ζώνης με το πρότυπο UMTS (5 MHz), πράγμα που επιτρέπει την ταυτόχρονη λειτουργία HSPA με το UMTS. Περαιτέρω, το HSDPA υλοποιήθηκε, για πρώτη φορά, στην έκδοση 5 του προτύπου 3GPP στάνταρ το 2005. Υποστηρίζει, δε, ταχύτητες μετάδοσης έως 14,4 Mbps για κάθε ένα χρήστη. Σχετικά με το «κατέβασμα» περιεχομένου, το HSUPA αποτέλεσε συστατικό μέρος της έκδοσης 6 του προτύπου 3GPP, υποστηρίζοντας ταχύτητες «ανεβάσματος» περιεχομένου έως 5,8 Mbps.

Η κεντρική βελτίωση που επέφερε το HSPA είναι ένα νέου τύπου ευρυζωνικό κανάλι το οποίο θα μπορεί να παρέχει μεγάλες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων. Το κανάλι αυτό ονομάζεται High Speed – Downlink Shared Channel (HS-DSCH) και βελτιώνει την απόδοση μόνο της διαδικασίας «κατεβάσματος» δεδομένων. Παρόλη τη βελτίωση στην ταχύτητα, η τεχνολογία HSPA δεν συνίσταται, για κάθε είδους εφαρμογή. Καθώς δεν παρέχει εγγυήσεις όσον αφορά τις καθυστερήσεις παραλαβής δεδομένων, δεν προτιμάται για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Για

τέτοιου είδους εφαρμογές, προτιμώνται dedicated channels, δηλαδή κανάλια αποκλειστικής χρήσης από την εφαρμογή. Όμως, η χρήση του HSPA είναι ενδεδειγμένη για την αύξηση της χωρητικότητας του καναλιού όταν σε αυτό διακινείται μεγάλος όγκος δεδομένων.

Οι μεγάλες ταχύτητες «κατεβάσματος» περιεχομένου, καθιστούν την τεχνολογία HSPA ιδανική για «βαριές» πολυμεσικές υπηρεσίες που απαιτούσαν, πρωτίτερα ενσύρματο ευρυζωνικό δίκτυο. Τέτοιες υπηρεσίες συμπεριλαμβάνουν τη γρήγορη σύνδεση στο διαδίκτυο, VoIP (Voice over IP, π.χ. Skype), διαδικτυακά παιχνίδια μεταξύ πολλών παικτών, real-time mobile TV, video/audio streaming, πλοήγηση με GPS/location based services κλπ.

#### 2.4 Οι εξελίξεις προς τη γενιά 4G

Οι υποψήφιες τεχνολογίες για την 4<sup>η</sup> γενιά δικτύων ήταν οι: LTE (Long Term Evolution) της 3GPP, mobile WiMax and UMB (Ultra Mobile Broadband) ξανά της 3GPP (δείτε Εικόνα 2 – πηγή: Jacob Scheim, “A comparison of two fourth generation technologies: WiMax and 3GPP-LTE.”, Comsys 2006). Και τα τρία συστήματα υπόσχονται χαμηλές καθυστερήσεις και, θεωρητικά, μέγιστες ταχύτητες.

Aspect	LTE	UMB	WiMax
Access Technology (DL)	OFDMA	OFMDA, SDMA, CDMA*	OFDMA
Access Technology (UL)	OFDMA	OFDMS, SDMA, CDMA*	OFDMA
Capable Speeds	100 Mb/s DL 50 Mb/s UL	280 Mb/s DL 75 Mb/s	75 Mb/s 25 Mb/s
Channel BW	1.25 to 20 MHz	1.25 to 20 MHz	5, to 20 MHz
Spectral Efficiency	5 bits/sec/Hz	4-6 bits/sec/Hz	3.25 bits/sec/Hz
Time to market	2010	2009	2008
Legacy	GSM/UMTS	CDMA2000	WiFi

Εικόνα 2: Οι εξελίξεις στην τεχνολογία των κυψελωτών συστημάτων 4G

Και οι τρεις αυτές τεχνολογίες είναι ευέλικτες όσον αφορά τη χρήση εύρους ζώνης, χρησιμοποιούν FDD/TDD duplexing, την τεχνική OFDMA στο «κατέβασμα» δεδομένων καθώς και σύστημα κεραιών MIMO. Υπάρχουν, όμως, και διαφορές κυρίως όσον αφορά το



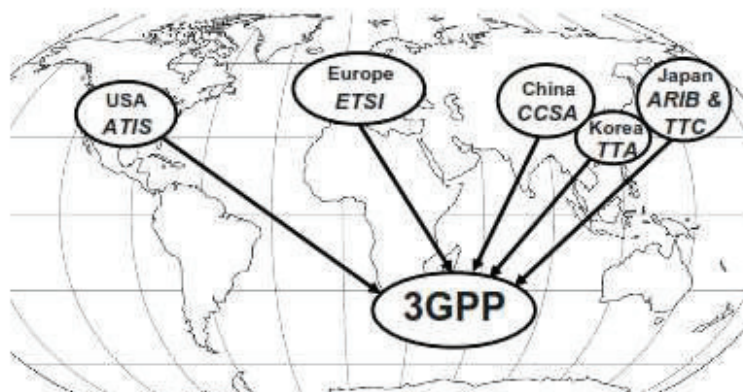
«ανέβασμα» δεδομένων. Για παράδειγμα, στη διαδικασία αυτή το LTE βασίζεται στο SC-FDMA ενώ οι τεχνολογίες κινητών τηλεφώνων WiMax και UMB βασίζονται στο OFDMA. Με βάση αυτά, αναμένεται η απόδοση των τριών τεχνολογιών να είναι παραπλήσια.

Σήμερα το πρότυπο που θα αποτελέσει το μέλλον στα συστήματα 4<sup>ης</sup> γενιάς είναι το LTE, και στο οποίο θα εστιάσουμε, αναφέροντας περισσότερες λεπτομέρειες, στη συνέχεια της εργασίας αυτής.

## 2.5 Η διαδικασία προτυποποίησης του 3GPP

Πριν συνεχίσουμε με την ανάλυση της προσπάθειας LTE, είναι σκόπιμο να αναφερθούμε, σύντομα, στον οργανισμό και τις διαδικασίες που βρίσκονται πίσω από κάθε τέτοια προσπάθεια δημιουργίας νέων, πιο αποδοτικών τηλεπικοινωνιακών προτύπων.

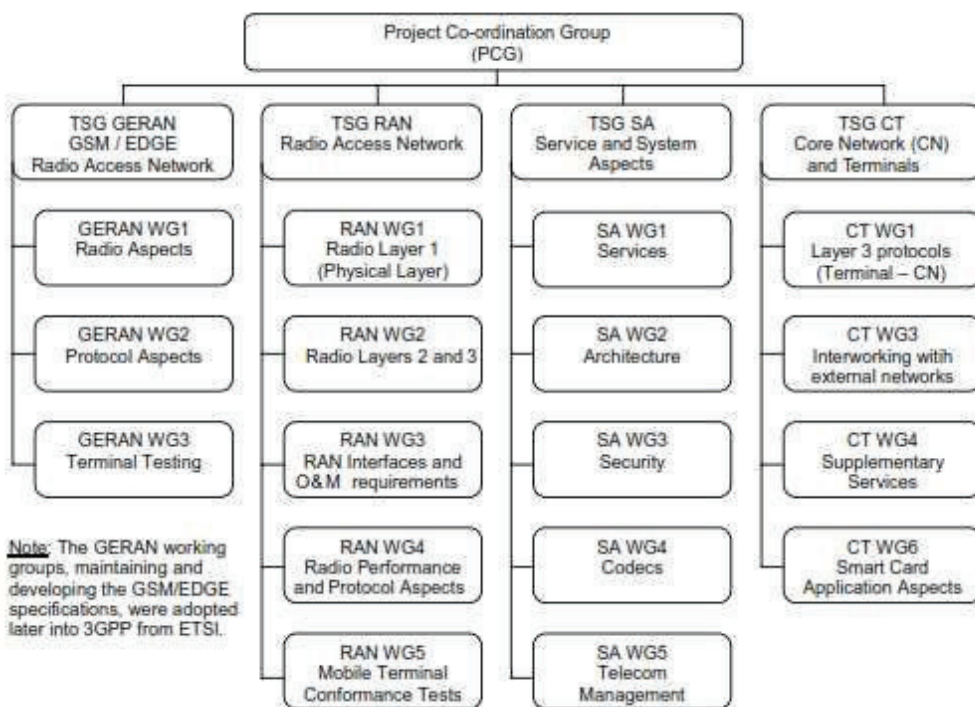
Ο οργανισμός αυτός ονομάζεται *3rd Generation Partnership Project* (3GPP – <http://www.3gpp.org/>) και συνασπίζει έξι οργανισμούς προτυποποίησης τηλεπικοινωνιακών συστημάτων (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TTA, TTC), γνωστούς ως «Οργανωτικούς Εταίρους» (Organizational Partners) ή Standards Development Organizations (SDOs) και παρέχει στα μέλη τους με ένα σταθερό περιβάλλον εργασίας για τη δημιουργία των εξαιρετικά επιτυχημένων αναφορών και προδιαγραφών που οδηγούν τις εξελίξεις στο χώρο των τηλεπικοινωνιών (δείτε εικόνα φαίνεται στην Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Το 3GPP και οι έξι SDOs

Φυσικά, η, μέχρι τώρα, επιτυχημένες προσπάθειες διατύπωσης των προδιαγραφών όπως είναι UMTS και το LTE προαπαιτούν μία ευέλικτη οργανωτική δομή με αποδοτικές διαδικασίες σχεδιασμού, ελέγχου και έγκρισης προτάσεων προτυποποίησης.

Στο 3GPP υπάρχουν τέσσερις κύριες ομάδες δημιουργίας και ελέγχου τεχνικών προδιαγραφών που ονομάζονται *Technical Specification Groups* (Ομάδες Τεχνικών Προδιαγραφών) ή, σύντομα, TSGs. Οργανωτικά, κάθε μια από τις τέσσερις αυτές ομάδες διευθύνει έναν αριθμό άλλων *Ομάδων Εργασίας* (Working Groups ή WGs) κάθε μία από τις οποίες εξετάζει διαφορετικές πτυχές ενός, υπό διερεύνηση, προτύπου (δείτε Εικόνα 4).



Εικόνα 4: Η δομή της ομάδας εργασίας του 3GPP

Η λήψη αποφάσεων εντός μιας ομάδας εργασίας γίνεται μέσα από μία διαδικασία εκτενών συζητήσεων μέσα από συναίνεση. Όλο το υλικό που υποβάλλεται προς εξέταση στο 3GPP είναι δημόσια διαθέσιμα μέσα από την ιστοσελίδα του.

Για να φτάσουν στη λήψη μιας απόφασης, οι ομάδες εργασίας λαμβάνουν υπόψη τους στοιχεία που συμπεριλαμβάνουν την απόδοση μιας τεχνολογίας, το κόστος υιοθέτησής της, τη δυσκολία υλοποίησής της καθώς και τη συμβατότητά της με άλλες τεχνολογίες.

Σημαντική τεχνική υποβοήθηση της διαδικασίας λήψης απόφασης αποτελεί και η *προσομοίωση* των προτεινόμενων τεχνολογιών. Με τις προσομοιώσεις, οι ομάδες εργασίας έχουν τη δυνατότητα να συγκρίνουν, με μικρό κόστος και εντός μικρού χρονικού διαστήματος, την

αποδοτικότητα των ανταγωνιστικών προτάσεων. Φυσικά, με στόχο τη δικαιότερη σύγκριση, οι ομάδες εργασίας επικοινωνούν με τα εμπλεκόμενα μέρη (stakeholders) για να καθορίσει τα σενάρια καθώς και τις παραμέτρους των προσομοιώσεων.

Ειδικότερα για το LTE, που αποτελεί το κεντρικό θέμα την παρούσας εργασίας, αναφέρουμε ότι εγκαινιάστηκε σε ένα εργαστήριο στο Τορόντο τον Νοέμβριο του 2004, με τις προτάσεις διάφορων εταιριών που δραστηριοποιούνταν στο χώρο των τηλεπικοινωνιών 0.

