



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ
ΣΗΜΑΤΩΝ LTE ΜΕ ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΓΚΕΦΑΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ
&
ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ (WCDMA)
ΣΤΑ ΕΓΚΕΦΑΛΙΚΑ ΠΡΟΚΛΗΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΑ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Δ. Αντωνάκος

&

Νικόλαος Δ. Καραλιώτας

Επιβλέπων : Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ LTE
ΜΕ ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΓΚΕΦΑΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ
&
ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ (WCDMA)
ΣΤΑ ΕΓΚΕΦΑΛΙΚΑ ΠΡΟΚΛΗΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΑ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Δ. Αντωνάκος

&

Νικόλαος Δ. Καραλιώτας

Επιβλέπων : Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....

Χ. Καψάλης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Π. Κωττής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Α. Παναγόπουλος

Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

.....

Παναγιώτης Δ. Αντωνάκος

Νικόλαος Δ. Καραλιώτας

Διπλωματούχοι Ηλεκτρολόγοι Μηχανικοί και Μηχανικοί Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Παναγιώτης Δ. Αντωνάκος, Νικόλαος Δ. Καραλιώτας

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	5

Μέρος Ι: Θεωρητικό Υπόβαθρο

Κεφάλαιο 1. Φυσιολογία Εγκεφάλου και EEG	11
1.1 Γενικά στοιχεία Εγκεφαλικής Νευροφυσιολογίας	13
1.2 Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (EEG) και Προκλητά Δυναμικά Εγκεφάλου (EPs)	19
Κεφάλαιο 2. Πρωτόκολλα Συστημάτων Κινητών Επικοινωνιών	31
2.1 Ιστορική Αναδρομή	33
2.1.1 Εισαγωγή	33
2.1.2 Κυψελωτά Συστήματα 1 ^{ης} Γενιάς	34
2.1.3 Μετάβαση στα Ψηφιακά Κυψελωτά Συστήματα	35
2.1.4 Κυψελωτά Συστήματα 2 ^{ης} Γενιάς	37
2.1.5 Κυψελωτά Συστήματα 2,5 Γενιάς	41
2.1.6 Κυψελωτά Συστήματα 3 ^{ης} Γενιάς	43
2.1.7 Εξέλιξη των 3G - High Speed Packet Access (HSPA)	45
2.1.8 Τάσεις στην Εξέλιξη των Συστημάτων Κινητών Επικοινωνιών – 4G	47
2.1.9 Δορυφορικά Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών	50
2.2 Wideband Code Division Multiple Access (W-CDMA)	51
2.2.1 Προτυποποίηση του WCDMA	51
2.2.2 Συστήματα Πολλαπλής Πρόσβασης με Διαίρεση Κώδικα (CDMA)	55
2.2.3 Δομή Δικτύου UMTS/WCDMA	63
2.2.4 Τεχνολογίες Φυσικού Στρώματος στο WCDMA	75
2.3 Long Term Evolution (LTE)	93
2.3.1 Εισαγωγικά περί 3GPP Long Term Evolution (LTE)	93
2.3.2 Περιγραφή της Προδιαγραφής του Συστήματος LTE	94
2.3.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του LTE.	95

Μέρος ΙΙ: Πειραματική Διαδικασία

Κεφάλαιο 3. Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας	119
3.1 Η Πειραματική Διάταξη	121
3.2 Έλεγχος Συμβατότητας Οργάνων (EMC)	127
3.3 Hayling Test	131
3.4 Περιγραφή Πειράματος με Ανθρώπους	132

3.5 Αποθήκευση και Οργάνωση Μετρήσεων	134
3.5.1 Οργάνωση των EMC μετρήσεων υπό ακτινοβολία LTE	136
3.5.2 Οργάνωση των EEG και EP μετρήσεων υπό ακτινοβολία WCDMA	139
Κεφάλαιο 4. Στατιστική Επεξεργασία των Μετρήσεων	141
4.1 Έλεγχος Κανονικότητας των μετρήσεων	143
4.2 Έλεγχος Υποθέσεων	146
4.2.1 T-test στις μεταξύ EMC μετρήσεων υπό ακτινοβολία LTE ή όχι	149
4.3 Συγκρίσεις Μετρήσεων EEG	156
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα	177
5.1 Συμπεράσματα για τις EMC μετρήσεις του LTE	179
5.2 Συμπεράσματα για τις EEG μετρήσεις	181
5.3 Συνολική Αποτίμηση της Εργασίας	189
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	191
Παράρτημα 1: Κώδικας του Excel macro	181
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	193

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί το επιστέγασμα μιας μακράς πορείας ενασχόλησης των υποφαινόμενων συγγραφέων με τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα τα τελευταία 3 χρόνια στη σχολή των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών. Η πρωτοβουλία του Εργαστηρίου Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων της σχολής να δραστηριοποιηθεί στην έρευνα πιθανής επίδρασης των τηλεπικοινωνιακών σημάτων στα προκαλούμενα εγκεφαλικά δυναμικά των ανθρώπων υπήρξε μια ευχάριστη ευκαιρία για εμάς να ασχοληθούμε προσωπικά με έναν κλάδο που μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα, καθώς συνδυάζει τις κεκτημένες μας γνώσεις από την τηλεπικοινωνιακή κατεύθυνση της σχολής και τα πρακτικά προβλήματα που πιθανώς απορρέουν από την εφαρμογή των ραδιοσημάτων στην κοινωνία μας. Η εμπιστοσύνη που μας έδειξε ο καθηγητής μας και διευθυντής του ανωτέρω εργαστηρίου κ.Καψάλης με την πρόσκλησή του για την αποπεράτωση του συγκεκριμένου ερευνητικού έργου, αποτέλεσε για εμάς μια πρόκληση ώστε να βοηθήσουμε και εμείς από την πλευρά μας στην εξαγωγή νέων ερευνητικών αποτελεσμάτων που θα συντελέσουν στην παραγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της WCDMA ακτινοβολίας στην ανθρώπινη εγκεφαλική λειτουργία, καθώς και σχετικά με την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα της WCDMA και LTE ακτινοβολίας με τον εξοπλισμό ηλεκτροεγκεφαλογράφησης.

Σε αυτό το σημείο θα θέλαμε να αποδώσουμε τα οφειλόμενα εύσημα προς όλους εκείνους που με τη βοήθειά τους και την καθοδήγησή τους συνετέλεσαν ώστε να ολοκληρωθεί η παρούσα διπλωματική εργασία. Πρώτα απ' όλα, θα θέλαμε ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή κ.Καψάλη που μας εμπιστεύτηκε την ανάθεση της συγκεκριμένης εργασίας και μας μύησε με τις γνώσεις του και την πολύπλευρη στήριξή του στην τηλεπικοινωνιακή ερευνητική διαδικασία. Μεγάλο «ευχαριστώ» αξίζει και στην υποψήφια διδάκτορα Αργυρώ Μαγκανιώτη, που με την καθημερινή της καθοδήγηση κατά την πειραματική διαδικασία και την αμέριστη συνεργασία της για τον έλεγχο της παρούσας εργασίας, συνετέλεσε τα μέγιστα για την αποπεράτωση της εργασίας. Επιπροσθέτως, να ευχαριστήσουμε θερμά και τον υποψήφιο διδάκτορα Λάζαρο Πραγιάτη για την πολύτιμη αρωγή του για την πραγματοποίηση των πειραματικών μετρήσεων στο Ερευνητικό Πανεπιστημιακό Ινστιτούτο Ψυχικής Υγείας (ΕΠΙΨΥ), καθώς και τον υπεύθυνο ιατρό του εργαστηρίου κ. Χαράλαμπο Παπαγεωργίου για την επόπτευση της διαδικασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες αξίζουν στους 13 εθελοντές που, με τον αλτρουισμό που επέδειξαν, συμμετείχαν ως εξεταζόμενοι στην πειραματική διαδικασία σηματοληψίας των εγκεφαλικών τους δυναμικών και αποτέλεσαν την πρωταρχική και αναγκαία

προϋπόθεση για τη διεξαγωγή της έρευνας. Πρόκειται για τους (με αλφαβητική σειρά):

Αλεξάνδρου Αλέξανδρος, Αλιμήση Βαρβάρα, Βλαχογιαννάτος Κωνσταντίνος, Ζαγανάς Χρήστος, Καραδήμου Ευαγγελία, Κουντουριώτης Χρήστος, Λάππα Ευγενία, Λοΐζος Αναστάσιος, Μακρή Χριστίνα, Παπαμιχαήλ Χρυσάνθη, Σταυρόπουλος Ιωάννης, Τσούτση Μαίρη, Τζαφέρου Βασιλική.

Τέλος, με την ευκαιρία της παρούσας εργασίας, θα θέλαμε να εκφράσουμε τη βαθιά μας ευγνωμοσύνη προς όλους εκείνους που μας στήριξαν για την ολοκλήρωση συνολικά της Σχολής των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ και ιδιαίτερα τις οικογένειές μας, που με την ηθική και υλική υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μας, μας έδωσαν τη δυνατότητα να σπουδάσουμε το αντικείμενο που επιθυμούσαμε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό την αποτύπωση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από την ερευνητική διαδικασία που πραγματοποιήσαμε αναφορικά με τον έλεγχο της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας των πρωτοκόλλων LTE και WCDMA με τα όργανα εγκεφαλογράφησης, καθώς και τον έλεγχο της επίδρασης της WCDMA ακτινοβολίας στα ανθρώπινα εγκεφαλικά δυναμικά. Για την πραγματοποίηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ο ειδικός χώρος που έχει δημιουργηθεί στο Ερευνητικό Πανεπιστημιακό Ινστιτούτο Ψυχικής Υγείας (ΕΠΙΨΥ) του δήμου Παπάγου, ενώ για την επεξεργασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα Matlab και Microsoft Office Excel. Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη, στο θεωρητικό, όπου παρουσιάζονται οι βασικές απαιτούμενες πληροφορίες για την επεξήγηση και αντίληψη των χρησιμοποιούμενων εννοιών στη συνέχεια, και στο πειραματικό, όπου περιγράφεται αρχικά η διεξαγωγή του πειράματος και στη συνέχεια αποτυπώνονται τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των μετρήσεων και τα εξαγόμενα συμπεράσματα.

Αναλυτικότερα, στο **1^ο Κεφάλαιο** παρουσιάζονται ορισμένα γενικά στοιχεία της εγκεφαλικής νευροφυσιολογίας του ανθρώπου και του τρόπου λειτουργίας του νευρώνων, καθώς και στη συνέχεια του τρόπου πραγματοποίησης του εγκεφαλογραφήματος. Επιπλέον δίνονται οι βασικοί ορισμοί των προκλητών δυναμικών (Π.Δ.) και των χαρακτηριστικών τους που χρησιμοποιούνται για την ψυχιατρική μελέτη της ανθρώπινης ανταπόκρισης σε διάφορα ερεθίσματα.

Στο **2^ο Κεφάλαιο** πραγματοποιείται μια ανάλυση των ραδιοσημάτων κινητής τηλεφωνίας που εξετάστηκαν στο πείραμα. Στην πρώτη παράγραφο του κεφαλαίου δίνεται μια ιστορική αναδρομή της εξέλιξης των πρωτοκόλλων αυτών μέχρι να φτάσουμε στη σημερινή τεχνολογία. Ακολουθώντας, μνημονεύονται οι σχεδιαστικές τεχνικές που χρησιμοποιούν τα 2 σύγχρονα εξεταζόμενα πρωτόκολλα και τα σημεία διαφοροποίησης από τα προγενέστερά τους, διατηρώντας την παρουσίαση σύμφωνα με την χρονική σειρά προτυποποίησής τους, περιγράφοντας δηλαδή πρώτα το WCDMA και στη συνέχεια το LTE πρωτόκολλο επικοινωνίας.

Στο **3^ο Κεφάλαιο** ξεκινά η αποτύπωση της πειραματικής διαδικασίας. Στο κεφάλαιο αυτό δίδεται η περιγραφή της εκτέλεσης των μετρήσεων στο Ε.Π.Ι.Ψ.Υ. και στη συνέχεια η μέθοδος αποθήκευσης και οργάνωσής τους. Πιο συγκεκριμένα, το κεφάλαιο αρχίζει με την αναφορά στην πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο και συνεχίζει με την παρουσίαση του ελέγχου ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας των οργάνων (EMC) που απαιτείται πριν την

εκτέλεση του βασικού μέρους του πειράματος για τον έλεγχο της επίδρασης της WCDMA ακτινοβολίας στην εγκεφαλική λειτουργία. Στη συνέχεια, πριν την αναλυτική περιγραφή της διεξαγωγής του πειράματος, επεξηγείται η δοκιμασία του Hayling Test που ακολουθήθηκε ώστε να δημιουργήσουμε το επιθυμητό ακουστικό ερέθισμα για την παραγωγή των αντίστοιχων ερευνούμενων προκλητών δυναμικών στον ανθρώπινο εγκέφαλο. Τέλος, παρουσιάζονται οι μέθοδοι αποθήκευσης και οργάνωσης των μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν με τη χρήση των προγραμμάτων της Matlab και του Excel Microsoft Office.

Στο **4^ο Κεφάλαιο** πραγματοποιείται η στατιστική επεξεργασία των μετρούμενων σηματοληψιών για τον έλεγχο κανονικότητας και υποθέσεων και για τη σύγκριση των μετρούμενων δειγμάτων στις διάφορες συνθήκες ακτινοβολίας. Ειδικότερα, δίνονται οι απαραίτητες πληροφορίες για τους στατιστικούς ελέγχους που εφαρμόστηκαν στα δείγματα και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προαναφερθέντων ελέγχων για το κάθε δείγμα είτε για τις μετρήσεις του EMC ελέγχου είτε για τις μετρήσεις των ανθρώπινων εγκεφαλικών δυναμικών. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συγκρίσεων που πραγματοποιήθηκαν μεταξύ των διαφόρων δειγμάτων.

Τέλος, στο **5^ο Κεφάλαιο** πραγματοποιείται μια εποπτική περιγραφή της συνολικής εργασίας που εκπονήθηκε, εξετάζοντας τη μέχρι πρότινος βιβλιογραφία που υπήρχε στον συγκεκριμένο κλάδο του ελέγχου της επίδρασης των εγκεφαλικών δυναμικών από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και της συνεισφοράς που έχει η παρούσα με την εκπόνησή της. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα βάσει των αποτελεσμάτων που εξάγονται από τον EMC έλεγχο που πραγματοποιήθηκε μεταξύ των οργάνων εγκεφαλογράφησης και όλων των ερευνούμενων παραλλαγών του LTE πρωτοκόλλου.

Λέξεις κλειδιά:

Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (ΗΕΓ), Προκλητά Δυναμικά, Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα, Πρωτόκολλα Συστημάτων Κινητών Επικοινωνιών, Ραδιοκύματα

ABSTRACT

The purpose of the present thesis is to put down the results of the research that we conducted concerning the control of Electromagnetic Compatibility between LTE and WCDMA radiation and the measuring instrument of an electroencephalogram (EEG), and also concerning the test for the possible influence of WCDMA radiation on the Evoked Potentials (EPs) of healthy people. In order to conduct the experiment, a special area for EEG measurements in the Institute of Mental Health (EPIPSY) in Papagou municipality was used, and for the processing of the measurements we used the programs of Matlab and Excel Microsoft Office. This paper is divided into two parts, the theoretical one showing the basic necessary information for the sufficient explanation and understanding of the concepts that are used later, and the experimental part, which firstly describes the experiment and then presents the results of the statistical processing of the measurements, and the productive conclusions as well.

Specifically, the **1st chapter** outlines some general aspects of the human-brain neurophysiology and of the way that neurons work, and then it describes how to perform brain scans. Moreover the basic definitions of evoked potentials (EPs) and their characteristics (components) are given, which are used in the psychiatric study of human response in various stimuli.

In the **2nd chapter** there is an analysis of the mobile radio signals, which are examined in this experiment. First of all, a historical overview of the evolution of these protocols is given, till we get to today's technology. Next, the design techniques that are used by the two currently examined protocols are indicated, along with the differentiating points from its predecessors, keeping the presentation in accordance with the time series of their modeling which is described firstly by the WCDMA and then by the LTE protocol.

The **3rd chapter** begins with the presentation of the experimental procedure. In this chapter we give a description of the implementation of the measurements in E.P.I.P.S.Y. and then of the method of their storage and organization. More specifically, the chapter starts with a reference to the experimental setup which was used in the laboratory and continues with the presentation of the electromagnetic compatibility control (EMC) of the measurement instruments, which is required before performing the main part of the experiment in order to monitor the effect of the WCDMA radiation in the human's brain function. What is more, before the detailed description of the experiment, there is an analysis of the "Hayling Test" that was followed in order to create the desired acoustic stimulus and consequently, the

production of the corresponding evoked potentials of the human brain. Finally, there is a presentation of the methods of the storage and organization of the measurements, which were made using the programs of Matlab and Excel Microsoft Office.

In the **4th chapter**, there is a statistical analysis of the measurements in order to check the regularity, the significance and the comparison of the measured samples in various conditions of radiation. Especially, in the beginning, there is some necessary information about the statistical tests which were applied to the samples and the results of the above tests for each sample are presented, both for the measurements of the EMC control and the measurements of the human brain potentials. Lastly, there are the results of the comparisons that were made between various types of samples that were created in the measurements of human brain potentials.

Finally, in the **5th chapter**, there is a comprehensive description of the supervisory work that was made, examining the literature that previously existed in the area of the effect of electromagnetic radiation in the evoked brain potentials and of the contribution that this project has made. Furthermore, the conclusions got from the EMC Control between the EEG instruments and all variants of the LTE protocol are presented.

KEY WORDS

Electromagnetic Compatibility (EMC), Electroencephalogram (EEG), Event Related Potentials (ERPs), Evoked Potentials (EPs), Wide Code Division Multiple Access (WCDMA), Long Term Evolution (LTE), 3G and 4G Mobile Communications

ΜΕΡΟΣ Ι:

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑ ΕΓΚΕΦΑΛΟΥ

ΚΑΙ EEG

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται ορισμένα γενικά στοιχεία της εγκεφαλικής νευροφυσιολογίας του ανθρώπου. Παρουσιάζεται αναλυτικά η λειτουργία του εγκεφαλογράφου και ο τρόπος καταγραφής του ηλεκτρικού εγκεφαλικού σήματος (EEG). Αναπτύσσονται τα κύρια χαρακτηριστικά του, όπως οι φασματικές συνιστώσες και οι βασικές κορυφώσεις (peaks/συνιστώσες) των προκλητών δυναμικών (EPs) που μετρούνται σε σχέση με το χρόνο, παραθέτοντας τους ορισμούς αλλά και τον τρόπο σηματοληψίας τους.

1.1 Γενικά στοιχεία Εγκεφαλικής Νευροφυσιολογίας

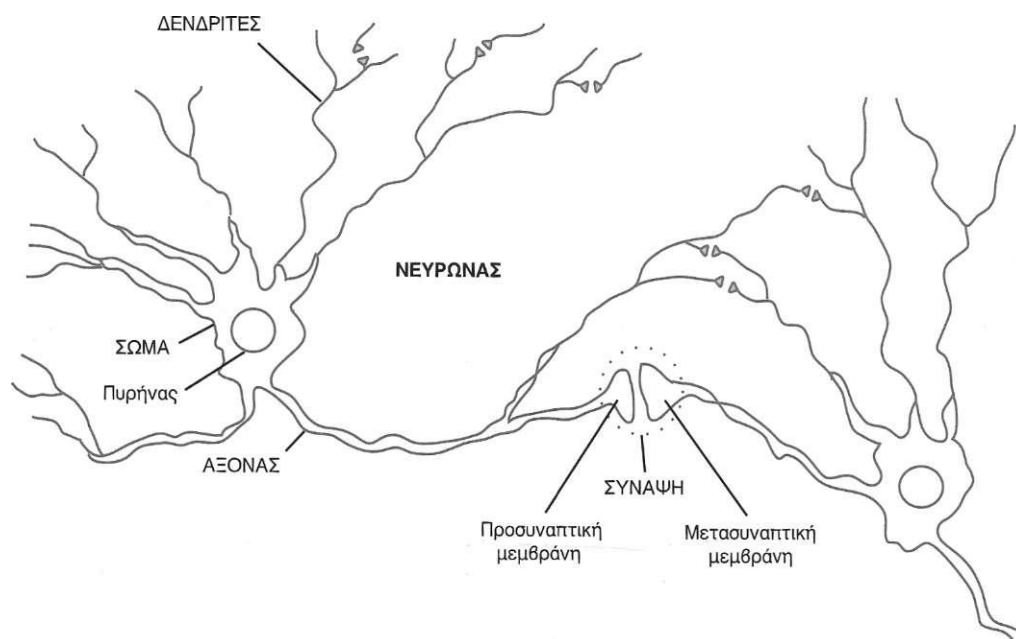
Ιστορικά Στοιχεία

Ο ανθρώπινος εγκέφαλος αποτελεί χωρίς αμφιβολία, το πλέον πολύπλοκο δημιούργημα της φύσης. Προϊόν βιολογικής εξέλιξης εκατομμυρίων ετών, αυτή η μικρή μάζα της τάξης του 1,5kg εμπεριέχει ένα εξαιρετικά πολυσύνθετο δίκτυο κυττάρων, οι λειτουργίες του οποίου είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία των σκέψεων, της μνήμης, τον έλεγχο των δραστηριοτήτων του σώματος και των συναισθημάτων. Αυτό το έργο επιτελείται από τους περίπου 10^{10} νευρώνες του εγκεφάλου, οι οποίοι συναντιούνται μεταξύ τους σε 10^{14} ως 10^{15} σημεία. Η συνολική ανωτερότητα του εγκεφάλου, ως προς οποιαδήποτε υπολογιστική μηχανή έχει κατασκευασθεί έως σήμερα είναι προφανής. Η έρευνα για την κατανόηση των μηχανισμών λειτουργίας του αποτελεί ένα τιτάνιο έργο και μέχρι σήμερα το ποσοστό της άγνοιάς μας είναι συντριπτικά μεγαλύτερο από την ποσότητα των γνώσεων που αποκτήθηκαν εδώ και 150 χρόνια. Χωρίς υπερβολή, το πεδίο φαίνεται απέραντο και η πρόοδος των ανακαλύψεων της τελευταίας τριακονταετίας μας ωθεί συνεχώς σε νέες ανεξερεύνητες περιοχές.

Το 1848 ο **Du Bois - Reymond** ανακάλυψε ότι η δραστηριότητα αυτή των περιφερειακών νεύρων συνοδευόταν από μετρήσιμες μεταβολές του ηλεκτρικού δυναμικού. Αυτό έδωσε ώθηση στην επιστημονική κοινότητα να ερευνήσει για μεταβολές της ηλεκτρικής δραστηριότητας οι οποίες θα οφείλονταν στο νευρικό σύστημα και θα ήταν ενδεικτικές της λειτουργίας του. Ήδη, το 1877 ο **R. Catton** είχε δείξει ότι υπάρχει σχέση μεταξύ εξωτερικών ερεθισμάτων και ηλεκτρικής δραστηριότητας στον εγκέφαλο κουνελιών και πιθήκων (**Event Related Potentials**). Ανέφερε μάλιστα ότι ήταν δυνατή η καταγραφή ασθενών ρευμάτων από ηλεκτρόδια στη δερματική επιφάνεια του κεφαλιού τους. Η πρώτη εμπεριστατωμένη αναφορά για τη μέτρηση διαφορών δυναμικού από την εξωτερική επιφάνεια του ανθρώπινου κεφαλιού προέρχεται από τον **Hans Berger** το 1929, γεγονός το οποίο οριοθετεί την έναρξη της μελέτης των λειτουργιών του εγκεφάλου μέσω του Ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος (**ElectroEncephaloGraph**).

Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του εγκεφαλογράφου, παραθέτουμε σε πρώτο στάδιο ακολούθως κάποιες βασικές πληροφορίες σχετικά με τη δομή και τη λειτουργία των νευρώνων.

Νευρώνες (Εγκεφαλικά κύτταρα)



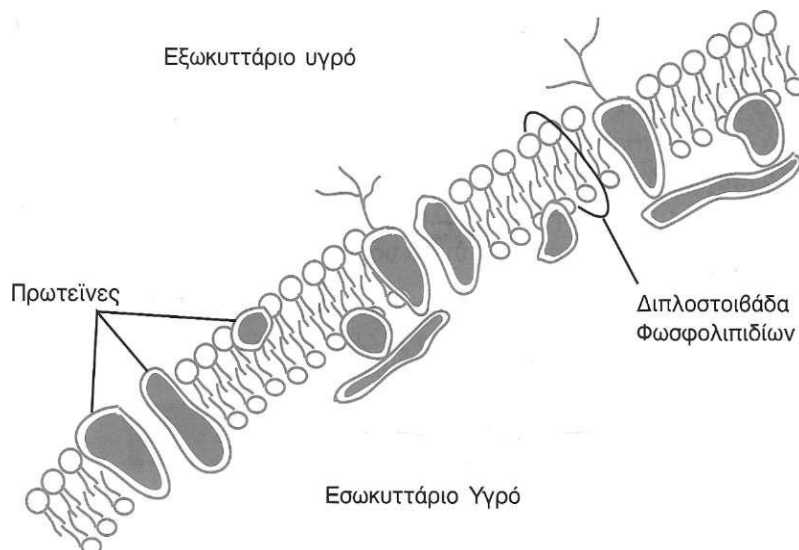
Σχήμα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση νευρώνων με τους δενδρίτες, τους άξονες και τις συνάψεις

Ένας νευρώνας (σχήμα.5.1) είναι αυτόνομος και αποτελείται από το κυρίως νευρικό κύτταρο (σώμα) και τις αποφυάδες του, που ονομάζονται νευρίτες και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- i) Στην πρώτη κατηγορία έχουμε τον μοναδικό **νευράξονα** (ή άξονα) κάθε νευρώνα. Αυτός είναι μια νηματοειδής προέκταση του κυρίως νευρικού κυττάρου. Οι νευρικές ώσεις (δυναμικά δράσης, βλ. παρακάτω) του κυτταρικού σώματος οδεύουν κατά μήκος του άξονα κατευθυνόμενες προς την απόληξή του. Οι άξονες καταλήγουν στην προσυναπτική μεμβράνη που συμμετέχει στο σχηματισμό της σύναψης, της περιοχής δηλαδή όπου έρχεται ο νευρώνας σε ηλεκτροχημική επαφή με άλλους νευρώνες για να τους μεταδώσει σήματα.
- ii) Στη δεύτερη κατηγορία έχουμε τους **δενδρίτες** που είναι διακλαδισμένες αποφυές των νευρώνων. Αυτοί βρίσκονται σε επαφή μέσω των συνάψεων με τις απολήξεις διαφόρων αξόνων, που προέρχονται από γειτονικούς ή απομακρυσμένους νευρώνες. Οι δενδρίτες, μέσω των μετασυναπτικών μεμβρανών, συλλέγουν τα σήματα που εκπέμπονται από τις αξονικές απολήξεις και τα μεταδίδουν στο αντίστοιχο κυτταρικό σώμα του νευρώνα στον οποίο ανήκουν.

Η σύναψη, όπου όπως προαναφέρθηκε διαρθρώνεται η απόληξη του νευράξονα ενός νευρώνα με ένα δενδρίτη άλλου νευρώνα, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, διότι εκεί πραγματοποιείται η μεταβίβαση της δράσης από την προσυναπτική μεμβράνη στη μετασυναπτική, μέσω της πολύ λεπτής σχισμής που τα χωρίζει, η οποία ονομάζεται **συναπτικό χάσμα**. Υπάρχουν επίσης περιπτώσεις όπου η σύναψη βρίσκεται πολύ κοντά ή και πάνω στο σώμα ενός νευρώνα και περιπτώσεις όπου σε μία σύναψη συμμετέχουν τρεις νευρώνες ταυτόχρονα, οπότε απολήξεις δύο αξόνων οδεύουν στο ίδιο σημείο ενός δενδρίτη.

Ολόκληρος ο νευρώνας μαζί με τον άξονα και τους δενδρίτες καλύπτεται από την κυτταρική μεμβράνη. Η κυτταρική μεμβράνη είναι ουσιαστικά ένα διπλό (διμοριακό) στρώμα από μόρια λιπιδίων, μέσα στο οποίο υπάρχουν τοποθετημένα εγκαρσίως πολλά διαφορετικά είδη πρωτεϊνικών μορίων. Η μεμβράνη έχει πάχος περίπου 8 - 10 nm. Τα λιπίδια του διμοριακού στρώματος είναι κυρίως **φωσφολιπίδια**, τα οποία αποτελούνται από μια υδρόφιλη κεφαλή, η οποία είναι συνδεδεμένη σε δύο υδρογονανθρακικές αλυσίδες που αποτελούν το υδρόφοβο τμήμα (ουρά) του μορίου. Όταν τα φωσφολιπίδια βρεθούν σε ένα υδατικό μέσο οργανώνονται σε διπολικό στρώμα, έτσι ώστε οι υδροφοβικές ουρές να είναι όσο το δυνατόν μακρύτερα από το υδατικό μέσο και οι υδρόφιλες κεφαλές τοποθετούνται μεταξύ του ύδατος και των υδρόφοβων ουρών. Ένα τέτοιο λιπαρό διμοριακό στρώμα είναι ουσιαστικά αδιαπέραστο από τα περισσότερα βιολογικώς ενεργά μόρια, όπως αμινοξέα και σάκχαρα, και επίσης από ιόντα. Η μεμβράνη όμως στην πραγματικότητα είναι ημιπερατή, διότι οι πρωτεΐνες, οι ενσωματωμένες στο διμοριακό λιπιδικό στρώμα, κάνουν τη μεμβράνη διαπερατή για πολλές ουσίες και είναι υπεύθυνες για τη λειτουργική δραστηριότητα της ζωντανής μεμβράνης (σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2: Κυτταρική μεμβράνη

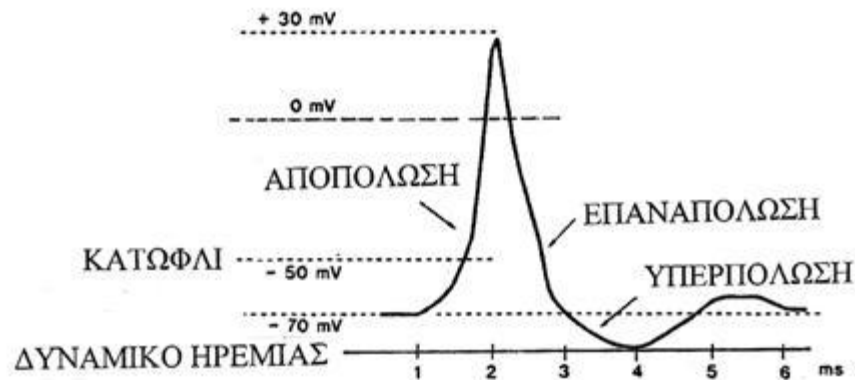
Κάποιες από τις πρωτεΐνες αυτές λειτουργούν **ως δίοδοι ιόντων**, προσφέροντας το κατάλληλο περιβάλλον ώστε ιόντα, μαζί με τα μόρια νερού που τα ακολουθούν, να διέρχονται από μέσα τους. Αυτές οι δίοδοι έχουν σημαντικότερη σημασία στη λειτουργία των νευρικών κυττάρων. Μπορούν δε να διαχωριστούν σε διόδους ελεγχόμενες από τάση, σε χημικά ελεγχόμενες διόδους και σε μη ελεγχόμενες διόδους, δηλαδή αντίστοιχα σε ιοντικές διόδους που ανοιγοκλείνουν είτε ανάλογα με την τάση που τους επιβάλλεται διαμεμβρανικά είτε ανάλογα με την παρουσία κάποιων χημικών ουσιών, καθώς και σε διόδους που δεν ελέγχονται από εξωτερικές συνθήκες.

Κατά μήκος της μεμβράνης των κυττάρων διατηρείται, σε κατάσταση ηρεμίας, μια διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού, τέτοια ώστε το εσωτερικό του κυττάρου να βρίσκεται σε **αρνητικό** δυναμικό ως προς τον εξωτερικό χώρο. Στην περίπτωση των νευρικών και μυϊκών κυττάρων, αυτό το δυναμικό ηρεμίας είναι της τάξης των λίγων δεκάδων mV ($\sim -70\text{ mV}$) και οφείλεται στην άνιση κατανομή ιόντων μεταξύ των δύο πλευρών της μεμβράνης, η οποία κατανομή διατηρείται από τη μεταβολική δραστηριότητα του κυττάρου. Τα δυναμικά τα οποία μετρούμε μεταξύ δύο ηλεκτροδίων στην εξωτερική δερματική επιφάνεια του κεφαλιού κατά το EEG οφείλονται ουσιαστικά σε ρεύματα ιόντων διαμέσου της κυτταρικής μεμβράνης των νευρώνων που συμμετέχουν στην εκάστοτε εγκεφαλική διεργασία. Τα ρεύματα αυτά δημιουργούν μια διαφορά δυναμικού (τάση) μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού της κυτταρικής μεμβράνης, και στη συνέχεια διαχέονται στην περιοχή από τα σημεία δημιουργίας τους έως και την εξωτερική δερματική επιφάνεια, καθώς ο εγκεφαλικός ιστός, οι μήνιγγες, το κρανίο και το δέρμα άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα.

Υπάρχουν δύο είδη διαμεμβρανικής ρευματικής ροής, που σχετίζονται με τη μετάδοση και επεξεργασία πληροφοριών μεταξύ των νευρώνων και προκαλούν τα εξής διαφορετικής φύσης δυναμικά:

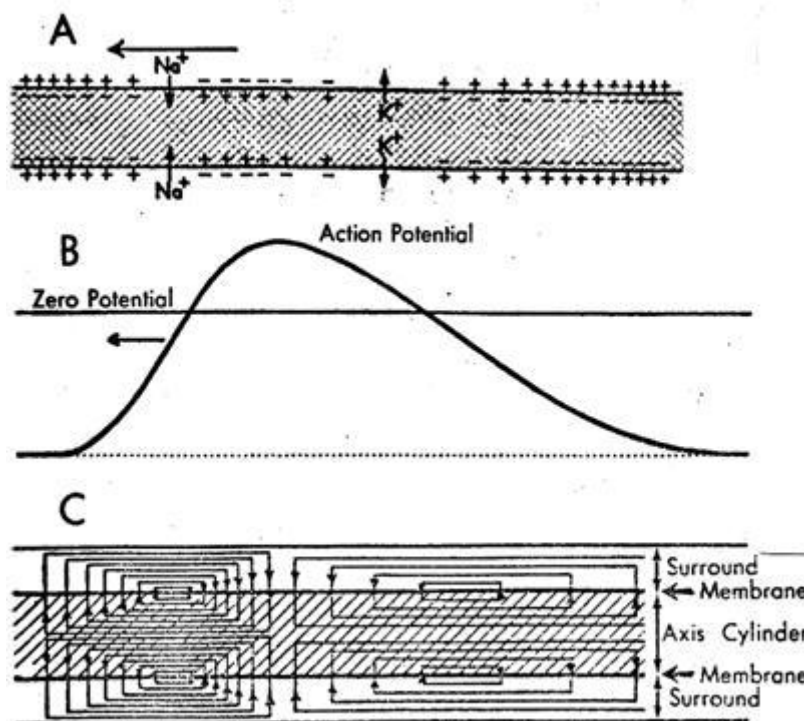
i) Δυναμικό Δράσης (action potential):

Προκαλείται όταν το διαμεμβρανικό δυναμικό στο σώμα του νευρώνα, ως συνολικό άθροισμα των ερεθισμών που καταφθάνουν από τους δενδρίτες, αλλάξει από την τιμή ηρεμίας και περάσει ένα ορισμένο κατώφλι (συνήθως περίπου -50 mV). Τότε συμβαίνει ενεργοποίηση του νευρώνα, αποπόλωση της κυτταρικής μεμβράνης στη «ρίζα» όπου ο άξονας ξεκινά από το σώμα, και εμφάνιση μιας αιχμής δυναμικού ως τα 30 mV , με επακόλουθη επιστροφή στην αρχική κατάσταση ηρεμίας αφού συμβεί επαναπόλωση και υπερπόλωση (σχήμα 1.3). Αυτή η κρουστική ώθηση διαδίδεται ταχύτατα κατά μήκος του άξονα, αναπαράγοντας τον κύκλο “πόλωση-αποπόλωση-πόλωση” και τη συνακόλουθη ρευματική ροή μέσα και έξω από την κυτταρική μεμβράνη (σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.3: Δυναμικό Δράσης

(Το σχήμα δίνει τη διαφορά δυναμικού $\Delta V = [V_{\text{εσωκυτταρικά}} - V_{\text{εξωκυτταρικά}}]$ συναρτήσει του χρόνου σε ένα σημείο της μεμβράνης)



Σχήμα 1.4: Ιοντικές ροές και ρευματική ροή σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή κατά τη μετάδοση μιας νευρικής ώσης.

(Στο Α δείχνονται οι ιοντικές ροές, στο Β το διαμεμβρανικό δυναμικό και στο Γ οι γραμμές της ιοντικής ροής μεταξύ του αξονικού κυλίνδρου και του περιβάλλοντος χώρου)

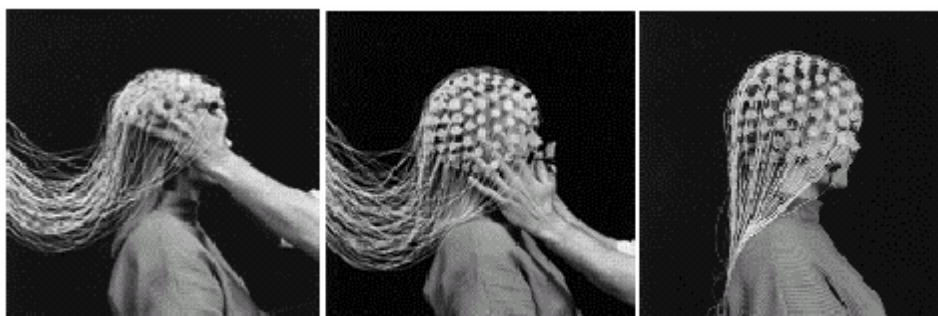
ii) Μετασυναπτικό Δυναμικό (Post Synaptic Potential - PSP):

Το δυναμικό αυτό εμφανίζεται στη μετασυναπτική μεμβράνη, όταν μεταδοθεί ο ερεθισμός μέσω του συναπτικού χάσματος από την προσυναπτική μεμβράνη, ερεθισμός ο οποίος οφείλεται σε ενεργοποίηση του προσυναπτικού νευρώνα. Έχει πιο συνεχή μορφολογία από τα δυναμικά δράσης, είναι πιο περιορισμένο στο χώρο - αφού εμφανίζεται στην περιοχή της σύναψης - και έχει χαμηλότερη τιμή, διότι η μετασυναπτική μεμβράνη αποπολώνεται ή υπερπολώνεται σε μικρότερο βαθμό από ό,τι το σώμα του νευρώνα, όπου αθροίζονται όλα τα σήματα τα προερχόμενα από τους δενδρίτες. Όταν έχουμε αποπόλωση το δυναμικό ονομάζεται μετασυναπτικό δυναμικό **διέγερσης (excitatory PSP - EPSP)**, ενώ στην αντίθετη περίπτωση μετασυναπτικό δυναμικό **καταστολής ή αναστολής (inhibitory PSP - IPSP)**, διότι διαδιδόμενο προς το σώμα και αθροιζόμενο με άλλες συνεισφορές από διαφορετικές συνάψεις δεν διευκολύνει ενδεχόμενη αποπόλωση του νευρώνα. Σε μια σύναψη του εγκεφάλου μπορεί να εμφανισθεί συνήθως, είτε μόνο EPSP, οπότε η σύναψη ονομάζεται σύναψη διέγερσης ή διεγείρουσα σύναψη (excitatory synapse), είτε μόνο IPSP, οπότε αυτή ονομάζεται κατασταλτική ή ανασταλτική σύναψη (inhibitory synapse). Το σύνολο των ηλεκτροχημικών επιδράσεων από νευρώνα σε νευρώνα, αθροιζόμενο για όλες τις περιοχές του εγκεφάλου, μέσα από ένα δίκτυο ανεξερεύνητης ακόμη πολυπλοκότητας, δημιουργεί αυτό που ονομάζουμε εγκεφαλική λειτουργία, της οποίας μόνο μερικώς μπορούμε να ανιχνεύσουμε και να μελετήσουμε τις διάφορες διαδικασίες και εκδηλώσεις, μέσω της «ηλεκτροεγκεφαλογραφίας».

1.2 Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (EEG) και Προκλητά Δυναμικά Εγκεφάλου (EPs)

Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (EEG)

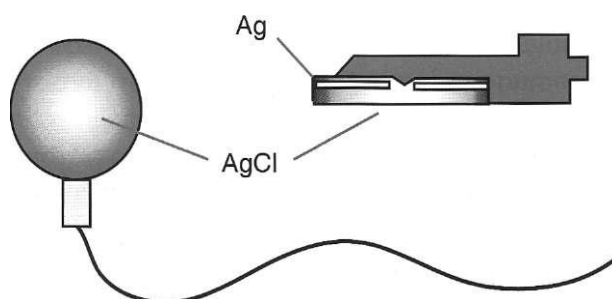
Η «Ηλεκτροφυσιολογία» είναι η μελέτη των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των βιολογικών κυττάρων και των ιστών. Ένας τομέας της ηλεκτροφυσιολογίας είναι η μελέτη των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των βιολογικών κυττάρων του εγκεφάλου, ο οποίος ονομάζεται «Ηλεκτροεγκεφαλογραφία», και πραγματοποιείται με τη βοήθεια ηλεκτροδίων που τοποθετούνται στο δέρμα του κρανίου. Το αποτέλεσμα της καταγραφής είναι γνωστό ως **εγκεφαλογράφημα (EEG)** και αναπαριστά ένα ηλεκτρικό σήμα που είναι το αποτέλεσμα της ηλεκτρικής δραστηριότητας ενός μεγάλου αριθμού νευρώνων. Ο εγκεφαλικός ιστός, οι μήνιγγες, το κρανίο και το δέρμα άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα, με αποτέλεσμα να το μεταφέρουν στην επιφάνεια του κεφαλιού, από όπου το μετράμε ως τάση (διαφορές δυναμικού) μεταξύ δύο διαφορετικών σημείων.