### **3 Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του LTE**

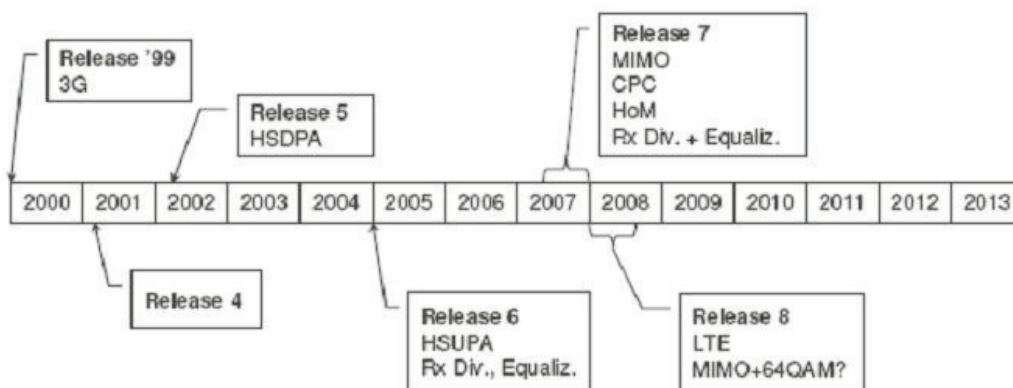
Ο βασικός στόχος του LTE είναι η βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας υπηρεσιών και εφαρμογών που χρησιμοποιούν μεταγωγή πακέτων για τη μετάδοση δεδομένων (packet switching) όπως είναι οι εφαρμογές multimedia. Στόχος, επίσης, είναι η υπέρβαση των ορίων των 14.4 Mbps και 5.8 Mbps που επιτυγχάνονται στα πρότυπα HSDPA και HSUPA αντιστοίχως.

Πιο συγκεκριμένα, οι πιο βασικές απαιτήσεις που στοχεύει να ικανοποιήσει το πρότυπο LTE είναι οι εξής:

1. **Εύρος Ζώνης:** υποστηρίζεται κλιμακωτή χρήση φάσματος εύρους ζώνης της τάξης των 5, 10, 15 και 20 MHz. Προβλέπεται, επίσης, και χρήση εύρους ζώνης μικρότερου των 5 MHz (στα 1.5 MHz και 2.5 MHz) για ευελιξία στις περιπτώσεις που κάτι τέτοιο είναι επιθυμητό ή αναγκαίο.
2. **Ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων:** υποστήριξη ταχυτήτων της τάξης των 100 Mbps για «κατέβασμα» δεδομένων και 50 Mbps για «ανέβασμα» δεδομένων, σε εύρος ζώνης 20 MHz.
3. **Mode λειτουργίας:** υποστήριξη των FDD και TDD modes.
4. **Throughput:** επίτευξη τριπλάσιου έως τετραπλάσιου μέσου throughput χρήστη ανά MHz στον σύνδεσμο λήψης δεδομένων και διπλάσιου έως τριπλάσιου throughput για αποστολή δεδομένων, σε σύγκριση με τις εκδόσεις 6 και 7 των 3GPP προτύπων HSDPA και HSUPA.

5. **Αποδοτικότητα χρήσης φάσματος:** επίτευξη 2 έως 3 φορές μεγαλύτερης αποδοτικότητας φάσματος σε σύγκριση με την έκδοση 6 του 3GPP προτύπου HSDPA.
6. **Καθυστερήση:** επίτευξη σημαντικής μείωσης της round-trip καθυστέρησης από το χρήστη έως το σταθμό βάσης, στα 5 έως 10 ms.
7. **Κινητικότητα:** ύπαρξη δυνατότητας βέλτιστης λειτουργίας για χαμηλές ταχύτητες κίνησης των χρηστών (0 έως 15 χιλιόμετρα ανά ώρα) καθώς και δυνατότητα υποστήριξης χρηστών που κινούνται σε υψηλότερες ταχύτητες.
8. **Διαλειτουργικότητα:** ύπαρξη δυνατότητας ταυτόχρονης λειτουργίας με πρότυπα τηλεπικοινωνιών που δεν έχουν προτυποποιηθεί από το 3GPP καθώς και με τα υπάρχοντα συστήματα UTRAN/GERAN.. Παράλληλα προβλέπεται η υποστήριξη ομαλής και διαφανούς προς το χρήστη μεταγωγής από και προς τα συστήματα αυτά.
9. **Ποιότητα Υπηρεσίας:** πλήρης υποστήριξη point-to-point ποιότητας υπηρεσίας (QoS), για την υποστήριξη απαιτητικών εφαρμογών, όπως είναι οι εφαρμογές VoIP.

Συνοπτικά, η χρονολογική αλληλουχία των προτύπων 3GPP για συστήματα κινητής τηλεφωνίας, από τα συστήματα 3G έως και συστήματα επόμενης γενιάς LTE, διαφαίνεται στην Εικόνα 5.



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

Το πρότυπο 3G/UMTS υιοθετήθηκε, αρχικά, στην Release '99 του 3GPP, στην Release 5 έγινε η εισαγωγή του HSDPA, στην Release 6 η εισαγωγή του HSUPA, ενώ στη Release 7 έχουμε το πρότυπο LTE, το οποίο αναλύεται στις Release 8 και 9 του 3GPP.

Επιστρέφοντας, τώρα, στις απαιτήσεις από το LTE, είναι φανερό ότι για την ικανοποίησή τους θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν και οι κατάλληλες τεχνολογίες ασύρματης μετάδοσης πληροφοριών. Μία από αυτές τις τεχνολογίες είναι και η τεχνολογία διαμόρφωσης και πολυπλεξίας σημάτων με την ονομασία OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing). Το κυριότερο χαρακτηριστικό της τεχνολογίας αυτής είναι η εξαιρετική αντοχή του σε περιβάλλοντα λειτουργίας με μεγάλη εξασθένηση σήματος και ισχυρές παρεμβολές. Ειδικότερα για το κατέβασμα δεδομένων, που συνήθως ενδιαφέρει περισσότερο τους χρήστες, η τεχνολογία OFDM παίζει σημαντικό ρόλο, με αποτέλεσμα την υιοθέτησή της από 3GPP.

Ταυτόχρονα, για το ανέβασμα δεδομένων, προτείνεται στο πρότυπο LTE η χρήση της τεχνολογίας Single Carrier OFDM (SC-OFDM). Αυτή η πτυχή του LTE το διαφοροποιεί από το πρότυπο WiMAX, το οποίο υιοθετεί την τεχνική OFDMA για το ανέβασμα δεδομένων. Η τεχνική αυτή, αν και έχει σημαντικά πλεονεκτήματα, εν τούτοις απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ισχύος από την μπαταρία της κινητής συσκευής. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που το LTE υιοθέτησε την τεχνική SC-OFDM. Επίσης, η τεχνική SC-OFDM παρέχει υψηλή απόδοση και έχει μικρή πολυπλοκότητα υλοποίησης της κεραίας των σταθμών βάσης του κινητού δικτύου.

Τέλος, μία τεχνολογία που μπορεί να υποστηρίξει ακόμη μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μαζί με αυξημένη κάλυψη δικτύου και χωρητικότητα καναλιού στο πρότυπο LTE είναι η τεχνική MIMO (Multiple Input and Multiple Output). Η τεχνική αυτή προδιαγράφει την ύπαρξη πολλαπλών κεραιών στον σταθμό βάσης καθώς και στην κινητή συσκευή 0. Στην παρούσα εργασία, όμως, δεν θα αναφερθούμε περαιτέρω στην τεχνική αυτή.

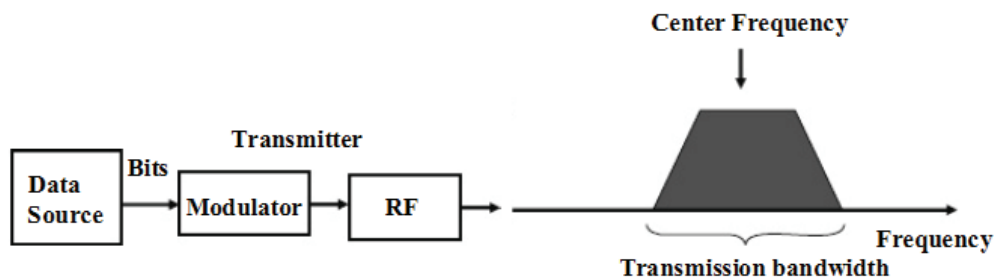
## 4 Η τεχνική OFDM

### 4.1 Βασικές αρχές διαμόρφωσης και πολυπλεξίας σημάτων

Η μετάδοση ενός σήματος με τρόπο Single Carrier (SC) σημαίνει ότι η εκπεμπόμενη πληροφορία διαμορφώνει έναν μόνο φορέα (ημιτονοειδής συχνότητα), το φέρον κύμα, προσαρμόζοντας τη φάση ή το πλάτος του ή, ακόμη, και τα δύο. Διαμόρφωση μπορεί να γίνει ακόμη και στη συχνότητα αλλά κάτι τέτοιο δεν θα ήταν αποτελεσματικό για τους στόχους του LTE.

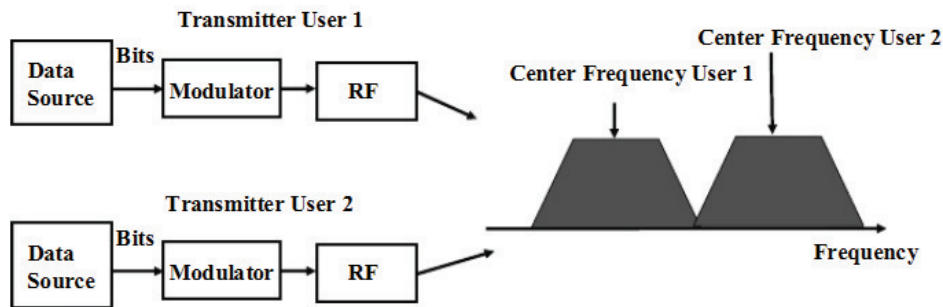
Σε ένα ψηφιακό σύστημα όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός δεδομένων τόσο μεγαλύτερος είναι και ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων και, συνεπώς, και το εύρος ζώνης είναι μεγαλύτερο. Με τη χρήση της απλής διαμόρφωσης Quadrature Amplitude Modulation (QAM), ο πομπός του σήματος προσαρμόζει το σήμα έτσι ώστε αυτό να μεταφέρει τον επιθυμητό αριθμό των bits ανά σύμβολο. Η τελική κυματομορφή φάσματος είναι ένα φάσμα ενός φέροντος, όπως φαίνεται στην εικόνα πιο κάτω:

Με τις βασικές αρχές του Frequency Division Multiple Access (FDMA), διαφορετικοί χρήστες θα μπορούν να χρησιμοποιούν διαφορετικούς φορείς ή υπο-φορείς, όπως φαίνεται στην εικόνα 3-2, για να έχουν πρόσβαση στο σύστημα ταυτόχρονα έχοντας διαμορφώσει τα δεδομένα τους γύρω από διαφορετικές κεντρικές συχνότητες.



Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στη δημιουργία της κυματομορφής με τρόπο ώστε να μην υπάρχει πολύ μεγάλη αλληλεπίδραση μεταξύ των φορέων. Επιπλέον, ο ένας φορέας δεν πρέπει να χρησιμοποιεί μεγάλα διαστήματα ασφαλείας μεταξύ των χρηστών.

Η βασική αρχή πολλαπλών φερόντων απεικονίζεται στην εικόνα πιο κάτω, όπου τα δεδομένα διαχωρίζονται σε διαφορετικούς υπο-φορείς σε έναν πομπό:



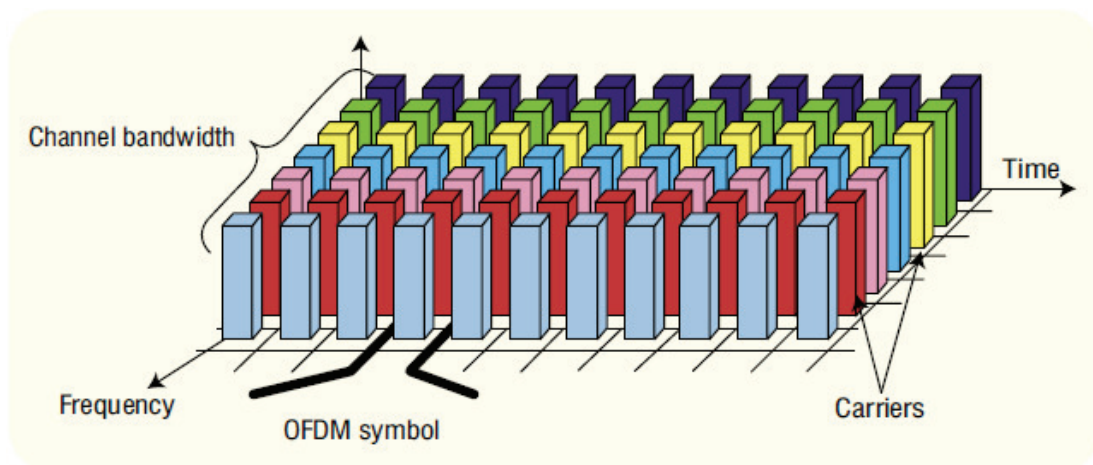
Το παράδειγμα της εικόνας αυτής έχει ένα σύνολο φίλτρων, το οποίο, στην πράξη συχνά συχνά αντικαθίσταται με τον αντίστροφο μετασχηματισμό FFT (IFFT) (δείτε πιο κάτω για περισσότερες λεπτομέρειες) για εφαρμογές όπου ο αριθμός των υπο-φορέων είναι υψηλός. Επιπρόσθετα, υπάρχει ένα σταθερό διάστημα μεταξύ των γειτονικών υπο-φορέων για προστασία από παρεμβολές.