Σχήμα 1.5: Τοποθέτηση ηλεκτροδίων με σκοπό την καταγραφή του EEG

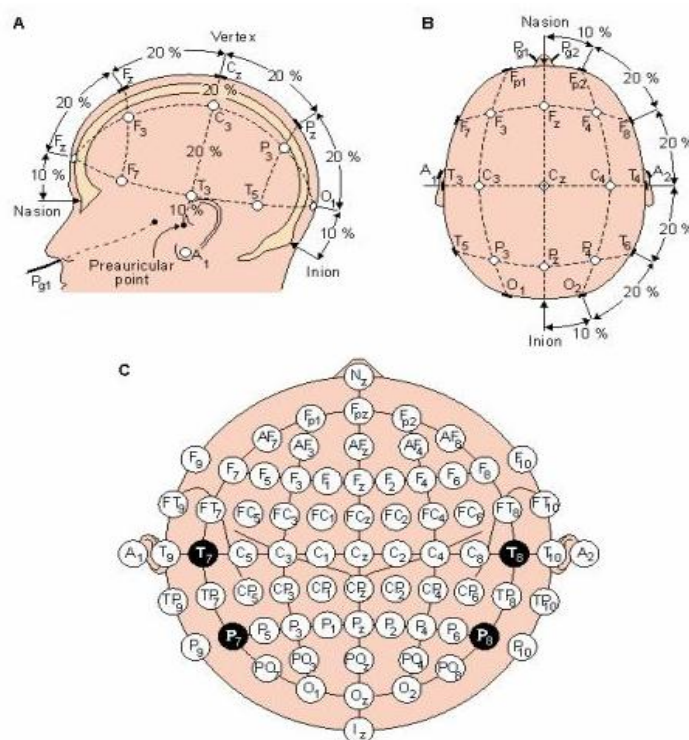
Τα μετρούμενα ηλεκτρικά σήματα είναι ασθενή, πλάτους από περίπου 1pV ως 100μV. Εξαρχής λοιπόν υπάρχει η απαίτηση της όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ενίσχυσης των υπό εξέταση σημάτων, και μόνο αυτών, καθώς και της πυκνότερης κάλυψης του κεφαλιού με απαγωγά ηλεκτρόδια. Κατ' αυτόν τον τρόπο αναμένεται ότι θα έχουμε μια ουσιαστική απεικόνιση - αντανάκλαση της εγκεφαλικής δραστηριότητας που θέλουμε να μελετήσουμε. Το πρώτο στάδιο στην εξαγωγή των σημάτων του EEG αποτελούν τα ηλεκτρόδια, οι αισθητήρες του συστήματος, οι οποίοι μετατρέπουν το ρεύμα ιόντων μέσα στο ανθρώπινο σώμα σε ρεύμα ηλεκτρονίων μέσα στα καλώδια, τα οποία μετά οδηγούν αυτό το ρεύμα σε επόμενα

στάδια επεξεργασίας. Συνήθως χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια που κατασκευάζονται από άργυρο (Ag) και χλωριούχο άργυρο (AgCl). Η επαφή τους με το δέρμα γίνεται μέσω μιας κολλώδους αγώγιμης ουσίας (gel) που συνήθως συνίσταται από ανιόντα χλωρίου (Cl^-) ή μέσω ενός μικρού δακτυλιδιού, που από τη μια μεριά προσκολλάται στο δέρμα και από την άλλη στο κυρίως ηλεκτρόδιο (σχήμα 1.6).



Σχήμα 1.6: Το ηλεκτρόδιο με επαφή δακτυλίου

Η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων γίνεται αφού το κρανίο μετρηθεί και οι θέσεις των ηλεκτροδίων επιλέγονται σύμφωνα με το Διεθνές Σύστημα 10 - 20 Ηλεκτροεγκεφαλογραφίας και έχει υιοθετεί από την Παγκόσμια Ομοσπονδία Ηλεκτροεγκεφαλογραφίας και Κλινικής Νευροφυσιολογίας.



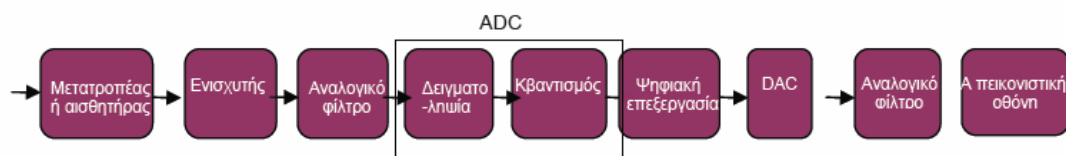
Σχήμα 1.7: Τυποποιημένες απαγωγές στην επιφάνεια του κεφαλιού σύμφωνα με το Διεθνές Σύστημα Ηλεκτροεγκεφαλογραφίας 10 - 20

Κάθε ηλεκτρόδιο συνδέεται με την είσοδο ενός **διαφορικού ενισχυτή** (ένας ενισχυτής για κάθε ηλεκτρόδιο) ο οποίος ενισχύει την τάση μεταξύ δύο ηλεκτροδίων από 1000 έως 100000 φορές. Συνήθως υπάρχει μια πρώτη βαθμίδα ενίσχυσης, οι **προενισχυτές**, η οποία αποτελείται από ενισχυτές χαμηλού θορύβου, της τάξεως των nV, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα προς ενίσχυση σήματα είναι, όπως είπαμε, της τάξεως των pV και μV. Η ενίσχυση του σήματος των ηλεκτροδίων γίνεται συνήθως με έναν εκ των ακόλουθων τριών τρόπων:

- Ενίσχυση κοινής αναφοράς (Μονοπολική) : Ο τερματισμός κάθε ενισχυτή συνδέεται σε ένα κοινό για όλους ηλεκτρόδιο και τα σήματα όλων των άλλων ηλεκτροδίων μετρώνται σε σχέση με αυτό το ηλεκτρόδιο που ονομάζεται *ηλεκτρόδιο αναφοράς*. Συνήθως το ηλεκτρόδιο αναφοράς τοποθετείται σε κάποιο σημείο που ανήκει στη μεσαία γραμμή του κρανίου (νοητή ευθεία που χωρίζει το κρανίο συμμετρικά σε δύο μέρη) ή τοποθετείται στα λοβία των αυτιών, εκ του γεγονότος ότι τα λοβία των αυτιών έχουν μηδαμινή βιολογική δραστηριότητα και έτσι προσφέρονται ως σημεία «αναφοράς». Η ενίσχυση κοινής αναφοράς είναι και η συνηθέστερη εφαρμοζόμενη μέθοδος.
- Ενίσχυση μέσης αναφοράς : Οι έξοδοι όλων των ενισχυτών αθροίζονται και υπολογίζεται ο μέσος όρος τους. Αυτό το σήμα αποτελεί την κοινή αναφορά για κάθε ενισχυτή.
- Διπολική ενίσχυση : Τα ηλεκτρόδια συνδέονται *σειριακά* σε ισάριθμους ενισχυτές. Για παράδειγμα ο ενισχυτής No1 ενισχύει τη διαφορά των ηλεκτροδίων A και B, ο ενισχυτής 2 τη διαφορά των ηλεκτροδίων B και C κ.ο.κ.

Συνήθως χρησιμοποιούνται διαφορικοί ενισχυτές, ώστε ο λόγος απόρριψης κοινού σήματος (Common Mode Rejection Ratio - CMRR) να είναι στο επίπεδο των 120db. Το προκύπτον σήμα **φιλτράρεται** από ένα υψιπερατό και ένα βαθυπερατό φίλτρο με χαρακτηριστικά 0.5Hz και 35-70 Hz αντίστοιχα. Το υψιπερατό φίλτρο απορρίπτει χαμηλόσυχνα σήματα που προκαλεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα του δέρματος ενώ το βαθυπερατό απορρίπτει ηλεκτρομυογραφικά σήματα. Το φιλτραρισμένο σήμα αποτυπώνεται σε χαρτί (κυρίως στα παλαιότερα συστήματα) ή συνηθέστερα παρουσιάζεται στην οθόνη ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή αφού πρώτα **ψηφιοποιηθεί** και **ληφθεί** από ειδική κάρτα δεδομένων (Data Acquisition Card – DAC). Αναλυτικότερα, μέσω συσκευής *πολυπλεξίας* τα ενισχυμένα εγκεφαλικά σήματα οδηγούνται στον *μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό* σήμα (A/D), από όπου ως ψηφιακά πλέον σήματα καταμετρώνται σε ένα ηλεκτρονικό βολτόμετρο. Τέλος, ο ηλεκτρονικός υπολογιστής *λαμβάνει* τα ψηφιακά δεδομένα των μετρήσεων, οπότε υπάρχει πλέον η δυνατότητα για περαιτέρω ψηφιακή επεξεργασία και απεικόνιση του σήματος, είτε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (εντός γραμμής - on line), είτε σε μεταγενέστερο χρόνο εφόσον αποθηκευτεί το

σήμα στο δίσκο του υπολογιστή (εκτός γραμμής - offline). Η όλη παραπάνω διαδικασία ψηφιοποίησης (πολύπλεξη, αναλογικοψηφιακή μετατροπή και μέτρηση) σε σύγχρονα συστήματα δύναται να εκτελεστεί και εξολοκλήρου από τις Data Acquisition Cards.



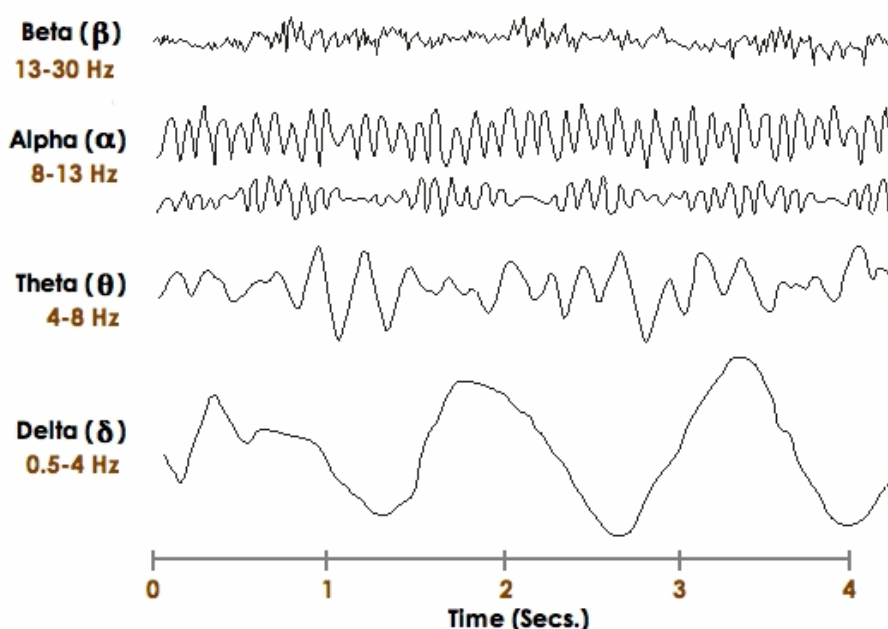
Σχήμα 1.8: Τυπικό Σύστημα Λήψης και επεξεργασίας βιοϊατρικού σήματος

Η μελέτη του λαμβανόμενου EEG βασίζεται στη διάκριση της ύπαρξης ή μη συγκεκριμένων κυματομορφών στο λαμβανόμενο σήμα, των λεγόμενων «**ρυθμών**». Οι ρυθμοί του EEG είναι οι συχνοτικές περιοχές (μπάντες) που περιέχονται στο λαμβανόμενο σήμα και αποκαλύπτονται όταν γίνει η φασματική ανάλυση¹ του. Στα παρακάτω σχήματα δίνονται οι κυριότεροι ρυθμοί που έχουν διακριθεί, με την παράλληλη καταγραφή του εύρους των πλατών και της μορφής που έχει ο καθένας τους.

Ρυθμός	Περιοχή Συχνοτήτων (σε Hz)	Πλάτος (σε μV)
Δέλτα	0,5-3,5	Εως 100-200
Θήτα	4-7,5	<30
Άλφα	8-12	30-50
(Αργός) Βήτα	13-19	<20
(Ταχύς) Βήτα	20-30	<20

Σχήμα – Πίνακας 1.9: Οι κυριότεροι ρυθμοί του EEG

¹ Ανάλυση των αρμονικών συχνοτήτων από τις οποίες αποτελούνται το EEG.



Σχήμα 1.10: Μορφή κυριότερων ρυθμών του EEG

Η εμφάνιση των ρυθμών έχει συνδυαστεί με διάφορα επίπεδα εγρήγορσης, χαλάρωσης, ύπνου κ.λπ. Για παράδειγμα, **ο α ρυθμός** εμφανίζεται σε περίπου 75% των ενηλίκων. Το κλείσιμο (αντίστοιχα άνοιγμα) των ματιών προκαλεί αύξηση (αντίστοιχα μείωση) του α ρυθμού. Αντίθετα, μείωση της δραστηριότητας α έχει συσχετισθεί με αισθητηριακό ερεθισμό ή πνευματική δραστηριότητα. Ο ρυθμός αυτός πήρε το όνομα α γιατί ήταν ο πρώτος ο οποίος μελετήθηκε, ήδη από τον Berger. **Ο β ρυθμός**, ο δεύτερος ο οποίος μελετήθηκε, είναι ο κυρίαρχος ρυθμός που εμφανίζεται κατά τη φάση πλήρους εγρήγορσης ενός φυσιολογικού ατόμου. **Ο ρυθμός δ** συσχετίζεται με τον ύπνο στον φυσιολογικό άνθρωπο και είναι επίσης κύριος ρυθμός στα νεογέννητα έως το δεύτερο έτος της ηλικίας. **Ο ρυθμός θ** φαίνεται να συνδέεται με μηχανισμούς καταστολής, είτε στην είσοδο σε φάση χαλάρωσης, είτε σε συνδυασμό με τον β ρυθμό σε φάσεις αυξημένης προσοχής.

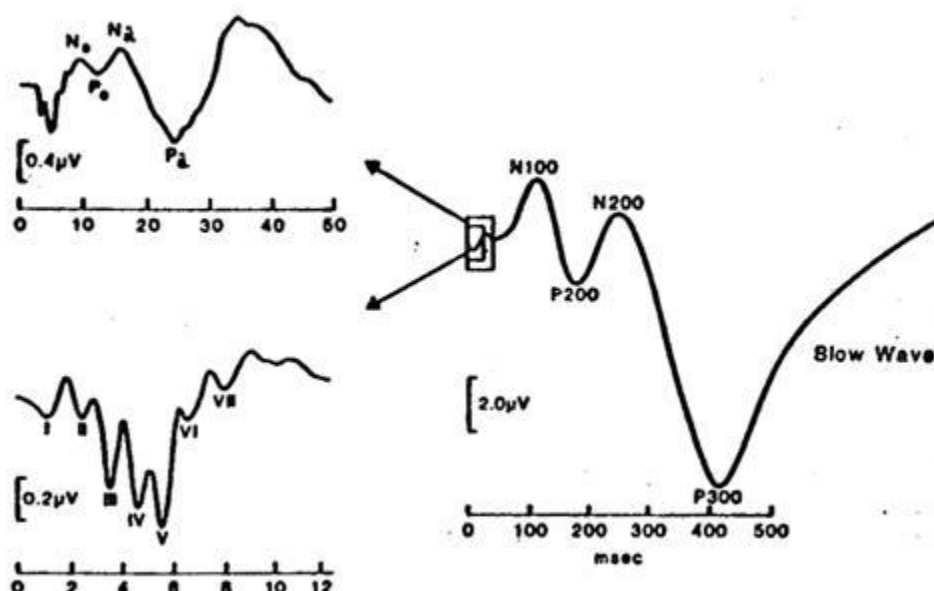
Προκλητά Δυναμικά Εγκεφάλου (EPs)

Τα τελευταία είκοσι έτη παρουσιάζεται αυξημένο ενδιαφέρον για τη μελέτη των εγκεφαλικών διαδικασιών οι οποίες προκαλούνται από συγκεκριμένα γεγονότα. Ονομάζουμε **Βιωματικά Δυναμικά - ΒΔ (Event Related Potentials - ERP)**, τις διαφορές δυναμικού που μετρούμε, συνήθως στη δερματική επιφάνεια του κεφαλιού, οι οποίες προκαλούνται ως απόκριση σε συγκεκριμένο γεγονός, το οποίο συμβαίνει είτε στον εξωτερικό φυσικό κόσμο, είτε λαμβάνει χώρα ως ψυχολογική διαδικασία. Τα διακρίνουμε σε **Εκπεμπόμενα Δυναμικά (Emitted Potentials)** όταν σχετίζονται με μία ψυχολογική διαδικασία και σε **Προκλητά Δυναμικά - ΠΔ (Evoked Potentials - EP)**, όταν το ερέθισμα, το γεγονός, προέρχεται από τον εξωτερικό κόσμο.

Τα προκλητά δυναμικά (EPs) μπορούν να διακριθούν περαιτέρω ανάλογα με το είδος του εξωτερικού ερεθίσματος που τα προκαλεί:

- **ακουστικά** προκλητά δυναμικά (**VEPs**): Οι ερεθισμοί είναι ακουστικοί.
- **οπτικά** προκλητά δυναμικά (**AEPs**): Οι ερεθισμοί είναι οπτικοί.
- **σωματοαισθητικά** προκλητά δυναμικά (**SEPs**): Οι ερεθισμοί είναι σωματοαισθητικοί.

Ένας άλλος τρόπος διαχωρισμού των προκλητών δυναμικών (EPs) είναι σε σχέση με το χρόνο εμφάνισής τους μετά από το εκλυτικό γεγονός (λανθάνων χρόνος). Στην περίπτωση των ακουστικών προκλητών δυναμικών για παράδειγμα υπάρχει η διάκριση σε **πρώιμα** (early, fast), **μέσα** (middle) και **αργά ή ύστερα** (slow, late) δυναμικά, που αντιστοιχούν περίπου στα χρονικά διαστήματα 2 ως 12 ms, 12 ως 50 ms και 50 ως 800 ms από τη στιγμή που χορηγείται ο εξωτερικός ερεθισμός (σχήμα 1.11). Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι αυξανόμενου του λανθάνοντος χρόνου μειώνεται η συχνότητα των κυματομορφών και αυξάνεται το πλάτος τους. Προσεγγιστικά μπορούμε να πούμε ότι στα πρώιμα δυναμικά έχουμε πλάτη της τάξης του 0,1 ως 0,5μV και συχνότητας 100 ως 1000 Hz ενώ στα ύστερα δυναμικά παρατηρούνται συχνότητες 0,1Hz (σχεδόν DC) ως 5Hz και πλάτη από 1 ως 20 μV. Τα χαρακτηριστικά αυτά οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στον τόπο έκλυσης των αντίστοιχων δυναμικών. Τα πρώιμα σχετίζονται με τη διαβίβαση των νευρωνικών ώσεων κατά μήκος του ακουστικού ή οπτικού νεύρου για ακουστικά ή οπτικά προκλητά δυναμικά και κατά μήκος της σωματοαισθητικής οδού για τα σωματοαισθητικά. Αντίθετα, τα ύστερα δυναμικά αντανakλούν την εγκεφαλική δραστηριότητα περιοχών του φλοιού ως αντίδραση στην άφιξη της εξωτερικής πληροφορίας.



Σχήμα 1.11: Μορφή EPs.

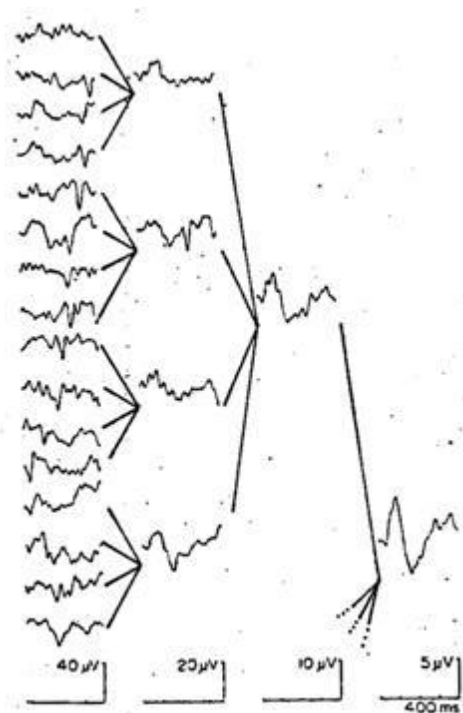
Πρώιμα EPs (κάτω-αριστερά), Μέσα EPs (πάνω-αριστερά) και Ύστερα EPs (δεξιά)

Τέλος, μπορούμε να χωρίσουμε τα EPs σε **ενδογενή** και **εξωγενή**. Τα εξωγενή σχετίζονται άμεσα με τη φύση του εκλυτικού ερεθίσματος δηλαδή την ένταση, τη συχνότητά του κ.τ.λ., αλλά και την ακεραιότητα των αισθητικών οδών. Τα ενδογενή EPs εξαρτώνται ουσιαστικά από την ψυχολογική κατάσταση του ατόμου και τα ψυχολογικά γνωρίσματα του απλού ή συμπλόκου ερεθίσματος, όπως για παράδειγμα αν το ερέθισμα είναι γνωστό ή άγνωστο, αν προκαλεί δυσφορία ή ευχαρίστηση, αν είναι σημασιολογικά ορθό ή λάθος, ενδιαφέρον ή αδιάφορο κ.ο.κ.. Ο λανθάνων χρόνος εμφάνισής τους σε σχέση με το εκλυτικό ερέθισμα βρίσκεται συνήθως ανάμεσα στα 100 και 500 msec.

Όλα τα παραπάνω δυναμικά ωστόσο, τείνουν να είναι μικρά σε πλάτος, κυμαινόμενα **από 0.1μVolt έως λίγα μVolts**, έναντι των δεκάδων κατά μέσο όρο μVolts του EEG. Η μέτρηση των προκλητών δυναμικών γίνεται με την ίδια αρχική διαδικασία που αναλύθηκε και στην καταγραφή του EEG. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα τελευταία να αναδύονται μέσα από την τυχαία και διαρκή εγκεφαλική λειτουργία και να απαιτούνται πολλές επαναλήψεις για την εξαγωγή ενός μέσου όρου, ώστε να αναγνωρισθούν και να αποτιμηθούν. Επίσης κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης εγκεφαλικού σήματος λειτουργούν εκτός των εγκεφαλικών περιοχών που δέχονται και επεξεργάζονται το ερέθισμα, και άλλες εγκεφαλικές περιοχές οι οποίες σχετίζονται με τη γενικότερη λειτουργία του οργανισμού. Κατά συνέπεια το σήμα που σχετίζεται με την αντίδραση του εγκεφάλου στο ερέθισμα είναι κρυμμένο μέσα

στο συνολικό σήμα που καταγράφεται. Το κομμάτι του σήματος που δεν αφορά στην εγκεφαλική επεξεργασία του ερεθίσματος θεωρείται θόρυβος, ο οποίος μάλιστα είναι πιο ισχυρός από το σήμα που επιθυμούμε να μελετήσουμε. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται χρησιμοποιώντας τις εξής μεθόδους αποθρομβοποίησης:

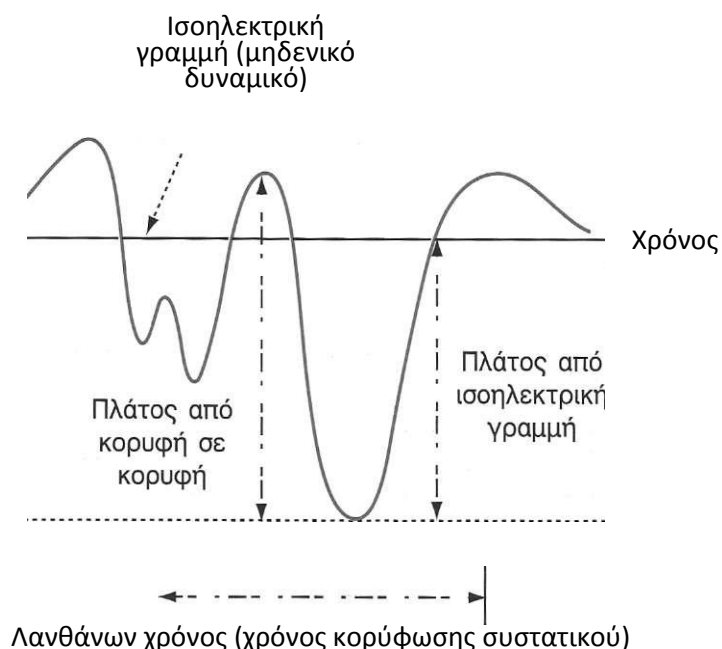
- Χρησιμοποιούνται **ενισχυτές** μεγάλης ευαισθησίας
- Οι χώροι μέτρησης των σημάτων είναι απομονωμένοι από εξωτερικά ηλεκτρικά πεδία, όπως αυτά που δημιουργούν ενσύρματες ή ασύρματες ηλεκτρικές συσκευές, γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας κ.ά.. Η προτιμώμενη λύση είναι η μέτρηση να γίνεται σε ηλεκτρομαγνητικά θωρακισμένο δωμάτιο (**κλωβό Faraday**) ή σε ανηχοϊκό θάλαμο.
- **Εύρεση μέσου όρου** (signal averaging). Η λήψη εγκεφαλικού σήματος για μέτρηση EP επαναλαμβάνεται αρκετές φορές ή το συνολικό σήμα χωρίζεται σε τμήματα μικρότερης διάρκειας (για μέτρηση EEG). Το συνολικό αυτό σήμα (SIGNAL(t)) μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο τμήματα, το σήμα EP(t) και τον θόρυβο NOISE (t). Θεωρώντας ότι ο θόρυβος είναι λευκός η μέση τιμή του είναι μηδενική ενώ το σήμα EP κάθε φορά έχει τα ίδια χαρακτηριστικά. Με τον υπολογισμό του μέσου όρου λοιπόν ο θόρυβος ελαχιστοποιείται ενώ το σήμα των προκλητών δυναμικών ενισχύεται και τελικώς αποκαλύπτεται.



Σχήμα 1.12: Η εξαγωγή του μέσου όρου (δεξιά κυματομορφή στην εικόνα) των μετρούμενων EPs από το ίδιο ηλεκτρόδιο/απαγωγή σε μια επαναληπτική διαδικασία καταγραφών.

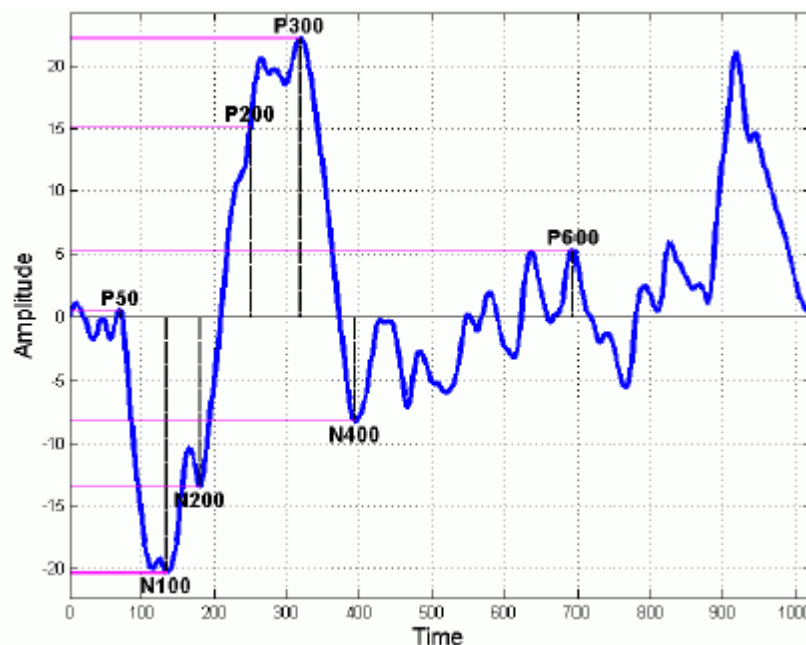
Κατόπιν της μέτρησης και διάκρισης των ερευνούμενων EPs από τον παρεμβαλλόμενο θόρυβο, τα προκλητά δυναμικά αποθηκεύονται μέσω των καρτών DAC σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, όπου θα ακολουθήσει η **μελέτη των χαρακτηριστικών τους (components)**. Τα συστατικά αυτά, είναι τμήματα του συνολικού σήματος που καθορίζονται με βάση τρεις παράγοντες:

- τις κορυφώσεις (αρνητικές ή θετικές) του πλάτους του δυναμικού (amplitude). Η κορύφωση του EP συνήθως μετράται με αναφορά την ισοηλεκτρική γραμμή (= 0 Volts) ή το επίπεδο δυναμικού στην έναρξη της διαδικασίας μέτρησης ή κάποια άλλη προγενέστερη κορύφωση.
- τη χρονική στιγμή στην οποία κατά προσέγγιση λαμβάνει χώρα η κορύφωση (λανθάνων χρόνος - latency period), έχοντας ως έναρξη τη χρονική στιγμή πραγματοποίησης του υπαίτιου εξεταζόμενου ερεθίσματος.
- το χρονικό εύρος το οποίο καταλαμβάνει η κυματομορφή που περιέχει τη συγκεκριμένη κορύφωση.



Σχήμα1.13: Σχηματική αναπαράσταση του καθορισμού του πλάτους, του χρονικού σημείου κορύφωσης και του «ενεργού» εμβαδού ενός συστατικού του EP

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις για τα χαρακτηριστικά των **κορυφώσεων** της χρονοσειράς των προκλητών δυναμικών, όπως εκείνα έχουν καθιερωθεί στη βιβλιογραφία από τη μέχρι σήμερα μελέτη τους. Εκτός από το **χρονικό διάστημα** της χρονοσειράς το οποίο αντιστοιχεί σε κάθε κορυφή παρουσιάζεται μια επιγραμμιακή αναφορά στην ιατρική σημασία του κάθε ενός:



Σχήμα 1.14: Προκλητά Δυναμικά ανθρώπινου εγκεφάλου. Διακρίνονται οι κορυφώσεις P50, N100, N200, P200, P300, N400 και P600

P50: Περιγράφει τη θετική κορύφωση του μετρούμενου δυναμικού που εντοπίζεται στο χρονικό παράθυρο από 20 ως 80 msec μετά το ερέθισμα. Θεωρείται δείκτης πρώιμων πτυχών προσοχής.

N100: Πρόκειται για την αρνητική κορύφωση του μετρούμενου δυναμικού που εντοπίζεται στο χρονικό παράθυρο 90 ως 150 msec μετά την παρουσίαση του ερεθίσματος. Υποδηλώνει φαινόμενα κινητοποίησης προσοχής. Ο λανθάνων χρόνος (latency) αντικατοπτρίζει την ταχύτητα κινητοποίησης της προσοχής, ενώ το μέγιστο πλάτος (amplitude) αντικατοπτρίζει την ικανότητα ή χωρητικότητα της προσοχής.

P200: Περιγράφει τη θετική κορύφωση του μετρούμενου δυναμικού που εντοπίζεται από 140 ως 250 msec μετά το ερέθισμα. Αποτελεί ένα μέτρο για την επικέντρωση της προσοχής του ατόμου.

N200 : Περιγράφει την αρνητική κορύφωση του μετρούμενου δυναμικού που εντοπίζεται από 180 ως 300msec μετά το ερέθισμα. Αντικατοπτρίζει τις επιδόσεις των νευρωνικών κυκλωμάτων που υπόκεινται στο φαινόμενο της αντίδρασης του προσανατολισμού σε επίπεδο Κεντρικού Νευρικού Συστήματος.

P300: Περιγράφει τη θετική κορύφωση του μετρούμενου δυναμικού που εντοπίζεται από 220 ως 500 msec μετά το ερέθισμα. Αντικατοπτρίζει τη νευρωνική δραστηριότητα η οποία υπόκειται των διεργασιών που συναρτώνται με τον επιμερισμό προσοχής για την κινητοποίηση των προγραμμάτων δράσης. Ο λανθάνων χρόνος εμφάνισής του φαίνεται να αντανακλά το απαραίτητο χρονικό διάστημα για να πάρει ο εξεταζόμενος μια απόφαση για το ερέθισμα.

P400: Πρόκειται για την αρνητική κορύφωση του μετρούμενου δυναμικού η οποία λαμβάνει χώρα από 280 ως 500 msec μετά το ερέθισμα. Αντικατοπτρίζει τη λειτουργία των νευρωνικών κυκλωμάτων που υπηρετούν και εκφράζουν την «συντακτική» διάσταση της εκάστοτε απάντησης του Κεντρικού Νευρικού Συστήματος. Συμβάλλει στην εξέταση μηχανισμών που σχετίζονται με τη γλώσσα και το εννοιολογικό – συντακτικό της περιεχόμενο.

P600: Περιγράφει τη θετική κορύφωση του μετρούμενου δυναμικού που εντοπίζεται στο χρονικό παράθυρο 500 ως 800 msec μετά το ερέθισμα. Έχει καθιερωθεί ως δείκτης συγχρονισμού σημαντικών και συντακτικών διαστάσεων της απάντησης.

Όλα τα παραπάνω εξαχθέντα χαρακτηριστικά των κορυφώσεων των EPs χρησιμοποιούνται σήμερα στην προώθηση της ψυχιατρικής έρευνας και κλινικής εφαρμογής, τόσο στις διαγνωστικές διαδικασίες όσο και στην ψυχοφαρμακολογία. Σε αυτή την κατεύθυνση γίνεται προσπάθεια να μελετηθούν περαιτέρω οι διαφορές που παρουσιάζουν άρρωστοι σε σχέση με υγιείς, όσον αφορά τα παραπάνω χαρακτηριστικά συστατικών (components) των προκλητών δυναμικών (EPs).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ

ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές σχεδιαστικές τεχνικές των εξεταζόμενων τηλεπικοινωνιακών σημάτων, δηλαδή του WCDMA και του LTE. Στην πρώτη παράγραφο του κεφαλαίου δίνεται μια γενική ιστορική αναδρομή των τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων της κινητής τηλεφωνίας από τα μέσα της δεκαετίας του 1930 μέχρι σήμερα, περιγράφοντας τα διάφορα στάδια που προηγήθηκαν ώστε να φτάσουμε στην ισχύουσα σημερινή προτυποποίηση. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, ακολουθώντας την χρονική αλληλουχία των γεγονότων, αναλύουμε πρώτα την αρχή λειτουργίας των WCDMA συστημάτων και ακολούθως την προτυποποίηση που αποφασίστηκε για τα LTE συστήματα επικοινωνίας από την ITU.

2.1 Ιστορική Αναδρομή Ασυρμάτων Κινητών Επικοινωνιών

2.1.1 Εισαγωγή

Αρχικά, τα πρώτα συστήματα κινητών επικοινωνιών χρησιμοποιήθηκαν από αστυνομικά τμήματα σε πόλεις των ΗΠΑ για λόγους δημόσιας ασφάλειας. Το 1934 εγκαταστάθηκαν σε 252 αστυνομικά τμήματα τα πρώτα αναλογικά συστήματα κινητών επικοινωνιών που χρησιμοποιούσαν αναλογική διαμόρφωση πλάτους (AM). Περίπου 5000 συσκευές είχαν εγκατασταθεί σε αυτοκίνητα της αστυνομίας για την επικοινωνία με τα τμήματα. Με την εισαγωγή από τον Edwin Armstrong το 1935 της διαμόρφωσης συχνότητας (FM), όλα τα συστήματα κινητών επικοινωνιών υιοθέτησαν την FM διαμόρφωση. Το 1946 εγκαταστάθηκαν για πρώτη φορά συστήματα κινητών επικοινωνιών σε 25 πόλεις των ΗΠΑ. Κάθε σύστημα χρησιμοποιούσε έναν πομπό σε υψηλό πύργο για να καλύπτει αποστάσεις μέχρι 50Km. Το εύρος ζώνης για τη φωνή ήταν 120KHz, σε half-duplex επικοινωνία. Στη δεκαετία του 1950 η εξέλιξη της τεχνολογίας επέτρεψε τη μείωση του εύρους στα 60KHz και στη δεκαετία του 1960 στα 30KHz. Με την πάροδο των χρόνων η ανάγκη για εξυπηρέτηση περισσότερων χρηστών έγινε ασφυκτικά μεγάλη. Στη δεκαετία του 1960 η AT&T Bell Labs καθώς και άλλες εταιρίες τηλεπικοινωνιών ανέπτυξαν τις βασικές αρχές των κυψελωτών συστημάτων. Η βασική ιδέα ήταν ο χωρισμός μιας περιοχής κάλυψης σε μικρές κυψέλες, κάθε μια από τις οποίες επαναχρησιμοποιεί διαύλους, ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα των συστημάτων. Παρόλο που η AT&T πρότεινε τα κυψελωτά συστήματα στην FCC το 1968, η τεχνολογία δεν ήταν ακόμη έτοιμη να τα υποστηρίξει μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1970. Το 1976 το **WARC (World Administrative Radio Conference)** ενέκρινε την απόδοση συχνοτήτων για κυψελωτά συστήματα κινητών επικοινωνιών στην περιοχή των 800/900MHz θέτοντας τη βάση για την ανάπτυξη εμπορικών συστημάτων.

2.1.2 Κυψελωτά Συστήματα 1^{ης} Γενιάς

Το πρώτο παγκοσμίως κυψελωτό σύστημα που λειτούργησε ήταν στην Ιαπωνία το 1979 από τη **Nippon Telephone and Telegraph (NTT)**. Το σύστημα χρησιμοποιούσε 600 FM duplex διαύλους με εύρος 25KHz στα 925-940/870-885 MHz. Το 1981 η Ericsson ανέπτυξε το πρώτο ευρωπαϊκό κυψελωτό σύστημα, το **NMT450 (Nordic Mobile Telephone)**, στη ζώνη 450-470MHz, το οποίο μετεξελίχθηκε στο NMT900, στη ζώνη 890-915/917-950MHz, το 1986. Το 1983 αναπτύχθηκε το πρώτο δοκιμαστικό κυψελωτό σύστημα στην Αμερική, το **AMPS (American Mobile Phone System)** από την AT&T στο Σικάγο, στη ζώνη 824-849/869-894MHz, με εύρος διαύλου τα 30KHz. Τα NTT, NMT450, NMT900, AMPS, NAMPS, ETACS, JTACS, C-450 αποτελούν κυψελωτά συστήματα 1^{ης} γενιάς, με βασικά χαρακτηριστικά την αναλογική διαμόρφωση FM, την τεχνική πολλαπλής πρόσβασης FDMA και την τεχνική FDD. Η φασματική πυκνότητα ισχύος του διαμορφωμένου σήματος στα συστήματα FDD πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά, ώστε η παρασιτικά ακτινοβολούμενη ισχύς σε γειτονικούς διαύλους να είναι 60 - 80 dB χαμηλότερα από την επιθυμητή. Τα περισσότερα από τα προαναφερθέντα συστήματα χρησιμοποιούσαν μια απόσταση 45MHz μεταξύ των συχνοτήτων εκπομπής και λήψης, τέτοια ώστε να είναι εφικτή η υλοποίηση του διπλέκτη με επαρκή απομόνωση των δύο συχνοτήτων. Ο πίνακας 2.1 απεικονίζει τα βασικά χαρακτηριστικά των κυψελωτών συστημάτων 1^{ης} γενιάς.

Προδιαγραφή	Ζώνη Συχνοτήτων Αντίστροφη/Ευθεία Ζεύξη (MHz)	Απόσταση Φερόντων (KHz)	Αριθμός Διαύλων	Περιοχή Ανάπτυξης
NTT	925-940/870-885	25	600	Ιαπωνία
NMT450	453-457,5/463-467,5	25	180	Σουηδία
NMT900	890-915/935-960	12,5	1999	Σουηδία
AMPS (IS91)	824-849/869-894	30	832	ΗΠΑ
NAMPS (IS88)	824-849/869-894	10	2412	ΗΠΑ
ETACS	872-905/917-950	25	1240	Αγγλία
JTACS	915-925/860-870	25	400	Ιαπωνία
C-450	450-455,74/460-465,74	10	573	Γερμανία

Σχήμα - Πίνακας 2.1:
Βασικά χαρακτηριστικά των κυψελωτών συστημάτων 1^{ης} γενιάς

2.1.3 Μετάβαση στα Ψηφιακά Κυβελωτά Συστήματα

Ενώ οι ψηφιακές τεχνικές γρήγορα υιοθετήθηκαν στα ενσύρματα συστήματα επικοινωνιών, έπρεπε να προηγηθεί η ραγδαία εξέλιξη στην τεχνολογία της μικροηλεκτρονικής μέχρι να βρουν εφαρμογή στα ασύρματα συστήματα. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των ψηφιακών συστημάτων έναντι των αναλογικών είναι:

- έχουν αυξημένη ανοσία στο θόρυβο.
- δίνουν τη δυνατότητα επεξεργασίας του σήματος προσφέροντας περισσότερο αποδοτικές τεχνικές μετάδοσης και την καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών, κάνοντας χρήση κωδίκων διόρθωσης σφαλμάτων, φασματικά αποδοτικών τεχνικών διαμόρφωσης, αποδοτική κωδικοποίηση πληροφορίας και κωδικοποίηση διαύλου.
- έχουν τη δυνατότητα εφαρμογής τεχνικών κρυπτογράφησης για την ασφάλεια της μετάδοσης.
- δίνουν ευελιξία στην ανάπτυξη και επέκταση των δικτύων.
- έχουν τη χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος.
- επιτρέπουν την εφαρμογή διαφορετικών επιπέδων ποιότητας υπηρεσίας, παρέχοντας ταυτόχρονα υπηρεσίες φωνής και δεδομένων.
- είναι εύκολα υλοποιήσιμα σε VLSI χαμηλού κόστους.
- παρέχουν τη δυνατότητα για επιπλέον τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης (TDMA/CDMA/SDMA) και duplexing (TDD).
- επιτρέπουν την υλοποίηση **επαναπροσδιοριζόμενων δεκτών λογισμικού (Software Defined Radio - SDR)** και των λεγόμενων cognitive radios.

Υπάρχουν βέβαια και κάποια μειονεκτήματα έναντι των αναλογικών συστημάτων όπως:

- ανάγκη για ισοστάθμιση ώστε να αποφεύγονται διασυμβολικές παρεμβολές.
- κόστος αντικατάστασης υπαρχόντων αναλογικών συστημάτων, όπου αυτά υπήρχαν, π.χ. ΗΠΑ.
- ποιότητα φωνής συχνά υποβαθμισμένη.
- ανάγκη για συγχρονισμό.
- αυξημένη πολυπλοκότητα αλγορίθμων, διαδικασιών ελέγχου και πρωτοκόλλων.

Στις αρχές του 1980 είχε γίνει εμφανής η αδυναμία των αναλογικών κυψελωτών συστημάτων να αντεπεξέλθουν στις απαιτήσεις των επερχόμενων χρόνων, λόγω των πέντε βασικών περιορισμών που τα χαρακτήριζαν:

- Εξαιρετικά περιορισμένο φάσμα προς απόδοση, και συνεπώς χαμηλή χωρητικότητα συστημάτων.
- Η αντίληψη των χρηστών ότι ήταν περιορισμένης χρησιμότητας λόγω της χαμηλής ποιότητας υπηρεσιών, αλλά και του αριθμού των προσφερόμενων υπηρεσιών.
- Απουσία ασφάλειας επικοινωνιών.
- Αδυναμία να μειώσουν το κόστος των τερματικών και της υποδομής των δικτύων.
- Ασυμβατότητα μεταξύ των διάφορων αναλογικών συστημάτων.

Ήταν συνεπώς αναμενόμενη η στροφή της βιομηχανίας στις ψηφιακές τεχνικές που αποδείχτηκαν ιδιαίτερα αποτελεσματικές και στα ενσύρματα συστήματα επικοινωνιών. Τα 2^{ης} γενιάς κυψελωτά δίκτυα βασίζονται όλα σε ψηφιακές τεχνικές, εκμεταλλευόμενα τα εμφανή και πολλαπλά τους πλεονεκτήματα.

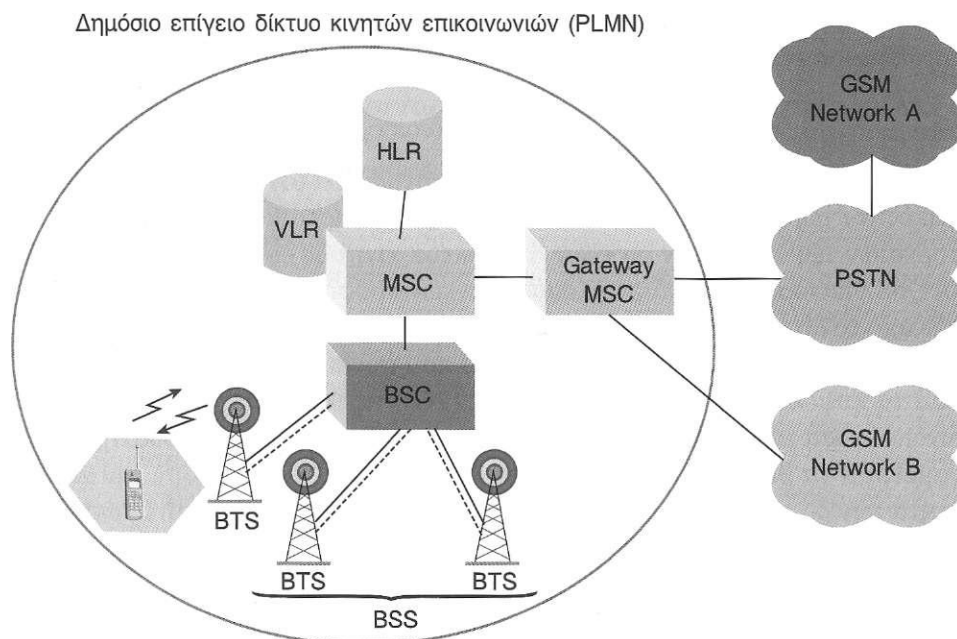
2.1.4 Κυψελωτά Συστήματα 2^{ης} Γενιάς

Στα κυψελωτά συστήματα 2^{ης} γενιάς συγκαταλέγονται όλα τα υπάρχοντα και λειτουργούντα συστήματα. Στηρίζονται στις τεχνικές TDMA ή DS-CDMA και για τις ΗΠΑ είναι τα IS-54, IS-136 και IS-95, για δε την Ευρώπη το GSM και για την Ιαπωνία το PDC.

Global System for Mobile Communications (GSM)

Το σύστημα GSM σχεδιάστηκε από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Προτυποποίησης (ETSI) που ιδρύθηκε το 1988 για το σκοπό αυτό, υλοποιήθηκε εξολοκλήρου στην Ευρώπη και είναι το πλέον πετυχημένο κυψελωτό σύστημα παγκοσμίως. Η σχεδιάσή του ξεκίνησε το 1982 ως πανευρωπαϊκή προδιαγραφή και λειτούργησε το 1992 ως το πρώτο ψηφιακό κυψελωτό σύστημα. Στηρίζεται σε FDMA τεχνική, με 200KHz απόσταση φερόντων, αλλά συνδυάζει και την TDMA τεχνική με FDD. Κάθε φέρον έχει οκτώ (8) διαύλους - χρονοσχισμές με διάρκεια χρονοσχισμής τα 0,577msec, ενώ χρησιμοποιεί την τεχνική ψηφιακής διαμόρφωσης GMSK με τελικό ρυθμό μετάδοσης τα 270,8Kbps. Υποστηρίζει υπηρεσίες φωνής (13Kbps) και δεδομένων μέχρι 9,6Kbps. Τα υπάρχοντα δίκτυα GSM είναι περισσότερα από 690, παρέχοντας ασύρματες ψηφιακές υπηρεσίες σε περισσότερους από 2,4 δισεκατομμύρια συνδρομητές (Ιούνιος του 2007) σε 213 χώρες. Οι συνδέσεις GSM αντιστοιχούν στο 82,4% της συνολικής παγκόσμιας αγοράς κινητών επικοινωνιών. Το σύστημα έχει βελτιστοποιηθεί για τερματικές συσκευές χειρός με μέγιστη ισχύ εκπομπής το 1Watt ή τα 250mWatt και υποστηρίζει την επικάλυψη κυψελών διαφορετικού μεγέθους (μακροκυψέλες, μικροκυψέλες).

Η απαίτηση για απεριόριστη κινητικότητα τερματικού οδηγεί σε μια συγκεκριμένη αρχιτεκτονική του συστήματος. Οι λειτουργίες που αφορούν στην κινητικότητα του τερματικού είναι η διαχείριση των ασύρματων πόρων, η διαχείριση κινητικότητας και η διαχείριση ασφάλειας. Το σχήμα 2.2 δείχνει τα βασικά στοιχεία του GSM, τα οποία προσφέρουν αυτήν τη λειτουργικότητα. Αν ένα κινητό τερματικό ενεργοποιηθεί κάπου, πρέπει πρώτα να εξακριβώσει αν έχει πρόσβαση στο **Δημόσιο Επίγειο Δίκτυο Κινητών Επικοινωνιών (Public Land Mobile Network, PLMN)**. Αρχίζει τότε το κινητό τερματικό μια διαδικασία ενημέρωσης θέσης για να πληροφορήσει το οικείο PLMN για την τρέχουσα θέση του, με σκοπό να καταστεί δυνατή η δρομολόγηση των εισερχόμενων κλήσεων προς το κινητό τερματικό στη νέα του θέση. Η πληροφορία για τη θέση ενός κινητού τερματικού αποθηκεύεται σε μια κεντρική βάση δεδομένων, τον **Καταχωρητή Θέσης Οικείων (Home Location Register, HLR)** του PLMN στο οποίο είναι συνδρομητής ο χρήστης.



Σχήμα 2.2: Βασικά στοιχεία δικτύου του συστήματος GSM

Επιπρόσθετα με άλλες ειδικές πληροφορίες, ο HLR διατηρεί φυλαγμένη πληροφορία με την οποία καθίσταται δυνατή η δρομολόγηση της εισερχόμενης κλήσης προς το **κέντρο μεταγωγής κινητών επικοινωνιών (Mobile Switching Center, MSC)** που εξυπηρετεί την τρέχουσα περιοχή στην οποία περιφέρεται το καλούμενο τερματικό. Το MSC είναι κατά κύριο λόγο υπεύθυνο για τη μεταγωγή και τη διαχείριση κινητικότητα. Από τη στιγμή που συνδέεται το κινητό τερματικό σε κάποιο MSC, ένα **Υποσύστημα Σταθμών Βάσης (Base Station Subsystem, BSS)** μαζί με τον αντίστοιχο **Ελεγκτή Σταθμών Βάσης (Base Station Controller, BSC)** βρίσκεται σε συνεργασία μαζί του μέσω της ασύρματης διεπαφής. Κάθε κινητό τερματικό, που βρίσκεται σε μια κυψέλη κάποιου BSS ενός MSC, εγγράφεται σε μια συγκεκριμένη βάση δεδομένων που αντιστοιχεί στο υπόψη MSC, η οποία ονομάζεται **Καταχωρητής Θέσης Επισκεπτών (Visitors Location Register, VLR)**. Εάν μια κλήση προς έναν συνδρομητή του GSM προέρχεται από εξωτερικό δίκτυο, η κλήση δρομολογείται πρώτα σε ένα Διαβιβαστικό - MSC (Gateway - MSC, GMSC). Αυτό το GMSC ρωτά τον HLR του καλούμενου συνδρομητή για να βρει τον αριθμό δρομολόγησης προς το MSC στο οποίο ο καλούμενος είναι επισκέπτης. Το τελευταίο MSC αρχίζει τότε τη μετάδοση ενός μηνύματος αναζήτησης προς όλες τις σχετιζόμενες με αυτό κυψέλες. Αν ο καλούμενος συνδρομητής απαντήσει, το BSS εκχωρεί έναν δίαυλο για να χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία και εγκαθίσταται η πλήρης σύνδεση.

Κατά τη διάρκεια μιας κλήσης, το κινητό τερματικό επιτρέπεται να κινηθεί από τη μια κυψέλη σε μια άλλη, σε όλη την περιοχή εξυπηρέτησης του GSM, και το GSM φροντίζει να διατηρεί τις ζεύξεις χωρίς να διακόπτεται η από άκρη σε άκρη σύνδεση. Σε αντίθεση με το DETC, η διαδικασία διαπομπής στο GSM υποβοηθείται

από το κινητό τερματικό και εκτελείται από το BSS. Το κινητό τερματικό μετράει περιοδικά την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος και την αναφέρει στον σταθμό βάσης που το εξυπηρετεί, όπως επίσης και τις λαμβανόμενες στάθμες από όλους τους σταθμούς βάσης των κυψελών της περιοχής του που είναι υποψήφιος για τη διαπομπή. Μπορούμε να διακρίνουμε διάφορα είδη διαπομπών, που είτε αλλάζουν δίαυλο στην κυψέλη εξυπηρέτησης, είτε σε κυψέλες εντός της περιοχής που ελέγχεται από τον ίδιο BSC, είτε σε κυψέλες που ανήκουν σε διαφορετικούς BSC μέσα σε μια περιοχή εντοπισμού, είτε μεταξύ περιοχών εντοπισμού.

IS-54, IS-136 και IS-95 Global System for Mobile

Στις ΗΠΑ αναπτύχθηκαν δύο διαφορετικά συστήματα 2^{ης} γενιάς, το IS-54 με τεχνική TDMA, και το IS-95 με τεχνική CDMA. Και τα δύο συστήματα σχεδιάστηκαν ώστε να είναι συμβατά με το σύστημα AMPS. Η IS-54 προδιαγραφή, που πολλές φορές καλείται και **USDC (US Digital Cellular)** ή Digital AMPS, καθορίζει τερματικά διπλού τρόπου λειτουργίας, συμβατά με το AMPS αλλά και ικανά για ψηφιακή σηματοδότηση βασισμένη στο TDMA (3 χρονοσχισμές ανά φέρον), με απόσταση φερόντων τα 30KHz, διαμόρφωση π/4-DQPSK, με τελικό ρυθμό μετάδοσης τα 48,6Kbps. Οι συχνότητες λειτουργίας είναι ίδιες με εκείνες του AMPS (824-894MHz). Το σύστημα υποστηρίζει δύο τύπους διαύλων σηματοδότησης ελέγχου, ένα για το ψηφιακό με ρυθμό 48,6Kbps και ένα για τους διαύλους του AMPS με ρυθμό 10Kbps. Εξέλιξη του IS-54 είναι το IS-136, που παρέχει δυνατότητα αποστολής μικρών μηνυμάτων, και υποστηρίζει κλειστές ομάδες χρηστών. Τα τερματικά του IS-136 δεν είναι συμβατά με εκείνα του IS-54 γιατί το IS-136 έχει διαύλους σηματοδότησης ελέγχου μόνο στα 48,6Kbps.

Το Μάρτιο του 1992 υιοθετήθηκε ένα επιπλέον σύστημα, το IS-95, που βασίζεται στην τεχνική CDMA και προτάθηκε από την Qualcomm. Χρησιμοποιεί **διασπορά φάσματος απευθείας ακολουθίας (Spread Spectrum Direct Sequence)** και παρουσιάζει ασυμμετρία ζεύξης, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές για την ευθεία και την αντίστροφη ζεύξη. Σε κάθε Κινητό Σταθμό σε μία κυψέλη, αποδίδεται ένας διαφορετικός κώδικας, παρέχοντας έτσι ορθογωνιότητα μεταξύ των χρηστών. Το σύστημα είναι συμβατό με το AMPS, και η Qualcomm παρείχε κινητά διπλού τρόπου λειτουργίας. Οι συχνότητες λειτουργίας είναι ίδιες με το AMPS και το IS-54, αλλά έχουν αποδοθεί και επιπλέον συχνότητες στην περιοχή 1,8 – 2 GHz. Το εύρος ζώνης του διεσπαρμένου σήματος είναι 1,25MHz. Ο ρυθμός μετάδοσης για κάθε χρήστη είναι συνάρτηση του χρόνου που η φωνή είναι ενεργή αλλά και της συνολικής κίνησης στο δίκτυο. Η επιτυχία του IS-95 αλλά και η πολλά υποσχόμενη τεχνική της διασποράς φάσματος που χρησιμοποιεί, το κατέστησαν οδηγό και βάση εκκίνησης για τα συστήματα 3^{ης} γενιάς.

Personal Digital Cellular (PDC)

Το PDC αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία από το 1989 και στηρίζεται στις αρχές του IS-54, με TDMA τεχνική πολλαπλής πρόσβασης (3 χρονοσχισμές ανά φέρον), απόσταση φερόντων τα 25KHz, διαμόρφωση $\pi/4$ -DQPSK, με τελικό ρυθμό μετάδοσης τα 42Kbps. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του PDC είναι η διαφορισιμότητα στην κεραία του Κινητού Σταθμού. Οι συχνότητες λειτουργίας είναι οι 810-826MHz/940-956MHz και 1429-1453MHz/1477-1501MHz.

Ο πίνακας 2.3 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά των κυψελωτών συστημάτων 2^{ης} γενιάς:

Σύστημα	Ζώνη Συχνοτήτων Αντίστροφη/Ευθεί α Ζεύξη (MHz)	Απόσταση Φερόντων (KHz)	Αριθμός Διαύλων	Τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης
GSM	890-915/935-960	200	GMSK	TDMA/FDMA/FDD
IS-54	824-849/869-894	30	$\pi/4$ -DQPSK	TDMA/FDMA/FDD
IS-95	824-849/869-894 1800-2000	1250	QPSK/BPSK	CDMA
PDC	810-826/940-956 1429-1453/1477- 1501	25	$\pi/4$ -DQPSK	TDMA/ FDMA/FDD

Σχήμα - Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά κυψελωτών συστημάτων 2^{ης} γενιάς

2.1.5 Κυψελωτά Συστήματα 2,5 Γενιάς

Η μετάβαση από τα κυψελωτά συστήματα 1^{ης} γενιάς σε εκείνα της 2^{ης} γενιάς σηματοδεύτηκε από την εισαγωγή των ψηφιακών τεχνικών, που έδωσαν τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών φωνής σε μεγάλους πληθυσμούς και μεγάλες γεωγραφικές εκτάσεις, λόγω της πολύ καλής ποιότητας της φωνητικής υπηρεσίας. Η δυνατότητα όμως υποστήριξης υπηρεσιών δεδομένων είναι περιορισμένη στα 2^{ης} γενιάς συστήματα και η ανάγκη για παροχή υπηρεσιών με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, ώστε να μεταδίδονται εικόνες υψηλής ποιότητας και video πραγματικού χρόνου, ή να παρέχεται πρόσβαση στο Διαδίκτυο με υψηλές ταχύτητες, οδήγησε στη σχεδίαση των συστημάτων 2,5G. Τα συστήματα 2,5G στηρίζονται σε συστήματα τεχνολογίας 2^{ης} γενιάς, π.χ. το GSM ή το IS-95 και προσφέρουν υπηρεσίες δεδομένων υψηλότερης ταχύτητας υποστηρίζοντας τεχνολογίες μεταγωγής πακέτου. Ουσιαστικά πρόκειται για υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας στα ήδη λειτουργούντα συστήματα, εξασφαλίζοντας μια πιο ομαλή μετάβαση στα συστήματα 3^{ης} γενιάς. Το βασικό χαρακτηριστικό είναι η παροχή κινητικότητας IP, φέρνοντας τους χρήστες κινητών επικοινωνιών πιο κοντά στο Internet.

General Packet Radio Service (GPRS)

Το GSM αρχικά παρείχε δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων με ρυθμούς 9,6Kbps με συμμετρία στην ευθεία και την αντίστροφη ζεύξη, χρησιμοποιώντας τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος. Στη συνέχεια και λόγω της μεγάλης απαίτησης για μεταφορά δεδομένων, έγιναν μερικές τροποποιήσεις ώστε να αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης. Πράγματι, με μια μικρή βελτίωση της κωδικοποίησης, ήταν δυνατή η αύξηση του ρυθμού στα 14Kbps. Κατόπιν, έγινε δυνατή η χρησιμοποίηση πολλών ταυτόχρονα διαύλων για τη μεταφορά δεδομένων, γεγονός που οδήγησε στο **High Speed Circuit Switched Data (HSCSD)** και σε ρυθμούς θεωρητικά ως 40 - 50 Kbps. Η ασυμμετρία όμως της κίνησης στην ευθεία και την αντίστροφη ζεύξη είναι ένα δεδομένο που δεν αντιμετωπίζεται από το HSCSD με αποτέλεσμα να μην είναι καθόλου φασματικά αποδοτική τεχνική.

Η «αναβάθμιση» του GSM, με την υποστήριξη υπηρεσιών δεδομένων με τεχνολογία μεταγωγής πακέτων, οδήγησε στο GPRS. Το βασικό πλεονέκτημα του GPRS είναι η δυνατότητα μεγαλύτερης εκμετάλλευσης των υπαρχόντων ραδιοπόρων ενός λειτουργούντος συστήματος GSM. Θεωρητικά μπορούν να υποστηριχθούν ρυθμοί μέχρι και 112Kbps. Έχουν προβλεφθεί τέσσερις διαφορετικοί τύποι κωδικοποίησης, προσφέροντας από καλή έως καθόλου αναγνώριση και διόρθωση σφαλμάτων, οι οποίοι υποστηρίζουν ρυθμούς για το χρήστη μέχρι και 21,4Kbps για μια χρονοσχισμή. Αν και η έννοια της ποιότητας υπηρεσίας (QoS) υπάρχει στο GPRS,

εντούτοις στην πράξη δεν υποστηρίζεται. Ο λόγος είναι ότι η τηλεπικοινωνιακή κίνηση του GPRS έχει πάντα μικρότερη προτεραιότητα από εκείνη των υπηρεσιών του GSM και χρησιμοποιεί τους ραδιοπόρους που δεν χρησιμοποιούνται από το GSM. Κατά συνέπεια, επειδή δεν μπορεί να είναι εκ των προτέρων γνωστή η ακριβής διαθεσιμότητα των πόρων, δεν μπορεί κανείς να εγγυηθεί συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης. Προκειμένου το GPRS να λειτουργήσει σε συνεργασία με υπάρχοντα GSM δίκτυα, απαιτούνται τροποποιήσεις στη δομή του δικτύου, με κυριότερη εκείνη της πρόσθεσης δύο επιπλέον κόμβων, οι οποίοι καλούνται *GGSN (Gateway GPRS Support Node)*, και *SGSN (Serving GPRS Support Node)*.

IS-95b

Το IS-95b είναι μια εξέλιξη του CDMA δικτύου IS-95 που αναπτύχθηκε στην Αμερική και βρήκε εφαρμογή και σε χώρες της Ανατολικής Ασίας. Υποστηρίζει υπηρεσίες δεδομένων με τεχνολογία μεταγωγής πακέτου, με ρυθμούς πρακτικά μέχρι 64Kbps. Λόγω της σχετικά καθυστερημένης ανάπτυξης και εμπορικά διαθέσιμης τεχνολογίας, έχει εγκατασταθεί σε μικρό αριθμό δικτύων.

Enhanced Data for Global Evolution (EDGE)

Η τεχνολογία EDGE, θεωρείται ως η μετεξέλιξη του GPRS ή του HSCSD, και για το λόγο αυτό αποκαλείται και Enhanced-GPRS (EGPRS) ή Enhanced-HSCSD. Είναι μια προσπάθεια να αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης πάνω από τη ραδιοεπαφή του GSM. Η βασική διαφορά από το GPRS είναι ότι χρησιμοποιεί διαφορετικό τρόπο διαμόρφωσης (8-PSK) και διαφορετικούς τύπους κωδικοποίησης διαύλου. Αποτέλεσμα είναι να μπορεί να υποστηρίξει ρυθμούς θεωρητικά μέχρι και 384Kbps. Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης για μια χρονοσχισμή έχει αυξηθεί στα 59,2Kbps. Το EDGE είναι μια προσθήκη στο GPRS και δεν μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα. Με το EDGE, κάθε χρονοσχισμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί από πολλούς χρήστες, αυξάνοντας έτσι τη χωρητικότητα του δικτύου. Όλες οι απαραίτητες τροποποιήσεις αφορούν κυρίως την πλευρά του ραδιοδικτύου και συνεπώς η επέκταση είναι σχετικά απλή.

2.1.6 Κυψελωτά Συστήματα 3^{ης} Γενιάς

Το βασικό χαρακτηριστικό συστημάτων 3^{ης} γενιάς είναι η υποστήριξη εφαρμογών πολυμέσων και η δυνατότητα πρόσβασης σε πληροφορίες και υπηρεσίες από δημόσια ή ιδιωτικά δίκτυα, με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Οι βασικές απαιτήσεις που τίθενται από τα 3^{ης} γενιάς συστήματα είναι οι εξής:

- Ρυθμοί μετάδοσης μέχρι και 2Mbps.
- Μεταβαλλόμενος ρυθμός μετάδοσης για δυνατότητα προσφοράς εύρους ζώνης κατά απαίτηση.
- Πολυπλεξία υπηρεσιών, με διαφορετικές απαιτήσεις ως προς την ποιότητα (π.χ. φωνή, video, πακέτα δεδομένων), στην ίδια σύνδεση.
- Μεταβαλλόμενες απαιτήσεις ως προς την καθυστέρηση, ανάλογα με την ευαισθησία της υπηρεσίας ως προς την καθυστέρηση.
- Μεταβαλλόμενες απαιτήσεις ποιότητας ανάλογα με την υπηρεσία, από 10% **FER (Frame Error Rate)** ως 10^{-6} BER.
- Συνύπαρξη 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς συστημάτων και υποστήριξη μεταπομπής μεταξύ των συστημάτων για βελτίωση της κάλυψης και εξισορρόπηση του τηλεπικοινωνιακού φορτίου.
- Υποστήριξη ασύμμετρης τηλεπικοινωνιακής κίνησης στην ευθεία και την αντίστροφη ζεύξη (π.χ. όπως στο web browsing όπου η κίνηση στην ευθεία ζεύξη είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστροφη).
- Μεγάλη φασματική απόδοση.
- Συνύπαρξη FDD και TDD συστημάτων.

Οι ραδιοεπαφές που έχουν αναπτυχθεί για τα συστήματα 3^{ης} γενιάς, που από την ITU καλούνται IMT-2000, είναι το WCDMA ή UTRA και το cdma2000 multicarrier-CDMA. Υπάρχει και τρίτη προδιαγραφή που καλείται TD-CDMA και η οποία αναπτύσσεται κυρίως στην Κίνα. Το μεν WCDMA σχεδιάστηκε ώστε να εκμεταλλευτεί τη δομή του δικτύου κορμού του GSM, το δε cdma2000, ώστε να παρέχει συμβατότητα με το δίκτυο IS-95. Οι συχνότητες που αποδόθηκαν από το WARC'92 για τα 3^{ης} γενιάς συστήματα είναι διαφορετικές για κάθε περιοχή. Ο λόγος είναι οι ζώνες συχνοτήτων που είχαν καταλάβει τα συστήματα 2^{ης} γενιάς σε κάθε γεωγραφική περιοχή. Οι συχνότητες που αποδόθηκαν στα 3^{ης} γενιάς δίκτυα στην Ευρώπη είναι 2 X 60MHz (1920-1980 MHz uplink, 2110-2170 MHz downlink) για WCDMA FDD συστήματα, 25MHz (1900-1920 MHz & 2020-2025 MHz) για TDD συστήματα με υποχρέωση έκδοσης άδειας, και 10MHz (2010-2020 MHz) για TDD συστήματα χωρίς αδειοδότηση (**Self Provided Applications - SPA**).

Για το WCDMA υπάρχουν δύο εκδοχές, η FDD και η TDD. Το εύρος διαύλου είναι 5MHz με ακολουθία διασποράς σε ρυθμό 3,84Mcps. Κάθε φέρον διαιρείται σε χρονοπλαίσια των 10msec και κάθε χρονοπλαίσιο διαθέτει 15 χρονοσχισμές. Παρόμοια με την WCDMA-TDD είναι και η TD-SCDMA, με τη διαφορά ότι το εύρος του διαύλου είναι 1,6MHz, και η ακολουθία διασποράς έχει ρυθμό 1,28Mcps. Για το cdma2000 υπάρχουν διάφορα στάδια υλοποίησης και αρκετές διαφορετικές τεχνικές. Αρχικά υλοποιήθηκε η τεχνολογία cdma2000-1xRTT η οποία έχει θεωρηθεί από πολλούς ως μια 2,5G ή 2,75G λύση. Υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μέχρι 144Kbps, ενώ το εύρος διαύλου είναι ίδιο με του IS-95, δηλαδή 1,25MHz. Στα τέλη του πρώτου εξαμήνου του 2007 υπήρχαν παγκοσμίως 290 εκατομμύρια συνδρομητές. Στη συνέχεια προέκυψε μια νέα προδιαγραφή, η **Cdma2000-1xEV-DO (1xEvolution Data Only)**, η οποία λειτουργεί ως επικάλυψη του IS-95 και υποστηρίζει υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, ως και 3,1Mbps για την ευθεία ζεύξη και μέχρι 1,2Mbps για την αντίστροφη ζεύξη, σε ξεχωριστό αποκλειστικό δίαυλο. Στηρίζεται στην τεχνολογία **High Data Rate (HDR)** που είχε αναπτύξει η Qualcomm. Στα τέλη του πρώτου εξαμήνου του 2007 υπήρχαν παγκοσμίως 65 εκατομμύρια συνδρομητές. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε η τεχνολογία **cdma2000-1xEV-DV (1xEvolution Data and Voice)**, η οποία και υποστηρίζει ταυτόχρονα στο ίδιο φέρον υπηρεσίες φωνής και δεδομένων, με ρυθμούς μέχρι 3,1Mbps για την ευθεία ζεύξη και μέχρι 1,8Mbps για την αντίστροφη. Τέλος, σε ανάπτυξη βρίσκεται η προδιαγραφή Multicarrier CDMA ή cdma2000-3x, σύμφωνα με την οποία, χρησιμοποιούνται πολλαπλά (3) φέροντα, των 1,25MHz το καθένα, για την μετάδοση δεδομένων και φωνής. Εναλλακτικά έχει προταθεί και η απευθείας διασπορά φάσματος με ακολουθία της οποίας ο ρυθμός είναι $3 \times 1,2288\text{Mcps} = 3,6864\text{Mcps}$, παραπλήσιος δηλαδή του ρυθμού στο WCDMA.

2.1.7 Εξέλιξη των 3G - High Speed Packet Access (HSPA)

Στις τελευταίες εκδόσεις της προδιαγραφής για τα δίκτυα τρίτης γενιάς γίνεται εισαγωγή μιας νέας τεχνολογίας που ονομάζεται **Πρόσβαση Πακέτων Υψηλής Ταχύτητας (High Speed Packet Access - HSPA)**. Με την HSPA, οι πάροχοι των δικτύων είναι πλέον σε θέση να παράσχουν εμπορικές υπηρεσίες μεταγωγής πακέτων πολύ υψηλής ταχύτητας, όπως πρόσβαση στο διαδίκτυο με πολύ υψηλή ταχύτητα, ανάκτηση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου με συνημμένα αρχεία, πρόσβαση σε ασύρματες υπηρεσίες ήχου και video, ανάκτηση εικόνων πολύ μεγάλης ανάλυσης, κλπ. Το HSPA περιλαμβάνει τόσο την τεχνολογία **High Speed Downlink Packet Access (HSDPA)** που εισήχθει με την έκδοση R5 του 3GPP το 2002 όσο και την **High Speed Uplink Packet Access (HSUPA)**, η οποία εισήχθει με την R6 το 2004 και η ανάπτυξή της στα δίκτυα έχει ήδη γίνει από τα τέλη του 2007.

Το HSDPA είναι μια τεχνολογία η οποία βασίζεται κυρίως σε βελτιώσεις του λογισμικού, οι οποίες επιτρέπουν το διπλασιασμό της χωρητικότητας της ραδιοεπαφής και δίνουν μια αύξηση 5 - 10 φορές στο ρυθμό μετάδοσης στην κάτω ζεύξη. Τυπικοί ρυθμοί μετάδοσης είναι τα 21,6Mbps, με μέγιστο εκείνο των 42,2Mbps. Ήδη υπάρχουν πάροχοι που υποστηρίζουν τα 21,6Mbps, ενώ με την έκδοση R7 του 3GPP στα τέλη του 2007 και την προτυποποίηση του HSPA+ (Evolved HSPA), οι ρυθμοί της κάτω-ζεύξης αναμένεται να φθάσουν σύντομα στα 84Mbps στους παρόχους δικτύων 3G.

Το HSUPA είναι μια τεχνολογία που προσφέρει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης στην άνω ζεύξη, μέχρι και 5,7Mbps, επιτρέποντας πλέον την εύκολη ανταλλαγή μεγάλου μεγέθους αρχείων μεταξύ δικτύου και χρηστών. Στην πράξη, δίνεται η δυνατότητα μεταφόρτωσης από το χρήστη προς το δίκτυο πολυμεσικού περιεχομένου που παράγεται ή φυλάσσεται από αυτόν. Με την προτυποποίηση του HSPA+ (εξέλιξη του HSPA) με το R7, οι ρυθμοί της άνω-ζεύξης αναμένεται να φθάσουν σύντομα στα 22Mbps.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η εξέλιξη που υπεισέλθε στο αρχικό πρότυπο του HSPA που υπήρξε το HSPDA του 2002 με την έκδοση R5 του 3GPP. Όπως αντικατοπτρίζεται και από τον πίνακα, κομβικό ρόλο για τη βελτίωση των χρησιμοποιούμενων ρυθμών μετάδοσης ανά πελάτη, ήταν η χρησιμοποίηση υψηλότερης τάξης διαμόρφωση QAM³, η χρησιμοποίηση τεχνικών MIMO⁴ και η πολυπλεξία των κυμάτων διαφορετικών κυψελών (πρότυπο Dual-Cell HSPDA και Dual-Cell HSUPA με το R9 του 2009) πάντα υπό μέθοδο πρόσβασης CDMA.

3GPP Release	Category	Max. number of HS-DSCH codes	Modulation ^[3]	MIMO, Dual-Cell	Code rate at max. data rate ^[4]	Max. data rate [Mbit/s] ^[5]
Release 5	1	5	16-QAM		.76	1.2
Release 5	2	5	16-QAM		.76	1.2
Release 5	3	5	16-QAM		.76	1.8
Release 5	4	5	16-QAM		.76	1.8
Release 5	5	5	16-QAM		.76	3.6
Release 5	6	5	16-QAM		.76	3.6
Release 5	7	10	16-QAM		.75	7.2
Release 5	8	10	16-QAM		.76	7.2
Release 5	9	15	16-QAM		.70	10.1
Release 5	10	15	16-QAM		.97	14.0
Release 5	11	5	QPSK		.76	0.9
Release 5	12	5	QPSK		.76	1.8
Release 7	13	15	64-QAM		.82	17.6
Release 7	14	15	64-QAM		.98	21.1
Release 7	15	15	16-QAM	MIMO	.81	23.4
Release 7	16	15	16-QAM	MIMO	.97	28.0
Release 7	19	15	64-QAM	MIMO	.82	35.3
Release 7	20	15	64-QAM	MIMO	.98	42.2
Release 8	21	15	16-QAM	Dual-Cell	.81	23.4
Release 8	22	15	16-QAM	Dual-Cell	.97	28.0
Release 8	23	15	64-QAM	Dual-Cell	.82	35.3
Release 8	24	15	64-QAM	Dual-Cell	.98	42.2
Release 9	25	15	16-QAM	Dual-Cell + MIMO	.81	46.7
Release 9	26	15	16-QAM	Dual-Cell + MIMO	.97	55.9
Release 9	27	15	64-QAM	Dual-Cell + MIMO	.82	70.6
Release 9	28	15	64-QAM	Dual-Cell + MIMO	.98	84.4

Σχήμα - Πίνακας 2.4: Η εξέλιξη του HSPA από τη γέννηση του με το R5 το 2002 έως την τελευταία αναβάθμισή του με το R9 το 2009

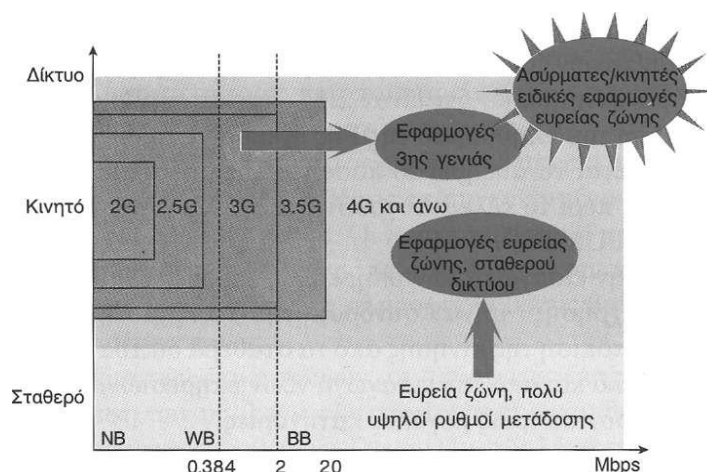
³**Quadrature Amplitude Modulation**, η διαμόρφωση με phase-shift keying (PSK) and Amplitude-shift keying (ASK) δυο ορθογώνιων ψηφιακών σημάτων.

⁴**Multiple-input and Multiple-output**, η τεχνική χρήσης πολλαπλών κεραιών εκπομπής-λήψης.

2.1.8 Τάσεις στην Εξέλιξη των συστημάτων κινητών επικοινωνιών – 4G

Με την ευρύτερη ερμηνεία, παρατηρούμε τη συγκλίνουσα τηλεπικοινωνιακή βιομηχανία να προχωρά προσθέτοντας το Διαδίκτυο και πολλαπλές υπηρεσίες στην ασύρματη επικοινωνία και στην κινητικότητα. Αναπτύσσονται νέες εφαρμογές, οι οποίες εκμεταλλεύονται το πλεονέκτημα του συνδυασμού υψηλών ρυθμών μετάδοσης και κινητικότητας, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.15.

Πέραν από την ανάπτυξη των συστημάτων 3G είναι τα συστήματα κινητών επικοινωνιών 4^{ης} γενιάς (4G). Τα συστήματα 4G βασίζονται κατά κύριο λόγο στα συστήματα 3G και στις εξελιγμένες εκδοχές τους.



Σχήμα 2.5: Η εξέλιξη των εφαρμογών προς τη 4^η γενιά

Όλα τα δίκτυα 4G είναι ετερογενή δίκτυα βασισμένα στο IP και επιτρέπουν στους χρήστες να χρησιμοποιούν οποιοδήποτε σύστημα, οποτεδήποτε και οπουδήποτε. Χρήστες που διαθέτουν ολοκληρωμένα τερματικά μπορεί να χρησιμοποιούν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που παρέχονται από πολλαπλά ασύρματα δίκτυα. Επίσης, τα δίκτυα 4G δεν παρέχουν μόνο τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες αλλά επίσης υπηρεσίες δεδομένων και πολυμέσων. Για την υποστήριξη των εφαρμογών πολυμέσων, παρέχονται υπηρεσίες υψηλών ρυθμών μετάδοσης και με καλή αξιοπιστία, αλλά ταυτόχρονα, επιδιώκεται να διατηρείται χαμηλό και το κόστος μετάδοσης. Επιπροσθέτως, τα συστήματα νέας γενιάς θα παρέχουν προσωποποιημένες υπηρεσίες. Αναμένεται ότι με την αύξηση της διείσδυσης των συστημάτων 4G, χρήστες από διάφορες διάσπαρτες γεωγραφικές περιοχές, με διαφορετικά επαγγέλματα και οικονομικές δυνατότητες θα χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες τους. Για την ικανοποίηση των ετερόκλητων αυτών χρηστών, οι πάροχοι υπηρεσιών θα πρέπει να σχεδιάσουν προσωπικές υπηρεσίες προσαρμοσμένες στους χρήστες.

Τέλος, τα συστήματα 4G θα παρέχουν επίσης υποδομή για ολοκληρωμένες υπηρεσίες. Οι χρήστες θα μπορούν να χρησιμοποιούν πολλαπλές υπηρεσίες από οποιονδήποτε πάροχο υπηρεσίας, ταυτόχρονα. Για παράδειγμα, έναν κινητό χρήστη 4G θα μπορεί να αναζητά πληροφορίες για τις ταινίες που παίζονται στους πλησιέστερους προς αυτόν κινηματογράφους. Το κινητό τερματικό του μπορεί να συνδεθεί σε διαφορετικά ασύρματα συστήματα, τα οποία μπορεί να περιλαμβάνουν σύστημα GPS (Global Positioning System) για τον εντοπισμό της θέσης του χρήστη, ασύρματο LAN για τη λήψη περιλήψεων από τις ταινίες των πλησιέστερων κινηματογράφων, και σύστημα CDMA για την πραγματοποίηση τηλεφωνικής κλήσης προς έναν από τους κινηματογράφους. Στο παράδειγμα αυτό, ο χρήστης χρησιμοποιεί στην πραγματικότητα πολλαπλές ασύρματες υπηρεσίες, οι οποίες διαφέρουν ως προς την παρεχόμενη QoS, τις πολιτικές ασφάλειας, τις ρυθμίσεις στο τερματικό, τις μεθόδους χρέωσης και τις εφαρμογές. Θα είναι σημαντική επανάσταση αν καταστεί δυνατό να προσφέρονται τέτοιες ολοκληρωμένες υπηρεσίες με τα συστήματα 4G. Για την αναβάθμιση των υφιστάμενων συστημάτων μας σε συστήματα 4G με τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω, πρέπει να αντιμετωπισθούν διάφορα θέματα, τα οποία αφορούν:

- Τα κινητά τερματικά
 - Χρήση τερματικών πολλαπλών τρόπων λειτουργίας (multimode).
 - Ανακάλυψη διατιθέμενων ασύρματων συστημάτων.
 - Επιλογή ασύρματου συστήματος.
- Το σύστημα
 - Κινητικότητα τερματικού.
 - Υποδομή δικτύου και υποστήριξη QoS.
 - Ασφάλεια και απόρρητο.
 - Ανοχή σε σφάλματα.
- Τις υπηρεσίες
 - Πολλαπλοί πάροχοι και σύστημα χρέωσης.
 - Προσωπική κινητικότητα.

Το Δεκέμβριο του 2010 η ITU ανακοίνωσε τις προδιαγραφές που θα πρέπει να πληρούνται από ένα πρότυπο επικοινωνίας ώστε να θεωρηθεί και να λάβει την επιγραφή της 4G τεχνολογίας. Το πλαίσιο αυτό ονομάστηκε, σε αντιστοιχία με το IMT-2000, ως **IMT-Advanced** και αποφασίστηκε να περικλείει τις εξής προϋποθέσεις:

- Βασισμένα σε αρχιτεκτονική σχεδίασης all-IP πακέτων.
- Μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης περίπου 100Mbit/s για ευρεία δίκτυα επικοινωνίας (όπως τα κυψελωτά) και περίπου 1Gbit/s για τα τοπικά δίκτυα επικοινωνίας (όπως έχουν οριστεί από την ITU).
- Δυναμική χρησιμοποίηση και μοίρασμα των πόρων του δικτύου για την υποστήριξη περισσότερων ταυτόχρονων χρηστών ανά κυψέλη.
- Κλιμακωτό εύρος ζώνης καναλιού 5 – 20 MHz, επιλεκτικά έως 40MHz.
- Μέγιστη αποδοτικότητα φασματικής γραμμής (Link spectral efficiency) στα 15bit/s/Hz στην κάτω-ζεύξη και 6,75bit/s/Hz στην άνω-ζεύξη. Κάτι που αντιστοιχεί δηλαδή, στο ότι 1Gbit/s στην κάτω-ζεύξη θα πρέπει να είναι δυνατό με χρήση λιγότερων από 67MHz εύρους ζώνης.
- Αποδοτικότητα φάσματος του συστήματος (System spectral efficiency) στα 3bit/s/Hz/cell στην κάτω-ζεύξη και 2,25bit/s/Hz/cell στην χρήση εσωτερικά των κτιρίων.
- Απαλά handovers μεταξύ across ετερογενών δικτύων.
- Δυνατότητα να προσφέρουν υψηλής ποιότητας υπηρεσίες για υποστήριξη πολυμέσων επόμενης γενιάς.

Βάσει των ανωτέρω, τα μόνα τηλεπικοινωνιακά πρότυπα που πληρούν όλες τις προδιαγραφές λήψης της επιγραφής 4G είναι τα πρόσφατα εκδοθέντα πρωτόκολλα **LTE Advanced** (Q1 2011) και το **WirelessMAN-Advanced** (Ιούνιος 2011). Ωστόσο, πολλά ακόμα συγγενή πρωτόκολλα και πιο συγκεκριμένα οι αμέσως προωότεροι πρόγονοί τους (WiMax, LTE, και HSPA+) παρουσιάζονται σήμερα στην αγορά ως 4G τεχνολογίες. Η σύγχυση αυτή προκλήθηκε για καθαρά εμπορικούς λόγους κατά την προώθηση των αναφερόμενων προτύπων, καθώς συνολικά δεν καλύπτουν τις απαιτούμενες προδιαγραφές για να θεωρούνται 4G τεχνολογίες.

2.1.9 Δορυφορικά Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών

Οι κινητές δορυφορικές υπηρεσίες έγιναν εμπορικά διαθέσιμες από τις αρχές του 1976 με την εισαγωγή του συστήματος Standard-A, το οποίο αργότερα εξελίχθηκε στο Inmarsat-A (Φεβρουάριος 1982) σύστημα του **International MARitime SATellite Organisation (INMARSAT)**. Αρχικά προσφέρονταν μόνο υπηρεσίες επικοινωνίας φωνής στην κοινότητα του εμπορικού ναυτικού, ενώ αργότερα προστέθηκαν υπηρεσίες δεδομένων και επίγεια φορητά τερματικά. Η ουσιαστική ισχύς των κινητών δορυφορικών επικοινωνιών πηγάζει από τη δυνατότητα που έχουν να προσφέρουν υπηρεσίες σε αχανείς εκτάσεις, όπου τέτοιες υπηρεσίες δεν θα μπορούσαν να παρασχεθούν αποδοτικά από επίγεια συστήματα, είτε λόγω της γεωγραφικής περιοχής (όπως σε περιοχές ωκεανών), είτε λόγω της έλλειψης ικανοποιητικής υποδομής (σε αραιοκατοικημένες ή υπό ανάπτυξη περιοχές). Τα δορυφορικά συστήματα κινητών επικοινωνιών είναι ικανά να παρέχουν υπηρεσίες σε ένα μεγάλο αριθμό τερματικών, διαφορετικού τύπου, σε ξηρά, θάλασσα και αέρα. Παραδείγματα πλατφόρμας για τερματικά είναι τα επίγεια κινητά, τα αεροσκάφη, τα πλοία και τα διάφορα μέρη συλλογής δεδομένων και ελέγχου.