Το πρότυπο LTE έχει οριστεί να χρησιμοποιεί την τεχνική διαμόρφωσης OFDM για τη βελτίωση της ταχύτητας και ανοχής της σύνδεσης κατεβάσματος δεδομένων. Επιπρόσθετα, η τεχνική OFDM καλύπτει την απαίτηση για ευέλικτη χρήση του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων. Η OFDM είναι μια ευρύτατα διαδεδομένη τεχνική διαμόρφωσης σε πρότυπα όπως τα IEEE 802.11a/b/g, 802.16, HiperLan-2, Video Broadcast (DVB) και Digital Audio Broadcast (DAB).

Η τεχνική πολυπλεξίας σημάτων στο πεδίο των συχνοτήτων (FDM – Frequency Division Multiplexing) προδιαγράφει την ταυτόχρονη μετάδοση πολλών εκπεμπόμενων σημάτων μέσα από ένα κανάλι (π.χ. ασύρματη σύνδεση). Κάθε σήμα έχει τη δική του φέρουσα συχνότητα (carrier frequency) η οποία διαμορφώνεται από τα δεδομένα (κείμενο, φωνή, βίντεο, κλπ). Η τεχνική OFDM κατανέμει τα δεδομένα σε έναν αριθμό φορέων που ανήκουν σε φασματικές περιοχές συγκεκριμένων συχνοτήτων. Με αυτό τον διαχωρισμό σε διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων επιτυγχάνεται η *ορθογωνιότητα* (το “Ο” στο αρκτικόλεξο OFFM), δηλαδή η λήψη καθενός σήματος μόνο από το δικό του αποδιαμορφωτή και όχι από άλλους. Συνεπώς, η χρήση του OFDM έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα: υψηλή φασματική απόδοση, ανθεκτικότητα σε παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών ραδιοσυχνοτήτων καθώς και μικρότερη παραμόρφωση.

Σε ψηφιακά συστήματα, οι πληροφορίες είναι, υπό 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 την χρήση της τεχνικής OFDM, κάθε μία από τις φέρουσες συχνότητες είναι διαμορφωμένη από ένα κομμάτι της πληροφορίας που μεταφέρεται σε κάθε ζώνη συχνοτήτων. Οι διαφορετικές φέρουσες συχνότητες είναι, ανά δύο, ορθογώνιες, δηλαδή ανεξάρτητες (δείτε Εικόνα 6).



**Εικόνα 6: Κάθε ένα από τα timeslots περιέχει OFDM σύμβολα, καθένα από τα οποία σε διαφορετική συχνότητα**

Μέσα από την τεχνική OFDM περιορίζονται οι παρεμβολές μεταξύ των φερουσών που μεταδίδουν τα σύμβολα καθώς αυτές έχουν κατανεμηθεί σε διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων ίδιου πλάτους. Βέβαια, η χρήση των πολλών ορθογώνιων φερουσών αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος, αλλά αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί μέσα από τον Αντίστροφο Διακριτό Μετασχηματισμό Fourier και τον Διακριτό Μετασχηματισμό Fourier (Inverse Discrete Fourier Transform / Discrete Fourier Transform (IDFT / DFT)) 0. Στη συνέχεια, περιγράφουμε το πώς λειτουργεί η τεχνική OFDM και OFDM Access (OFDMA).

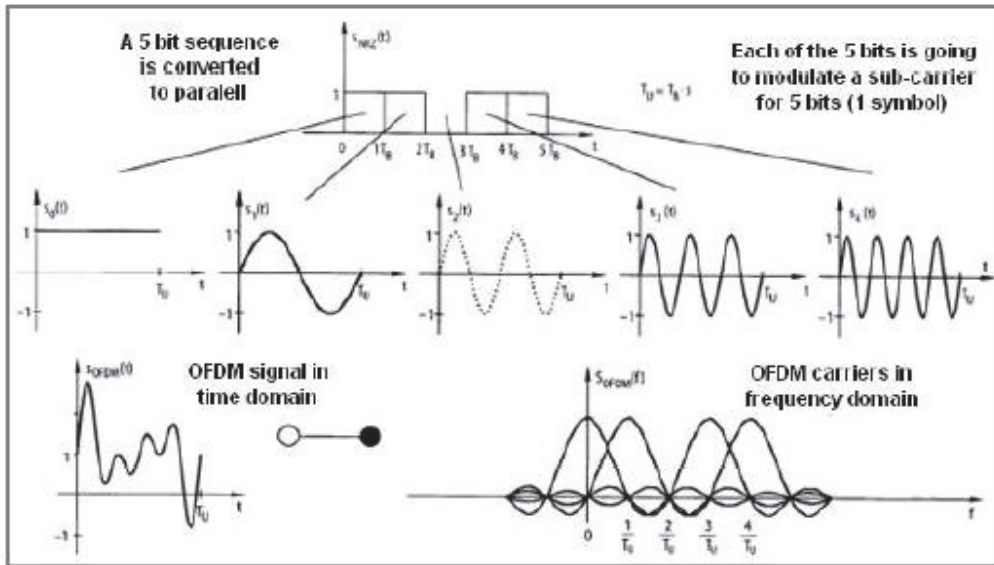


## 4.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Ένα από τα πιο βασικά αποτελέσματα της ανάλυσης σημάτων, κάθε περιοδικό σήμα στο πεδίο του χρόνου μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένα άπειρο άθροισμα (δηλαδή γραμμικός μετασχηματισμός) ημιτόνων και συνημίτονων, τα οποία είναι ορθογώνια, μεταξύ τους, σήματα. Αυτό το άθροισμα αποτελεί την αναπαράσταση του σήματος στο πεδίο των συχνοτήτων και τα ύψη των ημιτόνων και συνημίτονων αναπαριστούν την ενέργεια του σήματος που αντιστοιχεί στην κάθε συχνότητα που εμπεριέχεται σε αυτό. Ο μετασχηματισμός αυτός ονομάζεται μετασχηματισμός Fourier και αποτελεί βασικό μαθηματικό εργαλείο της θεωρίας και επεξεργασίας σημάτων.

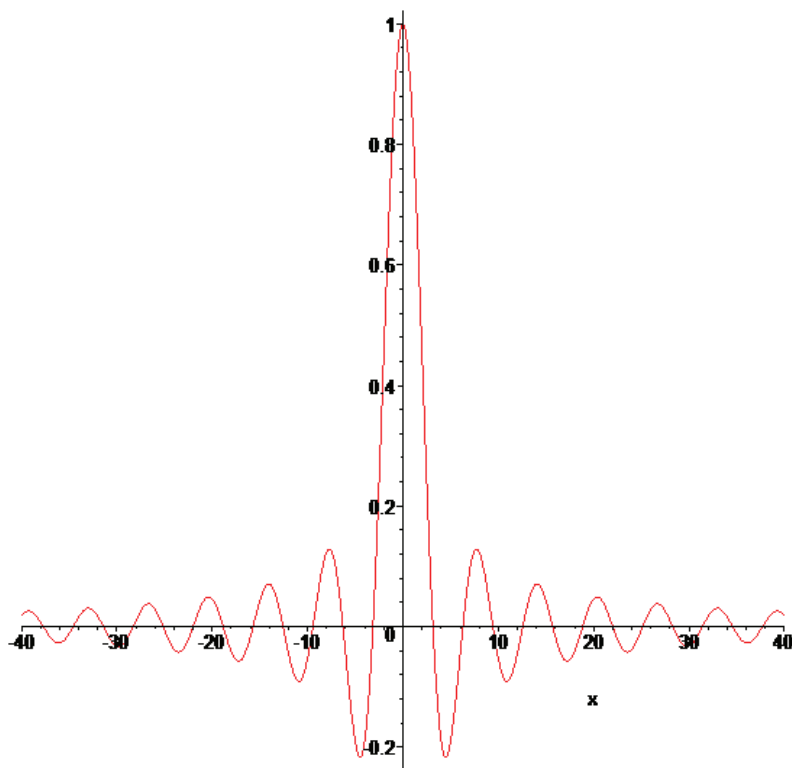
Με βάση τον μετασχηματισμό Fourier, ο βασικός τρόπος λειτουργίας του OFDM μπορεί να περιγραφεί σύμφωνα με την Εικόνα 7. Εν συντομία, ένα OFDM σύστημα εκπομπής και λήψης ενός σήματος, λαμβάνει τα προς μετάδοση σύμβολα στο πεδίο των συχνοτήτων (frequency domain). Στη συνέχεια, τα σύμβολα αυτά υπόκεινται σε μία διαδικασία Γρήγορου, Αντίστροφου Μετασχηματισμού Fourier (Inverse Fast Fourier Transform ή IFFT) η οποία και μετατρέπει το σήμα σε αναπαράσταση στο πεδίο του χρόνου. Ο μετασχηματισμός IFFT λειτουργεί με  $N$  ταυτόχρονα μεταδιδόμενα σύμβολα (όπου  $N$  είναι ο αριθμός των υπό-φερουσών του συστήματος OFDM), κάθε ένα με περίοδο  $T$  δευτερόλεπτων. Το αποτέλεσμα είναι ένα ενιαίο, και μοναδικό OFDM σύμβολο.

Τα βασικά στοιχεία ενός IFFT είναι  $N$  ορθογώνια ημιτονοειδή σήματα, διαφορετικής συχνότητας. Κάθε σύμβολο εκλαμβάνεται ως ένας μιγαδικός αριθμός-συντελεστής βάρους στο αντίστοιχο ημιτονοειδές. Την τιμή κάθε συμβόλου καθορίζουν το εύρος και η φάση της ημιτονοειδούς φέρουσας. Η έξοδος του IFFT είναι, τελικά, το άθροισμα αυτών των  $N$  ημιτονοειδών. Στο τέλος, έχουμε ένα ενιαίο OFDM σύμβολο μήκους  $NXT$  που θα σταλεί στο πεδίο του χρόνου μέσα από το κανάλι μετάδοσης. Στη συνέχεια, στο δέκτη, το ληφθέν σήμα θα υποβληθεί σε έναν Γρήγορο Μετασχηματισμό Fourier (Fast Fourier Transform ή FFT) και θα μετασχηματιστεί, πάλι, στο πεδίο συχνοτήτων.



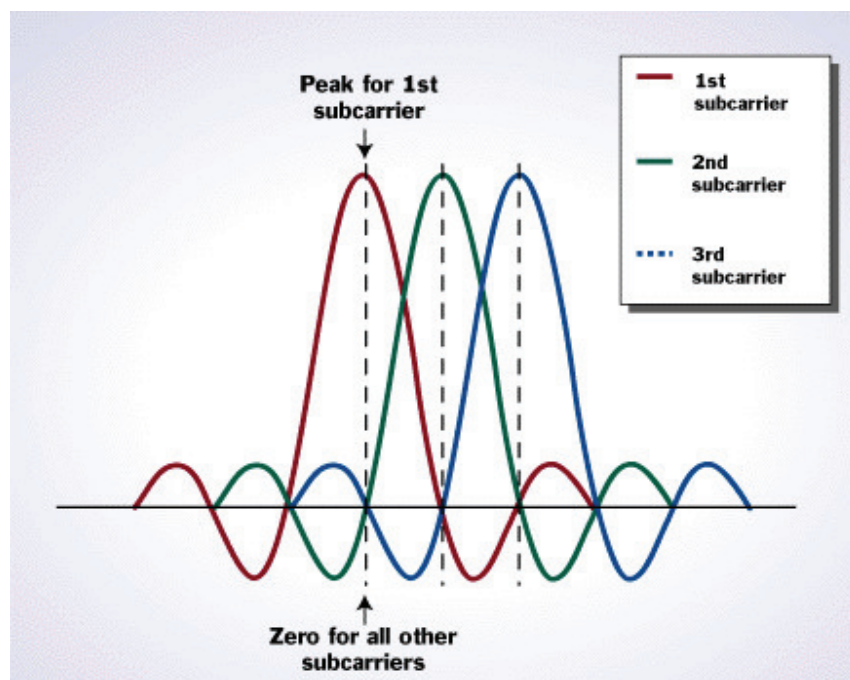
Εικόνα 7: Ο τρόπος λειτουργίας του OFDM

Από τις ιδιότητες του IFFT, οι υπό-διάλογοι δεδομένων έχουν την μορφή της συνάρτησης  $\frac{\sin x}{x}$ , η οποία φαίνεται στο σχήμα πιο κάτω:



Στην

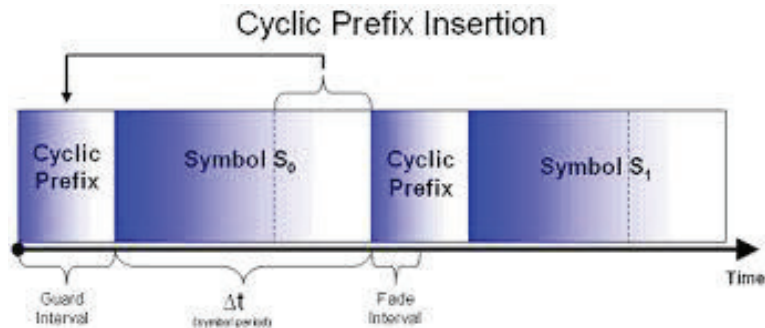
Εικόνα 8, για παράδειγμα, φαίνεται το φάσμα των τριών OFDM υπό-φερουσών και δείχνει ότι το φάσμα αλληλεπικαλύπτεται, μερικώς, οδηγώντας σε μεγαλύτερη φασματική απόδοση σε σύγκριση με τις συμβατικές multi-carrier τεχνικές. Πάντως, ο διαχωρισμός των υπό-φερουσών δεν είναι δυνατό να γίνει μέσω φιλτραρίσματος στο πεδίο συχνοτήτων παρά μόνο με τεχνικές επεξεργασίας σήματος βασικής ζώνης (base band processing), οι οποίες και διατηρούν την ορθογωνιότητα των υπο-φερουσών (ημιτονοειδή σήματα). Στην εικόνα πιο κάτω, η ιδιότητα αυτή είναι προφανής όπου το μέγιστο πλάτος μίας υπό-φέρουσας επιτυγχάνεται όταν το γειτονικό υπό-φέρον έχει μηδενικό πλάτος.



Εικόνα 8: Το φάσμα τριών υπο-φερουσών που απαρτίζουν ένα OFDM σήμα

Σε ένα σύστημα OFDM πολλαπλών διαδρομών σήματος (multi-path), μπορεί να υπάρξει λάθος στη λήψη ενός συμβόλου, εξαιτίας παρεμβολών από το προηγούμενο ληφθέν σύμβολο. Γενικά, ενώ σε ένα ενιαίο σύστημα μεταφοράς συμβόλων μεταφέρονται R σύμβολα σε κάθε χρονική στιγμή, σε ένα OFDM σύστημα, υπάρχουν N υπό-φέρουσες όπου κάθε μια μεταφέρει R/M σύμβολα ανά χρονική στιγμή. Άρα, με δεδομένο ότι ο ρυθμός μειώνεται κατά ένα συντελεστή τάξης N, κατά την περίοδο εκπομπής ενός OFDM συμβόλου ο ρυθμός αυτός αυξάνεται κατά ένα συντελεστή N. Πάντως, το μήκος ενός OFDM συμβόλου μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το μήκος του καναλιού. Στην περίπτωση αυτή, η αρχή του OFDM συμβόλου θα αλλοιωθεί από το προηγούμενο σύμβολο που μεταφερόταν. Για την αποφυγή του φαινομένου αυτού, υπάρχει ένα διάστημα ασφάλειας μεταξύ των

εκπομπών δύο διαδοχικών συμβόλων. Συνήθως, χρησιμοποιείται ένα κυκλικό πρόθεμα (CP), στο οποίο το σύμβολο αναπαράγεται κατά την έναρξη κάθε σύμβολου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 9.



Εικόνα 9: Κυκλικό πρόθεμα

Η εισαγωγή ενός ικανά μεγάλου περιθωρίου CP μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά τις αρνητικές επιπτώσεις των πολλαπλών διαδρομών. Παρόλα αυτά, όμως, αυτό επιφέρει μεγάλη απώλεια ισχύος. Συνεπώς, υπάρχει μια διαδικασία trade-off (συμβιβασμού) για τον καθορισμό του περιθωρίου αυτού.

Αν, τώρα, η μέγιστη καθυστέρηση έχει διάρκεια  $N$ , προσθέτοντας ένα περιθώριο προστασίας διάρκειας τουλάχιστον  $N+1$  θα εξασφαλίσει ότι κάθε σύμβολο OFDM θα είναι, πραγματικά, ανεξάρτητο από το προηγούμενο καθώς και το επόμενο σύμβολο.

Γενικά, ένα σύμβολο του OFDM στο πεδίο του χρόνου μπορεί να αναπαρασταθεί ως μια ακολουθία μήκους  $L$ :

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

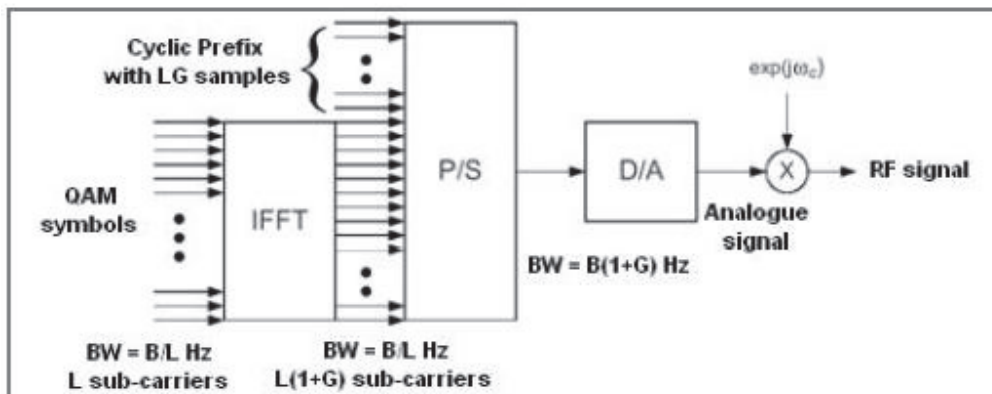
Μετά την εισαγωγή του περιθωρίου CP, η ακολουθία αυτή θα μετασχηματιστεί ως εξής:

$$X_{CP} = [X_{L-1}, X_{L-2}, \dots, X_0, X_1, \dots, X_{L-1}]$$

Τότε η έξοδος του καναλιού είναι η συνέλιξη (convolution)  $H * X$ , όπου  $H$  είναι το διάνυσμα μήκους  $N + 1$  που προκύπτει από την κρουστική απόκριση (impulse response) του καναλιού κατά τη διάρκεια αποστολής του συμβόλου OFDM. Η ακολουθία  $H * X$  αποτελείται από  $(L+N)$  στοιχεία, όπου τα πρώτα  $N$  στοιχεία αντιστοιχούν στο προηγούμενο OFDM σύμβολο, έτσι ώστε να απορριφθούν και τα τελευταία στοιχεία του περιθωρίου CP. Στο

τέλος, τα  $L$  στοιχεία που απομένουν αντιστοιχούν ακριβώς στα στοιχεία του συμβόλου OFDM. Όμως, αυτό δημιουργεί το πρόβλημα της αύξησης του εύρους ζώνης από  $B$  σε  $(L+v/L)B$ , γεγονός που οδηγεί σε απώλειες. Οι απώλειες αυτές προέκυψαν προκύπτουν από τον παράγοντα  $v/L$ , όπου  $L$  είναι το μέγεθος των δειγμάτων FFT που χρησιμοποιείται (συχνά χρησιμοποιούμενες τιμές για τον αριθμό δειγμάτων είναι οι εξής: 128, 256, 1024 και 2048). Όσο υψηλότερη είναι η τιμή του  $L$ , τόσο πιο αποτελεσματικό είναι το σύστημα OFDM ενώ, επιπλέον, τόσο μεγαλύτερο εύρος ζώνης χρειάζεται για να διατηρηθεί ο ίδιος ρυθμός μετάδοσης bits (bit-rate).

**Κατά την μετατροπή από την παράλληλη αναπαράσταση στη σειριακή, στο δέκτη, οι προστατευτικές ζώνες (και μαζί τους τα κυκλικά προθέματα) αφαιρούνται πριν από την μετατροπή τους από τη σειριακή στην παράλληλη ξανά. Η έξοδος της μετατροπής του Serial/Parallel (S/P) του δέκτη υποβάλλεται, στη συνέχεια, σε μετασχηματισμό DFT (δείτε την Εικόνα 10).**



**Εικόνα 10: Το Data block ενός συστήματος OFDM**

Οι  $L$  υπο-φέρουσες εμφανίζονται παράλληλα στη μονάδα IFFT, στην οποία μετατρέπονται σε αναπαράσταση στο πεδίο του χρόνου. Μετά από τη μετατροπή αυτή, προστίθενται  $L$  CP μεγέθους  $G$  (δηλαδή  $LG$  διαστήματα συνολικά). Στη συνέχεια γίνεται μετατροπή από παράλληλη αναπαράσταση σε σειριακή (P/S). Τότε ο ρυθμός μετάδοσης είναι ο εξής:

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

Κάθε μια από τις  $L$  υπο-φέρουσες με εύρος ζώνης  $B/L$  περιέχει δεδομένα μήκους  $\log_2(M)$  bits. Η χρήση του χρονικού διαστήματος ασφαλείας CP επιφέρει, όμως, μείωση του ρυθμού μετάδοσης κατά ένα παράγοντα  $1/(1+G)$

Στο τελικό στάδιο, πραγματοποιείται η μετατροπή του σήματος από ψηφιακή μορφή σε αναλογική. Ο OFDM δέκτης εκτελεί την ίδια, ακριβώς, ακολουθία μετασχηματισμών όπως και ο πομπός, με την αντίστροφη όμως σειρά.

Η διαδικασία αποδιαμόρφωσης των συμβόλων OFDM περιλαμβάνει δύο ειδών συγχρονισμούς στο δέκτη:

- **Συγχρονισμός στο πεδίο του χρόνου:** Η χρονική αντιστάθμιση των συμβόλων δεν είναι επιβλαβής για το σύστημα OFDM και, συνεπώς, οι χρονικές απαιτήσεις συγχρονισμού δεν είναι πολύ αυστηρές.
- **Συγχρονισμός στο πεδίο των συχνοτήτων:** Οι απαιτήσεις για συγχρονισμό στο πεδίο των συχνοτήτων είναι πιο αυστηρές σε σχέση με το πεδίο του χρόνου λόγω της θεμελιώδους απαίτησης της ορθογωνιότητας των φορέων.

#### 4.3 *Μερικές παρατηρήσεις επί του σχεδιασμού της τεχνικής OFDM*

Αν και η χρήση πολλών υπο-φερουσών αποτελεί βασικό πλεονέκτημα της τεχνικής OFDM, εν τούτοις υπάρχει και η αρνητική πλευρά αυτού του χαρακτηριστικού: το υψηλό Peak-to-Average Power Ratio (PAPR). Το υψηλό PAPR δημιουργεί δυσκολίες στη μετατροπή μεταξύ αναλογικής και ψηφιακής μορφής του σήματος. Παράγοντες όπως αυτός, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το στάδιο σχεδιασμού ενός συστήματος βασισμένου στην τεχνική OFDM.

Οι πιο βασικοί από τους παράγοντες αυτούς είναι οι εξής:

1. **Διαθεσιμότητα εύρους ζώνης.** Όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης, τόσο περισσότερες υπο-φέρουσες μπορούν να χωρέσουν, με ένα λογικό περιθώριο CP.
2. **Ρυθμός μετάδοσης.** Το σύστημα πρέπει να μπορεί να υποστηρίξει τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

3. **Καθυστέρηση.** Θα πρέπει να είναι καθορισμένη από πριν η μέγιστη καθυστέρηση έτσι ώστε να είναι δυνατός ο καθορισμός κατάλληλης τιμής για το CP,
4. **Αριθμός των υπο-φερουσών.** Είναι επιθυμητό να υπάρχουν πολλές υπο-φέρουσες για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων από την ύπαρξη πολλαπλών μονοπατιών μετάδοσης του σήματος. Όμως, ο αριθμός αυτός δεν θα είναι πολύ μεγάλος έτσι ώστε να είναι εφικτός ο συγχρονισμός στο σημείο παραλαβής των δεδομένων (δέκτης).
5. **Διάρκεια κάθε συμβόλου και μέγεθος CP.** Θα πρέπει να επιλεγθούν κατάλληλες τιμές για τις παραμέτρους αυτές έτσι ώστε να μην συντελεστεί μείωση του διαθέσιμου εύρους ζώνης συχνοτήτων.
6. **Εντοπισμός και διόρθωση σφαλμάτων.** Είναι σημαντική η ενσωμάτωση κωδικοποίησης για εντοπισμό και διόρθωση σφαλμάτων για ισχυροποίηση της αξιοπιστίας των αποστελλόμενων δεδομένων.