Στις αρχές της δεκαετίας του '90 ξεκίνησε η σχεδίαση διαφόρων συστημάτων δορυφορικών κινητών επικοινωνιών, για την παροχή υπηρεσιών φωνής και δεδομένων παγκοσμίως, σε τερματικά πολλαπλού τρόπου λειτουργίας. Τα συστήματα αυτά συνήθως χωρίζονται σε συστήματα παγκόσμιας κάλυψης ή τοπικά συστήματα, δηλαδή συστήματα που αναφέρονται σε πιο μικρές γεωγραφικές περιοχές, όπως π.χ. η Βόρεια Αμερική, η Ανατολική Ασία, ή η Ευρώπη. Επίσης μπορούν να διαχωριστούν ανάλογα με τον τύπο της τροχιάς των δορυφόρων, δηλαδή GEO, MEO, LEO συστήματα. Παραδείγματα συστημάτων είναι εκείνα του INMARSAT, ή τα Iridium, Globalstar, ως συστήματα παγκόσμιας κάλυψης, ή τα AMSC, MSAT, AceS, Thuraya, OmniTracs, EutelTracs, ως τοπικά συστήματα δορυφορικών κινητών επικοινωνιών. Τα τελευταία χρόνια, λόγω και της μεγάλης ανάπτυξης των προδιαγραφών για τα επίγεια συστήματα 3^{ης} γενιάς, έχει προταθεί ανάπτυξη δορυφορικών κινητών επικοινωνιών 3^{ης} γενιάς είτε από γεωστατικούς δορυφόρους (S-UMTS), είτε από στρατοσφαιρικές πλατφόρμες (High Altitude Platforms - HAPS).

2.2 UMTS / WCDMA

2.2.1 Προτυποποίηση του WCDMA

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) ξεκίνησε το 1985 ένα πολύ φιλόδοξο έργο, τη δημιουργία μιας ομάδας συστημάτων κινητών επικοινωνιών 3^{ης} γενιάς, που θα παρέχουν ασύρματη πρόσβαση στην παγκόσμια τηλεπικοινωνιακή υποδομή. Αυτό το πλαίσιο των προδιαγραφών είναι γνωστό με το όνομα **IMT-2000 (International Mobile Telecommunications-2000)**, αν και αρχικά του είχε δοθεί το όνομα **Future Public Land Mobile Telephone System (PLMTS)**. Το 1990 στην Ευρώπη το ETSI ξεκίνησε μια αντίστοιχη προσπάθεια, ονομάζοντας τα δίκτυα τρίτης γενιάς ως **Universal Mobile Telecommunications Systems (UMTS)**. Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά που τέθηκαν ως στόχοι κατά την ανάπτυξη των προτύπων, για τα συστήματα τρίτης γενιάς ήταν τα εξής:

- Να παρέχουν ενοποιημένες υπηρεσίες σε ένα χρήστη, με ένα τερματικό, και έναν αριθμό συνδρομητή. Το τερματικό πρέπει να είναι μικρό σε διαστάσεις, σχεδιασμένο για παγκόσμια χρήση, με αυξημένες δυνατότητες υποστήριξης υπηρεσιών και μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.
- Να υποστηρίζουν μια εξαιρετικά πολύπλοκη αλλά ισχυρή και καλοσχεδιασμένη ραδιοεπαφή που θα παρέχει ευελιξία στον τρόπο μεταφοράς και πολυπλεξίας μιας μεγάλης ποικιλίας υπηρεσιών. Οι υπηρεσίες αυτές μπορεί να είναι είτε φωνής είτε δεδομένων, πολλές φορές πολυμεσικές, με σταθερό ή μεταβλητό ρυθμό μετάδοσης. Οι ρυθμοί που υποστηρίζονται κυμαίνονται από λίγα Kbps ως 2.048Kbps, ενώ απαιτείται η υποστήριξη μεγάλης κινητικότητας για ρυθμούς μέχρι και 384Kbps και πάντως οπωσδήποτε για 144Kbps και μικρότερης κινητικότητας για ρυθμούς μέχρι 2.048Kbps. Σε μια σύνθεση υπηρεσιών πρέπει να υποστηρίζονται υπηρεσίες με διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας. Επιπλέον, η ραδιοεπαφή πρέπει να υποστηρίζει αποδοτικά τη μετάδοση σε πακέτα και ιδιαίτερα το δημοφιλές πρωτόκολλο IP.
- Οι υπηρεσίες πρέπει να υποστηρίζονται σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη γεωγραφική περιοχή, παρέχοντας παγκόσμια περιαγωγή. Τόσο η γεωγραφική κάλυψη των κυψελών, όσο και η σχεδίαση των παρεχόμενων υπηρεσιών θα πρέπει να γίνεται για όλες τις υπηρεσίες, οι οποίες έχουν πολύ διαφορετικά μεταξύ τους χαρακτηριστικά. Συνεπώς, η ομοιόμορφη σχεδίαση στην περιοχή κάλυψης και στην υποστηριζόμενη χωρητικότητα είναι πλέον αδύνατη, ιδιαίτερα για τις υπηρεσίες υψηλού ρυθμού μετάδοσης και οι μηχανικοί των εταιρειών σχεδιάζουν τα δίκτυά τους με διαφορετικές τιμές-στόχους σε κάθε

περίπτωση. Επιπλέον, πρέπει να υποστηρίζεται ασύμμετρη τηλεπικοινωνιακή κίνηση στις δύο κατευθύνσεις μετάδοσης (άνω και κάτω ζεύξη).

- Να παρέχουν σε πεζούς χρήστες τόσο σε οικιακό περιβάλλον, όσο και σε περιβάλλον γραφείου, τις υπηρεσίες που παρέχουν τα επίγεια σταθερά δίκτυα επικοινωνιών.
- Προκειμένου να επιτευχθεί μεγάλη φασματική απόδοση, πρέπει να εξασφαλίζεται πυκνή επαναχρησιμοποίηση των πόρων του συστήματος και συνεπώς απαιτούνται πολύπλοκες τεχνικές σε επίπεδο ραδιοζεύξης, όπως μεγάλες δυνατότητες προσαρμοστικότητας των τεχνικών κωδικοποίησης και του ρυθμού μετάδοσης, τεχνικές διαφορισμού με χρήση πολλαπλών κεραιών στην κάτω ζεύξη, καθώς και τεχνικές καταπίεσης των παρεμβολών.
- Λόγω της μεγάλης απαίτησης για υπηρεσίες πακέτων δεδομένων με υψηλή παρεχόμενη ποιότητα, είναι αναγκαία η εκτεταμένη χρήση της λεγόμενη "best effort" τεχνικής μετάδοσης των πακέτων, η οποία χαρακτηρίζεται από ελάχιστες απαιτήσεις ως προς το ρυθμό μετάδοσης και την καθυστέρηση. Λογικό επόμενο είναι η αυξημένη επιβάρυνση του ραδιοφάσματος και βέβαια το αυξημένο επίπεδο παρεμβολών. Όλοι αυτοί οι λόγοι συνηγορούν στην εξαιρετικά πολύπλοκη διαδικασία σχεδίασης του ραδιοδικτύου.
- Να υποστηρίζουν τη συνύπαρξη με τα συστήματα 2^{ης} γενιάς και μάλιστα με τις όσο το δυνατό λιγότερες απαιτούμενες αλλαγές στα υπάρχοντα δίκτυα κορμού και στην όλη υποδομή. Στην ίδια κατεύθυνση είναι και η απαίτηση για υποστήριξη μεταπομπής μεταξύ των συστημάτων 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς. Με τις απαιτήσεις αυτές μπορούμε να εξασφαλίσουμε το μικρό κόστος ανάπτυξη δικτύου για τους παρόχους, που κατά συνέπεια σημαίνει μικρό κόστος και για τους χρήστες.
- Τέλος, είναι απαραίτητη η υποστήριξη και η συνύπαρξη συστημάτων και των δύο τεχνικών αμφιδρόμησης FDD και TDD. Η ανάγκη αυτή προέρχεται, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, από το γεγονός ότι τα δύο συστήματα έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και παρέχουν υπηρεσίες με διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης και ποιότητα υπηρεσίας.

Κάθε οργανισμός από αυτούς που συμμετέχουν στην προσπάθεια προτυποποίησης της ITU, συνεισέφερε προτάσεις για αξιολόγηση και υιοθέτηση. Από τις προτάσεις δύο είναι οι βασικές: το **WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access)** που είναι η ραδιοεπαφή του UMTS και το **cdma2000** ή **multicarrier-CDMA**. Οι προτάσεις των οργανισμών δεν είναι ίδιες, παρόλο που στηρίζονται στην τεχνολογία διασποράς φάσματος και έχουν στόχο ευρυζωνικά συστήματα. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκαν δύο διεθνείς εταιρικές συμμαχίες, το 3GPP και το 3GPP2, που στόχος τους είναι η εναρμόνιση των διαφορετικών

προτάσεων και η δημιουργία λεπτομερειακών προδιαγραφών για το WCDMA και το cdma2000 αντίστοιχα.

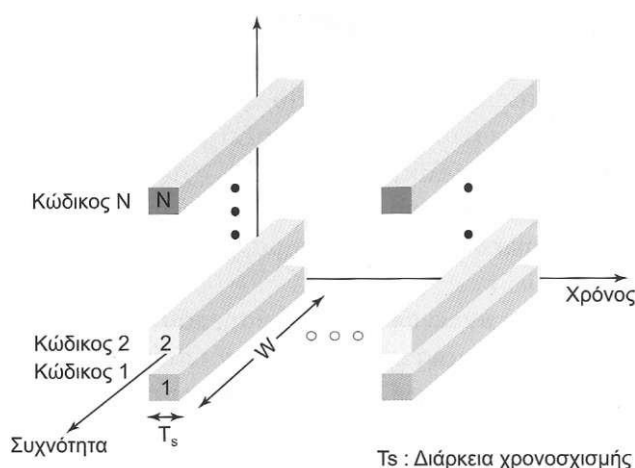
Το **3GPP**, ως οργανισμός, αναπτύσσει προδιαγραφές για τα δίκτυα τρίτης γενιάς βασισμένες στη ραδιοεπαφή **WCDMA** ή **UMTS Terrestrial Radio Access (UTRA)** και στην εξελιγμένη μορφή του δικτύου κορμού του GSM που υποστηρίζει τεχνολογίες μεταγωγής πακέτων. Να σημειωθεί ότι το 3GPP είναι πλέον ο οργανισμός που εξελίσσει και τις προδιαγραφές του GSM, αναλαμβάνοντας το ρόλο του ευρωπαϊκού οργανισμού προτυποποίησης ETSI.

Το **3GPP2**, από την άλλη, είναι ο δεύτερος οργανισμός που αναπτύσσει προδιαγραφές για τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς βασισμένες στη ραδιοεπαφή cdma2000 και στο δίκτυο κορμού του IS-95, δηλαδή του συστήματος 2^{ης} γενιάς που αναπτύχθηκε και λειτουργεί με μεγάλη επιτυχία, κυρίως στις *ΗΠΑ, την Κορέα* αλλά και την *Ιαπωνία*. Το IS-95 βασίζεται στην τεχνική CDMA και χρησιμοποιεί **διασπορά φάσματος απευθείας ακολουθίας (Direct Sequence Spread Spectrum - DSSS)**. Η διασπορά στο IS-95 επιτυγχάνεται με ακολουθία ρυθμού 1,2288Mcps. Το εύρος ζώνης συνεπώς του διασπαρμένου σήματος είναι μικρό, 1,25MHz, γεγονός που δίνει το όνομα «σύστημα CDMA στενής ζώνης Narrowband CDMA» στο IS-95. Τα δίκτυα τρίτης γενιάς όμως έπρεπε να υποστηρίζουν πολύ υψηλότερους ρυθμούς, οι οποίοι επιτυγχάνονται με τη χρήση μεγαλύτερου φάσματος, δηλαδή ακολουθίας διασποράς με μεγαλύτερο ρυθμό. Προέκυψε έτσι ο όρος «**σύστημα CDMA ευρείας ζώνης (Wideband CDMA - WCDMA)**», ο οποίος επικράτησε και στη ραδιοεπαφή του 3GPP. Εξαιτίας λοιπόν της προϋπάρχουσας κατάστασης, το 3GPP2 έπρεπε να λάβει υπόψη σοβαρούς περιορισμούς στην ανάπτυξη της προδιαγραφής της ραδιοεπαφής, διατηρώντας ταυτόχρονα όσο το δυνατόν περισσότερα κοινά σημεία με τις προδιαγραφές του 3GPP. Η λύση που υιοθετήθηκε ήταν ένας μεταβλητός ρυθμός της ακολουθίας διασποράς. Συγκεκριμένα, αποφασίστηκε οι ακολουθίες διασποράς να είναι ρυθμού πολλαπλάσιου του βασικού ρυθμού του IS-95, δηλαδή του 1,2288Mcps. Έτσι, στην πλήρη ανάπτυξη των δικτύων, θα μπορεί να υποστηρίζεται μέχρι και δωδεκαπλάσιος ρυθμός ($12 \times 1,2288 = 14,7456\text{Mcps}$), ενώ στην αρχική φάση θα υποστηρίζεται μέχρι και τριπλάσιος ρυθμός ($3 \times 1,2288 = 3,6864\text{Mcps}$), που είναι παραπλήσιος του ρυθμού του UTRA (3,84Mcps). Το cdma2000 παρουσιάζει ασυμμετρία ζεύξης, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές για την ευθεία και την αντίστροφη ζεύξη. Στην ευθεία ζεύξη έχει προβλεφθεί ότι ο υψηλός ρυθμός μετάδοσης θα επιτυγχάνεται είτε με απευθείας διασπορά είτε με ομαδοποίηση πολλαπλών φερόντων εύρους 1,25MHz. Δηλαδή, στο **cdma-3x**, όπου το εύρος είναι περίπου 5MHz, είτε θα υπάρχει απευθείας διασπορά με ακολουθία 3,6864Mcps είτε θα ομαδοποιούνται 3 φέροντα που στο καθένα έχουμε απευθείας διασπορά με ακολουθία 1,2288Mcps. Στην πρώτη περίπτωση προκύπτει διασπαρμένο σήμα με εύρος 3,75MHz, ενώ στη δεύτερη έχουμε την εναπόθεση σε γειτονικές συχνότητες τριών σημάτων εύρους 1,25MHz το καθένα και άρα, συνολικά

3,75MHz. Και στις δύο περιπτώσεις θεωρούμε συχνотικά διαστήματα φύλαξης αριστερά και δεξιά από το διασπαρμένο σήμα, με εύρος 625KHz ($3,75 + 2 \times 0,625 = 5\text{MHz}$). Τέλος, ενώ στο WCDMA οι σταθμοί βάσης δεν είναι συγχρονισμένοι, στο cdma2000 υπάρχει συγχρονισμός με ακρίβεια της τάξης μερικών μsec . Ο συγχρονισμός των σταθμών βάσης επηρεάζει άμεσα τις ακολουθίες διασποράς που χρησιμοποιούνται για να διαχωρίζονται οι εκπομπές στο σύστημα. Έγιναν πολλές προσπάθειες για την εναρμόνιση των διαφόρων προσεγγίσεων της CDMA ευρείας ζώνης προς μία ενιαία παγκόσμια ασύρματη διεπαφή, ωστόσο, λόγω της ανάπτυξης των τρεχόντων σχημάτων και των ισχυρών εμπορικών ενδιαφερόντων των υποστηρικτών τους, φαίνεται ότι θα υπάρχουν προς το παρόν, δύο τουλάχιστον πρότυπα CDMA ευρείας ζώνης για τα συστήματα τρίτης γενιάς.

2.2.2 Συστήματα Πολλαπλής Πρόσβασης με Διαίρεση Κώδικα (CDMA)

Στα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα (CDMA), όλοι οι χρήστες χρησιμοποιούν το ίδιο φέρον και μπορεί να μεταδίδουν ταυτόχρονα, ενώ ο κάθε χρήστης χρησιμοποιεί όλο το διατιθέμενο φάσμα. Προς τούτο, το στενής ζώνης σήμα πληροφορίας κάθε χρήστη πολλαπλασιάζεται με ένα σήμα πολύ μεγάλου εύρους ζώνης, που ονομάζεται σήμα εξάπλωσης (spreading signal). Το σήμα εξάπλωσης είναι μια κωδική ακολουθία ψευδοθορύβου, η οποία έχει ρυθμό chip που είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από τον ρυθμό bit του σήματος πληροφορίας. Το σήμα πληροφορίας κάθε χρήστη διαμορφώνεται από μια μοναδική κωδική ακολουθία, η οποία καλείται ακολουθία υπογραφής, και έχει ανατεθεί στον υπόψη χρήστη. Έτσι, η διάκριση των σημάτων των χρηστών γίνεται με βάση την ακολουθία υπογραφής.



Σχήμα 2.6: Τρόπος λειτουργίας συστήματος CDMA

Στην πλευρά του δέκτη, χρησιμοποιείται μια κωδική ακολουθία προσαρμογής για την επανασυμπίεση του εύρους ζώνης και τη λήψη των αρχικών δεδομένων. Με αυτήν τη διαδικασία εξάπλωσης και επανασυμπίεσης, όλες οι άλλες ταυτόχρονες μεταδόσεις στον δίαυλο θα δρουν ως πρόσθετη παρεμβολή στο επιθυμητό σήμα και μπορούν να απομακρυνθούν εντελώς, εάν οι κώδικες είναι ορθογώνιοι. Εάν υπάρχουν αρκετοί δέκτες στον σταθμό βάσης, είναι δυνατό να έχουμε πολλαπλές επιτυχείς λήψεις. Η CDMA έχει ήδη υιοθετηθεί για επικοινωνία φωνής, αλλά μπορεί ταυτόχρονα να υποστηρίξει και μετάδοση δεδομένων. Δεν χρειάζεται συντονισμός μεταξύ των διαφόρων χρηστών.

Αν είναι γνωστός ο απαιτούμενος λόγος E_b/I_t για καθορισμένο ρυθμό σφαλμάτων, ο αριθμός των χρηστών N_u που μπορεί να εξυπηρετηθούν από έναν σταθμό βάσης με συγκεκριμένο κέρδος εξάπλωσης G_s δίνεται από τη σχέση:

$$N_u = 1 + \frac{G_s}{E_b/I_t}$$

Με βάση τα χαρακτηριστικά του σήματος απλωμένου φάσματος, τα συστήματα CDMA μπορεί να διακριθούν σε: CDMA Ευθείας Ακολουθίας (Direct Sequence CDMA, **DS/CDMA**), CDMA Μεταπήδησης Συχνότητας (Frequency Hopping CDMA, **FH/CDMA**), και CDMA Μεταπήδησης Χρόνου (Time Hopping CDMA, **TH/CDMA**).

CDMA ευθείας ακολουθίας (DS/CDMA)

Στα συστήματα DS/CDMA, το σήμα πληροφορίας διαμορφώνεται απ' ευθείας από το σήμα κωδικοποίησης. Το σήμα πληροφορίας μπορεί να είναι είτε αναλογικό είτε ψηφιακό. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ψηφιακό. Η ακολουθία δεδομένων του σήματος πληροφορίας πολλαπλασιάζεται απ' ευθείας με το σήμα κωδικοποίησης και το σήμα που προκύπτει διαμορφώνει το φέρον ευρείας ζώνης. Από τον απ' ευθείας πολλαπλασιασμό λαμβάνει και το όνομά της η DS/CDMA.

Μετά τη μετάδοση του σήματος, ο δέκτης χρησιμοποιεί ομόδυνη αποδιαμόρφωση για να επανασυμπιέσει το σήμα απλωμένου φάσματος, παράγοντας τοπικά την ακολουθία κώδικα. Για να μπορεί ο δέκτης να πραγματοποιήσει τη λειτουργία της επανασυμπίεσης, θα πρέπει όχι μόνο να γνωρίζει την ακολουθία κώδικα που χρησιμοποιήθηκε, αλλά και οι ακολουθίες κώδικα του λαμβανόμενου σήματος και η τοπικά παραγόμενη να είναι συγχρονισμένες. Ο συγχρονισμός αυτός πρέπει να πραγματοποιηθεί κατά την έναρξη της λήψης και να διατηρηθεί μέχρι να ληφθεί όλο το σήμα. Μετά την συμπίεση προκύπτει η ακολουθία δεδομένων του σήματος πληροφορίας και μετά την αποδιαμόρφωση ανακτάται το αρχικό σήμα πληροφορίας.

Η DS/CDMA έχει τα εξής βασικά πλεονεκτήματα:

- Η παραγωγή των κωδικοποιημένων σημάτων είναι εύκολη και μπορεί να πραγματοποιηθεί με έναν πολλαπλασιασμό. Επειδή χρησιμοποιείται μόνο μία συχνότητα, ο συνθέτης συχνοτήτων είναι μια απλή γεννήτρια φέροντος.
- Είναι δυνατή η χρήση ομόδυνης αποδιαμόρφωσης και δεν απαιτείται συγχρονισμός μεταξύ των χρηστών.

Και τα εξής μειονεκτήματα:

- Υπάρχει δυσκολία για την ανάκτηση και διατήρηση του συγχρονισμού μεταξύ της τοπικά παραγόμενης ακολουθίας κώδικα και του λαμβανόμενου σήματος.
- Το σφάλμα συγχρονισμού πρέπει να διατηρηθεί σε πολύ μικρό κλάσμα του χρόνου διάρκειας ενός chip. Το γεγονός τούτο, σε συνδυασμό με την έλλειψη μεγάλων ζωνών παραπλήσιων συχνοτήτων, περιορίζει πρακτικά το εύρος ζώνης σε 10 - 20 MHz.
- Υπάρχει, τέλος ανάγκη ελέγχου ισχύος για τον περιορισμό του φαινομένου near - far, ο οποίος έλεγχος αποδεικνύεται ότι είναι αρκετά δύσκολος.

CDMA με μεταπήδηση συχνότητας

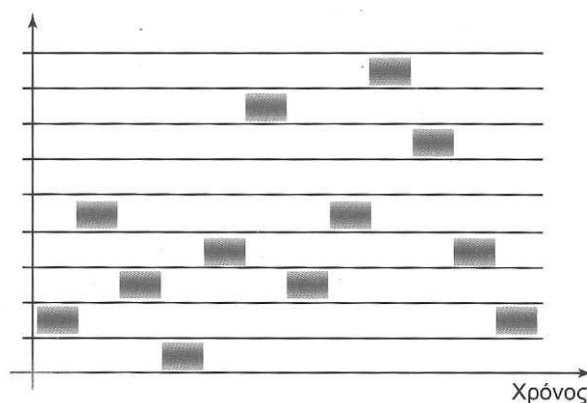
Στα συστήματα CDMA με μεταπήδηση συχνότητας, το φέρον του διαμορφωμένου σήματος πληροφορίας δεν είναι σταθερό αλλά αλλάζει περιοδικά. Κατά τη διάρκεια χρονικού διαστήματος T η συχνότητα φέροντος παραμένει σταθερή, αλλά μετά την παρέλευση χρόνου T το φέρον μεταπηδά σε άλλη (ή πιθανόν στην ίδια) συχνότητα. Το σχήμα μεταπήδησης καθορίζεται από την ακολουθία κώδικα. Το σύνολο των διαθεσίμων φερόντων ονομάζεται *σύνολο μεταπήδησης (hop - set)*.

Το εύρος ζώνης που καταλαμβάνει ένα σύστημα FH/CDMA διαφέρει αρκετά από εκείνο ενός συστήματος DS/CDMA. Το σύστημα DS/CDMA καταλαμβάνει όλο το εύρος ζώνης συχνοτήτων όταν μεταδίδει, ενώ το FH/CDMA χρησιμοποιεί μόνο ένα μικρό μέρος του εύρους ζώνης, αλλά η θέση του μέρους αυτού στο συνολικό εύρος ζώνης μεταβάλλεται χρονικά (σχήμα 2.7).

Πέρα από τις γενικές ιδιότητες που αναφέρθηκαν για τα σήματα απλωμένου φάσματος, η FH/CDMA έχει ακόμα μερικά πλεονεκτήματα. Ο συγχρονισμός είναι πολύ ευκολότερος από ότι στην DS/CDMA. Το σφάλμα συγχρονισμού πρέπει να διατηρηθεί σε κλάσμα του χρόνου μεταπήδησης. Επειδή το άπλωμα του φάσματος δεν λαμβάνεται με τη χρήση υψηλής συχνότητας μεταπήδησης αλλά με τη χρήση μεγάλου συνόλου συχνοτήτων μεταπήδησης, ο χρόνος μεταπήδησης είναι πολύ μεγαλύτερος από την διάρκεια ενός chip. Συνεπώς, η FH/CDMA επιτρέπει

μεγαλύτερο σφάλμα συγχρονισμού από ότι η DS/CDMA. Οι διάφορες ζώνες συχνοτήτων που καταλαμβάνει η FH/CDMA δεν είναι ανάγκη να είναι γειτονικές στο φάσμα, δεδομένου ότι μπορεί εύκολα ο συνθέτης συχνοτήτων να μεταπηδά σε συγκεκριμένα τμήματα του φάσματος. Το γεγονός τούτο, σε συνδυασμό με τον ευκολότερο συγχρονισμό, επιτρέπει χρησιμοποίηση πολύ μεγαλύτερων περιοχών συχνοτήτων.

Συχνότητα



Σχήμα 2.7: Μεταπήδηση Συχνότητας

Επίσης, η πιθανότητα να μεταδίδουν πολλοί χρήστες ταυτόχρονα στην ίδια περιοχή συχνοτήτων είναι μικρή. Ένας χρήστης που μεταδίδει ευρισκόμενος μακριά από τον σταθμό βάσης θα λαμβάνεται ακόμη και αν οι χρήστες που βρίσκονται κοντά στον σταθμό βάσης μεταδίδουν, επειδή οι κοντινοί χρήστες θα μεταδίδουν πιθανόν σε διαφορετικές συχνότητες. Συνεπώς, η επίδοση της FH/CDMA ως προς το φαινόμενο near - far είναι πολύ καλύτερη από εκείνη της DS/CDMA. Τέλος, ένα σύστημα FH/CDMA, λόγω του μεγαλύτερου εύρους ζώνης που μπορεί να χρησιμοποιεί, μπορεί να παρέχει μεγαλύτερη απόρριψη παρεμβολής στενής ζώνης.

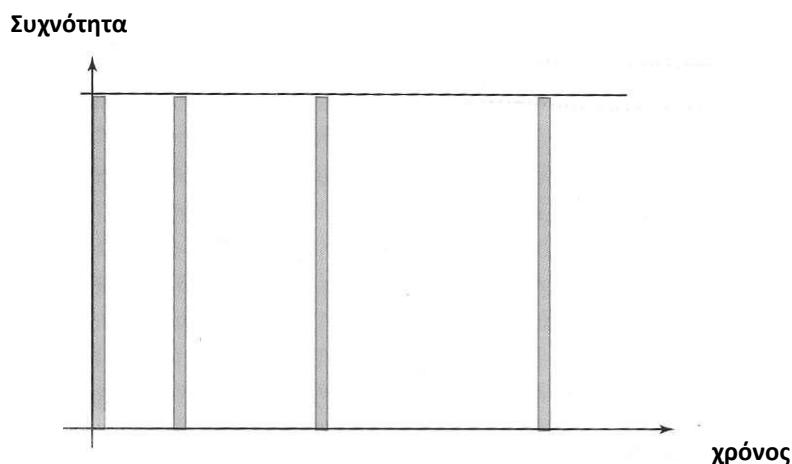
Ως κύριο μειονέκτημα της FH/CDMA μπορεί να αναφερθεί ο πιο πολύπλοκος συνθέτης συχνοτήτων που απαιτείται. Επίσης, δεδομένου ότι μια απότομη μεταβολή του σήματος κατά την μεταπήδηση σε άλλη ζώνη συχνοτήτων οδηγεί σε αύξηση του καταλαμβανόμενου εύρους ζώνης, πρέπει να διακόπτεται το σήμα τη στιγμή της μεταπήδησης. Τέλος, είναι δύσκολη η ομόδυνη αποδιαμόρφωση, λόγω των προβλημάτων διατήρησης των σχέσεων φάσης κατά τη μεταπήδηση.

Στο σύστημα FH/CDMA ανατίθεται σε κάθε χρήστη ένα μοναδικό σχέδιο FH βάσει του οποίου πραγματοποιεί μεταπηδήσεις συχνότητας. Η FH/CDMA μοιάζει με την FDMA μέσα σε κάθε μεταπήδηση. Η FH/CDMA μπορεί περαιτέρω να διακριθεί σε: *γρήγορη FH/CDMA (Fast FH/CDMA, FFH/CDMA)*, και *αργή FH/CDMA (Slow FH/CDMA, SFH/CDMA)* σύμφωνα με τη συχνότητα μεταπήδησης (πολλές

μεταπηδήσεις ανά bit ή πολλά bit ανά μεταπήδηση). Φυσικά, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα μεταπήδησης, τόσο καλύτερη είναι η επίδοση και πιο ακριβό το σύστημα. Με καλά σχεδιασμένο μηχανισμό διόρθωσης σφαλμάτων, τα ταυτόχρονα μεταδιδόμενα πακέτα που συγκρούονται μπορεί να ληφθούν επιτυχώς.

CDMA με μεταπήδηση χρόνου

Στα συστήματα TH/CDMA, το σήμα δεδομένων μεταδίδεται κατά ριπές σε χρονικά διαστήματα που καθορίζονται από την ακολουθία κώδικα που εκχωρείται σε κάθε χρήστη. Ο χρόνος διαιρείται σε πλαίσια και κάθε πλαίσιο διαιρείται σε M χρονοσχισμές. Κατά τη διάρκεια ενός πλαισίου, ο χρήστης μεταδίδει σε μία από τις M χρονοσχισμές. Το ποια από τις M χρονοσχισμές κάθε πλαισίου θα χρησιμοποιήσει κάθε φορά ο χρήστης καθορίζεται από τον κώδικά του και, έτσι, σε κάθε χρήστη ανατίθεται ένα μοναδικό σχέδιο TH. Δεδομένου ότι ένας χρήστης μεταδίδει όλα τα δεδομένα του σε μία αντί σε M χρονοσχισμές, το εύρος ζώνης που χρειάζεται για τη μετάδοσή του είναι M φορές μεγαλύτερο. Η TH/CDMA χρησιμοποιεί όλο το εύρος ζώνης για σύντομα χρονικά διαστήματα (σχήμα 2.8). Η TH/CDMA μοιάζει με την TDMA μέσα σε κάθε μεταπήδηση.



Σχήμα 2.8: Μεταπήδηση χρόνου

Η TH/CDMA έχει μια σειρά από πλεονεκτήματα:

- Είναι πολύ πιο εύκολο να υλοποιηθεί απ' ότι η FH/CDMA.
- Δεύτερον, είναι πολύ χρήσιμη μέθοδος, όταν υπάρχει περιορισμός ως προς τη μέση ισχύ του πομπού και όχι ως προς τη μέγιστη, δεδομένου ότι τα δεδομένα μεταδίδονται κατά ριπές.
- Όπως και στην FH/CDMA, το φαινόμενο near - far είναι πολύ πιο ασήμαντο, δεδομένου ότι κάθε τερματικό μεταδίδει μόνο του και δεν εμποδίζεται από μεταδόσεις άλλων τερματικών ευρισκομένων είτε κοντά είτε μακριά από τον σταθμό βάσης.

Ως μειονέκτημα, από την άλλη, μπορούμε να αναφέρουμε:

- Η χρονική διάρκεια που απαιτείται για τον συγχρονισμό είναι μεγάλη, ενώ ο χρόνος που πρέπει να συγχρονιστεί ο δέκτης είναι πολύ μικρός.
- Εάν υπάρχουν πολλαπλές μεταδόσεις, χάνεται ένας μεγάλος αριθμός δεδομένων, οπότε χρειάζεται καλός κώδικας διόρθωσης λαθών καθώς και ανάδευση (interleaving) των δεδομένων.

Υβριδικά συστήματα CDMA

Τα υβριδικά συστήματα CDMA περιλαμβάνουν όλα τα συστήματα CDMA που χρησιμοποιούν συνδυασμό δύο ή περισσότερων τεχνικών διαμόρφωσης απλωμένου φάσματος από αυτές που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ή συνδυασμό CDMA με κάποια άλλη τεχνική πολλαπλής πρόσβασης. Από τον συνδυασμό των βασικών τεχνικών διαμόρφωσης απλωμένου φάσματος, προκύπτουν τέσσερα υβριδικά συστήματα: DS/FH, DS/TH, FH/TH και DS/FH/TH. Επίσης, από τον συνδυασμό CDMA με TDMA ή με διαμόρφωση με πολλαπλά φέροντα, λαμβάνουμε ακόμη δύο υβριδικά συστήματα: CDMA/TDMA και MC-CDMA (multicode-CDMA).

Η ιδέα του υβριδικού συστήματος είναι να συνδυάσει τα επιμέρους πλεονεκτήματα κάθε τεχνικής διαμόρφωσης. Στο σύστημα DS/FH, για παράδειγμα, συνδυάζεται το πλεονέκτημα του περιορισμού της παρεμβολής λόγω πολλαπλών διαδρομών του συστήματος DS με την καλύτερη συμπεριφορά του συστήματος FH στο φαινόμενο near - far. Το μειονέκτημα βέβαια βρίσκεται στην αυξημένη πολυπλοκότητα του πομπού και του δέκτη.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των συστημάτων CDMA

Η τεχνική CDMA διαθέτει ορισμένα εγγενή χαρακτηριστικά, που μπορούν να την κάνουν χρήσιμη για τις κινητές και προσωπικές επικοινωνίες:

α) Στη CDMA χρησιμοποιείται όλο το εύρος ζώνης σε κάθε κυψέλη. Αποφεύγεται έτσι ο περίπλοκος προγραμματισμός για τις συχνότητες, γεγονός που διευκολύνει τη μελλοντική επέκταση του συστήματος (προσθήκη ή αφαίρεση κυψελών). Για την αμφίδρομη επικοινωνία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε TDD είτε FDD.

β) Το εγγενές χαρακτηριστικό του να λαμβάνεται η μέση τιμή των παρεμβολών στη CDMA επιτρέπει τη σχεδίαση συστημάτων με βάση κάποιον μέσο όρο παρεμβολών, γεγονός που εξασφαλίζει μεγαλύτερη χωρητικότητα από τη σχεδίαση με βάση τη χειρότερη περίπτωση. Αυξάνοντας τον αριθμό των χρηστών σ' ένα σύστημα CDMA, αυξάνεται η κατώτερη στάθμη θορύβου κατά γραμμικό τρόπο. Έτσι, δεν υπάρχει απόλυτο όριο για τον αριθμό των χρηστών. Βέβαια, η επίδοση του συστήματος υποβαθμίζεται προοδευτικά, καθώς αυξάνει ο αριθμός των χρηστών, και βελτιώνεται καθώς μειώνεται ο αριθμός των χρηστών.

γ) Η εκμετάλλευση της δραστηριότητας της φωνής και η διαφορική λήψη συχνότητας είναι εγγενή χαρακτηριστικά της CDMA και, επομένως, δεν χρειάζεται επιπλέον προσπάθεια για τη χρησιμοποίησή τους, ώστε να βελτιώνεται η απόδοση του φάσματος. Οι διαλείψεις λόγω πολλαπλών διαδρομών μπορεί να περιοριστούν σημαντικά, καθότι το σήμα απλώνεται σε μεγάλο φάσμα. Αν το εύρος ζώνης του απλωμένου φάσματος είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης συνοχής του διαύλου, η ενυπάρχουσα διαφορική λήψη συχνότητας θα μετριάξει τις επιδράσεις των βραχύχρονων διαλείψεων.

δ) Πιστεύεται, ότι είναι δυνατόν να συνυπάρξουν τα συστήματα CDMA με τα υπάρχοντα μικροκυματικά συστήματα. Αυτό είναι ένα χρήσιμο χαρακτηριστικό, ειδικά όταν οι επικαλύψεις είναι αναπόφευκτες,

ε) Τα συστήματα CDMA προσφέρουν ήπια χαρακτηριστικά ως προς τη χωρητικότητα και τη διαπομπή, γεγονός που τα κάνει προτιμότερα για τις εφαρμογές των προσωπικών επικοινωνιών.

Ωστόσο, τα συστήματα CDMA έχουν μερικά μειονεκτήματα. Η επίδοσή τους είναι πολύ ευαίσθητη στην ακρίβεια ελέγχου της ισχύος. Η βελτίωση της χωρητικότητας του συστήματος, σε ένα πραγματικό σύστημα με ατελή έλεγχο της ισχύος, είναι μικρότερη από ό,τι δείχνουν τα αναλυτικά αποτελέσματα, όπου υποτίθεται σύστημα με τέλει έλεγχο της ισχύος. Σ' αυτό το σημείο, το σύστημα FH/CDMA θεωρείται καλύτερο από το DS/CDMA, καθότι δεν χρειάζεται πολύ ακριβή έλεγχο της ισχύος. Αλλά το σύστημα FH/CDMA χρειάζεται έναν πολύπλοκο συνθέτη συχνοτήτων (synthesiser) για τη μεταπήδηση συχνότητας. Το κόστος του

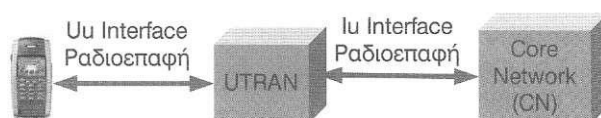
υλικού για την CDMA είναι ακριβότερο από εκείνο της TDMA. Ένα άλλο πρόβλημα της CDMA είναι ο μικρός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων σε σύγκριση με την TDMA, ειδικά όταν το εύρος ζώνης είναι μικρό (λιγότερο από 10MHz). Μεγαλύτερες καθυστερήσεις θα αντιμετωπίζουν οι μεταδόσεις μεγάλων μηνυμάτων, όπως αρχείων ή εικόνων. Απαιτείται περισσότερη έρευνα πάνω σε μεθόδους για παροχή υψηλότερου ρυθμού ή πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης στο σύστημα CDMA. Έχουν προταθεί ιδέες, όπως αυτή της CDMA πολλαπλού κώδικα. Στη CDMA πολλαπλού κώδικα, όταν ο χρήστης ζητάει υπηρεσία με υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, μπορεί να ανατεθούν πολλοί κώδικες στον ίδιο χρήστη. Θα χρειάζεται όμως επιπλέον προσπάθεια στο δέκτη για να λαμβάνει μεταδόσεις πολλαπλού κώδικα ταυτόχρονα και να επαναδιατάσσει τα πακέτα πληροφορίας. Αυξάνει το κόστος του συστήματος. Σε σχέση με τη CDMA, για το ίδιο εύρος ζώνης, η TDMA μπορεί να υποστηρίξει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων με ευέλικτη εκχώρηση χρονοσχισμών σε ένα πλαίσιο. Η ικανότητα υποστήριξης υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων θεωρείται ουσιώδης για το ασύρματο σύστημα προσωπικών επικοινωνιών, ώστε να παρέχει υπηρεσίες πολυμέσων.

2.2.3 Δομή Δικτύου UMTS/WCDMA

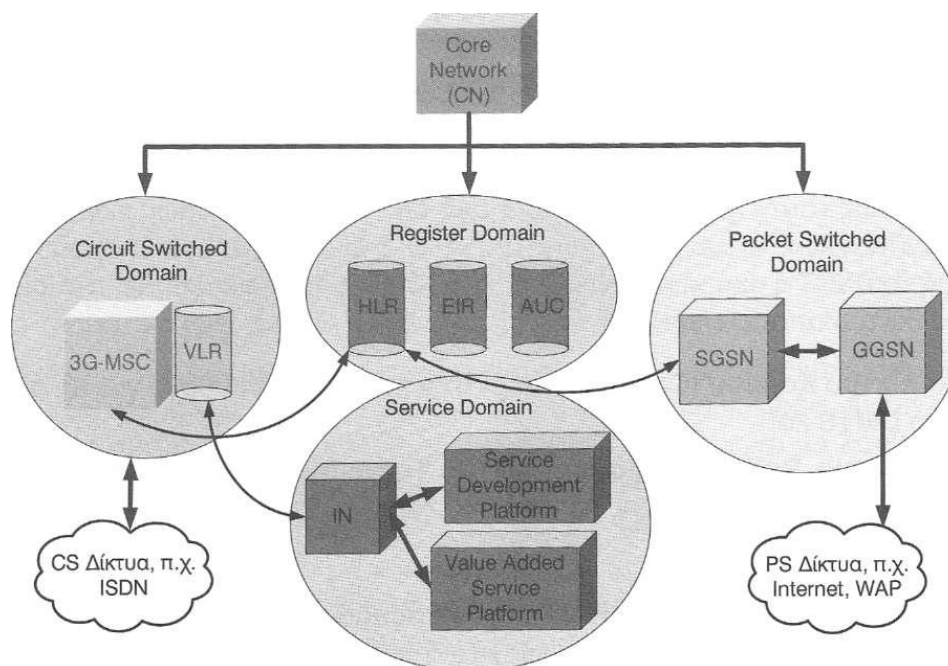
Ένα IMT-2000 δίκτυο χωρίζεται σε δύο λογικές ενότητες: το δίκτυο κορμού (Core Network - CN) και το γενικό δίκτυο ραδιοπρόσβασης (Generic Radio Access Network - **GRAN**). Η βασική ιδέα πίσω από τη λογική αυτή είναι ότι το GRAN θα μπορεί να συνδέεται, πιθανώς ταυτόχρονα, σε διαφορετικά δίκτυα κορμού, όπως εκείνο του GSM, το B-ISDN+IN ή ένα δίκτυο μεταγωγής πακέτων. Ενώ το GRAN θα μπορούσε να είναι το GSM, ή το DECT ή ακόμη και ένα LAN. Στο UMTS η δομή ακολουθεί την ίδια λογική καθώς το δίκτυο αποτελείται από:

- το Δίκτυο Κορμού (**Core Network - CN**) που είναι υπεύθυνο για τις συνδέσεις στο UMTS και
- το Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης (UMTS Terrestrial Radio Access Network - **UTRAN**), που προσφέρει τη ραδιοεπαφή **Uu**, στον Κινητό Σταθμό του χρήστη.

Η βασική απαίτηση για το GRAN είναι να συμμορφώνεται με τις προδιαγραφές της ραδιοεπαφής **Iu**. Στο σχήμα 2.9 εμφανίζονται τα δομικά στοιχεία του UMTS και οι αντίστοιχες 2 ραδιοεπαφές.



Σχήμα 2.9: Τα δομικά στοιχεία του UMTS

i) **Δίκτυο Κορμού (Core Network) στο UMTS****Σχήμα 2.10: Το δίκτυο κορμού (CN) του UMTS**

Το δίκτυο κορμού σύμφωνα με την έκδοση R99 παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα (2.10) και **αποτελείται από τέσσερις τομείς:**

- Ο τομέας **μεταγωγής κυκλώματος** (Circuit Switched Domain), που είναι μια διασκευασμένη έκδοση του Network Switching Subsystem (NSS) του GSM. Αποτελείται από το κέντρο διαμεταγωγής (Mobile Switching Center - MSC), το οποίο έχει προσαρμοσθεί στις ανάγκες του νέου δικτύου και τη γνωστή από το GSM VLR (Visitor Location Register). Το ίδιο MSC θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και από GSM δίκτυα. Η VLR είναι συνδεδεμένη φυσικά με το MSC, προκειμένου η διεπαφή μεταξύ τους να είναι μόνο σε λογικό επίπεδο. Τα στοιχεία που καταχωρούνται σε αυτή αφορούν στους Κινητούς Σταθμούς που βρίσκονται στην περιοχή, που ελέγχει το αντίστοιχο MSC.

Ο τομέας μεταγωγής κυκλώματος του CN αναγνωρίζει 3 καταστάσεις για ένα UE, ανάλογα με τη γνώση και την ακρίβεια για τη θέση του UE μέσα στη λογική δομή του δικτύου:

- **Αποσυνδεδεμένο (Detached):** Το UE είναι απενεργοποιημένο (switched off) και το δίκτυο δεν έχει καμία πληροφορία για την τοποθεσία του UE.

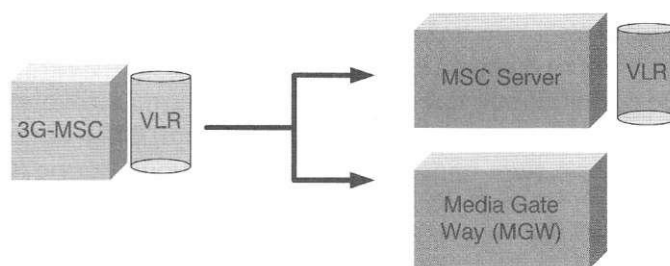
- Αδρανές (Idle): Το UE δεν είναι ακόμη συνδεδεμένο, αλλά μια σύνδεση σηματοδότησης μπορεί να ενεργοποιηθεί, αν αυτό απαιτηθεί. Το δίκτυο γνωρίζει την LA στην οποία βρίσκεται το UE.
- Συνδεδεμένο (Connected): Υπάρχει μια ενεργή σύνδεση. Η περιοχή αναζήτησης στην οποία βρίσκεται το UE είναι αποθηκευμένη στον τομέα εγγραφής (HLR και VLR) και πρέπει να ανανεώνεται, αν το UE αλλάζει θέση, ενώ είναι αδρανές. Αυτή η διαδικασία καλείται *Ενημέρωση Θέσης (Location Update)*. Επιπλέον, το δίκτυο γνωρίζει την τοποθεσία του UE σε επίπεδο κυψέλης. Αν το UE αλλάζει θέση ενώ υπάρχει ενεργή σύνδεση, τότε μπορεί να συμβεί μεταπομπή. Η μεταπομπή αποτελεί μέρος της Διαχείρισης των Ραδιοπόρων (Radio Resource Management) του συστήματος στο UTRAN.

Η ροή δεδομένων του χρήστη διέρχεται από τα **MGW**, τα οποία είναι υπεύθυνα για τη συντήρηση της σύνδεσης και για λειτουργίες μεταγωγής, όποτε αυτές απαιτούνται. Τα MGWs περιλαμβάνουν επιπλέον δυνατότητες σύνδεσης δικτύων, ενώ σε αυτά βρίσκονται οι Διακωδικοποιητές (Transcoders), ο εξοπλισμός ακύρωσης της ηχούς και τα modems. Τέλος, έχουν και δυνατότητα μετατροπής από CS σε PS για την περίπτωση π.χ. υπηρεσιών όπως η VoIP. Η όλη διαδικασία ελέγχεται από ένα διαφορετικό στοιχείο, τον **MSC Server**, στον οποίο ανήκει και η VLR. Ένας MSC Server μπορεί να ελέγχει πολλαπλά MGWs και έτσι εξασφαλίζεται η εύκολη επέκταση του CS τομέα. Όταν είναι επιθυμητή η αύξηση της δυνατότητας μεταγωγής του δικτύου, τότε προστίθενται νέα MGWs, ενώ όταν επιθυμούμε αύξηση της δυνατότητας ελέγχου, προσθέτουμε νέους MSC Servers.

- Ο τομέας **εγγραφής** (Register Domain), που αποτελείται από τους καταχωρητές: Home Location Register (HLR), Equipment Identity Register (EIR) και Authentication Center (AUC).
- Ο τομέας **υπηρεσιών** (Service Domain), που αποτελείται από το ευφυές δίκτυο (Intelligent Network - IN) και άλλες πλατφόρμες ανάπτυξης υπηρεσιών. Το IN παρέχει πιο προσωποποιημένες υπηρεσίες στους χρήστες, αλλά και πιο ασφαλείς υπηρεσίες (π.χ. προπληρωμένες συνδρομές). Το τυπικό IN του PSTN/ISDN δεν είναι σε θέση να μεταφέρει πληροφορία για τις υπηρεσίες μεταξύ διαφορετικών δικτύων και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένα εξελιγμένο IN που καλείται CAMEL (Customized Applications for Mobile network Enhanced Logic).
- Ο τομέας **μεταγωγής πακέτων** (Packet Switched Domain), που στηρίζεται στην υπάρχουσα αρχιτεκτονική του GPRS και περιλαμβάνει τους υποστηρικτικούς κόμβους SGSN και GGSN.

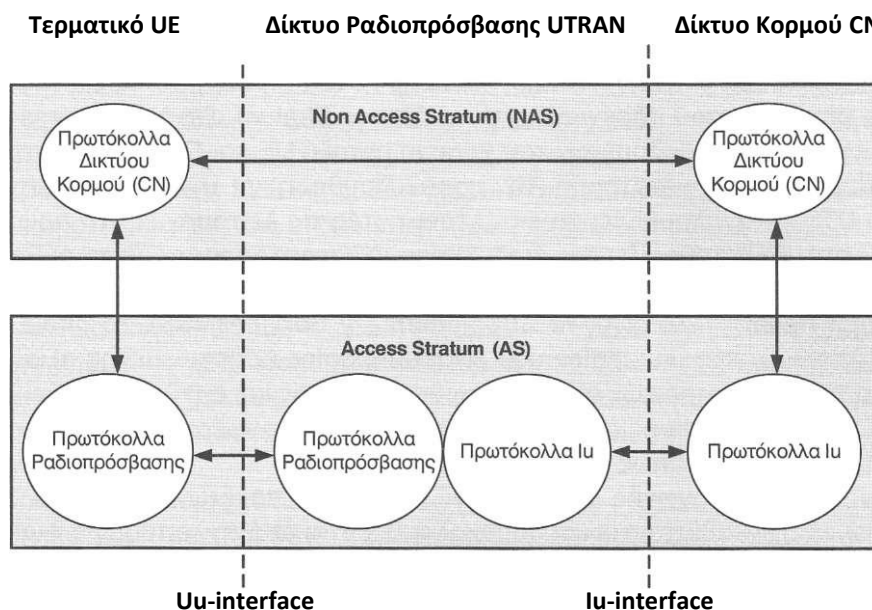
Ο τομέας μεταγωγής πακέτων του CN αναγνωρίζει επίσης 3 διαφορετικές καταστάσεις για ένα UE: Αδρανές (Idle), Έτοιμο (Ready) και Σε Αναμονή (Standby). Αρχικά το UE είναι αδρανές (idle) και δεν είναι συνδεδεμένο στο CN PS. Για να μεταβεί σε κατάσταση ετοιμότητας (ready), το UE πρέπει να εγγραφεί στο δίκτυο, δηλαδή να ενεργοποιήσει τη διαδικασία GPRS Attach. Τώρα, το UE έχει αναγνωριστεί από το δίκτυο και μπορεί να στείλει και να λάβει δεδομένα. Στην κατάσταση αυτή γίνονται ενημερώσεις των περιοχών στις οποίες βρίσκεται το UE, δηλαδή των περιοχών Cell και Routing. Μετά από συγκεκριμένη περίοδο χωρίς μεταφορά δεδομένων, ένας χρονιστής μετράγει το UE σε κατάσταση αναμονής (standby). Αυτή η μεταγωγή μπορεί να προκληθεί και από το δίκτυο. Σε κατάσταση αναμονής, το UE εκτελεί μόνο ενημερώσεις της περιοχής δρομολόγησης. Μόλις μεταφερθούν δεδομένα προς ή από το UE, αυτό μεταβαίνει σε κατάσταση ετοιμότητας. Η διαδικασία διαγραφής καλείται GPRS Detach. Στη συνέχεια, το UE επιστρέφει σε αδρανή κατάσταση, δηλαδή δεν είναι πλέον συνδεδεμένο (attached) στο GPRS. Υπάρχει βέβαια και η δυνατότητα απευθείας μετάβασης από κατάσταση αναμονής σε αδρανή κατάσταση.

Στην έκδοση R4 των προδιαγραφών εισήχθη μια ουσιαστική αλλαγή στη δομή του δικτύου κορμού. Αυτή είναι η διάσπαση του MSC/VLR σε MSC Server και σε Media Gateway (MGW), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11. Ο λόγος της διάσπασης είναι η επίτευξη του διαχωρισμού της σύνδεσης σε τμήμα ελέγχου και τμήμα πραγματικής υπηρεσίας.



Σχήμα 2.11: Διάσπαση του MSC στην R4

Μια σημαντική αρχή στη σχεδίαση του UMTS ήταν η ανάγκη για *απεξάρτηση* των λειτουργιών διαχείρισης της κινητικότητας και των συνδέσεων, από την τεχνολογία της ραδιοεπαφής. Αυτή η αρχή υλοποιήθηκε με την υιοθέτηση της έννοιας του **Access Stratum (AS)** και του **Non Access Stratum (NAS)**, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.12. Το AS είναι μια λειτουργική οντότητα που περιλαμβάνει τα πρωτόκολλα ραδιοπρόσβασης μεταξύ τερματικού εξοπλισμού (**User Equipment**) και του δικτύου ραδιοπρόσβασης (UTRAN).



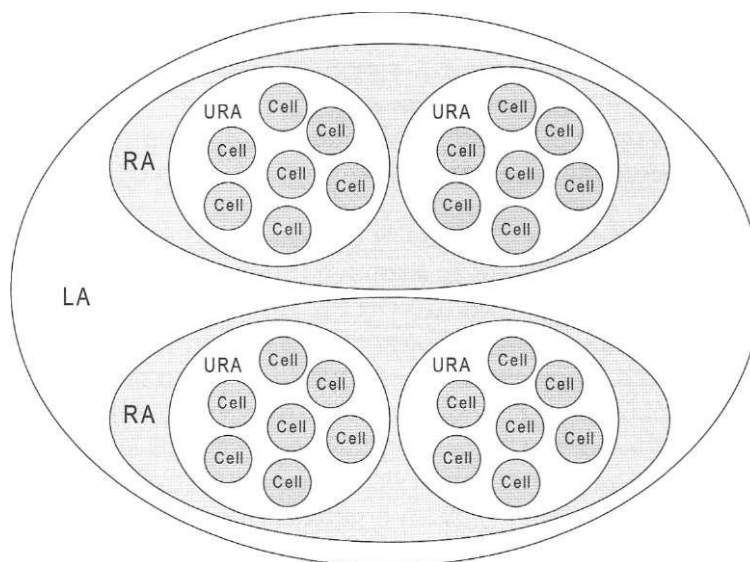
Σχήμα 2.12: Το μοντέλο αρχιτεκτονικής του UMTS

Το **NAS** περιλαμβάνει τα πρωτόκολλα του δικτύου κορμού μεταξύ του UE και του ίδιου του CN, όπου πλέον το UTRAN είναι διάφανο. Το Δίκτυο Κορμού παρέχει 3 βασικές λειτουργίες διαχείρισης:

- **Διαχείριση Σύνδεσης (Connection Management - CM)**, που παρέχει τις bearer υπηρεσίες (μεταφορά δεδομένων) και τις διαδικασίες για τις συνδέσεις μεταγωγής κυκλώματος.
- **Διαχείριση Συνόδου (Session Management - SM)**, που είναι υπεύθυνη για την εγκατάσταση, την παρακολούθηση και την απεγκατάσταση μιας σύνδεσης μεταγωγής πακέτων.
- **Διαχείριση Κινητικότητας (Mobility Management - MM)**, που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της θέσης ενός UE έτσι ώστε να μπορεί να εγκατασταθεί μια σύνδεση.

Τέλος, ας δούμε όμως και ποιες είναι οι περιοχές του δικτύου στις οποίες εντοπίζεται ένας **UE**. Η λογική δομή περιλαμβάνει τέσσερα επίπεδα, όπως αυτά φαίνονται και στο σχήμα 2.13:

- Την περιοχή αναζήτησης (Location Area - LA).
- Την περιοχή δρομολόγησης (Routing Area - RA).
- Την περιοχή εγγραφής στο UTRAN (UTRAN Registration Area - URA).
- Την κυψέλη (Cell).



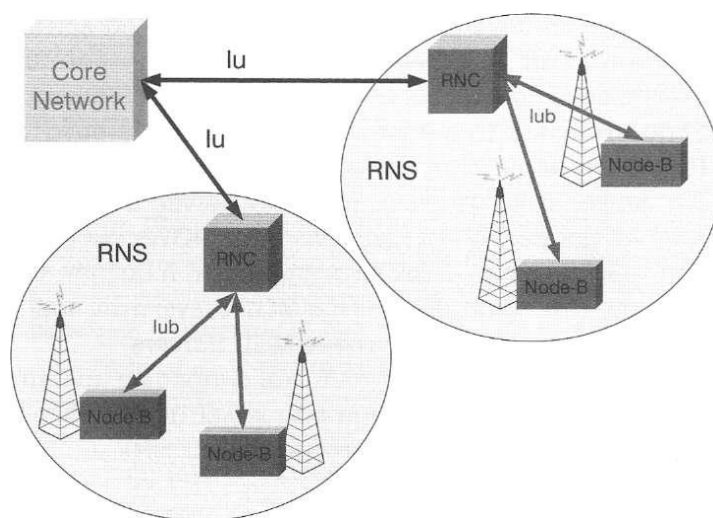
Σχήμα 2.13: Οι περιοχές της λογικής δομής του δικτύου

Στον τομέα μεταγωγής κυκλώματος του CN ένας συνδρομητής μπορεί να μετακινείται μέσα σε μια **LA**, χωρίς να χρειάζεται να ενημερώσει το δίκτυο. Η ταυτότητα της περιοχής αναζήτησης καταχωρείται από τη VLR, ώστε να γνωρίζει το δίκτυο πού θα αναζητήσει έναν συνδρομητή. Η LA δεν έχει άλλες δεσμεύσεις ως προς τα στοιχεία του δικτύου, δηλαδή π.χ. μια LA μπορεί να περιέχει πολλά RNC, αλλά και ένα RNC πολλές LAs. Αντίστοιχα, στον τομέα μεταγωγής πακέτων, υπάρχει η περιοχή δρομολόγησης (**RA**) στην οποία το UE μπορεί να μετακινείται, χωρίς να ενημερώνει το δίκτυο. Οι περιοχές δρομολόγησης είναι υποσύνολα των περιοχών αναζήτησης. Μια νέα περιοχή, σε σχέση με τα 2,5G συστήματα, είναι η περιοχή εγγραφής στο UTRAN (URA), η οποία είναι γνωστή εσωτερικά στο UTRAN, αλλά όχι στο CN. Αν και φαίνεται ότι είναι μια μικρή αλλαγή στη δομή SGSN, στην πράξη είναι πολύ σημαντική, αφού το SGSN πλέον μεταφέρει ενθυλακωμένη κίνηση IP προς και από το UE, σύμφωνα με την ταυτότητα της URA.

ii) Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης (UTRAN) στο UMTS

Το UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) είναι ένα νέο δίκτυο ραδιοπρόσβασης που σχεδιάστηκε για το UMTS. Τα όριά του είναι από την πλευρά του UE, η Uu interface, δηλαδή η ραδιοεπαφή, ενώ από την πλευρά του CN είναι η Iu interface. Το UTRAN αποτελεί μια υλοποίηση του GRAN και είναι παρόμοιο με το BSS του GSM. Αποτελείται από τα στοιχεία του δικτύου που είναι υπεύθυνα για τη διαχείριση των ραδιοπόρων (RRM) του συστήματος.

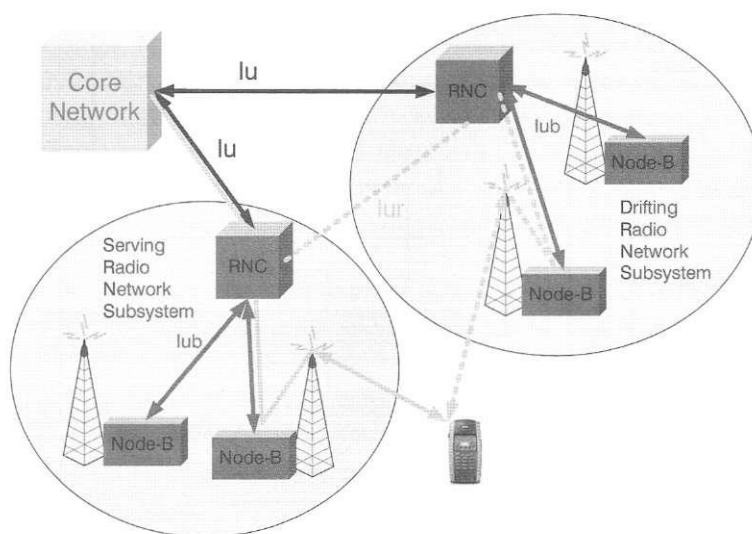
Το UTRAN αποτελείται από πολλά Radio Network Subsystems (RNS), τα οποία συνδέονται με το CN με τη διεπαφή Iu, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.14. Κάθε RNS διαχειρίζεται τους ραδιοπόρους των συνδέσεών του. Αποτελείται από ένα Radio Network Controller (RNC), που είναι παρόμοιο με το BSC του GSM, και από ένα ή περισσότερα **Node B**, τα οποία είναι παρόμοια με τους Σταθμούς Βάσης (BS) του GSM. Η σύνδεση του RNC με τα Node B γίνεται με την Iub interface. Αυτή η διεπαφή πρέπει να είναι ανοικτή, αλλά είναι τοποθετημένη σε τόσο σημαντική θέση, που, όπως και στο GSM με τη διεπαφή A-bis, υπάρχουν υλοποιήσεις αποκλειστικές για κάθε κατασκευαστή. Έτσι, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί συμβατός εξοπλισμός του ίδιου κατασκευαστή και στα δύο μέρη της διεπαφής.



Σχήμα 2.14: Η δομή του δικτύου ραδιοπρόσβασης UTRAN

Το RNC συνδέεται μέσω της διεπαφής Iu είτε με ένα MSC είτε με ένα SGSN. Το RNC που ελέγχει ένα Node B, πολλές φορές καλείται Controlling RNC (CRNC) για το Node B. Το CRNC είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο του φορτίου τηλεπικοινωνιακής κίνησης, αλλά και την επίλυση προβλημάτων υπερφόρτωσης στις κυψέλες που ελέγχει. Επιπλέον, το CRNC είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση του αλγορίθμου ελέγχου αποδοχής σύνδεσης (admission control) και της απόδοσης νέων κωδίκων σε νέες ραδιοζεύξεις στις κυψέλες που ελέγχει. Για κάθε UE που είναι συνδεδεμένο

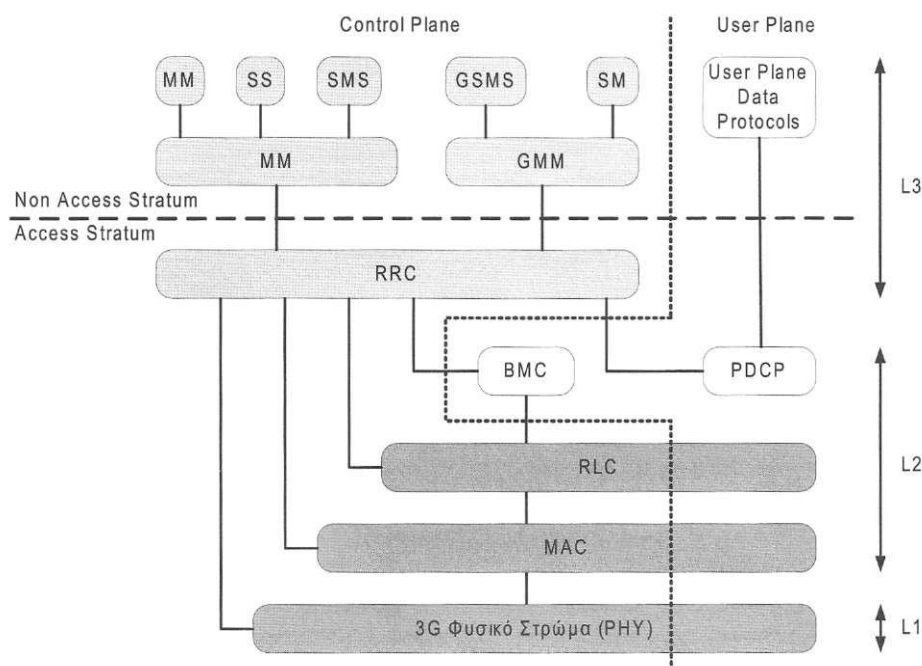
με το CN υπάρχει ένα RNS που το εξυπηρετεί (Serving RNS - SRNS). Το UE μπορεί να είναι όμως συνδεδεμένο και με άλλα RNS, αν απαιτούνται επιπλέον ραδιοπόροι π.χ. για ένα soft handover. Αυτά τα RNS καλούνται Drift RNS (DRNS). Τόσο τα δεδομένα, όσο και η σηματοδότηση μεταξύ των RNC μεταφέρονται από τη Iur interface, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα 2.15. Επειδή οι διεπαφές Iub, Iur και Iu απαιτούν μεγάλες χωρητικότητες, το πρωτόκολλο μετάδοσης είναι το Asynchronous Transfer Mode (ATM). Το κάθε RNS μπορεί να έχει το ρόλο του Serving ή του Drift RNC. Επιπλέον, η επικοινωνία με το CN γίνεται πάντα μέσω του SRNC. Στην περίπτωση που το UE είναι συνδεδεμένο με δύο RNC, τότε ο συνδυασμός της πληροφορίας στην άνω ζεύξη γίνεται στο SRNC.



Σχήμα 2.15: Η ύπαρξη Serving RNS και Drift RNS

Τα Node B αναλαμβάνουν όλη την επεξεργασία στο φυσικό στρώμα της ραδιοεπαφής. Είναι δηλαδή υπεύθυνα για λειτουργίες, όπως η διασπορά φάσματος, η κωδικοποίηση διαύλου, η διεμπλοκή και η προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης. Επιπλέον, τα Node B εκτελούν μερικές πολύ βασικές λειτουργίες διαχείρισης των ραδιοπόρων του συστήματος, όπως ο έλεγχος ισχύος κλειστού βρόχου.

Τα πρωτόκολλα της ραδιοεπαφής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στα οριζόντια στρώματα και στα κατακόρυφα επίπεδα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.16: Η στοίβα πρωτοκόλλων στη ραδιοεπαφή UTRAN

Τα στρώματα στο Access Stratum είναι τρία: το φυσικό στρώμα (PHY ή L1), το Data Link Layer (L2) και το Network Layer (L3). Το L2 χωρίζεται σε υποστρώματα: το Medium Access Control (MAC), το Radio Link Control (RLC), το Broadcast/Multicast Control (BMC) και το Packet Data Convergence Protocol (PDCP). Το στρώμα δικτύου (L3) περιέχει και αυτό υποστρώματα, από τα οποία μόνο το Radio Resource Control (RRC) ανήκει στο Access Stratum, ενώ τα υπόλοιπα ανήκουν στο Non Access Stratum, δηλαδή αφορούν το δίκτυο κορμού (CN).

Τα κατακόρυφα επίπεδα, από την άλλη, είναι: το επίπεδο ελέγχου (Control Plane) και το επίπεδο χρήστη (User Plane). Το MAC και το RLC ανήκουν και στα δύο επίπεδα, ενώ το RRC ανήκει μόνο στο επίπεδο ελέγχου και τα BMC και PDCP μόνο στο επίπεδο του χρήστη.

Όσον αναφορά τις λειτουργικότητα του UTRAN, οι βασικές του λειτουργίες εμφανίζονται στο σχήμα 2.17. Όπως είναι εμφανές, η πλέον σημαντική λειτουργία του UTRAN είναι ο έλεγχος των ραδιοπόρων του συστήματος (Radio Resource Control - RRC), που παρέχεται από το RNC. Το RRC διαχειρίζεται και τα υπόλοιπα στρώματα στο Access Stratum, καθώς συνδέεται με διεπαφές ελέγχου με αυτά, ελέγχοντας τη διαμόρφωση των παραμέτρων τους.



Σχήμα 2.17: Οι λειτουργίες του UTRAN

Ο Έλεγχος Αποδοχής Σύνδεσης-Κλήσης (Admission Control) παρέχεται και αυτός από το RNC και είναι ο μηχανισμός που χρησιμοποιείται για την αποδοχή ή την απόρριψη νέων χρηστών, νέων RAB ή ακόμη και νέων ραδιοζεύξεων που προέρχονται από ενέργειες του δικτύου, όπως οι μεταπομπές. Σκοπός του ελέγχου αποδοχής σύνδεσης είναι η αποφυγή υπερφόρτωσης του ραδιοδικτύου. Στην πράξη, το RNC βασίζεται σε μετρήσεις τόσο του ωφέλιμου φορτίου, όσο και των παρεμβολών σε μια κυψέλη και αποφασίζει, αν θα επιτρέψει επιπλέον συνδέσεις ή όχι. Οι αποφάσεις του ελέγχου αποδοχής σύνδεσης μπορεί να επηρεάσουν τόσο την ποιότητα υπηρεσίας (QoS) των υπάρχουσών συνδέσεων στην κυψέλη, όσο και να προκαλέσουν απορρίψεις κλήσεων. Να σημειώσουμε ότι στο UMTS, λόγω της WCDMA ραδιοεπαφής, μια νέα σύνδεση ή μια αύξηση στο ρυθμό μετάδοσης προκαλεί αύξηση του επιπέδου των παρεμβολών τόσο στην ίδια την κυψέλη, όσο και σε γειτονικές κυψέλες. Επιπλέον, η αύξηση των παρεμβολών σε μια κυψέλη έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση ουσιαστικά της έκτασης της κάλυψης της κυψέλης, γεγονός που σημαίνει ότι μια νέα κλήση μπορεί να είναι η αιτία διακοπής υπάρχουσών κλήσεων που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης.

Αν προκληθεί υπερφόρτωση σε μια κυψέλη, τότε ο Έλεγχος Συμφόρησης (Congestion Control) φροντίζει ώστε να επανέλθει το σύστημα σε σταθερή κατάσταση. Συνήθεις ενέργειες είναι ο εξαναγκασμός σε μεταπομπή σε άλλο Node B ή στο GSM ή η μείωση του ρυθμού εκπομπής/λήψης σε κάποιους συνδρομητές ή ακόμα και η αποσύνδεση συνδρομητών. Ο Έλεγχος Συμφόρησης καλείται πολλές φορές και Έλεγχος Φορτίου (Load Control). Η βασική διαφορά με το Admission Control είναι ότι αυτός είναι μια διαδικασία on-off, ενώ το Congestion Control είναι μια συνεχής διαδικασία. Το Admission Control αντιμετωπίζει κάθε αίτηση για πόρους ξεχωριστά, ενώ το Congestion Control αντιμετωπίζει το δίκτυο ως σύνολο. Το Admission Control αποφασίζει για την εγκατάσταση ή όχι κάποιων συνδέσεων,

ενώ το Congestion Control παρακολουθεί και διαχειρίζεται στη συνέχεια τις υπάρχουσες συνδέσεις. Θεωρητικά, το Congestion Control δεν θα απαιτούνταν, αν το Admission Control μπορούσε να προβλέψει με επιτυχία τις αλλαγές στο φορτίο των κυψελών του δικτύου, αλλά και το επίπεδο των παρεμβολών. Τόσο το Admission Control, όσο και το Congestion Control χρησιμοποιούν διαφορετικούς αλγόριθμους στην άνω και στην κάτω ζεύξη. Στο Admission Control θα πρέπει και οι δύο αλγόριθμοι τόσο στην άνω, όσο και στην κάτω ζεύξη να αποδεχτούν τη νέα αίτηση πριν τελικά αποδοθούν πόροι.

Τέλος, τα δίκτυα UMTS διαθέτουν μηχανισμούς ελέγχου της ισχύος των σημάτων των πελατών. Στο WCDMA όλοι οι χρήστες χρησιμοποιούν τον ίδιο συχνοτικό δίαυλο, αλλά διαχωρίζονται με ορθογωνικούς κώδικες διασποράς. Συνεπώς, κάθε χρήστης φαίνεται ως θόρυβος για τους υπόλοιπους χρήστες. Αν η ισχύς εκπομπής των χρηστών είναι ανεξέλεγκτη, τότε η προκύπτουσα παρεμβολή θα είναι αυξημένη. Ο Έλεγχος Ισχύος (Power Control) αναλαμβάνει τη διαχείριση της ισχύος των UEs, ώστε να αποφεύγονται προβλήματα αυξημένων παρεμβολών και φαινομένων, όπως το near - far. Να σημειώσουμε όμως ότι απαιτείται έλεγχος ισχύος και στην κάτω ζεύξη, προκειμένου να περιοριστούν οι παρεμβολές τόσο σε γειτονικές κυψέλες, όσο και στην ίδια κυψέλη λόγω χρήσης ημι-ορθογωνικών κωδίκων διασποράς. Υπάρχουν τρεις τύποι ελέγχου ισχύος:

- Έλεγχος Ισχύος Ανοικτού Βρόχου (Open Loop Power Control).
- Έλεγχος Ισχύος Κλειστού Βρόχου (Closed Loop Power Control).
- Έλεγχος Ισχύος Εξωτερικού Βρόχου (Outer Loop Power Control).

Στον έλεγχο ισχύος ανοικτού βρόχου, το Node B χρησιμοποιεί συγκεκριμένα κανάλια, για να μεταδώσει με ευρυεκπομπή (broadcast) την πληροφορία για την ισχύ εκπομπής του UE, κατά την πρώτη του προσπάθεια πρόσβασης στο δίκτυο. Στο CDMA, κάθε συνδρομητής αποτελεί πηγή παρεμβολών για τους υπόλοιπους χρήστες, συνεπώς η τυχαία πρόσβαση στο δίκτυο πρέπει να γίνει με την μικρότερη δυνατή ισχύ εκπομπής. Γενικότερα, με την τεχνική ανοικτού βρόχου ο πομπός πρέπει να μετρά τα επίπεδα παρεμβολών και να προσαρμόζει την ισχύ του αντίστοιχα. Αν η τεχνική αμφιδρόμησης είναι η TDD, τότε χρησιμοποιείται η ίδια συχνότητα και προς τις δύο κατευθύνσεις μετάδοσης και συνεπώς, οι διαλείψεις είναι συσχετισμένες και άρα, η τεχνική αποδίδει πολύ καλά. Αν όμως έχουμε FDD σύστημα, τότε οι διαλείψεις στις δύο κατευθύνσεις μετάδοσης είναι ασυσχέτιστες και άρα, η εκτίμηση του διαύλου στην κατεύθυνση λήψης δεν είναι απαραίτητα χαρακτηριστική και για την αντίστροφη ζεύξη. Η τεχνική τότε αποδίδει καλά σε επίπεδο μέσης τιμής της ισχύος.

Στον έλεγχο ισχύος κλειστού βρόχου, από τη στιγμή που εγκατασταθεί η σύνδεση, το Node B αναλαμβάνει τον έλεγχο ισχύος. Με βάση το λόγο σήματος

προς παρεμβολή (SIR) αλλά και τη λαμβανόμενη ισχύ στο Node B, αυτό ενημερώνει το UE να προσαρμόζει την ισχύ εκπομπής του κάθε 0.667 ms (που ταυτίζεται με τη διάρκεια μιας χρονοσχισμής). Συγκριτικά, αναφέρουμε ότι στο GSM η ισχύς προσαρμόζεται κάθε 480ms. Για το λόγο αυτό η τεχνική αυτή καλείται και γρήγορος έλεγχος ισχύος κλειστού βρόχου (fast closed loop power control). Εναλλακτικά, να πούμε ότι, αν αντί του SIR μετράται ο ρυθμός εσφαλμένων πλαισίων (Frame Error Rate - FER), τότε προκύπτει μεν μια αργή διαδικασία ελέγχου ισχύος, αλλά με μεγαλύτερη αξιοπιστία, αφού ο FER είναι πιο αξιόπιστος δείκτης από το SIR.

Στον έλεγχο ισχύος εξωτερικού βρόχου, το RNC προσαρμόζει την τιμή του target SIR (επιθυμητό SIR) στο Node B. Αυτή η ρύθμιση αφορά κάθε κυψέλη και γίνεται, προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η ποιότητα μετάδοσης, με δεδομένη τιμή BER ή FER. Ο σταθερός έλεγχος του επιθυμητού SIR κάθε κυψέλης είναι πολύ σημαντικός για την απόδοση των CDMA δικτύων. Αν δεν επιτυγχάνεται το επιθυμητό SIR, τότε μειώνεται το μέγεθος της κυψέλης ή αντίστοιχα η χωρητικότητα. Αν το RNC εντοπίσει μια επιδεινούμενη σύνδεση, η επιθυμητή τιμή του SIR στο Node B αυξάνεται κατά ένα σταθερό ποσό. Το UE θα αυξήσει σταδιακά την ισχύ εκπομπής μέχρι να πετύχει τη νέα τιμή του SIR.

Πρέπει να σημειώσουμε ότι, αν η διαδικασία του ελέγχου ισχύος δεν λειτουργεί ικανοποιητικά, είναι πιθανό να εμφανιστεί το φαινόμενο των κυψελών που «αναπνέουν» ή, όπως χαρακτηριστικά αναφέρονται, breathing cells. Το φαινόμενο αυτό προκύπτει, αν λόγω αυξημένων παρεμβολών οι μακρινοί χρήστες δεν εξυπηρετούνται πια και συνεπώς, η ενεργή ακτίνα της κυψέλης μειώνεται. Μαζί με τη μείωση όμως της κυψέλης, σταδιακά μειώνονται και οι χρήστες και άρα και οι παρεμβολές. Συνεπώς, νέοι χρήστες απομακρυσμένοι από το Node B μπορούν πάλι να συνδεθούν στο σύστημα, γεγονός που συνεπάγεται την αύξηση της ακτίνας κάλυψης της κυψέλης.

2.2.4 Τεχνολογίες Φυσικού Στρώματος στο WCDMA

Οι συχνότητες που έχουν αποδοθεί στο UTRA (WCDMA) στην Ευρώπη είναι οι εξής:

- WCDMA FDD: 2 X 60MHz (1920-1980MHz uplink, 2110-2170MHz downlink).
- WCDMA TDD (με άδεια): 25MHz (1900-1920MHz και 2020-2025MHz).
- WCDMA TDD (χωρίς άδεια): 10MHz (2010-2020MHz).

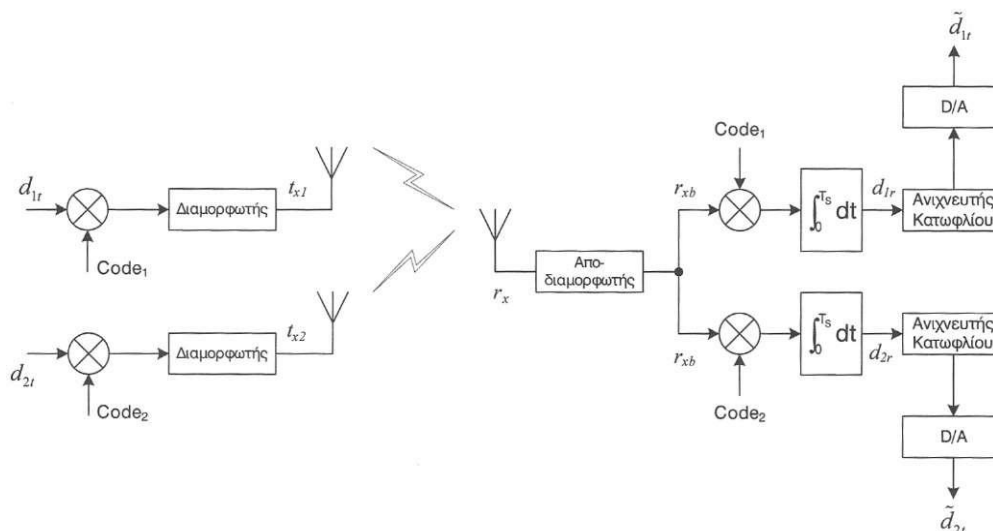
Επειδή κάθε κανάλι στο UMTS έχει εύρος 5MHz, έχουμε συνολικά 12 ζευγάρια FDD και 7 κανάλια TDD διαθέσιμα.

Διασπορά Φάσματος και Εφαρμογή σε CDMA Συστήματα

Όπως έχουμε αναφέρει, η βάση στα συστήματα τρίτης γενιάς είναι η τεχνολογία της διασποράς φάσματος και η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης CDMA. Λόγω του ρυθμού των ακολουθιών διασποράς (3,84Mcps), το εύρος ζώνης που καταλαμβάνουν τα εκπεμπόμενα στο σύστημα σήματα είναι 3,84MHz και, συμπεριλαμβάνοντας τις ζώνες φύλαξης, ο κάθε δίαυλος φτάνει τα 5MHz. Συνεπώς, το σύστημα χαρακτηρίζεται ως **ευρείας ζώνης CDMA (Wideband CDMA - WCDMA)**. Τα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης CDMA αναφέρθηκαν και στην παράγραφο 2.2.2. Εδώ, να υπενθυμίσουμε ότι η ακολουθία πληροφορίας κάθε χρήστη πολλαπλασιάζεται στον πομπό με μια μοναδική, πολύ γρήγορη, ψευδοτυχαία ακολουθία, που καλείται κώδικας διασποράς προκαλώντας τη διασπορά του φάσματος του σήματος πληροφορίας στενής ζώνης, σε ευρεία φασματική περιοχή (3,84MHz). Ο λόγος του εύρους ζώνης που καταλαμβάνει το σήμα στενής ζώνης πριν τη διασπορά, προς το εύρος ζώνης μετά τη διασπορά καλείται **κέρδος επεξεργασίας (processing gain)** ή **παράγοντας διασποράς (spreading factor - SF)**. Στο UTRA ο παράγοντας διασποράς κυμαίνεται από 4 ως 512. Όσο μικρότερος είναι, τόσο μεγαλύτερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων μπορεί να υποστηριχθεί στη ραδιοεπαφή. Το κέρδος αυτό μας δείχνει στην πράξη πόσα chips χρησιμοποιούνται για την διασπορά ενός συμβόλου της ακολουθίας πληροφορίας. Στο δέκτη το διεσπαρμένο σήμα πολλαπλασιάζεται ξανά με την ίδια ακολουθία διασποράς και το εύρος ζώνης επανέρχεται σε εκείνο του εκπεμπόμενου σήματος.

Στο παρακάτω σχήμα 2.18 παρουσιάζεται μια τυπική δομή ενός δέκτη που δέχεται διεσπαρμένα από διαφορετικούς κώδικες σήματα. Στο παράδειγμα αυτό υποθέτουμε ότι η προς μετάδοση ακολουθία πληροφορίας του χρήστη 1 είναι $d_u = [010]$, ενώ του χρήστη 2 είναι $d_{2t} = [001]$, Επιπλέον, ο κώδικας που χρησιμοποιεί ο

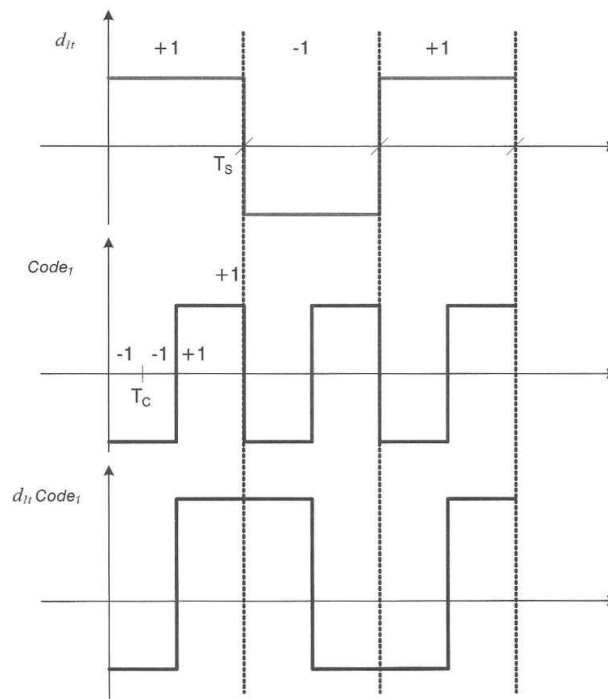
πρώτος χρήστης είναι $\text{Code}_1 = [1100]$, ενώ ο δεύτερος $\text{Code}_2 = [1\ 0\ 01]$. Να σημειώσουμε ότι το μήκος των κωδικών που επιλέξαμε για το παράδειγμα είναι πολύ μικρό, αλλά διευκολύνει την απεικόνιση και τους υπολογισμούς, ενώ η αντιστοίχιση των συμβόλων σε πλάτη παλμών που χρησιμοποιήσαμε είναι η εξής:
 $0 \rightarrow 1, 1 \rightarrow -1$.



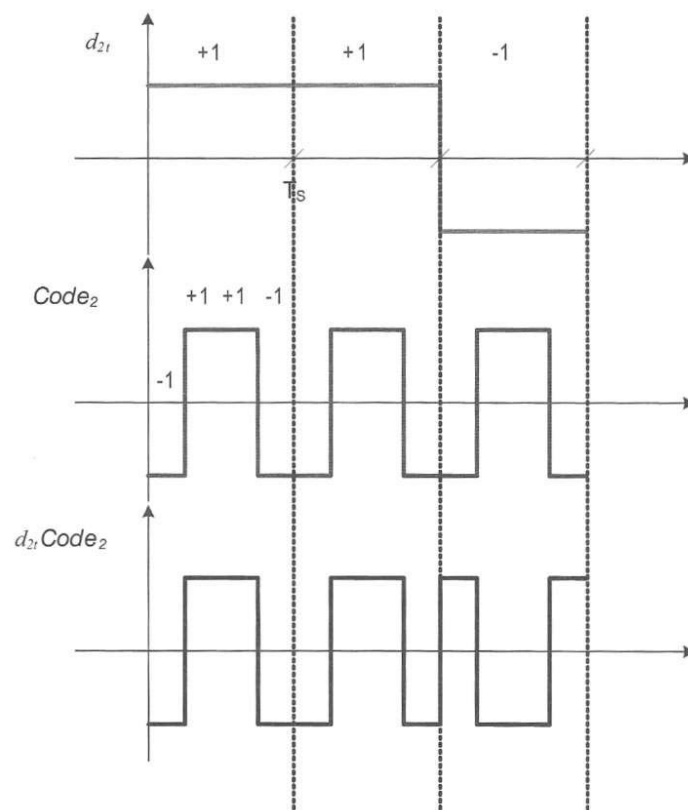
Σχήμα 2.18: Διάταξη πομποδεκτών για CDMA με 2 χρήστες

Επίσης στο σχήμα 2.19 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της διασποράς της ακολουθίας πληροφορίας του χρήστη 1 με τον κώδικα 1, ενώ στο σχήμα 2.20 του χρήστη 2 με τον κώδικα 2.