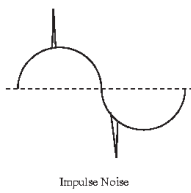
#### 4.4 *Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής OFDM*

Όπως θα έχει διαφανεί από την συζήτησή μας μέχρι τώρα, η τεχνική OFDM παρέχει πολλά πλεονεκτήματα, μερικά από τα οποία είναι τα εξής:

1. **Μειωμένη πολυπλοκότητα** – Το OFDM μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί με τη χρήση FFT / IFFT, καθώς και τις απαιτήσεις επεξεργασίας να αυξηθούν μόνον ελαφρώς ταχύτερα από ό, τι η γραμμική ταχύτητα επεξεργασίας των δεδομένων.
2. **Αξιοποίηση της διαφορετικότητας συχνότητας** – Το OFDM διευκολύνει την κωδικοποίηση και την χρονική διάχυση των πλαισίων εκπομπής (interleaving) από την τοποθέτηση δεδομένων σε μη συνεχόμενο τρόπο που χρησιμοποιούν οι υπό-φέρουσες στο πεδίο της συχνότητας παρέχοντας έτσι ανθεκτικότητα σε σφάλματα μετάδοσης.
3. **Αξιοποίηση σε πολλαπλά συστήματα πρόσβασης** – Το OFDM μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πολλαπλό σύστημα πρόσβασης στο οποίο οι διάφορες επιμέρους υπό-φέρουσες κατανέμονται σε πολλαπλούς χρήστες (OFDMA).

4. **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.

Τέλος, με στόχο την περαιτέρω ανάδειξη των πλεονεκτημάτων της τεχνικής OFDM, πιο κάτω συνοψίζουμε τα βασικότερα χαρακτηριστικά της τεχνικής OFDM έναντι των αντίστοιχων χαρακτηριστικών της τεχνικής CDMA:

	CDMA	OFDM
1.	Η τεχνική CDMA έχει ανοχή σε μεγάλες καθυστερήσεις όμως δεν συλλαμβάνει όλη την ενέργεια του multipath σήματος παρά μόνο ένα κλάσμα από αυτή.	Η τεχνική OFDM συλλαμβάνει όλη την ενέργεια λόγω της ικανότητάς της να απορροφά μεγάλο αριθμό των υπο-φερουσών. Επιπλέον, στην τεχνική OFDM, απορροφούνται όλες οι αλληλεπιδράσεις (interference) μεταξύ των συμβόλων.
2.	Το φαινόμενο multipath self-interference (παρεμβολή μεταξύ των διαφορετικών μονοπατιών αποστολής του σήματος) εμφανίζεται στην τεχνική CDMA.	Το φαινόμενο multipath self-interference δεν εμφανίζεται στην τεχνική CDMA.
3.	Στην τεχνική CDMA η παρεμβολή επηρεάζει όλα τα εκπεμπόμενα σύμβολα.	Μόνο ένας μικρός αριθμός συμβόλων επηρεάζεται ή χάνεται στην τεχνική OFDM.
4.	Στην τεχνική CDMA πολλά σύμβολα μπορούν να χαθούν εξ αιτίας του κρουστικού θορύβου (impulse noise – απότομο, αιχμηρό σήμα θορύβου, όπως φαίνεται στην εικόνα πιο κάτω). 	Στην τεχνική OFDM ο κρουστικός θόρυβος διασκορπίζεται και, συνεπώς, η επίδρασή του περιορίζεται δραστικά.
5.	Η διαμόρφωση CDMA είναι πολύ ευαίσθητη	Αυτό δεν συμβαίνει με την τεχνική OFDM.



	στο χρόνο και απαιτεί γρήγορη απορρόφηση από το δέκτη. Αυτό απαιτεί πολύπλοκους αλγορίθμους και διαχείριση.	
6.	Ο δέκτης rake στην τεχνική CDMA (rake receiver) είναι πιο πολύπλοκος από τον αντίστοιχο ψηφιακό δέκτη OFDM (FFT).	Η τεχνική αυτή υλοποιεί, interference cancellation, και adaptive antenna array αλγορίθμους, που είναι απλούστερα στην τεχνική OFDM.
7.	Η τεχνική CDMA απαιτεί γρήγορο και ακριβή έλεγχο της ισχύος καθώς είναι πολύ ευαίσθητη σε διακυμάνσεις της ισχύος σήματος που φτάνει στο δέκτη.	Αυτό δεν συμβαίνει στην τεχνική OFDM.
8.	Η τεχνική CDMA είναι λιγότερη ευαίσθητη σε αυξήσεις της χωρητικότητας καναλιού με χρήση τεχνικών έξυπνης κεραίας από ότι η τεχνική OFDM, λόγω του ότι η τεχνολογία CDMA υπόκειται σε παρεμβολές εντός της κυψέλης.	Αυτό δεν συμβαίνει στην τεχνική OFDM.

#### 4.5 Η τεχνική OFDMA

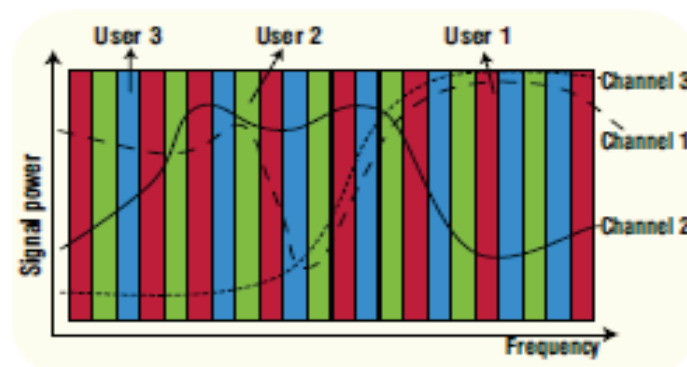
Όπως είπαμε προηγούμενα, η ιδιότητα του OFDM του να έχει ανθεκτικότητα λόγω των πολλαπλών διαδρομών σήματος μπορεί να αξιοποιηθεί για πολλαπλή πρόσβαση χρηστών. Αυτή η τεχνική ονομάζεται OFDMA ή Orthogonal Frequency-Division Multiple Access.

Σε αντίθεση με τη συμβατική τεχνική OFDM, στην οποία όλες οι υπο-φέρουσες συχνότητες (sub-carriers), είναι αφιερωμένες σε έναν μόνο χρήστη, στην τεχνική OFDMA οι υπό-φέρουσες ανατίθενται σε πολλούς διαφορετικούς χρήστες. Συνεπώς, ανάμεσα στα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνικής OFDMA είναι και η multi-user diversity (πολυχρηστική ποικιλότητα).

Με παρόμοιο τρόπο, όπως συμβαίνει και στην τεχνική, OFDM, σε κάθε χρονικό μερίδιο αντιστοιχεί ένα σύμβολο OFDM σύμβολο. Το σύμβολο αυτό, αντιστοιχεί σε ένα σύνολο ορθογωνίων υπο-φερουσών (sub-carriers). Τώρα, όμως, στην τεχνική OFDM κάθε υπό-φέρουσα μπορεί να ανατεθεί σε ένα διαφορετικό χρήστη και, συνεπώς, να έχουμε τα δεδομένα περισσότερων του ενός χρηστών σε ένα χρονομερίδιο (time slot).

Αν και οι βασικές αρχές που διέπουν τη λειτουργία της τεχνικής OFDMA είναι σχετικά απλές και λογικές, η τεχνική αυτή εμπεριέχει πολλές παραμέτρους των οποίων ο καθορισμός απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Τέτοια παράμετρος, για παράδειγμα, είναι ο τρόπος κατανομής των υπο-φερουσών συχνοτήτων, οι οποίες μπορούν να διαχωριστούν σε διαφορετικές ομάδες που καλούνται υπό-διάυλοι. Το πώς θα κατανεμηθούν οι υπό-διάυλοι στους χρήστες μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην απόδοση του συστήματος.

Οι υπο-διάυλοι των εκμεταλλεύονται την πολυμορφία της συχνότητας, η οποία παρουσιάζει ιδιαίτερη εφαρμοσιμότητα σε εφαρμογές κινητής τηλεφωνίας. Η Εικόνα 11 παρουσιάζει την εφαρμογή αυτή για τρεις κινητούς χρήστες. Οι υπο-φέρουσες του κάθε χρήστη είναι κατανεμημένες σε όλο το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων. Γενικά, οι συνεχόμενοι υπο-διάυλοι είναι πιο κατάλληλοι για τις σταθερές εφαρμογές ή εφαρμογές με ιδιαίτερα χαμηλή κινητικότητα.



Εικόνα 11: Η χρήση της τεχνικής OFDM (multi-user diversity)

Το τμήμα των υπό-φερουσών στην αριστερή πλευρά των συχνοτήτων (κόκκινο χρώμα) έχει ανατεθεί στο χρήστη 1, το μεσαίο μπλοκ (πράσινο) έχει ανατεθεί στο χρήστη 2 ενώ το δεξί (γαλάζιο) έχει ανατεθεί στο χρήστη 3. Παρατηρούμε ότι αν και το κανάλι 1 παρουσιάζει το μέγιστο στη δεξιά πλευρά στο μπλοκ των υπο-φερουσών, το κανάλι αυτό στον αναμεταδότη του χρήστη 1, καθώς το κανάλι 3 είναι χειρότερο στο μπλοκ της αριστερής πλευράς όταν το κανάλι 1 εξακολουθεί να έχει αποδεκτή απόδοση.

Το κύριο πλεονέκτημα της πιο πάνω διαδικασίας στην τεχνική OFDMA είναι ότι πολλοί χρήστες μπορούν, ταυτόχρονα, να στέλνουν και να λαμβάνουν δεδομένα με τη συνάρτηση μεταφοράς του καναλιού βελτιστοποιημένη για οποιοδήποτε συνδυασμό χρηστών. Στην πραγματικότητα, η

ύπαρξη πολλών χρηστών αποφέρει σημαντικά οφέλη στην συνολική χωρητικότητα του συστήματος αν το σύστημα έχει ρυθμιστεί προγραμματισμένο να δίνει προτεραιότητα στους χρήστες των οποίων τα υπό-κανάλια μεγιστοποιούν το λαμβανόμενο σήμα όσον αφορά την μετρική Interference-plus-Noise Ratio (SINR).

Με δεδομένη, τώρα, τη συγκεκριμένη θέση των χρηστών στο φάσμα συχνοτήτων, οι κρουστικές αποκρίσεις (impulse responses) των υπο-καναλιών, τα οποία και αντιστοιχούν στους χρήστες αυτούς, θα είναι και αυτές διαφορετικές. Αυτήν ακριβώς την ιδιότητα εκμεταλλεύεται η τεχνική OFDMA κατανέμοντας τις υπο-φέρουσες στους χρήστες σε εκείνες τις συχνότητες όπου η συνάρτηση μεταφοράς του καναλιού είναι βέλτιστη. Ως προς αυτή την κατανομή, έχουν προταθεί διάφοροι αλγόριθμοι για την ανάθεση των υπό-φερουσών (scheduling algorithms). Κάποιοι από αυτούς τους αλγορίθμους προσπαθούν να βελτιώσουν την ικανότητα του συστήματος με άπληστο τρόπο (greedy) δίνοντας προτεραιότητα στο χρήστη με το καλύτερο κανάλι ακόμη και αν αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καταστάσεις «πείνας» (starvation) κάποιους άλλους χρήστες. Άλλοι από αυτούς τους αλγόριθμους επιχειρούν να είναι δικαιότερη ελαχιστοποιώντας τον μέγιστο χρόνο αναμονής. Ο αλγόριθμος κατανομής έχει άμεση επίδραση στην επιλογή του τρόπου διαμόρφωσης και κωδικοποίησης δεδομένων με βάση την μεγαλύτερη δυνατή ταχύτητα που μπορεί να υποστηριχθεί από την παράμετρο SINR του δέκτη, έτσι ώστε ο δέκτης να έχει την μέγιστη δυνατή απόδοση.