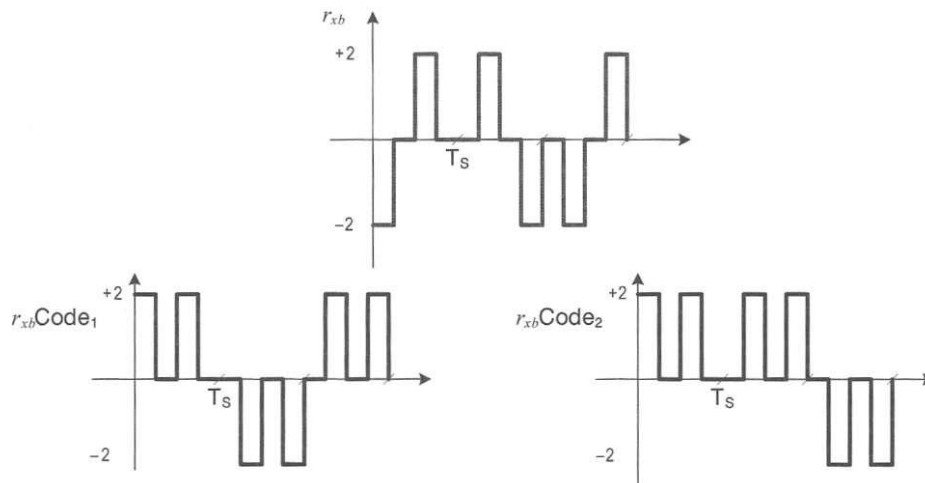
Τέλος, στο σχήμα 2.21 παρουσιάζεται η υπέρθεση των δύο διεσπαρμένων σημάτων στο δέκτη. Παρατηρήστε ότι ο δέκτης γνωρίζει τους κώδικες διασποράς που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε πομπό και τους χρησιμοποιεί αντίστοιχα, προκειμένου να ανακτήσει την ακολουθία πληροφορίας του καθενός. Η διαδικασία του πολλαπλασιασμού με τους αντίστοιχους κώδικες αφορά στο συνολικά λαμβανόμενο σήμα, δηλαδή την υπέρθεση των δύο εκπεμπόμενων. Επιπλέον, να σημειώσουμε ότι έχουμε υποθέσει τέλειο συγχρονισμό στο δέκτη, δηλαδή δεν υπάρχει διαφορά φάσης μεταξύ του λαμβανόμενου σήματος και των αντιγράφων του κώδικα. Στη συνέχεια, ολοκληρώνοντας στη διάρκεια του συμβόλου της ακολουθίας πληροφορίας, προκύπτουν από τους δύο κλάδους του δέκτη εκτιμήσεις των ακολουθιών πληροφορίας που ταυτίζονται με τις εκπεμπόμενες. Ένα πολύ χαρακτηριστικό αντιπαράδειγμα που δείχνει την αδυναμία της ανάκτησης της αρχικής πληροφορίας κάθε χρήστη, αν οι κώδικες που χρησιμοποιούμε δεν είναι ορθογωνικοί, είναι αυτό όπου: $\text{Code}_1 = [0000]$ και $\text{Code}_2 = [1111]$.



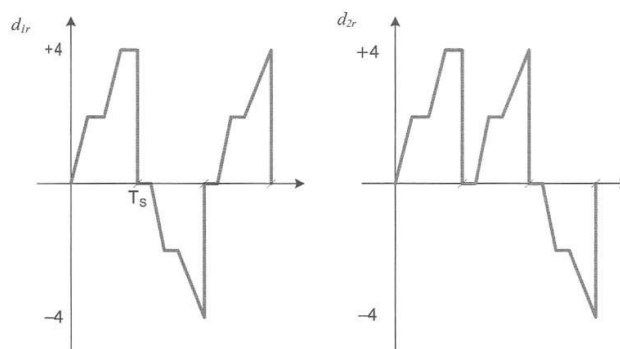
Σχήμα 2.19: Διασπορά φάσματος στο χρήστη 1



Σχήμα 2.20: Διασπορά φάσματος στο χρήστη 2



Σχήμα 2.21: Υπέρθεση μεταδιδόμενων σημάτων στο δέκτη



Σχήμα 2.22: Αποτέλεσμα αποδιασποράς

Στα CDMA συστήματα, μπορούμε να προσεγγίσουμε το πλήθος των χρηστών M , που μπορεί να υποστηρίξει μια κυψέλη, με τις ακόλουθες παραδοχές:

- Όλοι οι χρήστες λαμβάνουν την ίδια ισχύ.
- Η παρεμβολή προσεγγίζεται ως θόρυβος Gauss.
- Γνωρίζουμε τη σχέση που συνδέει το BER με το σηματοθορυβικό λόγο E_b/N_o .

Άρα, μπορούμε να υπολογίσουμε το ελάχιστο απαιτούμενο E_b/N_o που εξασφαλίζει τη βέλτιστη λειτουργία του δικτύου, ως εξής:

$$M \approx \frac{G_p}{E_b/N_o}$$

Εξαιτίας, όμως, παρεμβολών από γειτονικές κυψέλες που εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα, υπάρχει υποβάθμιση στο πλήθος των χρηστών M , που λαμβάνεται υπόψη, με έναν παράγοντα β , που κυμαίνεται από 0,4 ως 0,55. Επιπλέον, λόγω ατελούς ελέγχου ισχύος, εισάγουμε και ένα παράγοντα επιδείνωσης α , που κυμαίνεται από 0,5 ως 0,9. Εξαιτίας της ασυνεχούς εκπομπής σε φωνητικές κλήσεις (voice activity factor), θα πρέπει επιπλέον να λάβουμε υπόψη ένα κέρδος ν , στο πλήθος των χρηστών, που κυμαίνεται από 0,45 ως 1,0. Τέλος, αν χρησιμοποιήσουμε κατευθυντικές κεραίες στο Σταθμό Βάσης, δημιουργώντας τομείς, θα έχουμε ένα κέρδος ως προς τις παρεμβολές που συμβολίζεται με λ . Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις υποβαθμίσεις και τα κέρδη στο πλήθος των χρηστών, ο μέσος αριθμός χρηστών στην κυψέλη είναι:

$$M \approx \frac{G_p}{E_b/N_o} \cdot \frac{1}{1 + \beta} \cdot \alpha \cdot \frac{1}{\nu} \cdot \lambda$$

Τυπικές μέσες τιμές για τις παραμέτρους που προαναφέρθηκαν είναι:

$$\beta = 0,5, \alpha = 0,85, \nu = 0,6, \lambda = 2,55.$$

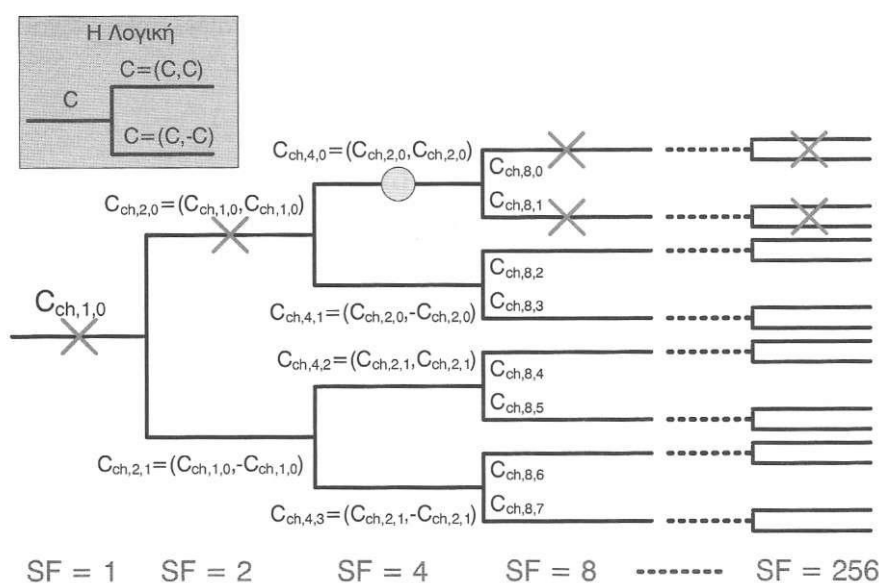
Οι Χρησιμοποιούμενοι Κώδικες στο WCDMA

Οι κώδικες διασποράς που χρησιμοποιούνται στο WCDMA είναι μοναδικοί, τουλάχιστο σε επίπεδο κυψέλης. Ενώ στο GSM ο διαχωρισμός μεταξύ δεδομένων και σηματοδοσίας, αλλά και ο διαχωρισμός των χρηστών γίνεται με απόδοση διαφορετικών χρονοσχισμών ή διαφορετικών συχνοτήτων, στο FDD WCDMA ο διαχωρισμός των μεταδόσεων από μια πηγή γίνεται με απόδοση διαφορετικών κωδίκων που λέγονται **κώδικες διαυλοποίησης (channelization codes)**. Οι κώδικες αυτοί είναι μεταβλητού μήκους και χρησιμοποιούνται για τη διασπορά φάσματος. Είναι ορθογώνιοι κώδικες, με την έννοια ότι η ετεροσυσχέτισή τους είναι μηδενική και κατά συνέπεια, σε ιδανικό περιβάλλον, δεν παρεμβάλλονται μεταξύ τους. Επιπλέον, αποτελούνται από άρτιο αριθμό από chips. Άρα και αποδοθεί κάποιος κώδικας σε μια σύνδεση, δεν μπορεί να αποδοθεί σε καμία άλλη σύνδεση. Κατά τη διάρκεια μιας σύνδεσης μπορεί να μεταβάλλεται ο ρυθμός μετάδοσης. Το σύστημα στην περίπτωση αυτή αλλάζει το SF και κατά συνέπεια τον κώδικα.

Στο FDD έχουμε 512 κώδικες στο DL και 256 στο UL, ενώ στο TDD έχουμε 16 κώδικες τόσο στο DL, όσο και στο UL. Το μήκος κώδικα αντιστοιχεί στον απαραίτητο SF και άρα επιλέγεται σε διακριτά βήματα. Για τον SF ισχύει: $SF = 2^k$, $k = 0, \dots, 8$. Ο SF δείχνει το μήκος του κώδικα, το οποίο είναι μεταβλητό ανάλογα με το ρυθμό μετάδοσης. Όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός, τόσο πιο μικρό είναι το μήκος του

κώδικα. Στο FDD, ο SF μπορεί να πάρει τιμές από 4 ως 256 στο uplink (1-66,7sec) και από 4 ως 512 στο downlink. Στο TDD ο SF μπορεί να πάρει τιμές από 1 ως 16 τόσο στο uplink, όσο και στο downlink. Επειδή οι κώδικες αυτοί έχουν μήκος και συμπεριφορά διασποράς που καθορίζεται από το SF, καλούνται Orthogonal Variable Spreading Factor Codes ή OVSF. Οι OVSF κώδικες οργανώνονται σε δένδρο (σχήμα 2.23). Αν ένας κώδικας αποδοθεί σε μια σύνδεση, τότε όλοι οι κώδικες που ακολουθούν, αλλά και οι προηγούμενοι στο δένδρο, δεν μπορούν πλέον να χρησιμοποιηθούν. Ο λόγος είναι βέβαια η διατήρηση της ορθογωνιότητας. Για παράδειγμα, αν χρησιμοποιείται ο κώδικας $C_{ch,4,0}$ τότε δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί κανένας κώδικας στο δέντρο που πηγάζει από τον $C_{ch,4,0}$, ούτε και κανείς από τους $C_{ch,2,0}$, $C_{ch,1,0}$. Να σημειώσουμε ότι στην πράξη δεν χρησιμοποιείται SF μικρότερος του 4. Χρησιμοποιώντας π.χ. τον κώδικα $C_{ch,8,1}$, έχουμε χρησιμοποιήσει το 12,5% των κωδικών. Μπορούμε να αποδώσουμε και άλλους κώδικες στην ίδια κυψέλη, μέχρι να φθάσουμε το 100%.

Ο πίνακας 2.24 παρουσιάζει τους SF και τους αντίστοιχους ρυθμούς συμβόλων αλλά και bit για τις δύο ζεύξεις, λαμβάνοντας υπόψη ότι σε συστήματα WCDMA FDD, στη μεν άνω ζεύξη έχουμε 1bit/symbol, ενώ στην κάτω ζεύξη έχουμε 2bits/symbol.



Σχήμα 2.23: Το δέντρο των OVSF κωδικών

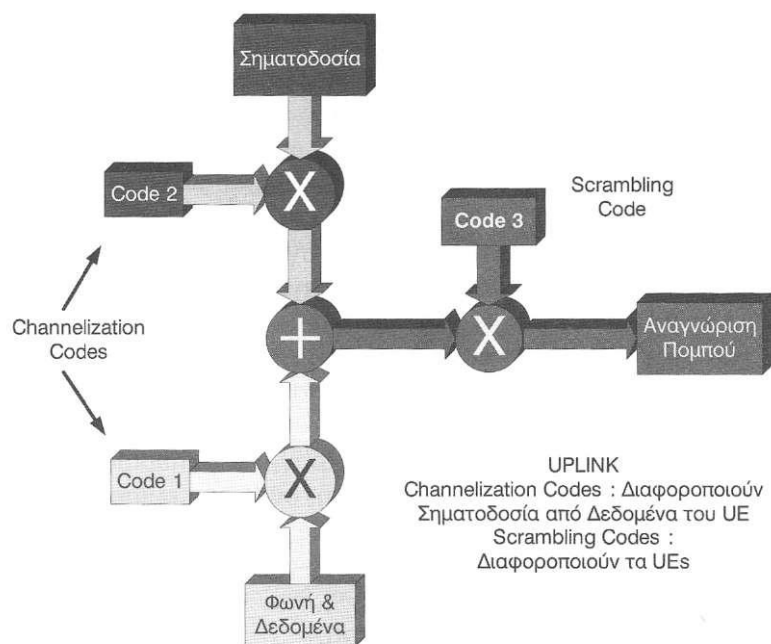
SF	Symbol Rate (Ksps)	Channel bit rate (Kbps) in UL	Channel bit rate (Kbps) in DL
512	7.5	-	15
256	15	15	30
28	30	30	60
64	60	60	120
32	120	120	240
16	240	240	480
8	480	480	960
4	960	960	1920

Σχήμα - Πίνακας 2.24: Σχέση SF και ρυθμών μετάδοσης σε UL και DL

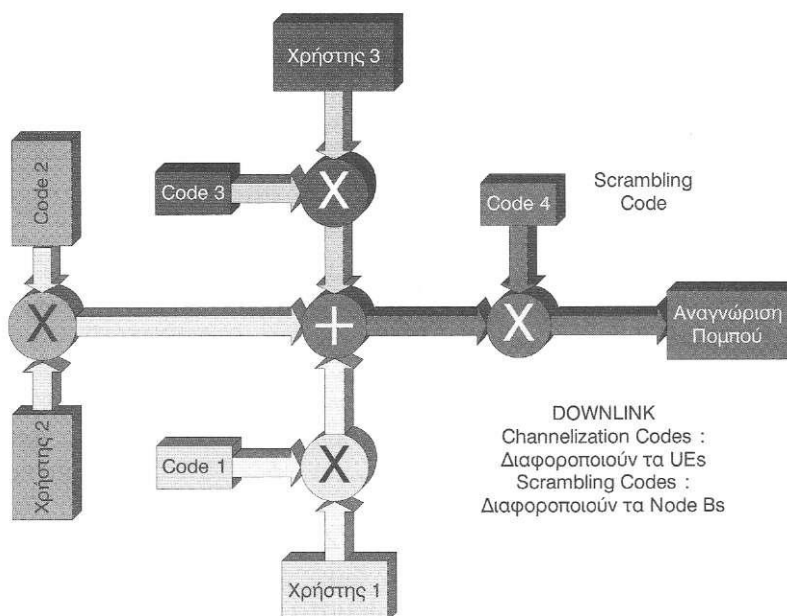
Για την αναγνώριση του Node B στο DL και του UE στο UL, εισάγεται ένας επιπλέον κώδικας, ο οποίος καλείται **κώδικας περίπλεξης (scrambling code)**, ο οποίος πολλαπλασιάζει το διεσπαρμένο σήμα προς εκπομπή. Αυτός ο κώδικας δεν προκαλεί κάποια επιπλέον διασπορά, απλά χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό των πομπών. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της χρήσης του κώδικα περίπλεξης είναι ότι η διαχείριση του δέντρου των κωδικών σε κάθε πομπό γίνεται πλέον ανεξάρτητα. Ένας ακόμη λόγος για τη χρήση του δεύτερου τύπου κώδικα είναι ότι η πλήρης ορθογωνιότητα είναι δυνατή μόνον αν ο συγχρονισμός στο δέκτη είναι ακριβής. Άρα οι OVFSF κώδικες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαχωρίσουν διαφορετικούς χρήστες στο DL, σε μια κυψέλη, αλλά όχι και στο UL, όπου η μεταβλητή καθυστέρηση από κάθε UE στο Node B έχει άμεση συνέπεια στην ορθογωνιότητα των μεταδόσεων. Αν βέβαια χρησιμοποιείται τεχνική αμφιδρόμησης TDD με συγχρονισμό στο UL, τότε θα ήταν εφικτός ο διαχωρισμός των χρηστών στο UL. Υπάρχει και ένας ακόμη βασικός λόγος χρησιμοποίησης των κωδικών περίπλεξης, που αφορά στο DL. Συγκεκριμένα, λόγω του μικρού πλήθους των διαθέσιμων OVFSF κωδικών, οι κώδικες αυτοί επαναχρησιμοποιούνται σε κάθε κυψέλη. Άρα, δεν είναι δυνατό να διαχωρίσουμε δύο Node B από τον OVFSF κώδικα και είναι εξαιρετικά πιθανό ένα UE που βρίσκεται στα άκρα της περιοχής κάλυψης ενός Node B να λαμβάνει δύο σήματα από τα δύο γειτονικά Node B με τον ίδιο κώδικα που προορίζονται όμως, για διαφορετικούς χρήστες.

Όλοι οι κώδικες περίπλεξης είναι ψευδοτυχαίες ακολουθίες (PN). Το μήκος τους είναι ($2^{18} - 1 = 262.143$) στην κάτω ζεύξη και ($2^{24} - 1 = 16.777.215$) στην άνω ζεύξη. Το μήκος τους αντιστοιχεί στο πλήθος των διαφορετικών διαθέσιμων

κωδικών. Από αυτούς τους κώδικες το UMTS επιλέγει τμήματα των 10msec. Αυτό το διάστημα αντιστοιχεί σε μήκος κώδικα με 38.400 chips ανά πλαίσιο. Παρατηρήστε (σχήμα 2.25) ότι στο UL οι κώδικες διαυλοποίησης διαχωρίζουν τη σηματοδοσία από τα δεδομένα προς αποστολή. Αντίστοιχα (σχήμα 2.26), στο DL οι κώδικες διαυλοποίησης χρησιμοποιούνται για να διαχωρίσουν τις εκπομπές προς διαφορετικούς χρήστες (UEs).



Σχήμα 2.25: Κώδικες στο Uplink



Σχήμα 2.26: Κώδικες στο Downlink

Όταν ο UE ενεργοποιείται, προσπαθεί να αναγνωρίσει τους καλύτερους Node B για να συνδεθεί. Επειδή οι κώδικες τους οποίους πρέπει να ανιχνεύσει είναι εξαιρετικά πολλοί ($2^{18} - 1$), έχουν οριστεί 8.192 κώδικες για ανίχνευση στο DL. Αυτοί έχουν χωριστεί σε 512 ομάδες των 16 κωδικών η κάθε μία. Η κάθε ομάδα αποτελείται από έναν πρωτεύοντα κώδικα και 15 δευτερεύοντες κώδικες. Οι πληροφορίες για την κυψέλη μεταδίδονται στον πρωτεύοντα κώδικα, ενώ όλα τα δεδομένα μεταδίδονται τόσο από τον πρωτεύοντα, όσο και από τους δευτερεύοντες κώδικες. Για επιπλέον απλοποίηση της ανίχνευσης των πρωτευόντων κωδικών, αυτοί έχουν χωριστεί σε 64 ομάδες των 8 κωδικών η κάθε μια. Το UE αναγνωρίζει ποια ομάδα πρωτευόντων κωδικών έχει χρησιμοποιηθεί, ακούγοντας το Synchronization Channel (SCH). Γνωρίζοντας την ομάδα, το UE μπορεί να βρει τον πρωτεύοντα κωδικό συσχετίζοντας την πληροφορία του Pilot Channel με τους 8 πιθανούς κωδικούς της ομάδας. Το UE βρίσκει επιπλέον πληροφορίες για τους κώδικες που χρησιμοποιούνται στην κυψέλη, ακούγοντας ένα κανάλι γενικών πληροφοριών.

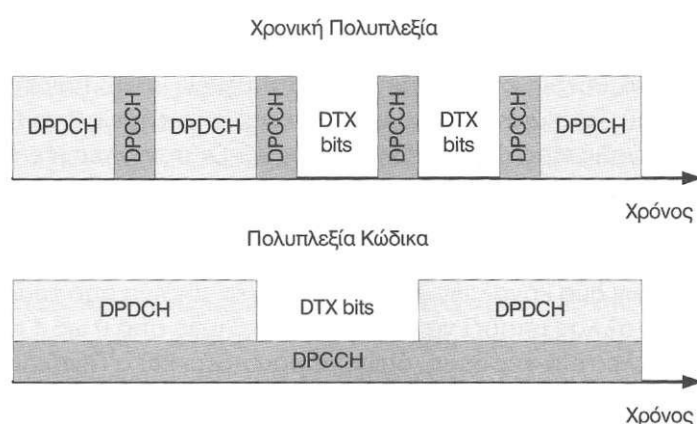
Θα πρέπει εδώ να επισημάνουμε ότι, σε πραγματικά περιβάλλοντα, η ορθογωνιότητα των κωδικών στο DL δεν είναι απόλυτη, οπότε το επίπεδο θορύβου-παρεμβολών αυξάνεται. Οι ενδοκυψελικές παρεμβολές οφείλονται στην ύπαρξη πολυδιαδρομικών συνιστωσών, ενώ οι διακυψελικές στην έλλειψη συγχρονισμού των Node B. Συνεπώς, πάντα απαιτείται έλεγχος ισχύος, ενώ στη μείωση των διακυψελικών παρεμβολών συνεισφέρει και η soft μεταπομπή.

Οι Τεχνικές Διαμόρφωσης στο WCDMA

Στο UTRAN υπάρχουν δύο αποκλειστικά φυσικά κανάλια: το DPCCCH που μεταφέρει πληροφορία ελέγχου και το DPDCH που μεταφέρει πληροφορία χρήστη. Αυτά τα δύο κανάλια πολυπλέκονται χρονικά στην κάτω ζεύξη. Το κανάλι ελέγχου θα πρέπει να είναι πάντα παρόν προκειμένου να υποστηρίζεται ο μηχανισμός ελέγχου της ισχύος. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο και με το κανάλι μεταφοράς δεδομένων χρήστη, αν ο χρήστης δεν έχει δεδομένα προς μετάδοση. Με τη χρονική πολυπλεξία των δύο αυτών καναλιών ουσιαστικά προκύπτει παλμική μετάδοση, δηλαδή απότομα διακοπτόμενη μετάδοση που γίνεται αντιληπτή από εξοπλισμό ήχου, όπως άλλα ακουστικά ή μεγάφωνα και είναι εξαιρετικά ενοχλητική, όπως και στο GSM. Στην κάτω ζεύξη, λόγω της συνεχούς αποστολής δεδομένων ελέγχου και σηματοδοσίας σε κοινά κανάλια, το φαινόμενο δεν αποτελεί πρόβλημα. Στην άνω ζεύξη όμως, όπου η συχνότητα μετάδοσης πληροφορίας ελέγχου ισχύος είναι 1,5KHz, υπάρχει σοβαρό πρόβλημα παρεμβολών σε συχνότητες που είναι ακουστικές. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο αυτό, αποφασίστηκε η πολυπλεξία κώδικα των δύο καναλιών ελέγχου και μεταφοράς δεδομένων χρήστη, όπως αυτή φαίνεται στο σχήμα 2.27. Παρατηρήστε ότι, εξαιτίας της συνεχούς

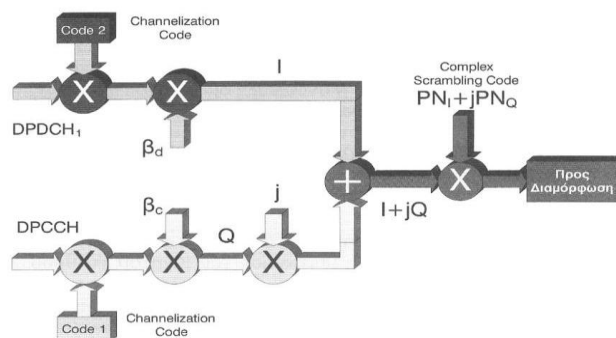
μετάδοσης του καναλιού σηματοδότησης, έχει αποφευχθεί η παλμική-διακοπτόμενη μετάδοση.

Ένα ακόμη πρόβλημα στην εκπομπή στην άνω ζεύξη είναι η κατανάλωση ισχύος και κατά συνέπεια, η κατανάλωση της μπαταρίας του Κινητού Σταθμού. Απαιτείται συνεπώς στο WCDMA μια τεχνική διαμόρφωσης που θα επιτυγχάνει να χρησιμοποιήσει τον ενισχυτή κοντά στο σημείο κορεσμού. Προκειμένου να συμβεί αυτό, θα πρέπει ο λόγος της μέγιστης προς τη μέση ισχύ (Peak to Average Power Ratio - PAPR) του διαμορφωμένου σήματος να είναι όσο μικρότερος γίνεται, προκειμένου να λειτουργεί με ασφάλεια ο ενισχυτής κοντά στο σημείο κορεσμού, χωρίς να κινδυνεύει να μετατοπιστεί η λειτουργία του στην περιοχή μη γραμμικής λειτουργίας.



Σχήμα 2.27: Χρονική πολυπλεξία και πολυπλεξία κώδικα των DPDCH και DPCCH

Μια αποδοτική τεχνική διαμόρφωσης που επιτυγχάνει το ζητούμενο είναι μια μιγαδική τεχνική περίπλεξης, που καλείται dual-channel QPSK. Με την τεχνική αυτή τα φυσικά κανάλια πολυπλέκονται στα ορθογωνικά κανάλια I και Q και συγκεκριμένα το DPCCH στο Q κανάλι, ενώ το πρώτο DPDCH στο I κανάλι, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.28. Επιπλέον κανάλια δεδομένων θα μοιράζονται από κοινού μεταξύ των I και Q καναλιών.



Σχήμα 2.28: I-Q πολυπλεξία κώδικα στην άνω ζεύξη

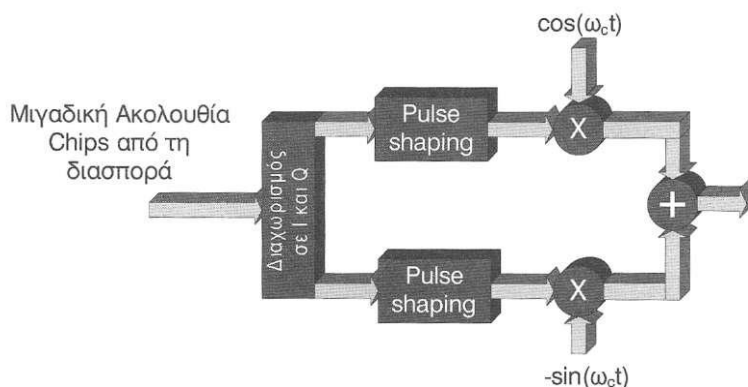
Οι συντελεστές κέρδους θ_d , θ_c χρησιμοποιούνται, προκειμένου να μπορούμε να θέτουμε διαφορετικές απαιτήσεις στην ποιότητα υπηρεσίας (QoS) κάθε καναλιού. Άρα, κανάλια με υψηλότερες απαιτήσεις στο QoS θα πολλαπλασιάζονται με μεγαλύτερο συντελεστή κέρδους. Οι συντελεστές αυτοί είτε υπολογίζονται στο φυσικό στρώμα είτε αποστέλλονται σε αυτό από υψηλότερα στρώματα. Επίσης, η τιμή τους μπορεί να αλλάζει σε κάθε πλαίσιο. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές υπάρχουν 16 δυνατές καταστάσεις (κωδικές λέξεις μήκους 4-bit) για τη σχέση της ισχύος των δύο καναλιών. Θέτοντας πάντα τον ένα από τους δύο συντελεστές στη μονάδα, ο άλλος μπορεί να πάρει κάποιες τιμές από 0 ως 1 ανάλογα με τον λόγο των δύο συντελεστών κέρδους, όπως παρουσιάζει και ο παρακάτω πίνακας 2.29.

Τιμές Σηματοδοσίας για το λόγο των συντελεστών κέρδους θ_d, θ_c	Λόγος των συντελεστών κέρδους θ_d, θ_c	Λόγος ισχύος σε dB υπολογισμένος ως $20\log_{10}$ (Λόγος Πλατών)
15	1,0000	0
14	0,9333	-0,5
13	0,8666	-1,2
12	0,8000	-1,9
11	0,7333	-2,7
10	0,6667	-3,5
9	0,6000	-4,4
8	0,5333	-5,5
7	0,4667	-6,6
6	0,4000	-8,0
5	0,3333	-9,5
4	0,2667	-11,5
3	0,2000	-14,0
2	0,1333	-17,5
1	0,0667	-23,5
0	Απενεργοποιημένο	Απενεργοποιημένο

Σχήμα - Πίνακας 2.29: Η κβαντοποίηση του λόγου των συντελεστών κέρδους

Εξαιτίας του γεγονότος ότι το κανάλι ελέγχου DPCCCH και το κανάλι δεδομένων DPDCH θα έχουν γενικά διαφορετικό επίπεδο ισχύος, ιδιαίτερα όταν ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνεται, τότε αν η μετάδοση στα δύο κανάλια I και Q γινόταν ανεξάρτητα, η διαμόρφωση θα μπορούσε να εκφυλιστεί, στην ακραία περίπτωση, σε BPSK. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται η μιγαδική περίπτωση μετά τη διασπορά, με τον κώδικα διαυλοποίησης.

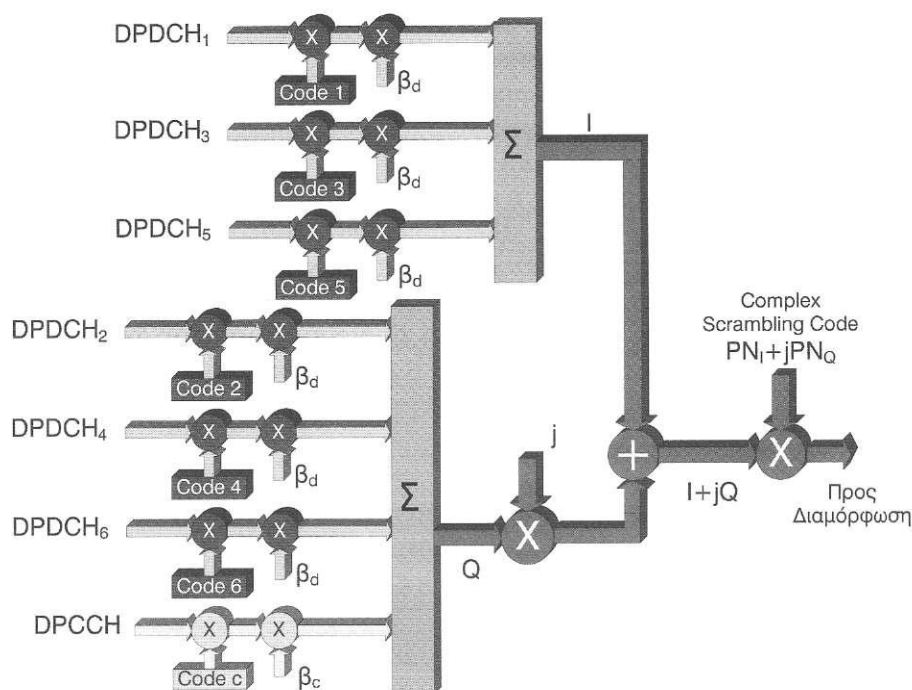
Η ραδιοεπαφή του UTRAN χρησιμοποιεί τη διαμόρφωση QPSK τόσο στην άνω ζεύξη, όσο και στην κάτω ζεύξη. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζουμε τη διαδικασία της διαμόρφωσης.



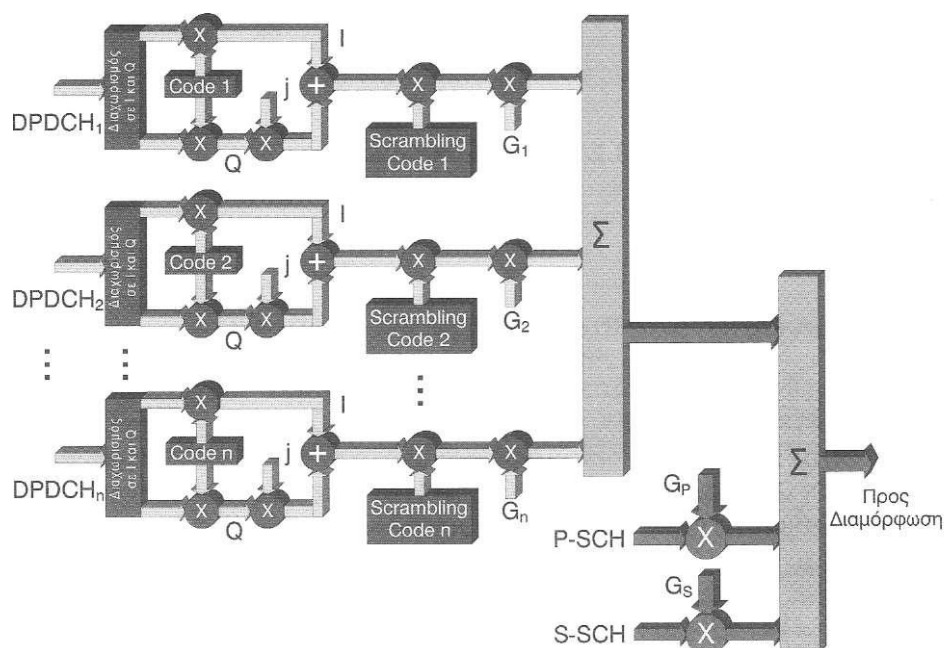
Σχήμα 2.30: Διαδικασία διαμόρφωσης

Συνδυασμός των Φυσικών Διαύλων

Στην άνω ζεύξη ένας Κινητός Σταθμός μπορεί να μεταδίδει ταυτόχρονα ένα DPCCH και μέχρι έξι DPDCH. Το μεν DPCCH μεταδίδεται στο Q κανάλι, ενώ τα DPDCH μεταδίδονται και στο I και στο Q, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.31. Οι συντελεστές κέρδους των DPDCH είναι κοινοί. Στην κάτω ζεύξη η διάταξη είναι διαφορετική και κάθε κανάλι δεδομένων έχει το δικό του συντελεστή κέρδους, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.32.



Σχήμα 2.31: Συνδυασμός φυσικών καναλιών στην άνω ζεύξη



Σχήμα 2.32: Συνδυασμός φυσικών καναλιών στην κάτω ζεύξη

Η Δομή του Πλαισίου

Τόσο στο FDD όσο και στο TDD υπάρχει κοινή δομή πλαισίου. Ένα πλαίσιο έχει διάρκεια 10msec και αποτελείται από 38400chips ($10 \cdot 10^{-3}(\text{sec}) \cdot 3840000(\text{chips/sec})$). Σε αντίθεση με το GSM, στο WCDMA δεν υπάρχει ιεραρχική δομή πλαισίων. Τα πλαίσια αριθμούνται με ένα Αριθμό Πλαισίου Συστήματος SFN (System Frame Number). Ο SFN χρησιμοποιείται για εσωτερικό συγχρονισμό στο UTRAN. Το πλαίσιο αποτελείται από 15 χρονοσχισμές, που κάθε μια περιέχει **$38400/15 = 2560\text{chips}$** . Στα FDD συστήματα, οι χρονοσχισμές εξυπηρετούν το συγχρονισμό και τη χρονική οργάνωση της σηματοδοσίας. Στα TDD συστήματα, το πλαίσιο χωρίζεται σε δύο υποπλαίσια, ένα για κάθε κατεύθυνση διάδοσης (UL και DL). Έτσι, είναι δυνατή η υποστήριξη ασύμμετρης τηλεπικοινωνιακής κίνησης στις δύο κατευθύνσεις. Στα TDD συστήματα μέχρι και 15 συνδρομητές μπορούν να αποδοθούν σε ένα χρονοπλαίσιο. Επίσης, είναι δυνατό πολλοί συνδρομητές να μοιράζονται ταυτόχρονα πολλές χρονοσχισμές, ενώ μπορούν να αποδοθούν περισσότερες της μιας χρονοσχισμές σε έναν συνδρομητή. Με τη δυναμική αυτή απόδοση είναι δυνατή η επίτευξη ρυθμών μέχρι και 2Mbps, για συνδρομητές που βρίσκονται κοντά στο Node B.

Τεχνικές Κωδικοποίησης Διαύλου στο Φυσικό Στρώμα

Στο φυσικό στρώμα του UMTS εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές κωδικοποίησης διαύλου για τη διόρθωση σφαλμάτων στη μετάδοση. Ο τύπος των τεχνικών είναι Forward Error Correction (FEC) και στο WCDMA έχουμε τρεις επιλογές: καθόλου κωδικοποίηση, συνελικτική κωδικοποίηση για δεδομένα με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης και turbo κωδικοποίηση για δεδομένα με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Η επιλογή της τεχνικής κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται στηρίζεται σε ένα κατώφλι ρυθμού μετάδοσης που έχει τεθεί ίσο με τα 300bits ανά TTI. Οι turbo τεχνικές δεν υποστηρίζονται υποχρεωτικά από όλα τα UEs. Ο πίνακας 2.33 παρουσιάζει τις τεχνικές και τους ρυθμούς κωδικοποίησης που εφαρμόζονται σε διαφορετικά κανάλια. Να σημειώσουμε ότι, επιπλέον των τεχνικών διόρθωσης, το WCDMA υποστηρίζει και τεχνικές ανίχνευσης σφαλμάτων, όπως το CRC, ώστε να είναι δυνατή η υποστήριξη υβριδικής τεχνικής ARQ (H-ARQ). Συνεπώς, αρχικά αναλαμβάνει η τεχνική FEC να διορθώσει όσα σφάλματα μπορεί και στη συνέχεια, με την τεχνική CRC, ελέγχεται αν τα πακέτα δεδομένων είναι απαλλαγμένα από σφάλματα. Τα ανώτερα στρώματα ενημερώνονται για όσα πακέτα περιέχουν ακόμη σφάλματα και δρομολογείται η επαναμετάδοσή τους. Συγκεκριμένα τη διαδικασία της επαναμετάδοσης την αναλαμβάνει το RLC.

Κανάλι	Τεχνική Κωδικοποίησης	Ρυθμός Κωδικοποίησης
BCH	Συνελικτική κωδικοποίηση	1/2
PCH		
RACH		
CPCH, DCH, DSCH, FACH		1/2 ή 1/3
	Turbo κωδικοποίηση	1/3
	Χωρίς κωδικοποίηση	

Σχήμα - Πίνακας 2.33: Τεχνικές κωδικοποίησης διαύλου στο φυσικό στρώμα

Ασφάλεια στο UMTS

Στο UMTS, με δεδομένα τα προβλήματα ασφάλειας των συστημάτων 2^{ης} γενιάς και ιδιαίτερα του GSM, έγινε μια προσπάθεια αντιμετώπισης των περισσότερων γνωστών προβλημάτων τόσο σε επίπεδο πρόσβασης των χρηστών στη ραδιοεπαφή, όσο και σε επίπεδο σύνδεσης εντός του δικτύου κορμού και διασύνδεσης με άλλα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Στην παρούσα παράγραφο γίνεται μια αναφορά στις μεθόδους που αναπτύχθηκαν για την αντιμετώπιση των προβλημάτων πρόσβασης των χρηστών στη ραδιοεπαφή. Τα πλέον σημαντικά χαρακτηριστικά της ασφάλειας πρόσβασης στο UMTS είναι τα εξής:

- Αμοιβαίος έλεγχος πιστοποίησης τόσο του χρήστη, όσο και του δικτύου.
- Χρήση προσωρινών ταυτοτήτων.
- Κρυπτογράφηση στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης.
- Προστασία της ακεραιότητας των μηνυμάτων σηματοδοσίας μέσα στο UTRAN.

Να σημειώσουμε ότι για την κρυπτογράφηση και την προστασία της ακεραιότητας χρησιμοποιούνται δημόσια διαθέσιμοι αλγόριθμοι, ενώ για την αμοιβαία πιστοποίηση χρησιμοποιούνται οι ειδικοί αλγόριθμοι του κάθε παρόχου.

Στη διαδικασία της αμοιβαίας πιστοποίησης συμμετέχουν τρεις οντότητες:

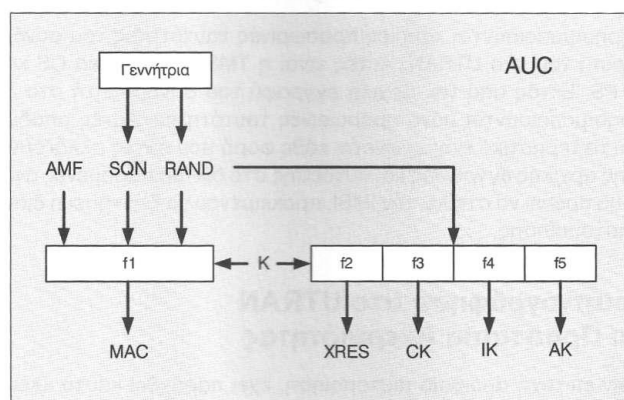
- Το οικείο δίκτυο (Home Network - HN)
- Το δίκτυο που το εξυπηρετεί (Serving Network - SN)
- Το τερματικό και συγκεκριμένα η κάρτα USIM

Το SN ελέγχει την ταυτότητα του συνδρομητή, όπως στο GSM και το τερματικό ελέγχει αν το SN είναι αδειοδοτημένο από το HN για τον παραπάνω έλεγχο. Το βασικό στοιχείο της πιστοποίησης είναι ένα κλειδί που καλείται master key K και το οποίο είναι γνωστό στη USIM και στους καταχωρητές του δικτύου. Το κλειδί αυτό είναι μήκους 128bits και δεν αποστέλλεται ποτέ στον αέρα. Όλα τα επιμέρους κλειδιά για τον έλεγχο ακεραιότητας και την κρυπτογράφηση υπολογίζονται με βάση το master key.