## **5 Συμβατότητα με άλλα πρότυπα και στοιχεία απόδοσης**

Η πρόσφατη αύξηση της χρήσης των κινητών τηλεφώνων για μεταφορά δεδομένων ανάδειξε πλήθος νέων εφαρμογών όπως είναι το MMOG (Multimedia Online Gaming), streaming τηλεοπτική εικόνα στην κινητή συσκευή, υποστήριξη του προτύπου Web 2.0 και άλλες εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων ταχύτητας και όγκου δεδομένων. Συνεπώς, το πρότυπο LTE θα πρέπει να υποστηρίζει υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων και μικρή καθυστέρηση, όπως φαίνεται στον πίνακα α πιο κάτω που περιέχει τα κύρια κριτήρια απόδοσης γι το LTE:

Metric	Requirement
Peak data rate	DL: 100Mbps UL: 50Mbps (for 20MHz spectrum)
Mobility support	Up to 500kmph but optimized for low speeds from 0 to 15kmph
Control plane latency (Transition time to active state)	< 100ms (for idle to active)
User plane latency	< 5ms
Control plane capacity	> 200 users per cell (for 5MHz spectrum)
Coverage (Cell sizes)	5 – 100km with slight degradation after 30km
Spectrum flexibility	1.25, 2.5, 5, 10, 15, and 20MHz

Η ικανότητα κάλυψης bandwidth των κινητών συσκευών αναμένεται να είναι στα 20MHz και για την εκπομπή και για τη λήψη σήματος. Ο πάροχος, όμως, μπορεί να χρησιμοποιήσει κελιά με οποιοδήποτε από τα bandwidths που φαίνονται στον πιο πάνω πίνακα. Αυτό παρέχει ευελιξία στους πάροχους να ρυθμίζουν τις εφαρμογές τους στο διαθέσιμο φάσμα ή να έχουν τη δυνατότητα να ξεκινούν με μικρότερο φάσμα, για μικρότερο κόστος, και να παίρνουν, βαθμιαία, επιπλέον bandwidth για μεγαλύτερη χωρητικότητα καναλιών.

Πέρα από τις μετρικές, το πρότυπο LTE στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του κόστους και της κατανάλωσης ισχύος, εξασφαλίζοντας προς τα πίσω συμβατότητα και αποτελεσματικότητα μετάβασης από τα UMTS συστήματα. Στόχοι είναι, επίσης, τα προηγμένα multicast services, η υποστήριξη Quality of Service (QoS) και η ελαχιστοποίηση των παραμέτρων και μη περιττών χαρακτηριστικών της αρχιτεκτονικής.

Η φασματική αποδοτικότητα του LTE DownLink (DL) είναι 3 με 4 φορές την αποδοτικότητα της έκδοσης 6 του HSDPA ενώ το UpLink (UL), είναι 2 με 3 φορές αποδοτικότερο. Η διαδικασία μεταγωγής μέσα στο LTE έχει ως στόχο να ελαχιστοποιήσει το χρόνο διακοπών έτσι ώστε να

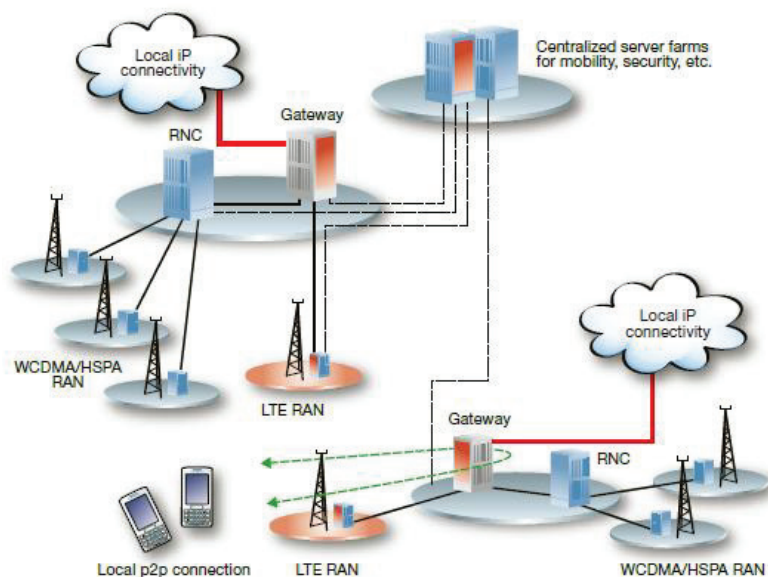
είναι μικρότερος από τα παλαιότερα συστήματα circuit-switched μεταγωγής. Επιπλέον, οι διαδικασίες μεταγωγής στα συστήματα 2G/3G είναι διαφανείς στο χρήστη.

## 6 Χαρακτηριστικά και τοπολογία δικτύων υποστήριξης LTE

Το πρότυπο LTE ορίστηκε για να υποστηρίξει ένα ευέλικτο εύρος bandwidth από 5 MHz έως και 20MHz. Το LTE μπορεί να ενσωματωθεί, συνεπώς, σε νέα και υπάρχοντα φάσματα συχνοτήτων. Το πρότυπο LTE μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε κυτταρική μπάνα. Οι τερματικοί σταθμοί LTE και η δικτυακή δομή θα πρέπει να υποστηρίζουν μέχρι τέσσερις συχνοτικές μπάνες, οπότε σε παγκόσμιο επίπεδο η λειτουργία του LTE θα εμπεριέχει πολλαπλές μπάνες (πράγμα που πρέπει να καθοριστεί μέσα από μία διαδικασία προτυποποίησης).

Κατά τη διαδικασία καθορισμού του LTE, ο οργανισμός 3GPP έδωσε προσοχή στην υποστήριξη ευέλικτων δικτυακών διατάξεων (configurations) με μηχανισμούς υψηλής διαθεσιμότητας (high availability) και ποιότητας υπηρεσιών (QoS – Quality of Service).

Για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης της κίνησης των πακέτων δεδομένων στα δίκτυα υποστήριξης, οι πάροχοι (operators) μπορούν να μοιράζονται τους κόμβους (gateways) σε πολλές θέσεις του δικτύου μειώνοντας έτσι τη χρήση των μέσων μεταφοράς, όπως φαίνεται στην εικόνα πιο κάτω.



Αυτή η προσέγγιση επίσης ελαχιστοποιεί την καθυστέρηση μεταφοράς δεδομένων. Αυτή η ελαχιστοποίηση είναι σημαντική προϋπόθεση για την υποστήριξη υπηρεσιών streaming ή real-time, όπως η IMS πολυμεσική τηλεφωνία και η κινητή ευρυζωνική σύνδεση υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Ειδικότερα το 3GPP/NGN IP Multimedia Subsystem (IMS) και Multimedia Telephony Service (MMTel) είναι ένα παγκόσμιο πρότυπο βασισμένο στο IMS, που προσφέρει σταθερές και κινητές υπηρεσίες πολυμέσων και επικοινωνιών με μεταφορά εικόνων και βίντεο καθώς και υπηρεσίες φωνής, real-time βίντεο, κείμενου, μεταφοράς αρχείων και διαμοίραση εικόνων, τραγουδιών και ταινιών.

Η αρχιτεκτονική που φαίνεται στην εικόνα επιτρέπει, επίσης, την κεντρική υποστήριξη της MME (Mobility Management Entities) λειτουργίας, η οποία ελέγχει το δίκτυο LTE. Για τον περιορισμό του κόστους λειτουργίας του δικτύου, η MME λειτουργία μπορεί να ανατεθεί σε κεντρικές θέσεις του δικτύου και να συνυπάρχουν με άλλους κόμβους ελέγχου.

## 7. Μαθηματική Μοντελοποίηση

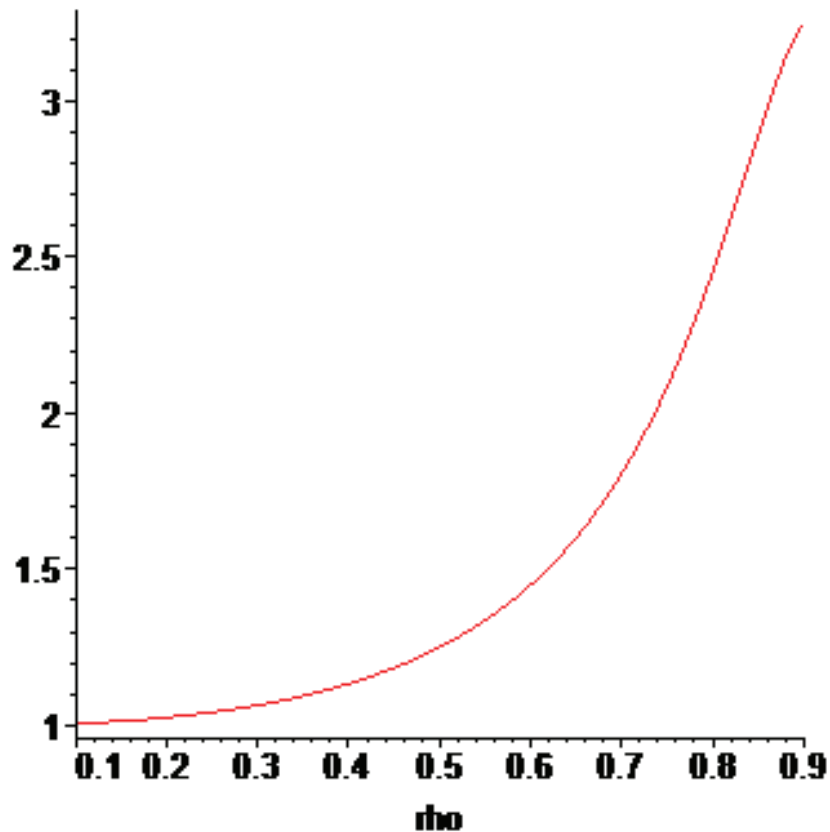
```
> wbuf := sum(n * (1 - rho) * sum((-1)^(n-k) * exp(k * rho) * ((k * rho)^(n-k)) / (n-k)!, k=1..n), n=1..nlimit) +
sum(n * (1 - rho) * (sum((-1)^(n-k) * exp(k * rho) * ((k * rho)^(n-k-1)) / (n-k-1)!), k=1..n-1), n=1..nlimit) ;
```

$$wbuf := \left( \sum_{n=1}^{nlimit} n (1 - \rho) \left( \sum_{k=1}^n \frac{(-1)^{(n-k)} e^{(k\rho)} (k\rho)^{(n-k)}}{(n-k)!} \right) \right) + \left( \sum_{n=1}^{nlimit} n (1 - \rho) \left( \sum_{k=1}^{n-1} \frac{(-1)^{(n-k)} e^{(k\rho)} (k\rho)^{(n-k-1)}}{(n-k-1)!} \right) \right)$$

```
> nlimit:=10;
```

*nlimit := 10*

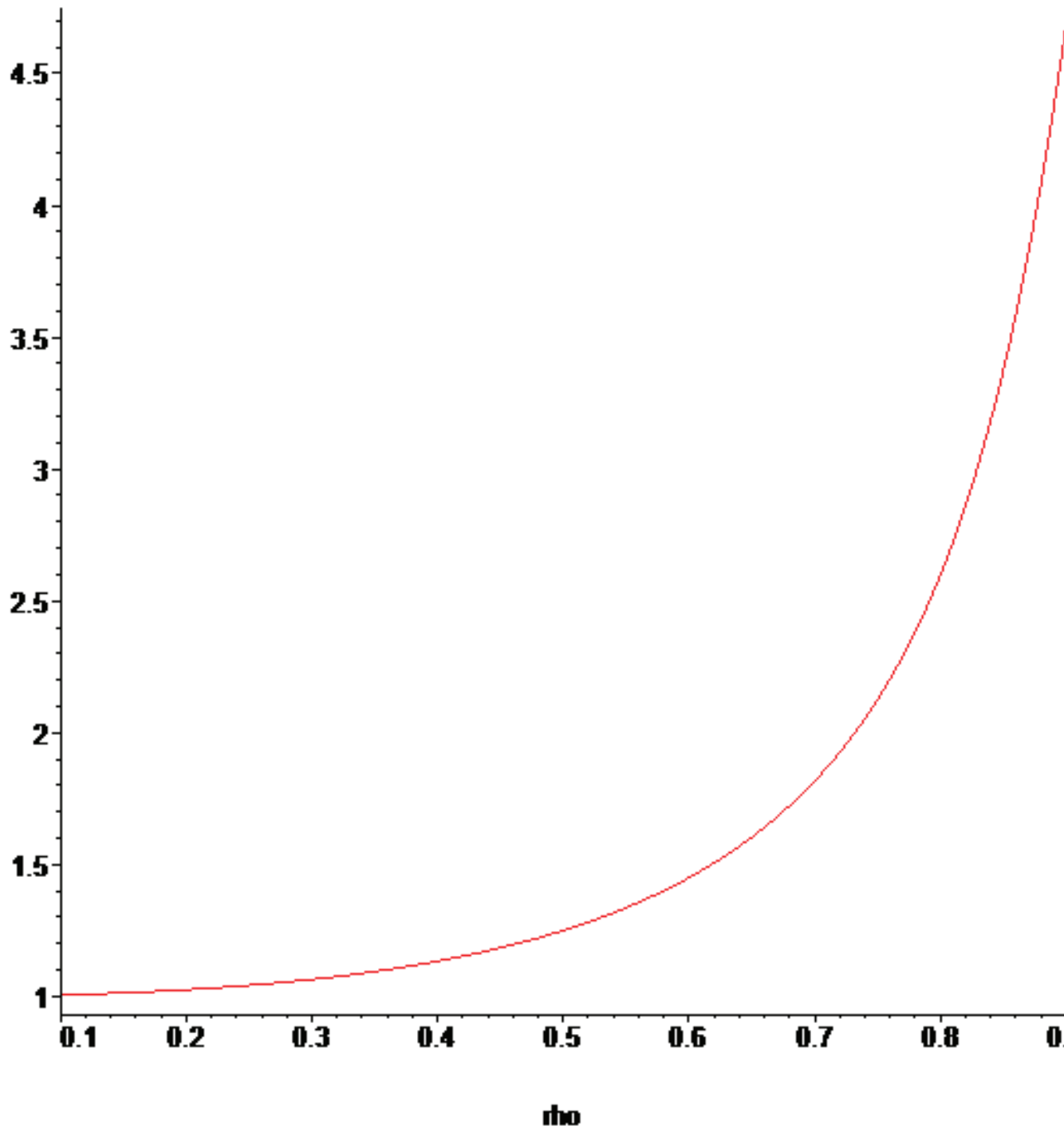
```
> plot(wbuf, rho=0.1..0.9);
```



```
> nlimit:=20;
```

```
> plot(wbuf, rho=0.1..0.9);
```

*nlimit := 20*



>  
>



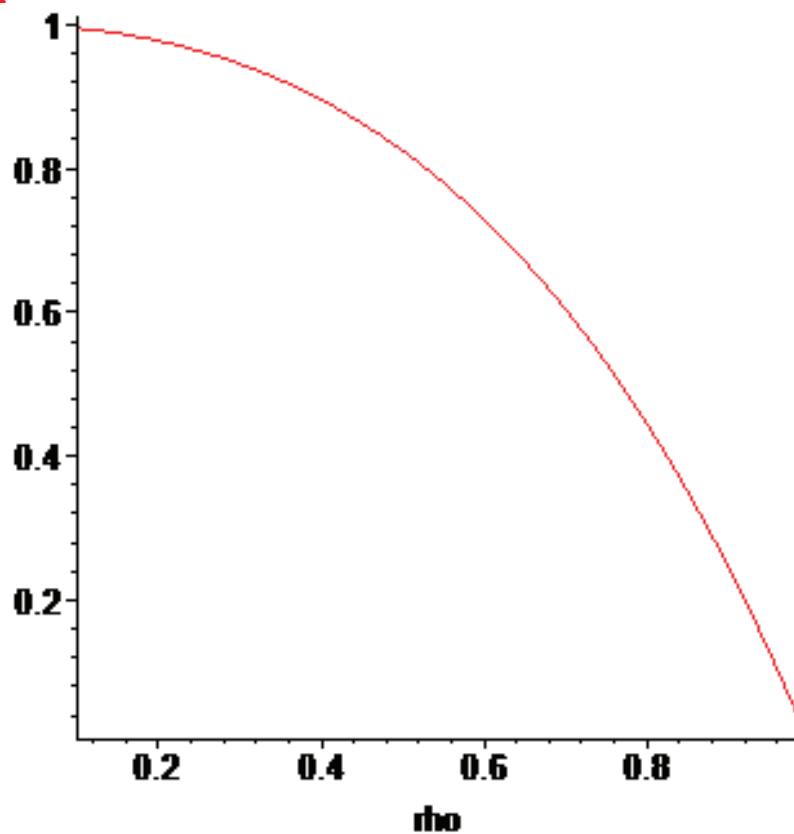
```
>
p_n := (1-rho) * sum ( (-1) ^ (n-k) * exp (k*rho) * ( (k*rho) ^ (n-k) ) / (n-k) ! ) , k=1..n) +
(1-rho) * sum ( (-1) ^ (n-k) * exp (k*rho) * ( (k*rho) ^ (n-k-1) ) / (n-k-1) ! ) , k=1..n-1) ;
```

$$p_n := (1 - \rho) \left( \sum_{k=1}^n \frac{(-1)^{(n-k)} e^{(k\rho)} (k\rho)^{(n-k)}}{(n-k)!} \right) + (1 - \rho) \left( \sum_{k=1}^{n-1} \frac{(-1)^{(n-k)} e^{(k\rho)} (k\rho)^{(n-k-1)}}{(n-k-1)!} \right)$$

```
> n:=1;
```

*n* := 1

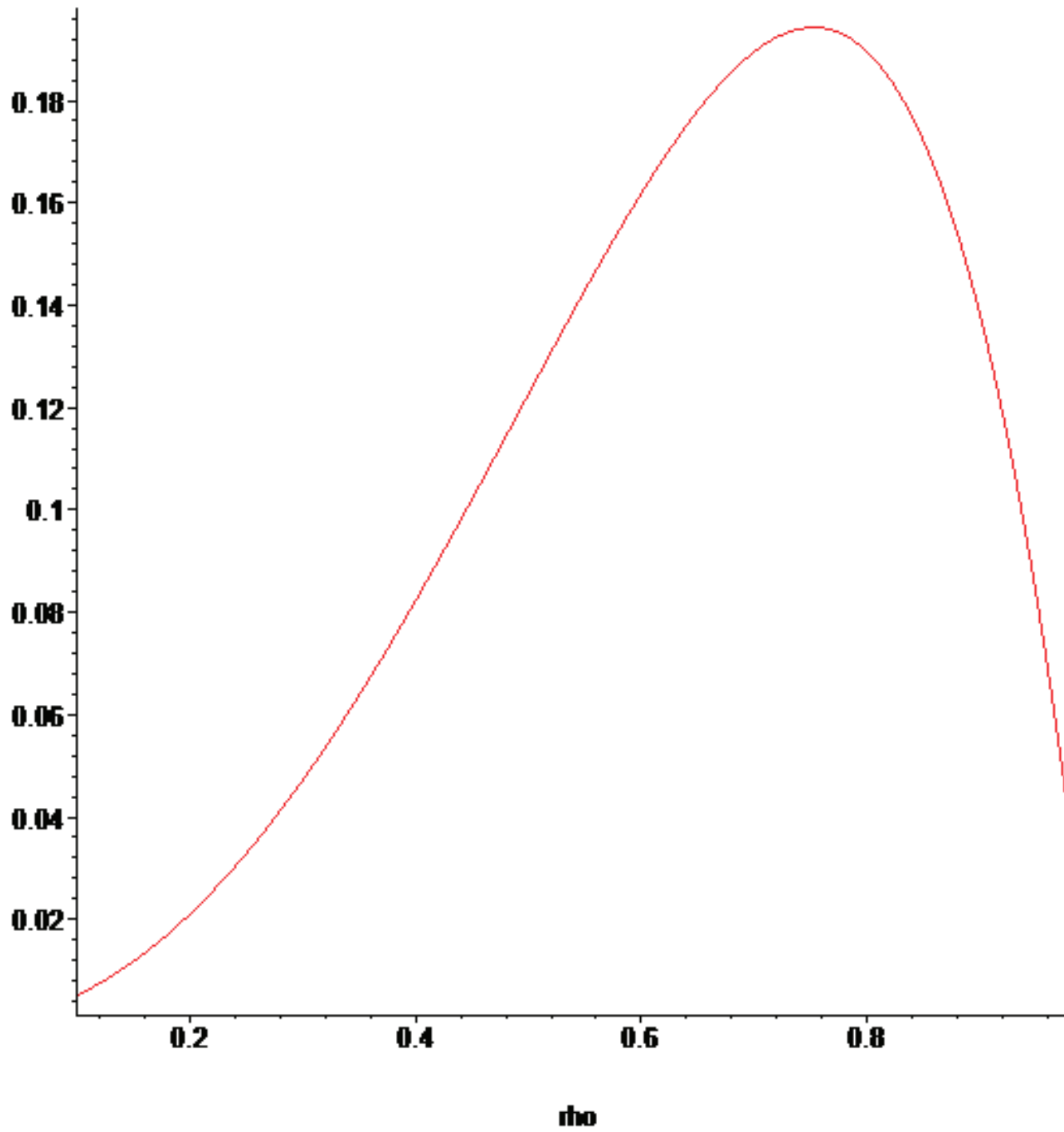
```
> plot (p_n, rho=0.1..0.99) ;
```



```
> n:=2;
```

*n* := 2

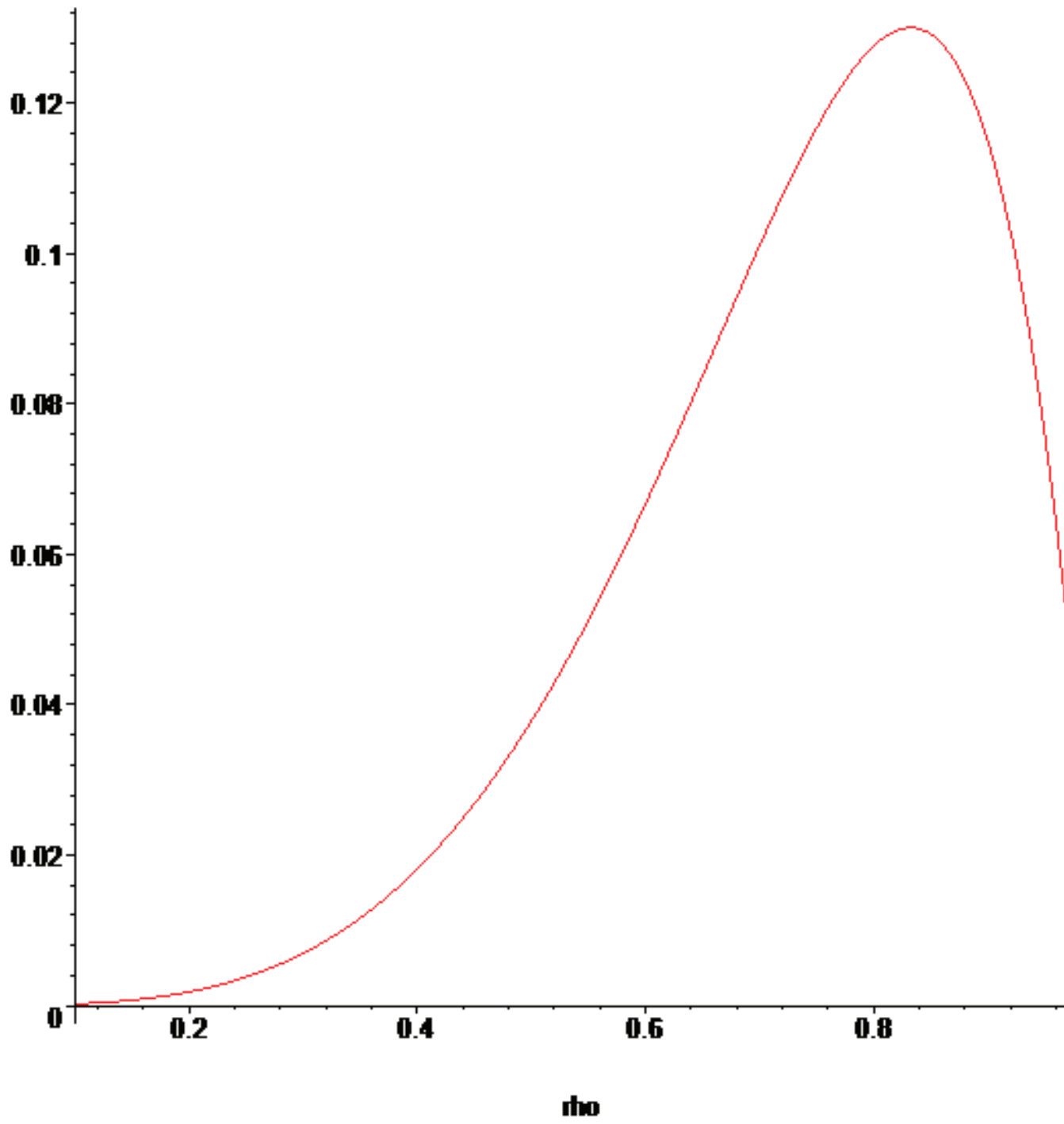
```
> plot (p_n, rho=0.1..0.99) ;
```



```
> n:=3;
```

```
n:=3
```

```
> plot(p_n, rho=0.1..0.99);
```



>

> `sumin:=sum((k*lambda)^1/1!)*exp(-k*lambda),l=0..m-1);`

$$sumin := \frac{\Gamma(m, k \lambda)}{\Gamma(m)}$$

> `sumout:= sum(1/k*(1-sumin),k=1..klimit);`

$$sumout := \Psi(klimit + 1) + \gamma + \left( \sum_{k=1}^{klimit} \left( -\frac{\Gamma(m, k \lambda)}{k \Gamma(m)} \right) \right)$$