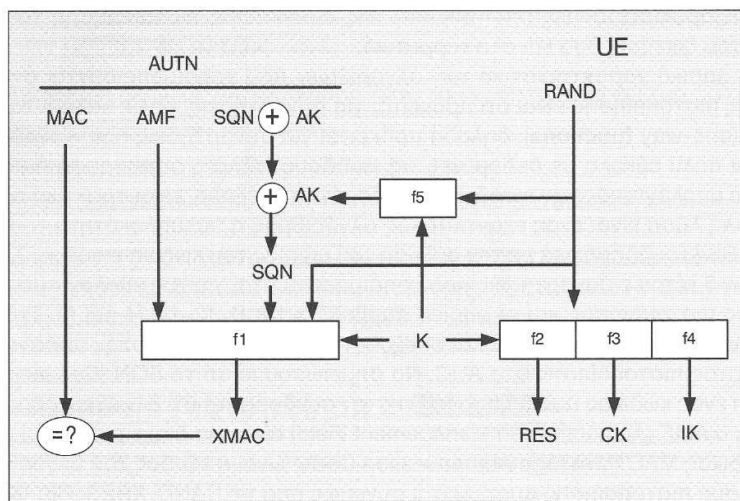
Κατά την πρόσβαση ενός χρήστη, το VLR ή το SGSN θα παραλάβει την ταυτότητα IMSI ή την προσωρινή ταυτότητα TMSI του συνδρομητή. Με δεδομένη αυτή την ταυτότητα, το VLR ή το SGSN θα επικοινωνήσει με το AUC, προκειμένου να ζητήσει δεδομένα πιστοποίησης για τον συνδρομητή. Το AUC, με χρήση κατάλληλων αλγορίθμων και στηριζόμενο στη γνώση τόσο της αποσταλμένης ταυτότητας, όσο και του master key, υπολογίζει ένα διάνυσμα πιστοποίησης για το χρήστη, το οποίο και στέλνει στο VLR/SGSN. Με τη λήψη του διανύσματος αυτού, το SN στέλνει στο τερματικό αίτηση για πιστοποίηση που περιλαμβάνει και τμήμα της

πληροφορίας που έστειλε το AUC (RAND και AUTN). Με βάση αυτή την πληροφορία και το master key που έχει αποθηκευμένο στην κάρτα USIM, το τερματικό είναι σε θέση να υπολογίσει το ίδιο διάνυσμα πιστοποίησης, να συγκρίνει την παράμετρο AUTN με τη ληφθείσα AUTN και σε περίπτωση επιτυχούς σύγκρισης να αποστείλει πίσω στο VLR/SGSN την RES. Το VLR/SGSN θα συγκρίνει τη ληφθείσα RES με την αναμενόμενη, που περιείχε το διάνυσμα πιστοποίησης. Σε περίπτωση επιτυχούς σύγκρισης, η πιστοποίηση τελειώνει. Τα κλειδιά για την κρυπτογράφηση και τον έλεγχο της ακεραιότητας των δεδομένων CK και IK προκύπτουν ως υποπροϊόντα της διαδικασίας πιστοποίησης τόσο στην πλευρά του δικτύου, όσο και στο τερματικό.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία της πιστοποίησης είναι ότι πρόκειται για συναρτήσεις, όπως καλούνται, **μονόδρομες (one-way functions)**, δηλαδή πρόκειται για συναρτήσεις που η έξοδος υπολογίζεται πολύ εύκολα με δεδομένες τις εισόδους, αλλά η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή ο υπολογισμός των εισόδων με δεδομένη την έξοδο, είναι πρακτικά αδύνατη. Η πιο απλή λύση είναι ένας εξαντλητικός αλγόριθμος η πολυπλοκότητα του οποίου όμως αυξάνεται δραματικά με την αύξηση του μήκους του κώδικα εισόδου. Συνολικά υπάρχουν 5 τέτοιες συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του διανύσματος πιστοποίησης και οι οποίες συμβολίζονται f1, f2, f3, f4 και f5. Στο σχήμα 2.34 παρουσιάζονται οι είσοδοι και οι έξοδοι κάθε αλγορίθμου στην παραγωγή του διανύσματος πιστοποίησης στο AUC. Να σημειώσουμε ότι το SQN (Sequence Number) είναι ένας κώδικας που θα αποδείξει στον συνδρομητή ότι δεν έχει χρησιμοποιηθεί ξανά, ο AMF (Authentication Management Field) είναι μια διαχειριστική ακολουθία και ο κώδικας MAC (Message Authentication Code) είναι η έξοδος του αλγορίθμου f1. Το διάνυσμα πιστοποίησης αποτελείται συνεπώς από τις RAND, XRES, CK, IK, AK και την AUTN, που προκύπτει από τις SQN, AK, AMF και MAC. Στο σχήμα 2.35 παρουσιάζονται οι είσοδοι και οι έξοδοι κάθε αλγορίθμου στην παραγωγή του διανύσματος πιστοποίησης, στο τερματικό. Να σημειώσουμε ότι το σύμβολο της άθροισης μέσα στον κύκλο σημαίνει πράξη XOR.



Σχήμα 2.34: Η παραγωγή του διανύσματος πιστοποίησης στο AUC



Σχήμα 2.35: Η παραγωγή του διανύσματος πιστοποίησης στο UE

Στο UMTS χρησιμοποιούνται κάποιες προσωρινές ταυτότητες του συνδρομητή για την αναγνώρισή του στο UTRAN. Αυτές είναι η TMSI στον τομέα CS και η P-TMSI στον τομέα PS. Εκτός από την αρχική εγγραφή του συνδρομητή στο δίκτυο, στη συνέχεια χρησιμοποιούνται μόνο προσωρινές ταυτότητες. Αυτές αποδίδονται από το δίκτυο και το τερματικό ενημερώνεται κάθε φορά που αυτές αλλάζουν. Βέβαια το πρόβλημα της αρχικής εγγραφής και σύνδεσης στο δίκτυο παραμένει, αφού αναγκαστικά το UE θα πρέπει να στείλει την IMSI, προκειμένου να ξεκινήσει η διαδικασία της αμοιβαίας πιστοποίησης. Μετά από την επιτυχή αμοιβαία πιστοποίηση, έχει παραχθεί και το κλειδί της κρυπτογράφησης CK (Cipher Key) τόσο στο τερματικό, όσο και στο CN. Η διαδικασία της κρυπτογράφησης και της αποκρυπτογράφησης λαμβάνει χώρα στο τερματικό και στο RNC. Υπάρχει μόνο ένας αλγόριθμος διαθέσιμος στο UMTS (R99) που καλείται f8. Τέλος, η προστασία της ακεραιότητας των μηνυμάτων σηματοδοσίας είναι εξαιρετικά σημαντική στο UTRAN και υλοποιείται στο τερματικό και στο RNC, όπως και η κρυπτογράφηση, στο στρώμα RRC. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται είναι ο f9 που δέχεται ως δεδομένο μεταξύ άλλων το κλειδί ακεραιότητας IK (Integrity Key) που παράχθηκε κατά τη διαδικασία πιστοποίησης.

2.3 3GPP Long Term Evolution (LTE)

2.3.1 Εισαγωγικά περί 3GPP Long Term Evolution (LTE)

Το 3GPP Long Term Evolution (LTE) είναι το τελευταίο πρότυπο που έπεται της σειράς τεχνολογιών δικτύων κινητής τηλεφωνίας GSM/EDGE και UMTS/HSPA. Είναι προϊόν του 3rd Generation Partnership Project (3GPP), και το όνομα του έχει προτυποποιηθεί από έναν από τους συμμετέχοντες οργανισμούς, το **Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων** (European Telecommunications Standards Institute (ETSI)).

Το LTE είναι το τελευταίο βήμα στη μετάβαση από τις κυψελωτές 3G υπηρεσίες (δηλ. GSM → UMTS → HSPA → LTE). Πολλές φορές το LTE αναφέρεται πιο επίσημα και ως Evolved UMTS Terrestrial Radio Access (E-UTRA) και Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) (Δίκτυο Πρόσβασης αυτού). Παρακάτω φαίνονται οι στόχοι του LTE:

- Αυξημένες ταχύτητες κορυφής δεδομένων για uplink/downlink.
- Κλιμακωτό εύρος ζώνης.
- Βελτιωμένη φασματική απόδοση.
- Μεταφορά βασισμένη στο IP.

Το LTE, με τα μεγάλα πλεονεκτήματα που διαθέτει σε σύγκριση με τις προηγούμενες τεχνολογίες, θα δώσει νέα διάσταση στις ήδη υπάρχουσες πολυμεσικές εφαρμογές και θα επιτρέψει την ανάπτυξη νέων και ακόμη πιο απαιτητικών εφαρμογών που θα εκμεταλλεύονται το πολλαπλάσιο εύρος ζώνης του συστήματος. Αναφέρονται συνοπτικά κάποιες από αυτές: διαδραστική τηλεόραση, προηγμένα παιχνίδια, επαγγελματικές υπηρεσίες.

2.3.2 Περιγραφή της προδιαγραφής του συστήματος LTE

Η προδιαγραφή του LTE έχει οριστικοποιηθεί στο 3GPP Release 8. Συγκεκριμένα, η προδιαγραφή αναφέρεται σε ρυθμούς κορυφής downlink τουλάχιστον 100Mbps, uplink τουλάχιστον 50Mbps, και χρόνους RAN round-trip λιγότερο από 10 ms. Το LTE υποστηρίζει κλιμακούμενο εύρος ζώνης, από 1,4MHz σε 20MHz και υποστηρίζει και FDD (Frequency Division Duplexing) και TDD (Time Division Duplexing).

Μέρος της προδιαγραφής του LTE αποτελεί η αρχιτεκτονική του core-δικτύου (System Architecture Evolution), ένα επίπεδο IP κεντρικό δίκτυο που σχεδιάστηκε για να αντικαταστήσει το GPRS Core Network και να εξασφαλίσει υποστήριξη για, και κινητικότητα μεταξύ, επακόλουθων τεχνολογιών ή μη-GPP συστήματα, όπως για παράδειγμα το GPRS και το WiMAX αντίστοιχα.

Τα κύρια πλεονεκτήματα του LTE είναι η υψηλή ρυθμοαπόδοση, ο χαμηλός χρόνος λανθάνουσας καθυστέρησης(latency), η υψηλή χωρητικότητα κυψέλης και τομέα, η συνύπαρξη FDD και TDD στην ίδια πλατφόρμα, και τέλος, η απλή αρχιτεκτονική core-δικτύου, που έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερο λειτουργικό κόστος.

Category		1	2	3	4	5
Peak rate Mbps	DL	10	50	100	150	300
	UL	5	25	50	50	75
Capability for physical functionalities						
RF bandwidth		20MHz				
Modulation	DL	QPSK, 16QAM, 64QAM				
	UL	QPSK, 16QAM				QPSK, 16QAM, 64QAM
Multi-antenna						
2 Rx diversity		Assumed in performance requirements.				
2x2 MIMO		Not supported	Mandatory			
4x4 MIMO		Not supported				Mandatory

Σχήμα - Πίνακας 2.36:
Προδιαγραφές του LTE, όπως παρουσιάζονται στο 3GPP release 8

2.3.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά του LTE.

Ένα από τα κύρια στοιχεία του LTE είναι η χρήση του **OFDM**, δηλαδή της (Orthogonal Frequency Division Multiplex) (Ορθογωνική Πολύπλεξη Διαίρεσης Συχνότητας) σαν φυσικό στρώμα, και τα αντίστοιχα σχήματα πολλαπλής πρόσβασης, **OFDMA** (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) (Σχήμα Πολλαπλής Πρόσβασης Ορθογωνικής Διαίρεσης Συχνότητας) και **SC-FDMA** (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) (Σχήμα Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Συχνότητας Μονού Φέροντος).

LTE OFDM

Η Ορθογωνική Πολύπλεξη Διαίρεσης Συχνότητας (OFDM) είναι μία μέθοδος μετάδοσης που χρησιμοποιεί ένα μεγάλο αριθμό φερόντων, διαμορφωμένων με χαμηλό ρυθμό data, τα οποία προκύπτουν από φασματική κατάτμηση του καναλιού. Κανονικά, θα περίμενε κανείς ότι μεταξύ αυτών των σημάτων θα υπήρχε ισχυρή παρεμβολή, αλλά κάνοντας τα γειτονικά σήματα ορθογώνια μεταξύ τους, δεν υπάρχει αμοιβαία παρεμβολή. Αυτό επιτυγχάνεται, έχοντας την απόσταση μεταξύ των φερόντων ίση με το αντίστροφο της διάρκειας συμβόλου. Αυτό σημαίνει ότι όταν τα σήματα αποδιαμορφώνονται, θα έχουν έναν ολόκληρο αριθμό κύκλων στη διάρκεια συμβόλου, και η συνεισφορά τους θα δίνει άθροισμα μηδέν - με άλλα λόγια δε θα υπάρχει διασυμβολική παρεμβολή. Τα προς μετάδοση δεδομένα διαμοιράζονται σε όλα τα φέροντα, και αυτό σημαίνει ότι με τη χρήση τεχνικών διόρθωσης λαθών, αν κάποια από τα φέροντα χαθούν λόγω φαινομένων διαλείψεων πολλαπλών διαδρομών, τότε τα δεδομένα μπορούν να ανακατασκευαστούν. Επιπλέον, τα προς μετάδοση δεδομένα διαμοιράζονται σε όλα τα φέροντα και αυτό σημαίνει ότι με τη χρήση τεχνικών διόρθωσης λαθών, εάν κάποια από τα φέροντα χαθούν λόγω φαινομένων πολυόδης μετάδοσης, τα δεδομένα μπορούν να ανακατασκευαστούν. Τέλος, διατηρώντας χαμηλό ρυθμό δεδομένων που μεταδίδονται στο σύνολο των φερόντων, επιτυγχάνεται μείωση των επιδράσεων λόγω ανακλάσεων και διασυμβολικής παρεμβολής.

Η πραγματική εφαρμογή της τεχνολογίας είναι διαφορετική μεταξύ downlink (base station → mobile) και uplink (mobile → base station) ως αποτέλεσμα των διαφορετικών απαιτήσεων μεταξύ των δύο κατευθύνσεων και του εξοπλισμού σε κάθε άκρο. Παρόλα αυτά, το OFDM επιλέχθηκε ως το φυσικό στρώμα επειδή είναι πολύ ανθεκτικό στην παρεμβολή. Επίσης, τα τελευταία χρόνια, έχει ενισχυθεί η εμπειρία στη χρήση του εξαιτίας των διαφόρων μεθόδων ευρυεκπομπής που το χρησιμοποιούν, όπως επίσης και το Wi-Fi και το WiMAX. Το OFDM είναι επιπλέον

ένα σχήμα διαμόρφωσης απολύτως κατάλληλο για την υποστήριξη μεγάλου ρυθμού δεδομένων – μία θεμελιώδης απαίτηση του LTE. Τέλος, το OFDM μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε FDD όσο και σε TDD σχήματα. Αυτό αποτελεί ένα επιπλέον πλεονέκτημα.

Το OFDM χρησιμοποιείται σε διάφορα άλλα συστήματα, από WLAN, WiMAX μέχρι τεχνολογίες ευρυεκπομπής, όπως το DVB και το DAB. Το OFDM έχει πολλά πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένου της ευρωστίας στις διαλείψεις πολλαπλής διαδρομής και στην παρεμβολή. Επιπλέον, παρόλο που μπορεί να φαίνεται μια ιδιαίτερα περίπλοκη μέθοδος διαμόρφωσης, μπορούμε όμως να επωφεληθούμε από διάφορες τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας σήματος. Για αυτόν το λόγο, η χρήση των αντίστοιχων σχημάτων πολλαπλής πρόσβασης OFDMA και SC-FDMA είναι λογικές επιλογές για το πρότυπο του κυψελωτού LTE. Μολονότι χρησιμοποιούνται οι βασικές αρχές του OFDM, ταυτόχρονα, έχει γίνει προσαρμογή κάποιων παραμέτρων ώστε να ικανοποιούνται συγκεκριμένες απαιτήσεις του LTE. Παραμένει, όμως, ίδια η αρχή της χρήσης πολλαπλών φερόντων, όπου το καθένα φέρει έναν χαμηλό ρυθμό data.

Εύρος Ζώνης και χαρακτηριστικά Καναλιού LTE

Μία από τις βασικές παραμέτρους που σχετίζονται με τη χρήση του OFDM, στο LTE, είναι η επιλογή του εύρους ζώνης. Τα διαθέσιμα εύρη ζώνης επηρεάζουν μια σειρά από αποφάσεις, συμπεριλαμβανομένου των αριθμών των φερόντων που μπορούν να «φιλοξενηθούν» στο σήμα του OFDM, και αυτό με τη σειρά του επηρεάζει διάφορες παραμέτρους, όπως το μήκος συμβόλου κτλ. Το LTE ορίζει έναν αριθμό από εύρη ζώνης διαύλου. Προφανώς όσο μεγαλύτερο το εύρος ζώνης, τόσο μεγαλύτερη η χωρητικότητα του διαύλου. Τα εύρη ζώνης που έχουν επιλεγεί για το LTE είναι:

- 1) 1,4 MHz
- 2) 3 MHz
- 3) 5 MHz
- 4) 10 MHz
- 5) 15 MHz
- 6) 20 MHz

Τα υποφέροντα εκτείνονται σε απόσταση 15kHz το ένα από το άλλο. Για να διατηρηθεί η ορθογωνιότητα, αυτό δίνει ρυθμό συμβόλου της τάξης των $1 / 15 \text{ kHz} = 66,7 \mu\text{s}$. Κάθε υποφέρον δύναται να μεταφέρει δεδομένα με μέγιστο ρυθμό 15ksps (kilosymbols per second). Αυτό δίνει σε ένα σύστημα εύρους ζώνης 20MHz ένα ρυθμό συμβόλων της τάξης των 18Msps. Με τη σειρά του, αυτό δύναται να παρέχει

ένα ρυθμό δεδομένων της τάξης των 108 Mbps, καθώς το κάθε σύμβολο σε σχήμα 64QAM μπορεί να αναπαραστήσει έξι bits.

Εκ πρώτης όψεως μπορεί να φαίνεται ότι αυτοί οι ρυθμοί δεν ταυτίζονται με τα επίσημα στοιχεία που έχουν προσδιοριστεί από τις προδιαγραφές του LTE. Ο λόγος είναι ότι οι πραγματικοί ρυθμοί κορυφής (peak data rates) προκύπτουν αφού προηγουμένως έχει αφαιρεθεί η πλεονάζουσα πληροφορία (overheads) κωδικοποίησης και ελέγχου, ενώ υπάρχουν και κέρδη από παράγοντες όπως η χωρική πολυπλεξία, κτλ.

LTE OFDM κυκλικό πρόθεμα (Cyclic Prefix)

Ένας από τους κύριους λόγους για τη χρήση του OFDM ως σχήμα διαμόρφωσης στο LTE (και σε πολλά άλλα ασύρματα συστήματα) είναι η ανθεκτικότητα στην *καθυστέρηση διασποράς (delay spread)* λόγω πολυδιαδρομικής μετάδοσης. Όμως, είναι ακόμη αναγκαίο να εφαρμοστούν μέθοδοι προσθήκης ανθεκτικότητας στο σύστημα. Αυτό βοηθάει στην αντιμετώπιση της διασυμβολικής παρεμβολής (ISI) που εμφανίζεται ως επακόλουθο της πολύοδης μετάδοσης. Σε περιοχές όπου περιμένουμε να έχουμε σημαντική διασυμβολική παρεμβολή, μπορούμε να την αποφύγουμε με την εισαγωγή ενός χρόνου προστασίας (guard period) στην αρχή κάθε συμβόλου δεδομένων. Είναι μετά εφικτό να γίνει αντιγραφή ενός τμήματος από το τέλος του συμβόλου στην αρχή. Αυτό είναι γνωστό ως κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix, CP). Ο δέκτης μπορεί τότε να δειγματοληπτήσει την κυματομορφή σε βέλτιστο χρόνο και να αποφύγει κάθε διασυμβολική παρεμβολή που τυχόν να είχε προκληθεί από ανακλώμενες εκδοχές του κύματος που έχουν καθυστερήσει κατά χρόνο όση η διάρκεια του κυκλικού προθέματος.

Το μήκος του κυκλικού προθέματος, CP είναι σημαντικός παράγοντας. Αν το CP έχει μικρό μήκος, τότε δεν θα είναι σε θέση να αντιμετωπίσει το delay spread λόγω πολύοδης μετάδοσης. Απεναντίας, αν το μήκος είναι πολύ μεγάλο, τότε θα υπάρξει μείωση της δυνατότητας διέλευσης δεδομένων (data throughput). Για το LTE, το πρότυπο μήκος του κυκλικού προθέματος έχει επιλεγεί να είναι 4,69μs. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα να υποστηρίξει εκδοχές της διαδρομής (path) που διαφέρουν μέχρι και 1,4km. Η διάρκεια συμβόλου στο LTE έχει οριστεί σε 66,7μs. Το μήκος συμβόλου ορίζεται από το γεγονός ότι για τα OFDM συστήματα το μήκος συμβόλου είναι ισοδύναμο με το αντίστροφο με το φασματικό περιεχόμενο των φερόντων (carrier spacing), για να επιτύχουμε ορθογωνιότητα. Με ένα φασματικό περιεχόμενο των 15kHz, λαμβάνουμε μήκος συμβόλου των 66,7μs.

LTE OFDMA στην κάτω ζεύξη (downlink)

Το σήμα OFDM που χρησιμοποιείται στο LTE αποτελείται από 2048 (κατά το μέγιστο) διαφορετικά υπό-φέροντα, που έχουν φασματικό περιεχόμενο 15kHz. Παρόλο που είναι υποχρεωτικό για τις κινητές συσκευές να έχουν τη δυνατότητα να λαμβάνουν όλα τα 2048 διαφορετικά υποφέροντα, απεναντίας δεν είναι απαραίτητο ο σταθμός βάσης να τα μεταδίδει όλα, αλλά αρκεί να έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει τη μετάδοση 72 εξ αυτών. Κατ' αυτόν τον τρόπο, όλα τα κινητά τερματικά θα μπορούν να επικοινωνούν σε οποιονδήποτε σταθμό βάσης.

Στο OFDM σήμα μπορεί να γίνει επιλογή μεταξύ τριών ειδών διαμόρφωσης:

1. **QPSK (= 4QAM)** 2 bits ανά σύμβολο
2. **16QAM** 4 bits ανά σύμβολο
3. **64QAM** 6 bits ανά σύμβολο

Το ακριβές σχήμα επιλέγεται βάσει των συνθηκών που επικρατούν. Τα χαμηλότερα σχήματα διαμόρφωσης, (QPSK) δεν απαιτούν υψηλό σηματοθορυβικό λόγο (συγκριτικά με τα άλλα), αλλά έχουν το μειονέκτημα ότι υποστηρίζουν χαμηλό ρυθμό μετάδοσης data. Μόνο υπό την προϋπόθεση ότι έχει επιτευχθεί υψηλός σηματοθορυβικός λόγος, γίνεται να χρησιμοποιηθούν τα υψηλότερα σχήματα διαμόρφωσης.

Στην κάτω ζεύξη, τα υποφέροντα χωρίζονται σε resource block. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα να διαχωρίζει σε τμήματα τα data προς ένα συγκεκριμένο αριθμό υποφερόντων.

Τα resource blocks αποτελούνται από 12 υποφέροντα, ανεξαρτήτως του συνολικού εύρους ζώνης του LTE σήματος. Ταυτόχρονα, καλύπτουν μία χρονοσχισμή (slot) στο πλαίσιο του χρόνου (time frame). Αυτό σημαίνει ότι διαφορετικά εύρη ζώνης του LTE σήματος θα έχουν διαφορετικούς αριθμούς από resource blocks.

Channel bandwidth (MHz)	1,4	3	5	10	15	20
Number of resource blocks	6	15	25	50	75	100

Σχήμα – Πίνακας 2.37: Αντιστοιχία εύρους ζώνης LTE και αριθμού χρονοσχισμών

LTE SC-FDMA στην άνω ζεύξη (uplink)

Για την άνω ζεύξη του LTE, χρησιμοποιείται μια διαφορετική αρχή, όσον αφορά στην τεχνική πρόσβασης. Παρόλο που και εδώ γίνεται πάλι χρήση της τεχνολογίας OFDMA, η υλοποίηση ονομάζεται Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Συχνότητας Μονού Φέροντος (**Single Carrier Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA**). Ένας από τους κύριους παράγοντες που επηρεάζει όλα τα κινητά τερματικά είναι ο χρόνος διάρκειας της μπαταρίας. Παρόλο που η απόδοση των μπαταριών ολοένα και βελτιώνεται, παραμένει αναγκαίο να επιδιώκουμε τα τερματικά να ξοδεύουν όσο το δυνατόν λιγότερη ενέργεια από τη μπαταρία. Ο RF ενισχυτής (RF power amplifier) που μεταδίδει το σήμα ραδιοσυχνότητας διαμέσου της κεραίας, προς το σταθμό βάσης, με τον τελευταίο να αποτελεί το τμήμα με τη μεγαλύτερη διαθέσιμη ενέργεια στο σύστημα, είναι αναγκαίο να λειτουργεί με όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικό τρόπο γίνεται. Το πόσο αποτελεσματικά θα λειτουργήσει εξαρτάται σημαντικά από το σχήμα διαμόρφωσης ραδιοσυχνότητας που θα χρησιμοποιηθεί και τη μορφή του ίδιου του σήματος. Τα σήματα που έχουν υψηλό πηλίκο κορυφής προς μέση τιμή (peak to average ratio) και απαιτούν γραμμική ενίσχυση, δεν προσαρμόζονται στη χρήση ενός αποδοτικού RF power amplifier. Για το συγκεκριμένο λόγο, είναι σημαντικό να εφαρμοστεί μια μέθοδος μετάδοσης που να έχει σχεδόν σταθερή ενέργεια κατά τη λειτουργία. Δυστυχώς, το OFDM έχει υψηλό λόγο κορυφής προς μέσο όρο. Αυτό, ενώ δεν είναι πρόβλημα για το σταθμό βάσης, είναι όμως μη-αποδεκτό για ένα κινητό τερματικό. Για αυτό το λόγο το LTE χρησιμοποιεί ένα υβριδικό σχήμα διαμόρφωσης, γνωστό και ως **SC-FDMA - Single Carrier Frequency Division Multiplex**. Αυτό συνδυάζει τα πλεονεκτήματα ως προς το λόγο peak to average που διατίθενται από συστήματα μονού φέροντος, με την ευρωστία ως προς την παρεμβολή λόγω πολύοδης μετάδοσης, και την ευελιξία ως προς την κατανομή σε υποφέρουσες συχνότητες που παρέχει το OFDM.

LTE MIMO

Η βασική αρχή του **MIMO**, (**M**ultiple **I**nput **M**ultiple **O**utput, Πολλαπλές Είσοδοι Πολλαπλές Έξοδοι) συνίσταται στη *αξιοποίηση της διασποράς του σήματος λόγω πολύοδης μετάδοσης (multipath signal propagation)*, που είναι εμφανής σε όλες της επίγειες επικοινωνίες. Έτσι, η ύπαρξη διαφορετικών διαδρομών για το σήμα, αντί να παράγει παρεμβολή, χρησιμοποιείται προς όφελος του συστήματος επικοινωνίας.

Δύο σημαντικοί περιορισμοί που συναντώνται στους τηλεπικοινωνιακούς διαύλους είναι η παρεμβολή λόγω πολύοδης μετάδοσης, και ο πεπερασμένος ρυθμός μετάδοσης, ως συνέπεια του νόμου Shannon. Το MIMO παρέχει έναν τρόπο

αξιοποίησης αυτών των πολλαπλών διαδρομών για το σήμα που υφίστανται μεταξύ ενός πομπού και ενός δέκτη, προς βελτίωση της *ρυθμοαπόδοσης* (data throughput) ενός δεδομένου διαύλου συγκεκριμένου εύρους ζώνης. Με τη χρήση πολλαπλών κεραιών τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη, παράλληλα με ψηφιακή επεξεργασία σήματος ορισμένης πολυπλοκότητας, η τεχνολογία MIMO δίνει στο σύστημα τη δυνατότητα να στήσει πολλαπλά data streams πάνω στον ίδιο δίαυλο, και επομένως να αυξήσει τη χωρητικότητα δεδομένων του διαύλου. Το MIMO χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε πολλές τεχνολογίες υψηλού ρυθμού μετάδοσης, όπως το Wi-Fi και άλλες ασύρματες και κυψελωτές τεχνολογίες.

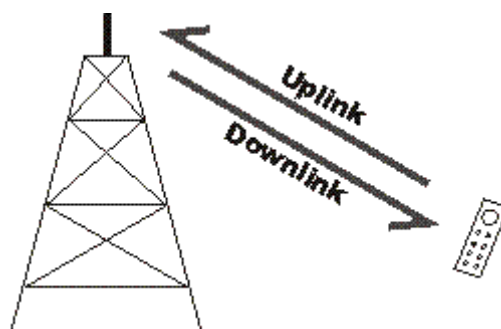
Τα σχήματα που εφαρμόζονται στο LTE διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ άνω και κάτω ζεύξης. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι για διατήρηση του κόστους κατασκευής των κινητών τερματικών σε χαμηλά επίπεδα, επειδή ο αριθμός των κινητών τερματικών είναι πάντα πολύ μεγαλύτερος από αυτόν των σταθμών βάσης, με αποτέλεσμα το κόστος κατασκευής τους να είναι πιο κρίσιμο. Για την κάτω ζεύξη χρησιμοποιείται κατά βάση ένας σχηματισμός από δύο κεραιές πομπού στο σταθμό βάσης και αντίστοιχα δύο κεραιές δέκτη στο κινητό τερματικό και ήδη μελετούνται σχηματισμοί τεσσάρων κεραιών. Για την άνω ζεύξη από το κινητό τερματικό στο σταθμό βάσης, ένα σχήμα που ονομάζεται **MU-MIMO** (Multi-User MIMO) είναι ήδη προς εφαρμογή. Κάνοντας χρήση αυτού, ενώ ο σταθμός βάσης απαιτεί πολλαπλές κεραιές, το κινητό τερματικό έχει μόνο μία κεραία πομπού, με αποτέλεσμα να μειώνεται το κόστος του κινητού. Κατά τη λειτουργία, πολλαπλά κινητά τερματικά μπορούν να μεταδίδουν ταυτόχρονα στο ίδιο κανάλι ή στα ίδια κανάλια, αλλά λόγω σχημάτων αμοιβαίας ορθογωνιότητας δεν προκαλούν παρεμβολή το ένα στο άλλο. Αυτή η τεχνική αναφέρεται επίσης και ως spatial domain multiple access (SDMA).

Το MIMO είναι μία τεχνολογική καινοτομία που χρησιμοποιείται στο LTE για να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος. Αυτή η τεχνολογία παρέχει στο LTE τη δυνατότητα να βελτιώσει την ρυθμοαπόδοση (data throughput) και τη φασματική απόδοση πέρα από τα επίπεδα που έχουν επιτευχθεί μέσω της χρήσης του OFDM. Ως μειονέκτημα θα μπορούσαμε να αναφέρουμε την προσθήκη πολυπλοκότητας στο σύστημα όσον αφορά στην επεξεργασία και στον αριθμό των απαιτούμενων κεραιών. Ωστόσο, το γεγονός ότι δίνει τη δυνατότητα για πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και πολύ βελτιωμένη φασματική απόδοση καθιστά το MIMO ένα αναπόσπαστο μέρος του LTE.

Σχήματα Αμφιδρόμησης (Duplex Schemes)

Είναι βασικό κάθε σύστημα κυψελωτών επικοινωνιών να μπορεί να υποστηρίξει αμφίδρομη ταυτόχρονη μετάδοση. Αυτό δίνει τη δυνατότητα να γίνονται «συνομιλίες», με το κάθε άκρο να μπορεί να «ακούει» και να «μιλάει» όπως απαιτείται. Επιπροσθέτως, κατά την ανταλλαγή δεδομένων, είναι επίσης απαραίτητο να εξασφαλίζονται εικονικά ταυτόχρονες (virtually simultaneous) ή τελείως ταυτόχρονες επικοινωνίες προς αμφότερες κατευθύνσεις. Είναι επίσης σημαντικό να μπορεί να καθοριστεί η διαφορετική κατεύθυνση της μετάδοσης, έτσι ώστε να είναι δυνατός ο εύκολος προσδιορισμός της κατεύθυνσης προς την οποία γίνεται η μετάδοση. Υπάρχουν πολλές διαφορές μεταξύ των δύο ζεύξεων και έχουν να κάνουν με παράγοντες όπως πχ το μέγεθος των δεδομένων που μεταφέρονται, το σχήμα μετάδοσης, τα κανάλια που υλοποιούνται, κ.α.. Οι δύο ζεύξεις ορίζονται ως:

- **Uplink:** η μετάδοση από το τερματικό του χρήστη (UE) προς τον NodeB ή σταθμό βάσης.
- **Downlink** η μετάδοση από τον eNodeB ή σταθμό βάσης προς το τερματικό του χρήστη (UE).



Σχήμα 2.38: Uplink & downlink κατευθύνσεις μετάδοσης

Για να είναι σε θέση να λειτουργεί προς αμφότερες κατευθύνσεις ένα κινητό τερματικό ή ο σταθμός βάσης θα πρέπει να έχουν ένα σχήμα αμφιδρόμησης/διπλεξίας. Η διπλεξία προσφέρει εκείνη τη μορφή οργάνωσης που διέπει τον τρόπο της αλληλεπίδρασης πομπού και δέκτη. Υπάρχουν δύο είδη διπλεξίας που χρησιμοποιούνται ευρέως, διπλεξία διαίρεσης συχνότητας **FDD (Frequency Division Duplex)** και η διπλεξία διαίρεσης χρόνου **TDD (Time Division Duplex)**. Στο FDD γίνεται χρήση δύο καναλιών, ένα για τον πομπό και ένα για τον δέκτη, ενώ στο TDD γίνεται χρήση μίας συχνότητας, αλλά εκχωρούνται διαφορετικές χρονοθυρίδες (slots) για μετάδοση και λήψη.

Το LTE έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί τόσο σε συνδυασμένο (paired) φάσμα για σχήμα FDD (Frequency Division Duplex), όσο και σε μη-συνδυασμένο (unpaired) φάσμα για σχήμα TDD (Time Division Duplex). Προβλέπεται ότι και το LTE TDD και το LTE FDD θα εφαρμοστούν ευρέως, καθότι το καθένα έχει τα δικά του

πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και το ποιο θα χρησιμοποιηθεί κάθε φορά θα εξαρτηθεί από την εκάστοτε εφαρμογή. Το LTE FDD με τη χρήση συνδυασμένου (paired) φάσματος αναμένεται να είναι το μονοπάτι για τη μετάβαση από τις τρέχουσες 3G υπηρεσίες που χρησιμοποιούνται ανά την υφήλιο, μιας και οι πιο πολλές χειρίζονται FDD συνδυασμένου (paired) φάσματος. Όμως, έχει επίσης δοθεί έμφαση στη χρήση LTE TDD μη-συνδυασμένου (unpaired) φάσματος (TD-LTE), το οποίο θεωρείται ως το μονοπάτι για την αναβάθμιση από το TD-SCDMA. Εν όψει της αυξανόμενης σημασίας που τίθεται μεταξύ LTE TDD ή TD-LTE, έχει ήδη σχεδιαστεί ο εξοπλισμός χρήστη να έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει τόσο FDD όσο και TDD σχήμα. Με το TDD να λαμβάνει όλο και μεγαλύτερη σημασία, οι TDD εφαρμογές θα μπορέσουν να επωφεληθούν από οικονομίες-κλίμακος (scale economies) που παλαιότερα ήταν ανοιχτές μονό προς FDD εφαρμογές.

Αναλυτικότερα, υπάρχουν μια σειρά από πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του TDD και FDD τα οποία είναι ιδιαιτέρως σημαντικά για τους παρόχους υπηρεσιών κινητών ή κυψελωτών επικοινωνιών. Αυτά αντανακλώνται και στην LTE υλοποίηση αντίστοιχα.

Παράμετρος	LTE-TDD	LTE-FDD
Συνδυασμένο Φάσμα (Paired Spectrum)	Δεν απαιτεί συνδυασμένο φάσμα, καθότι και η μετάδοση και η λήψη κάνουν χρήση του ίδιου καναλιού.	Απαιτεί συνδυασμένο φάσμα, με επαρκή διαχωρισμό συχνότητας, ώστε να επιτευχθεί ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη.
Κόστος Υλικού (Hardware Cost)	Χαμηλότερο κόστος, μιας και δεν απαιτείται διπλέκτης για την απομόνωση εκπομπής και λήψης. Το γεγονός ότι το κόστος των τερματικών χρήστη είναι σημαντικό λόγω του τεράστιου αριθμού αυτών που παράγονται, το καθιστά ένα αδιαφιλονίκητο πλεονέκτημα.	Απαιτείται διπλέκτης, και το κόστος είναι υψηλότερο.
Αμοιβαιότητα Καναλιού (Channel Reciprocity)	Η διασπορά του καναλιού είναι ίδια προς και τις δύο κατευθύνσεις, το οποίο δίνει τη δυνατότητα κοινής σχεδίασης για την άνω και την κάτω ζεύξη.	Τα χαρακτηριστικά των καναλιών διαφέρουν ανάλογα με την κατεύθυνση της ζεύξης, ως αποτέλεσμα της χρήσης διαφορετικών συχνοτήτων.
UL / DL ασυμμετρία	Είναι εφικτή η δυναμική αλλαγή της αναλογίας χωρητικότητας UL και DL, αναλόγως τη ζήτηση.	Η αναλογία UL / DL χωρητικότητας καθορίζεται από εκχώρηση συχνότητας, που έχει προαποφασιστεί από ρυθμιστικές αρχές. Επομένως, δεν είναι δυνατό να γίνουν

Παράμετρος	LTE-TDD	LTE-FDD
		δυναμικές αλλαγές. Ρυθμιστικές αλλαγές θα μπορούσαν υπό κανονικές συνθήκες να ζητηθούν, και η χωρητικότητα συνήθως εκχωρείται με τρόπο ώστε να είναι η ίδια προς αμφότερες κατευθύνσεις.
Περίοδος επιτήρησης / ζώνη επιτήρησης (Guard period / guard band)	Η περίοδος επιτήρησης απαιτείται για να διασφαλίσει ότι οι μεταδόσεις uplink και downlink δε συγκρούονται. Μεγάλες περίοδοι επιτήρησης περιορίζουν τη χωρητικότητα. Μεγαλύτερες περίοδοι επιτήρησης κανονικά θα απαιτηθούν αν οι αποστάσεις αυξηθούν με αποτέλεσμα την αύξηση των χρόνων διασποράς.	Η ζώνη επιτήρησης απαιτείται για να παρέχει επαρκή απομόνωση μεταξύ άνω και κάτω ζεύξης. Μεγάλη ζώνη επιτήρησης δεν επιδρά στη χωρητικότητα.
Ασυνεχή Μετάδοση (Discontinuous Transmission)	Απαιτείται ασυνεχή μετάδοση ώστε να γίνει μετάδοση τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη. Αυτό μπορεί να αλλοιώσει την απόδοση του ενισχυτή RF (RF power amplifier) στον πομπό.	Απαιτείται συνεχή μετάδοση.
Cross slot interference	Οι σταθμοί βάσης χρειάζεται να συγχρονιστούν βάσει των uplink και downlink χρόνων μετάδοσης. Αν γειτονικοί σταθμοί βάσης χρησιμοποιούν διαφορετικές uplink και downlink εκχωρήσεις, και μοιράζονται το ίδιο κανάλι, τότε πιθανόν να υφίσταται παρεμβολή μεταξύ κυψελών.	Δεν υφίσταται.

Σχήμα - Πίνακας 2.39: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του TDD και FDD

Εκτός, όμως, από τους τεχνικούς λόγους και τα πλεονεκτήματα για τη χρήση του LTE TDD / TD-LTE, υπάρχουν και παράγοντες της αγοράς. Με το **TD-SCDMA** να έχει διεισδύσει για τα καλά στην Κίνα, χρειάζεται να υπάρχει ένας 3,9G και αργότερα ένας 4G διάδοχος για την τεχνολογία. Με χρήση μη-συνδυασμένου φάσματος για την εκχώρηση του TD-SCDMA, όπως επίσης και για το UMTS TDD, είναι εύλογο να βρεθούν πολλοί πάροχοι που να θέλουν ένα μονοπάτι μετάβασης για τις τεχνολογίες, ώστε να επωφεληθούν από τις τεραστίως αυξημένες δυνατότητες σε ρυθμό μετάδοσης και τις βελτιωμένες λειτουργίες που προσφέρει

το LTE. Αντιστοίχως υπάρχει ένα σημαντικά αυξανόμενο ενδιαφέρον στην ανάπτυξη του LTE TDD, το οποίο στην Κίνα είναι επίσης γνωστό και ως TD-LTE. Λόγω του έντονου ενδιαφέροντος για το **TD-SCDMA**, έχουν ενσωματωθεί μια σειρά από χαρακτηριστικά στο σχήμα λειτουργίας του TD-LTE, ώστε να το κάνουν ένα μονοπάτι για την αναβάθμιση για το TD-SCDMA. Ένα παράδειγμα αυτού είναι η δομή του υποπλαισίου (subframe) που έχει υιοθετηθεί για το LTE TDD / TD-LTE.

Δομή Πλαισίου και Υποπλαισίου (Frame and Subframe Structure)

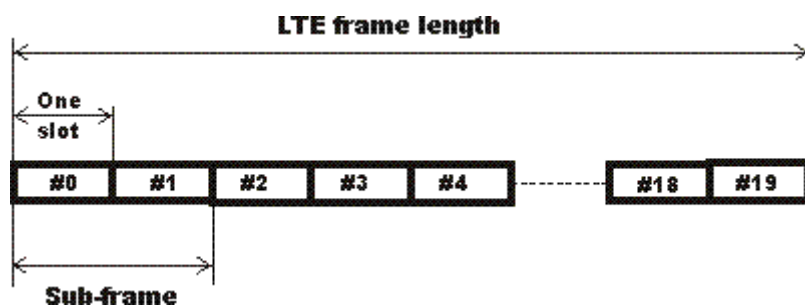
Το σύστημα LTE έχει μία ορισμένη δομή πλαισίου και υποπλαισίου για τη διεπαφή του 3G LTE, το E-UTRA (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access), ούτως ώστε να διατηρεί συγχρονισμό και να μπορεί να χειρίζεται τους διαφορετικούς τύπους πληροφοριών που μεταφέρονται μεταξύ του σταθμού βάσης (ή eNodeB) και του εξοπλισμού του χρήστη (User Equipment). Οι δομές πλαισίων για το LTE διαφέρουν μεταξύ Time Division Duplex, TDD και του Frequency Division Duplex, FDD σχήματος, καθότι υπάρχουν διαφορετικές απαιτήσεις για το διαχωρισμό της μεταδιδόμενης πληροφορίας.