> `p_0:=10^(-sumout);`

$$p_0 := 10^{\left( -\Psi(klimit + 1) - \gamma - \left( \sum_{k=1}^{klimit} \left( -\frac{\Gamma(m, k \lambda)}{k \Gamma(m)} \right) \right) \right)}$$

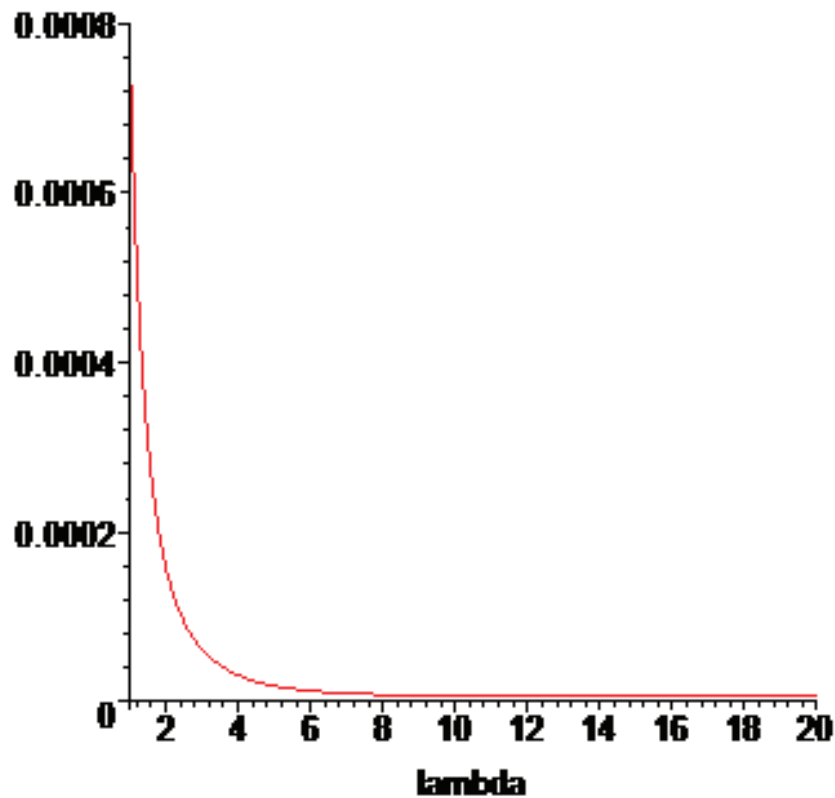
> `klimit:=100;`

`klimit := 100`

> `m:=5;`

`m := 5`

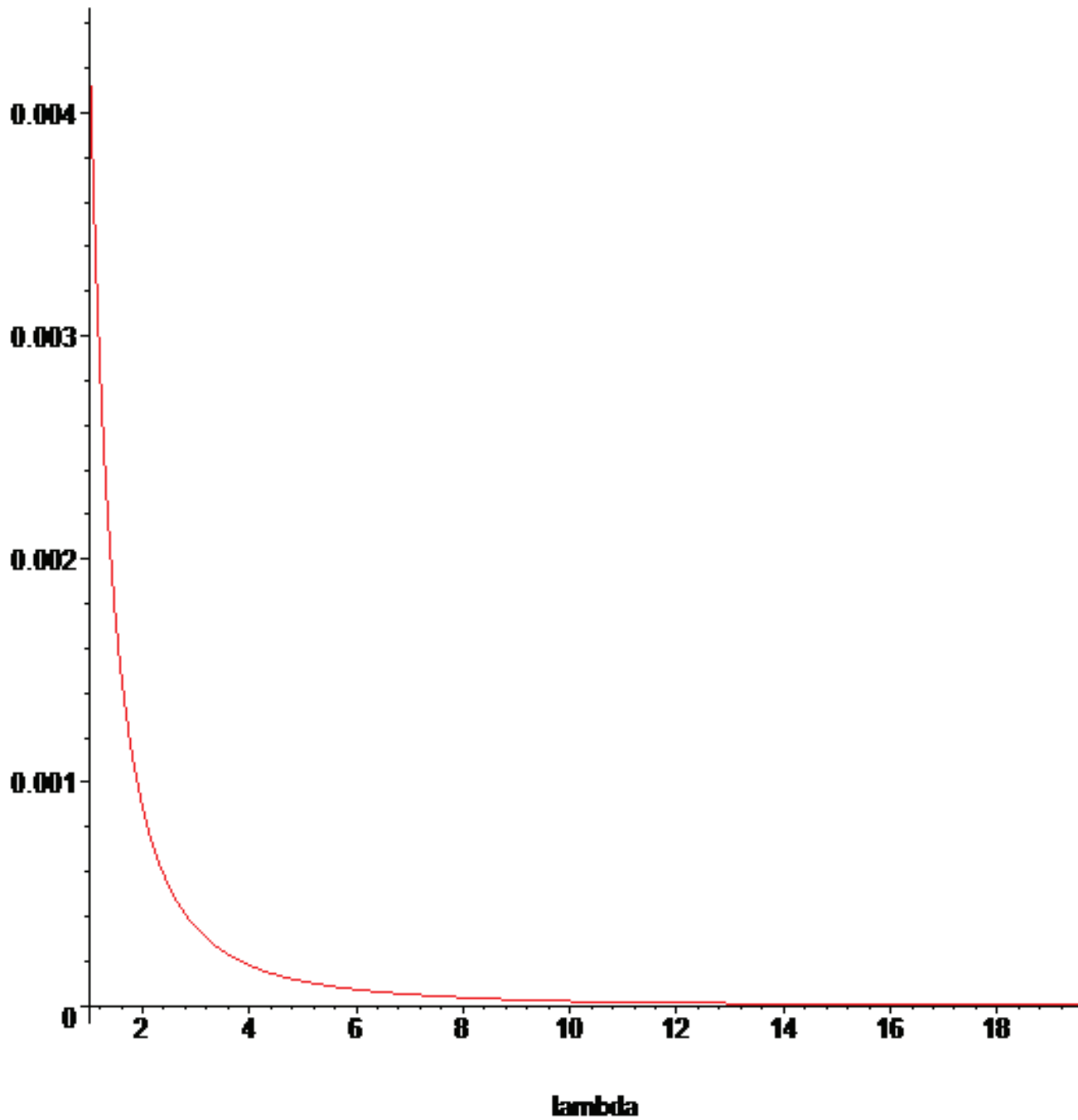
> `plot(p_0,lambda=1..20);`



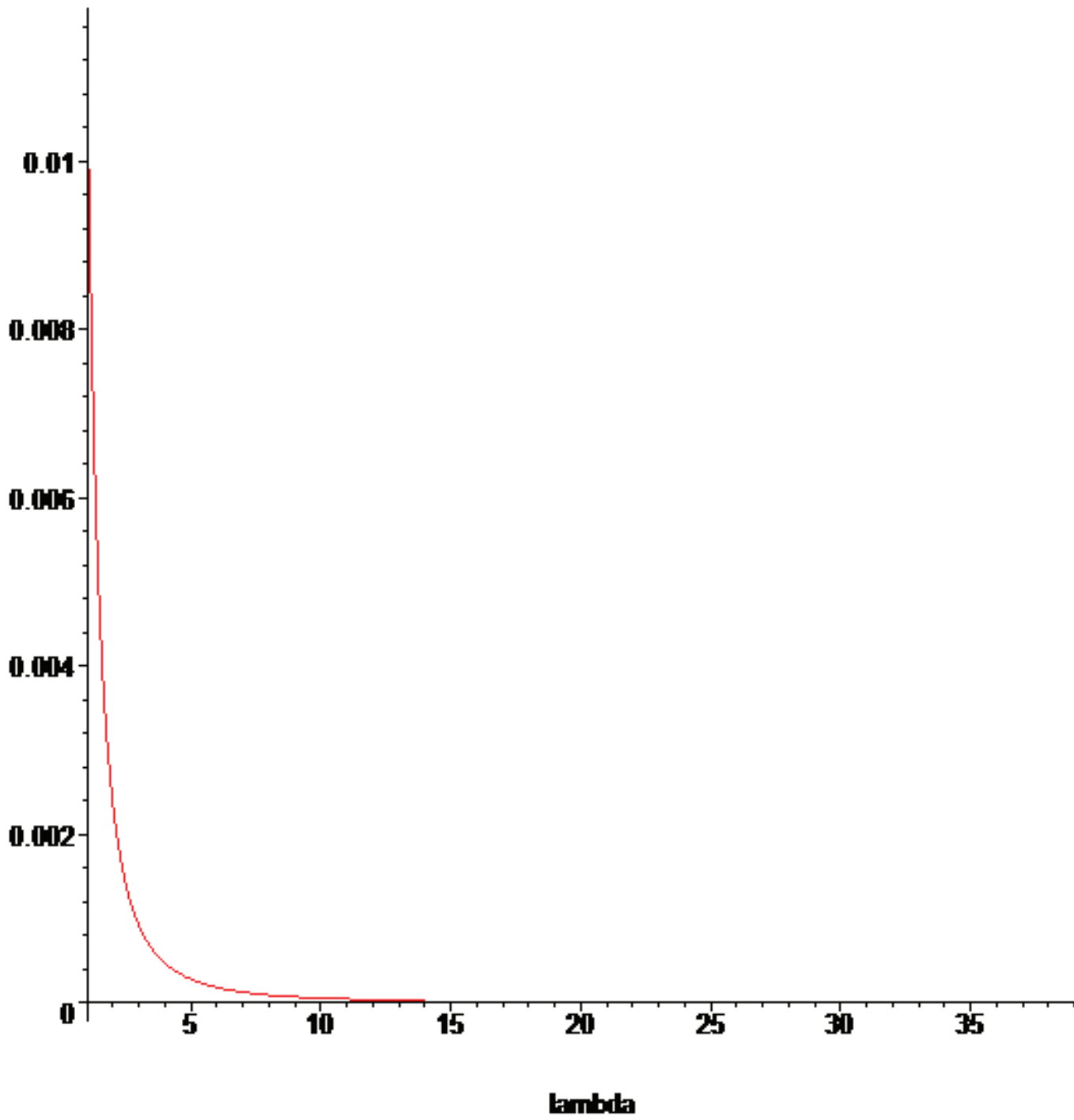
> `m:=10;`

> `plot(p_0,lambda=1..20);`

`m := 10`



```
> m:=15;  
> plot(p_0,lambda=1..40);  
m := 15
```



>

## 8. 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.  
Motorola White Paper: Long Term Evolution (LTE).
- [5] Holma, H., & Toskala, A. (2007). WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE. 4<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons.
- [6] UMTS Forum (<http://www.umts-forum.org/>).
- [7] Holma, H., & Toskala, A. (2007). WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE. 4<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons.
- [8] Holma, H., & Toskala, A.(2006). HSPDA/HSUPA for UMTS: High Speed Radio Access for Mobile Communications. John Wiley & Sons.
- [9] 3GPP TR 25.858. (2002). Physical layer aspects of UTRA High Speed Downlink Packet Access. Version 5.0.0.
- [10] 3GPP TS 25.308. (2009). High Speed Downlink Packet Access (HSDPA); Overall description; Stage 2. Version 9.0.0.
- [11] Ericsson White Paper: LTE – An introduction.

- [12] Lescuyer, P., & Lucidarme, T. (2008). Evolved Packet System (EPS): The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS. John Wiley & Sons.
- [13] Sesia, S., Toufik, I., & Baker, M. (2009). LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. John Wiley & Sons.
- [14] Third Generation Partnership Project - 3GPP (<http://www.3gpp.org>).
- [15] Malkowski, C. (2003). UTRAN Enhancements for Multicast. In Proceedings of HyWiN workshop, Turin, Italy.
- [16] OFDM: THEORY AND APPLICATION [Marco Araujo and Marcio Melo, Telecommunication Institute, University of Aveiro, Portugal].
- [17] <http://en.wikipedia.org/wiki/OFDM>
- [18] <http://en.wikipedia.org/wiki/OFDMA>
- [19] “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.
- [20] <http://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>
- [21] <http://en.wikipedia.org/wiki/SIMO>
- [22] 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.
- [23] Beach, M.A., Swales, S.C., Bateman, A., Edwards, D.J. and McGeehan, J.P.: “Adiversity combining antenna array for land mobile satellite communications”, IEEE VTC 1989, pp.749-756  
Saunders, S.R.: Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems. J. Wiley & Sons, 1999.



[24] 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.

[25] Teletar, I.E.: “Capacity of Multi-antenna Gaussian Channels”, European Transactions on Telecommunications, vol.10, no.6, 1995, pp.585-595.

[26] Kermoal, J.P.: “Measurement, Modelling and Performance Evaluation of the MIMO Radio Channel”, Ph.D. thesis, Centra for PersonKommunikation – Aalborg University, Denmark, 2002.