Υπάρχουν επομένως δύο τύποι δομών πλαισίου στο LTE:

1. **Τύπος 1:** χρησιμοποιείται για συστήματα που εφαρμόζουν σχήμα LTE FDD.
2. **Τύπος 2:** χρησιμοποιείται για συστήματα που εφαρμόζουν σχήμα LTE TDD.

i) Τύπος 1 (FDD)

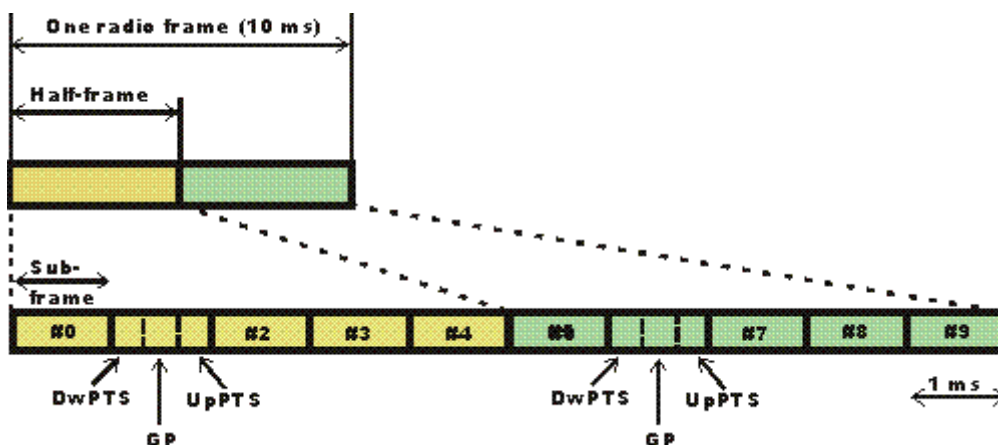
Η δομή πλαισίου τύπου 1 έχει συνολικό μήκος 10ms. Το μήκος αυτό διαιρείται σε ένα σύνολο από 20 ξεχωριστές χρονοθυρίδες (slots). Τα υποπλαίσια του LTE αποτελούνται από δύο χρονοθυρίδες – με άλλα λόγια, υπάρχουν 10 υποπλαίσια μέσα σ' ένα πλαίσιο.



Σχήμα 2.40: Type 1 LTE Frame Structure

ii) Τύπος 2 (TDD)

Η δομή πλαισίου τύπου 2 που χρησιμοποιείται στο LTE TDD είναι αρκετά διαφορετική. Το πλαίσιο των 10ms αποτελείται από δύο «μισά» πλαίσια, το καθένα διάρκειας 5ms. Αυτά τα «μισά» πλαίσια LTE διαιρούνται περαιτέρω σε πέντε υποπλαίσια, το καθένα διάρκειας 1ms.



Σχήμα 2.41: Type 2 LTE Frame Structure for 5ms periodicity.

Τα **υποπλαίσια** μπορεί να διαιρούνται σε ειδικά υποπλαίσια, τα οποία αποτελούνται από τρία πεδία:

- DwPTS - Downlink Pilot Time Slot
- GP - Guard Period
- UpPTS - Uplink Pilot Time Slot.

Αυτά τα πεδία χρησιμοποιούνται στο TD-SCDMA και έχουν μεταφερθεί και στο LTE TDD (TD-LTE) και με αυτόν τον τρόπο, βοηθάνε για τη συνέχιση της αναβάθμισης (upgrade path). Τα επιμέρους πεδία μπορούν να έχουν διάρκεια ρυθμιζόμενη, αλλά η συνολική τους διάρκεια πρέπει να είναι **1ms**.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης του LTE TDD είναι ότι είναι δυνατό να γίνεται **δυναμική αλλαγή της ισορροπίας** και των **χαρακτηριστικών** μεταξύ uplink και downlink, ώστε να ικανοποιούνται οι συνθήκες κίνησης (φορτίου). Για να επιτευχθεί αυτό κατά διατεταγμένο τρόπο, έχουν ρυθμιστεί συγκεκριμένες διατάξεις (configurations) μέσα στις προδιαγραφές του LTE. Συνολικά 7 up/downlink διατάξεις έχουν ρυθμιστεί, οι οποίες χρησιμοποιούν είτε 5ms είτε 10ms εναλλασσόμενες περιοδικότητες (switch periodicities). Στην περίπτωση των 5ms, ένα ειδικό υποπλαίσιο υπάρχει και στα 2 πλαίσια, ενώ στα 10ms το ειδικό αυτό υποπλαίσιο υπάρχει μόνο στο πρώτο μισό πλαίσιο. Δίνονται παρακάτω σε πίνακα όλες οι 7 περιπτώσεις διάταξης υποπλαισίων:

UPLINK- DOWNLINK CONFIGURATION	DOWNLINK TO UPLINK SWITCH PERIODICITY	ΑΡΙΘΜΟΣ ΥΠΟΠΛΑΙΣΙΟΥ									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 ms	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 ms	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 ms	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 ms	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Σχήμα - Πίνακας 2.42: Uplink/Downlink ρυθμίσεις υποπλαισίου για LTE TDD (TD-LTE)

Όπου D είναι το υποπλαίσιο για downlink μετάδοση

S είναι το “ειδικό” (special) υποπλαίσιο που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο.

U είναι το υποπλαίσιο για την uplink μετάδοση.

Εύκολα μπορεί να φανεί από τον πίνακα, πως τα υποπλάισια 0 και 5 δεσμεύονται πάντα για το downlink (DwPTS υποπλάισια). Αντίθετα, το υποπλαίσιο αμέσως μετά το «ειδικό» δεσμεύονται πάντα για το uplink (UpPTS υποπλάισια).

LTE Ζώνες Συχνοτήτων και Κατανομές Φάσματος

Υπάρχει ένας αυξανόμενος αριθμός ζωνών συχνοτήτων που ορίζονται ως υποψήφιες για χρήση στο LTE. Πολλές από τις ζώνες αυτές ήδη χρησιμοποιούνται από άλλα κυψελωτά συστήματα, ενώ άλλες LTE ζώνες είναι προς το παρόν αδιάθετες. Το φάσμα του FDD απαιτεί διπλές (paired) ζώνες, μία για το uplink και μία για το downlink, ενώ το TDD απαιτεί μονή ζώνη, καθώς το uplink και το downlink είναι στην ίδια συχνότητα. Το αποτέλεσμα αυτού είναι να υπάρχουν διαφορετικές κατανομές LTE ζωνών για TDD και FDD. Οι διαφορετικές καταχωρήσεις LTE ή οι μπάντες συχνοτήτων LTE είναι κατανεμημένοι αριθμοί. Επί του παρόντος, οι ζώνες συχνοτήτων LTE **μεταξύ 1 και 22** είναι για συνδυασμένο (paired) φάσμα, δηλαδή FDD, και οι LTE μπάντες **μεταξύ 33 και 41** είναι για ασυνδυαστο/μονό (unpaired) φάσμα, δηλαδή TDD. Τα τερματικά των χρηστών ίσως συναντούν και τους δύο τύπους στην ίδια μπάντα. Θα χρειάζεται επομένως να είναι σε θέση να ανιχνεύουν τι είδους μετάδοση γίνεται σε εκείνη τη συγκεκριμένη ζώνη συχνότητας LTE στην περιοχή που βρίσκονται.

LTE BAND ΑΡΙΘΜΟΣ	UPLINK (MHZ)	DOWNLINK (MHZ)	Κύριες Περιοχές Χρήσης
1	1920 - 1980	2110 - 2170	Ασία, Ευρώπη
2	1850 - 1910	1930 - 1990	Αμερική, την Ασία
3	1710 - 1785	1805 - 1880	Αμερική, Ασία, Ευρώπη
4	1710 - 1755	2110 – 2155	Αμερική
5	824 - 849	869 - 894	Αμερική
6	830 - 840	875 - 885	Ιαπωνία
7	2500 - 2570	2620 - 2690	Ασία, Ευρώπη
8	880 - 915	925 - 960	Ασία, Ευρώπη
9	1749,9 - 1784,9	1844,9 - 1879,9	Ιαπωνία
10	1710 - 1770	2110 - 2170	Αμερική
11	1427,9 - 1452,9	1475,9 - 1500,9	Ιαπωνία
12	698 - 716	728 - 746	ΗΠΑ
13	777 - 787	746 - 756	ΗΠΑ
14	788 - 798	758 - 768	ΗΠΑ
17	704 - 716	734 - 746	ΗΠΑ
18	815 - 830	860 - 875	Ιαπωνία
19	830 - 845	875 - 890	Ιαπωνία
20	832 - 862	791 - 821	Ευρώπη
21	1447,9 - 1462,9	1495,5 - 1510,9	Ιαπωνία
22	3410 - 3500	3510 - 3600	

Σχήμα - Πίνακας 2.43: Ζώνες συχνοτήτων για FDD συστήματα
(Οι LTE ζώνες 15 και 16 έχουν εξασφαλιστεί, αλλά όχι οριστεί)

Οι ζώνες συχνοτήτων για FDD LTE είναι κατά ζεύγη ώστε να επιτραπεί η ταυτόχρονη μετάδοση σε δύο συχνότητες. Οι ζώνες, επιπλέον, έχουν επαρκή απόσταση ώστε τα μεταδιδόμενα σήματα να μην επηρεάζουν δραματικά την απόδοση του δέκτη, για να μην μπλοκάρει και χάνει από την ευαισθησία του. Ο διαχωρισμός πρέπει να είναι επαρκής για να καταστεί δυνατό το **roll-off** του φιλτραρίσματος της κεραίας να δώσει επαρκή εξασθένηση του εκπεμπόμενου σήματος εντός της λαμβανόμενης ζώνης.

LTE BAND Αριθμός	Bandwidth MHz	Κύριες Περιοχές Χρήσης
33	1900 - 1920	Ασία (χωρίς την Ιαπωνία), Ευρώπη
34	2010 - 2025	Ασία, Ευρώπη
35	1850 - 1910	Αμερική
36	1930 - 1990	Αμερική
37	1910 - 1930	
38	2570 - 2620	Ευρώπη
39	1880 - 1920	Κίνα
40	2300 - 2400	Ασία, Ευρώπη
41	2496 - 2690	ΗΠΑ

Σχήμα - Πίνακας 2.44: Ζώνες συχνοτήτων για TDD συστήματα

Οι κατανομές συχνοτήτων TDD LTE είναι μη-συνδυασμένες επειδή η άνω και η κάτω ζεύξη μοιράζονται την ίδια συχνότητα με χρονική πολυπλεξία. Τέλος, υπάρχουν αρκετές μη συνδυασμένες (unpaired) κατανομές συχνοτήτων που είναι στο στάδιο της προετοιμασίας.

Υπάρχουν συχνές προσθήκες στις κατανομές του φάσματος του LTE που δόθηκαν παραπάνω. Αυτές οι κατανομές LTE είναι αποτέλεσμα εν μέρει των διαπραγματεύσεων κατά τις ρυθμιστικές συνεδριάσεις της ITU για το ψηφιακό μέρισμα, καθώς επίσης και από την πίεση που προκαλείται από την ολοένα αυξανόμενη ανάγκη για τις κινητές επικοινωνίες. Πολλές από τις νέες κατανομές φάσματος LTE είναι σχετικά μικρές, συνήθως 10 – 20 MHz σε εύρος ζώνης, πράγμα το οποίο έχει αναγνωριστεί ως ένα σημαντικό τεχνολογικό πρόβλημα, καθώς το LTE-Advanced χρειάζεται εύρος ζώνης των 100MHz, και πιθανόν να χρειαστεί συνάθροιση πολλών καναλιών σε ένα ευρύ σύνολο των συχνοτήτων.

LTE Τερματικά Χρήστη (UE)

Όπως και σε άλλα συστήματα, έτσι και στο LTE υπάρχει μια ποικιλία από τερματικά-χρήστη (User Equipment) για την επικοινωνία με τον σταθμό βάσης, τα οποία εντάσσονται σε κατηγορίες ανάλογα με τα πρότυπα του κάθε τερματικού. Οι **LTE UE κατηγορίες** ή **UE τάξεις**, πρέπει να εξασφαλίζουν ότι ο σταθμός βάσης (eNodeB ή eNB) μπορεί να επικοινωνεί σωστά με τον εξοπλισμό των χρηστών. Με την ενημέρωση του σταθμού βάσης σχετικά με την κατηγορία του LTE UE, ο σταθμός βάσης θα είναι σε θέση να προσδιορίζει την απόδοση του UE και να επικοινωνεί με αυτό αναλόγως. Καθώς η κατηγορία του LTE UE καθορίζει τη συνολική απόδοση και τις δυνατότητες του UE, είναι δυνατό για την eNB να επικοινωνεί χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες που γνωρίζει ότι το UE διαθέτει. Κατά συνέπεια, η eNB δεν θα επικοινωνεί πέρα από τις επιδόσεις του UE.

Υπάρχουν πέντε διαφορετικές κατηγορίες LTE UE που ορίζονται. Όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί, οι διάφορες κατηγορίες LTE UE έχουν ένα ευρύ φάσμα όσον αφορά στις υποστηριζόμενες παραμέτρους και επιδόσεις. Άξιο αναφοράς είναι ότι το UE κατηγορίας 1 δεν προσφέρει τις επιδόσεις που προσφέρει το υψηλότερης απόδοσης UE κατηγορίας HSPA, παρ' όλου που το τελευταίο είναι πρωτόκολλο επικοινωνίας προγενέστερης έκδοσης του LTE. Σε όλες τις UE κατηγορίες στους παρακάτω πίνακες, το σήμα επιλέχθηκε με εύρος ζώνης 20MHz.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	1	2	3	4	5
Downlink	10	50	100	150	300
Uplink	5	25	50	50	75

Σχήμα – Πίνακας 2.45: LTE UE κατηγορίες ταχυτήτων δεδομένων

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	1	2	3	4	5
Downlink	QPSK, 16QAM, 64QAM				
Uplink	QPSK, 16QAM				QPSK, 16QAM, 64QAM

Σχήμα - Πίνακας 2.46: LTE UE κατηγορίες μορφές διαμόρφωσης που υποστηρίζονται

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	1	2	3	4	5
2 Rx ποικιλομορφία	Υποτιθέμενο σε απαιτήσεις επιδόσεων σε όλες τις κατηγορίες LTE UE				
2 x 2 MIMO	Δεν υποστηρίζεται	Υποχρεωτική			
4 x 4 MIMO	Δεν υποστηρίζεται				Υποχρεωτική

Σχήμα - Πίνακας 2.47: LTE UE κατηγορία MIMO διαμορφώσεις κεραία

Εξέλιξη Αρχιτεκτονικής Συστήματος (SAE)

Μολονότι περισσότερο γίνονται αλλαγές στην τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης του κυψελωτού συστήματος τηλεπικοινωνιών για το 3G LTE - Long Term Evolution, υπάρχει ταυτόχρονα μία εξέλιξη του core δικτύου, γνωστή και ως **SAE - System Architecture Evolution**. Αυτή η νέα αρχιτεκτονική έχει αναπτυχθεί για να παρέχει υψηλή απόδοση που να ευθυγραμμίζεται με τις απαιτήσεις του LTE και του LTE Advanced, τη νέα 4G τεχνολογία. Επομένως, όταν εισαχθεί το LTE Advanced, το δίκτυο θα μπορεί να διαχειριστεί την περαιτέρω αύξηση στα data με λίγες αλλαγές. Η εξέλιξη αυτή της Αρχιτεκτονικής Συστήματος προσφέρει πλεονεκτήματα έναντι προηγούμενων τοπολογιών και συστημάτων που χρησιμοποιούνται για core δίκτυα κυψελωτών επικοινωνιών, με αποτέλεσμα να αναμένεται η υιοθέτησή της από τους παρόχους.

Παρακάτω κατονομάζονται μερικά από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα:

- 1) **Αυξημένη χωρητικότητα data:** Με το 3G LTE να προφέρει ρυθμούς download της τάξης των 100Mbps και μεγάλο ενδιαφέρον να εστιάζεται στην ανάπτυξη ευρυζωνικών υπηρεσιών για κινητές επικοινωνίες, θα είναι αναγκαίο το δίκτυο να μπορεί να διαχειρίζεται πολύ μεγαλύτερη ποσότητα δεδομένων. Η εξέλιξη της αρχιτεκτονικής κινείται προς την κατεύθυνση αυτή.
- 2) **All IP αρχιτεκτονική:** Όταν το 3G αναπτύχθηκε, η φωνή ακόμη μεταδιδόταν σαν δεδομένα υπό μεταγωγή κυκλώματος. Από τότε, υπάρχει μια αδιάκοπη μετάβαση προς τα IP data. Σύμφωνα με τη νέα αρχιτεκτονική συστήματος, τα σχήματα αυτής της Εξέλιξης Αρχιτεκτονικής Συστήματος έχουν υιοθετήσει ένα all IP δικτυακό configuration.
- 3) **Μειωμένος χρόνος λανθάνουσας καθυστέρησης (latency):** Λόγω του αυξημένου επιπέδου αλληλεπίδρασης και των πιο γρήγορων αποκρίσεων που απαιτούνται, η SAE εξελίχθηκε με τη λογική να εξασφαλίζει ότι η λανθάνουσα καθυστέρηση θα μειωθεί στα 10ms περίπου. Αυτό με τη σειρά του εξασφαλίζει

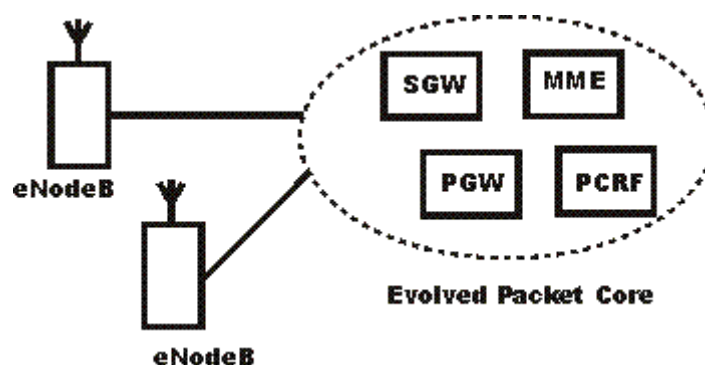
ότι οι εφαρμογές που θα χρησιμοποιούν το 3G LTE θα είναι επαρκώς αποκρίσιμες.

- 4) **Μειωμένο κόστος απόκτησης εξοπλισμού και λειτουργικό κόστος (CAPEX and OPEX):** Κύριος σκοπός κάθε παρόχου είναι η μείωση του κόστους. Είναι επομένως βασικό κάθε νέος σχεδιασμός να μειώνει τόσο το κόστος απόκτησης εξοπλισμού (CAPEX) όσο και το κόστος λειτουργίας (OPEX). Με τη νέα επίπεδη αρχιτεκτονική που χρησιμοποιείται για τη SAE, μόνο δύο ειδών nodes χρησιμοποιούνται.

Το νέο SAE δίκτυο είναι βασισμένο στα GSM/WCDMA δίκτυα κορμού (CN) ώστε να παρέχει απλοποιημένες λειτουργίες και εύκολη ανάπτυξη. Παρ' όλα αυτά, τα SAE δίκτυα καταφέρνουν να προκαλούν κάποιες μεγάλες αλλαγές και επιτρέπουν πολύ πιο αποδοτικό τρόπο μεταφοράς δεδομένων. Οι πιο σημαντικές διαφοροποιήσεις των SAE δικτύων από τα προγενέστερά τους είναι:

- Κοινός κόμβος-πύλη για όλες τις τεχνολογίες.
- Βελτιστοποίηση αρχιτεκτονικής για τους χρήστες με μόνο 2 είδη κόμβων.
- All-IP προσανατολισμένο σύστημα με IP προσανατολισμένα πρωτόκολλα σε όλες τις διασυνδέσεις.
- Ενσωμάτωση τεχνολογιών εκτός των 3GPP τεχνολογιών.
- Διαχωρισμός και βελτίωση του δικτύου ραδιοπρόσβασης (UTRAN) και του δικτύου κορμού (CN), αναφορικά με το διαχωρισμό που χρησιμοποιήθηκε στα WCDMA/HSPA.

Το βασικό στοιχείο του LTE SAE δικτύου, όμως, είναι αυτό που ονομάζουμε **Evolved Packet Core** ή **EPC**. Αυτό συνδέει το **eNodeBs**, όπως σχεδιαγραφείται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.48: LTE SAE Evolved Packet Core

Όπως εύκολα διαφαίνεται, το **EPC** αποτελείται από τα ακόλουθα 4 βασικά μέρη:

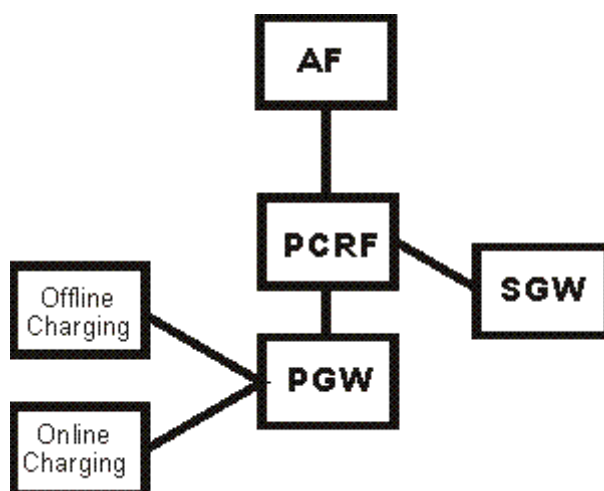
- **Mobility Management Entity, MME:** Το MME είναι ο βασικός κόμβος για την πρόσβαση στο LTE SAE δίκτυο και τον έλεγχο λειτουργίας του, διαχειριζόμενο τα εξής θέματα:
 - Ιχνηλάτηση του UE όταν είναι σε Idle mode.
 - Ενεργοποίηση/απενεργοποίηση του Bearer.
 - Επιλογή του SGW για ένα UE.
 - Intra-LTE handover περικλείοντας και τον κόμβο εντοπισμού του δικτύου κορμού.
 - Αλληλεπίδραση με HSS για να πιστοποιήσει το χρήστη στην επισύναψη roaming περιορισμών.
 - Προσφέρει προσωρινές ταυτότητες για τα τερματικά χρηστών (UE).
 - Δρα ως τερματισμός της κρυπτογράφησης των Non-Access-Stratum (NAS) σημάτων. Εκτός αυτού, χειρίζεται την ασφάλεια του κλειδιού διαχείρισης και άρα αποτελεί το σημείο όπου μπορεί να εφαρμοστεί μια νομική αναχαίτιση του σήματος.
 - Περαιτώνει την S3 διασύνδεση παρέχοντας την ελεγκτική συνάρτηση για τη φορητότητα των χρηστών από τα 2G/3G δίκτυα στα LTE δίκτυα.
 - Περαιτώνει, επίσης, τη S6a διασύνδεση του HSS⁵ για τα roaming τερματικά των χρηστών.
- **Serving Gateway, SGW:** Το SGW είναι ένα στοιχείο στρώματος δεδομένων μέσα στο LTE SAE. Ο βασικός του σκοπός είναι να διαχειρίζεται το επίπεδο φορητότητας των χρηστών και επίσης δρα ως το βασικό όριο μεταξύ του δικτύου ραδιοπρόσβασης (UTRAN) και του δικτύου κορμού (CN), καθώς και να συντηρεί τα κανάλια των δεδομένων μεταξύ των base stations (eNodeBs) και των κόμβων-πυλών PDN⁶, δρώντας ως μια διασύνδεση για το δίκτυο δεδομένων στο E-UTRAN. Τέλος, όταν τα τερματικά των χρηστών (UE) κινούνται μεταξύ περιοχών που εξυπηρετούνται από διαφορετικά base stations (eNodeBs), το SGW λειτουργεί ως ένας σταθερός εγγυητής πως τα κανάλια των δεδομένων συνεχίζουν να διατηρούνται.

⁵HSS = Home Subscriber Server

⁶PDN = Packet Data Network

- **PDN Gateway, PGW:** Η LTE SAE PDN πύλη προσφέρει συνδεσιμότητα μεταξύ των τερματικών των χρηστών και των εξωτερικών δικτύων πακέτων-δεδομένων, ολοκληρώνοντας, έτσι, τη συνάρτηση της εισόδου και της εξόδου για τα δεδομένα των τερματικών των χρηστών. Τα τελευταία, μπορούν να έχουν συνδεσιμότητα με παραπάνω από ένα PGW για την πρόσβαση σε πολλαπλά PDNs.
- **Policy and Charging Rules Function, PCRF:** Είναι το γενικό όνομα για την οντότητα μέσα στο LTE SAE EPC, η οποία ανιχνεύει τη ροή των υπηρεσιών, και ενισχύει την πολιτική διαχείρισης του φόρτου του δικτύου. Για εφαρμογές που απαιτούν δυναμική πολιτική ή επιβολή ελέγχου του φόρτου κίνησης χρησιμοποιείται το στοιχείο δικτύου Applications Function, **AF**.

Παρακάτω δίδεται η σχηματική απεικόνιση της διασύνδεσης των 3 τελευταίων αναφερθέντων μερών του εξελιγμένου δικτύου κορμού (Evolved Packet Core - **EPC**), καθώς και του επιπρόσθετου ελεγκτικού στοιχείου AF και που περιγράφηκαν παραπάνω:



Σχήμα 2.49: LTE SAE PCRF Interfaces

Ασφάλεια στο LTE

Ως γνωστόν, η ασφάλεια αποτελεί ένα μείζονος σημασίας θέμα στις τηλεπικοινωνίες. Στο LTE, όπως και στα υπόλοιπα πρωτόκολλα, εγείρονται θέματα ασφάλειας σχετικά με την κωδικοποίηση, την κρυπτογράφηση του σήματος και την προστασίας της ταυτότητας του χρήστη. Η έρευνα και η ανάπτυξη των συστημάτων ασφαλείας συνεχίστηκε από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνταν ήδη τα προγενέστερα 3G πρωτόκολλα και οδήγησε στις ακόλουθες βελτιώσεις:

- Ένα νέο ιεραρχικό κλειδί συστήματος εισάχθηκε, που μπορεί να αλλάξει ανάλογα την περίπτωση
- Οι LTE συναρτήσεις ασφαλείας για το Non-Access-Stratum (NAS) και το Access-Stratum (AS) διαχωρίστηκαν. Οι NAS συναρτήσεις, πλέον, είναι αυτές για τις οποίες η διεργασία ολοκληρώνεται μεταξύ του δικτύου κορμού (CN) και του τερματικού χρήστη. Οι AS συναρτήσεις περικλείουν τις επικοινωνίες μεταξύ των συνόρων του δικτύου (πχ ND - UE)
- Εισάχθηκε η αρχή της προχωρημένης ασφάλειας
- LTE συναρτήσεις ασφαλείας προστέθηκαν μεταξύ του υπάρχοντος 3G δικτύου και του LTE δικτύου

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία στην ασφάλεια των GSM, UMTS και τώρα LTE δικτύων είναι το θέμα της μονάδας ταυτοποίησης χρήστη (Subscriber Identity Module – SIM). Η κάρτα αυτή μεταφέρει την ταυτότητα του συνδρομητή σε μια κρυπτογραφημένη μορφή και αυτό έδινε τη δυνατότητα στο χρήστη να κρατά την ταυτότητά του κατά την αλλαγή των χρησιμοποιούμενων τερματικών συσκευών (UE). Με τη μετάβαση από το 2G (GSM) στο 3G (UMTS), η ιδέα αυτή ενισχύθηκε με βελτιώσεις όπως η αύξηση της μνήμης και της χρηστικότητας της κάρτας, δημιουργώντας πλέον την ονομαζόμενη **USIM** - UMTS Subscriber Identity Module. Συγκεκριμένα για τα LTE συστήματα, δύναται να χρησιμοποιηθεί μόνο η βελτιωμένη κάρτα (USIM) στο τερματικό του χρήστη, ενώ οι παλιές απλές SIM δεν καθίστανται συμβατές.

ΜΕΡΟΣ II:

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται η διεξαγωγή του πειράματος που πραγματοποιήθηκε για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ενδεχόμενη επιρροή της WCDMA ακτινοβολίας στα προκλητά δυναμικά του ανθρώπινου εγκεφάλου από ακουστικό ερέθισμα. Στην πρώτη παράγραφο του κεφαλαίου, περιγράφεται λεπτομερώς η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε και στη συνέχεια παρουσιάζεται ο EMC έλεγχος της διάταξης που προαπαιτήθηκε του πειράματος. Στην τελευταία παράγραφο γίνεται η ανάλυση της πειραματικής διαδικασίας, με την αναφορά στη νευροψυχολογική δοκιμασία (Hayling Test) που ακολουθήθηκε ώστε να παραχθούν τα προς μελέτη EGG και EPs σήματα.

3.1 Πειραματική Διάταξη

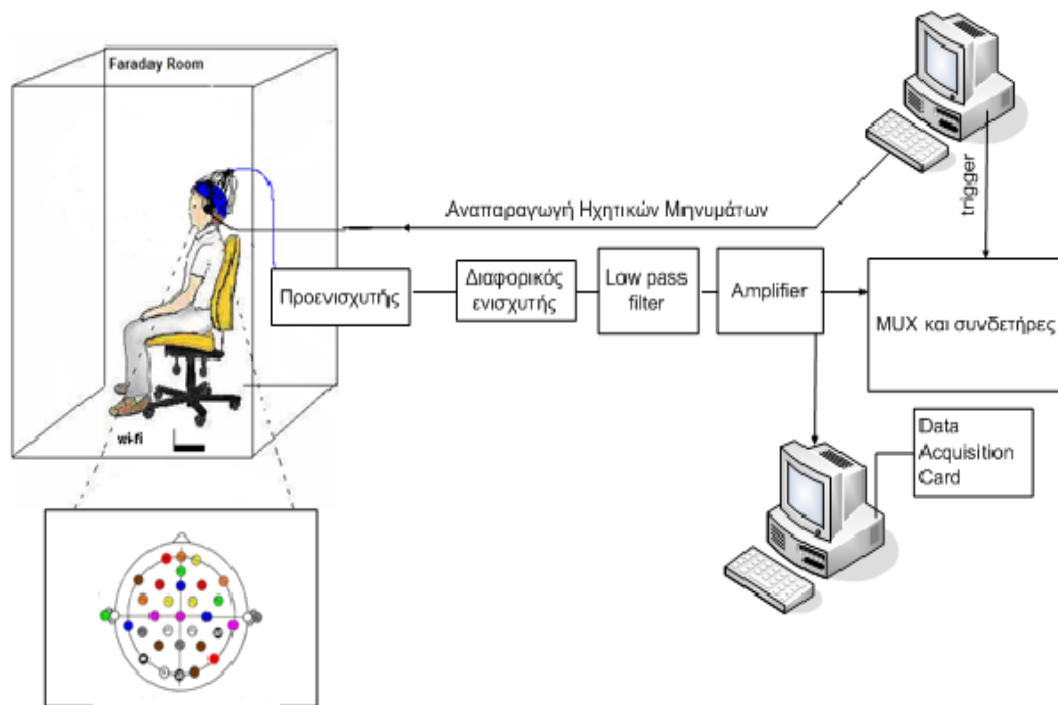
Το πείραμα της εργασίας πραγματοποιήθηκε σε εργαστήριο που στεγάζεται στο *Ερευνητικό Πανεπιστημιακό Ινστιτούτο Ψυχικής Υγιεινής (Ε.Π.Ι.Ψ.Υ.)* του Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, υπό την αιγίδα του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Στόχος του κέντρου αυτού είναι η μελέτη ψυχοφυσιολογικών φαινομένων με την υποστήριξη τεχνογνωσίας προερχόμενης από τον ελληνικό χώρο σε ένα περιβάλλον φιλικό και για τον εξεταζόμενο αλλά και για το επιστημονικό προσωπικό. Το εργαστήριο στο οποίο δουλέψαμε αποτελείται από έναν θωρακισμένο θάλαμο μονωμένο από περιβαλλοντικές παρεμβολές (κλωβός Faraday) μέσα στον οποίο λαμβάνονται οι μετρήσεις του εγκεφαλογραφήματος (EEG), από μία διάταξη δύο ηλεκτρονικών υπολογιστών συνδεδεμένων με μια πλατφόρμα χρονικού συσχετισμού του αποστελλόμενου και λαμβανόμενου σήματος (trigger) και από ιατρικό υλικό για την διαδικασία του ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος.

Ο κλωβός Faraday είναι απαραίτητος για την ορθή διεξαγωγή των μετρήσεων, καθώς προστατεύει το εσωτερικό από την εξωτερική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η λειτουργία ενός κλωβού μπορεί να προσεγγιστεί με την έννοια του *ιδανικού κενού αγωγού*, ο οποίος υπό την επίδραση εξωτερικού πεδίου αναδιοργανώνει τα φορτία στην επιφάνειά του, ακυρώνοντας το πεδίο στο εσωτερικό του. Η μόνωση από αλουμίνιο που διαθέτει ο κλωβός Faraday του εργαστηρίου στο Ε.Π.Ι.Ψ.Υ. μας επιτρέπει να θεωρήσουμε ότι εξασφαλίζεται η αντικειμενικότητα των μετρήσεων των EPs από παρεμβολές εξωτερικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Οι παρεμβολές αυτές ποικίλλουν ως προς την προέλευσή τους, δηλαδή μπορεί να προέρχονται από την τροφοδοσία της διάταξης του πειράματος, ή ακόμα και από συσκευές του επιστημονικού προσωπικού (π.χ. κινητά τηλέφωνα).

Η πειραματική διάταξη, με την πλατφόρμα λήψης και επεξεργασίας των σημάτων του EEG, περιγράφεται ακολούθως. Το άτομο στο οποίο γίνονται οι μετρήσεις βρίσκεται στον θάλαμο και φοράει ένα ειδικό «σκουφάκι» με τριάντα (30) ηλεκτρόδια κεφαλής, ενώ δύο ακόμη ηλεκτρόδια τοποθετούνται στους μύς κοντά στα μάτια. Δύο ηλεκτρόδια στους λοβούς των αυτιών αποτελούν τη γείωση. Τα ηλεκτρόδια οδηγούνται στον πολυπλέκτη και ενισχυτή (της εταιρείας *BRAINTRONICS*), αφού περάσουν από μια διαδικασία προενίσχυσης. Τα 32 σήματα οδηγούνται στο διαφορικό ενισχυτή όπου και υποβάλλονται σε ενίσχυση. Το κέρδος του ενισχυτή έχει επιλεγεί στις 50000.

Μετά την ενίσχυση το σήμα εισέρχεται σε ένα βαθυπερατό (low pass) φίλτρο. Το φίλτρο «κόβει» συχνότητες άνω των 35Hz, ώστε να αποφευχθεί παρεμβολή από το δίκτυο παροχής ρεύματος που λειτουργεί στα 50Hz. Η έξοδος του ενισχυτή οδηγεί σε ένα μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (A/D converter) ο οποίος καταλήγει στον έναν από τους δύο ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Ο δεύτερος είναι εφοδιασμένος με κάρτα ανάκτησης δεδομένων *DAQ 6035I της NI*. Μέσω της κάρτας λαμβάνονται τα 32 εγκεφαλικά σήματα τα οποία αποθηκεύονται στη μνήμη του υπολογιστή και οι κυματομορφές τους παρουσιάζονται στην οθόνη του. Η συχνότητα δειγματοληψίας έχει τεθεί στο 1kHz, γεγονός που σημαίνει πως σε κάθε ένα από τα 32 ηλεκτρόδια λαμβανόταν μια μέτρηση τάσης κάθε 1ms από την έναρξη έως τη λήξη της περιόδου αποθήκευσης του EEG και των EPs. Η περίοδος αυτή, επιλέχθηκε στα 1500ms για κάθε διαφορετικό ακουστικό ερέθισμα (ερώτηση του Hayling Test⁷), με αποτέλεσμα να αποθηκεύονται συνολικά 1500 μετρήσεις για κάθε ηλεκτρόδιο μέτρησης σε κάθε ερώτηση. Οι μετρήσεις των κυματομορφών των προκλητών δυναμικών παρουσιάζονται στην οθόνη με τη βοήθεια του προγράμματος LabVIEW. Ο πρώτος υπολογιστής, από την άλλη, είναι αυτός που παράγει το trigger και αυτός που έδωσε αρχικά το ηχητικό σήμα και άρα το ακουστικό ερέθισμα στον εξεταζόμενο μέσω των ακουστικών, τα οποία φοράει. Έχει την δυνατότητα να παρέχει πλήθος ηχητικών σημάτων που προσφέρονται για ψυχιατρική ανάλυση. Τέλος, σημαντικό μέρος του εργαστηρίου είναι τα υλικά ιατρικής φύσης που χρησιμοποιούμε, καθώς και η κάσκα του ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος, που έχει ενσωματωμένα τριάντα δύο (32) ηλεκτρόδια είναι το πλέον σημαντικό.

⁷Hayling Sentence Completion Test (HSCT). Βλ. παράγραφο 3.3.1.



Σχήμα 3.1: Η πειραματική διάταξη



Σχήμα 3.2: Το σύστημα των δύο Η/Υ στο εργαστήριο Ψυχοφυσιολογίας

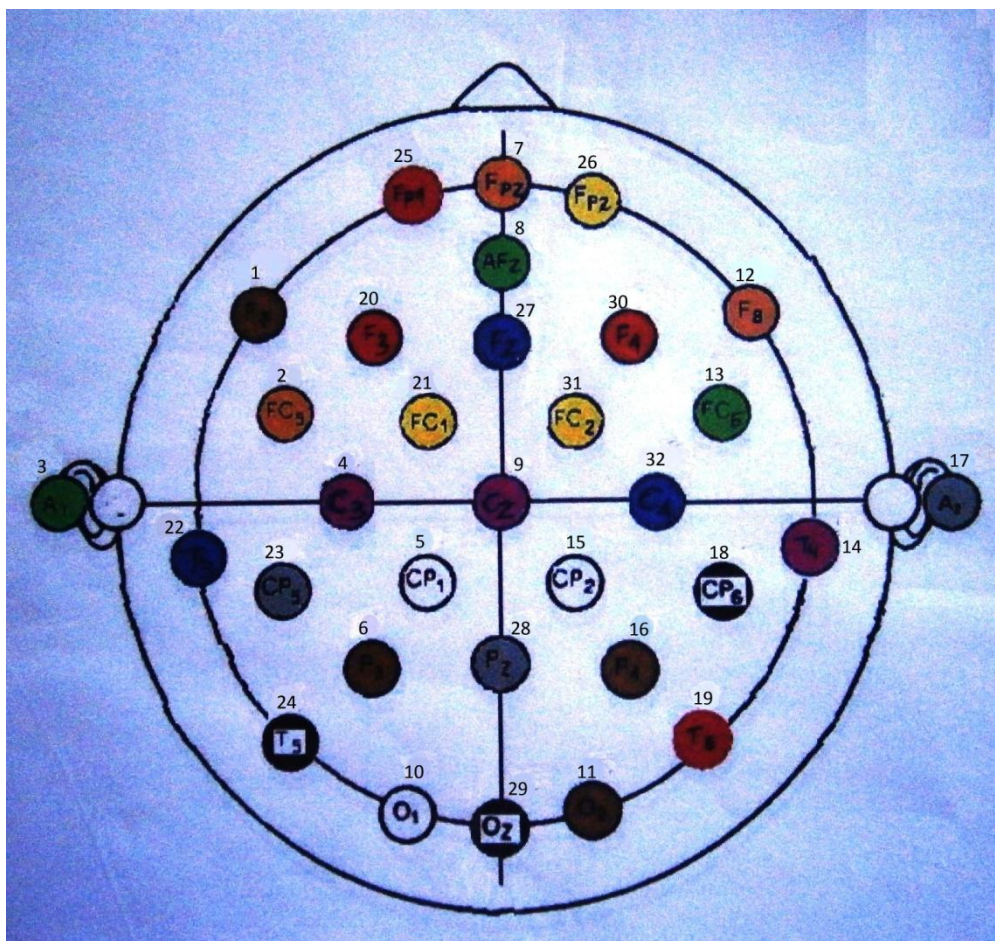


Σχήμα 3.3: Ο πολυπλέκτης και ενισχυτής της Braintronics

Οι θέσεις των ηλεκτροδίων είναι φανερές στην εξωτερική επιφάνεια της κάσας σαν άσπρες υποδοχές και πρόκειται για τυποποιημένη κατανομή απαγωγών στην επιφάνεια του εγκεφάλου βάσει του Διεθνούς Συστήματος Ηλεκτροεγκεφαλογραφίας, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1 (σύστημα 10 - 20, βλ. σχήμα 3.5). Για την σωστή διεπαφή των ηλεκτροδίων αυτών χρησιμοποιούμε ειδικά διηλεκτρικά υλικά, ουδέτερα όσων αφορά στην επαφή τους με το κρανίο, τα μαλλιά και το δέρμα του εξεταζόμενου. Η σωστή λειτουργία και σύνδεση των ηλεκτροδίων αυτών μας εξασφαλίζει μετρήσεις πολλαπλές που στην πορεία χρήζουν συλλογικής αξιολόγησης. Ο κύριος λόγος, όμως, της χρήσης αυτών των υλικών είναι η χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση που παρουσιάζουν. Το γεγονός αυτό μας εξασφαλίζει σηματοληψία με περιορισμένο θόρυβο και την μικρότερη δυνατή εξασθένηση των μετρούμενων εγκεφαλικών δυναμικών. Τα διηλεκτρικά αυτά είναι δύο ειδών. Το ένα έχει μορφή gel, το οποίο αραιώνεται με νερό και με τη βοήθεια σύριγγας ροής εισάγεται σε κάθε απαγωγή η ποσότητα, που είναι απαραίτητη για την επίτευξη διεπαφής. Αυτή η ποσότητα δεν είναι ορισμένη επακριβώς αλλά εμπειρικά. Η παρουσία στο εργαστήριο και οι δοκιμές που έγιναν έδειξαν ότι κάθε απαγωγή μπορεί να απαιτεί διαφορετική ποσότητα αυτού του gel. Το δεύτερο διηλεκτρικό είναι σε μορφή πάστας και χρησιμοποιείται για τα τέσσερα (4) ηλεκτρόδια τα οποία είναι εξωτερικά γιατί δεν απάγονται επί του κρανίου. Συγκεκριμένα υπάρχουν δύο ηλεκτρόδια για την καταγραφή των αντιδράσεων των νεύρων των ματιών και δύο που καταγράφουν τα νεύρα των αυτιών. Τα πρώτα έχουν απολήξεις που επικαλύπτονται με την πάστα αυτή και επικολλούνται στην περιοχή γύρω από τα μάτια με ιατρική αυτοκόλλητη γάζα (το ένα τοποθετείται πλάι από τον αριστερό οφθαλμό και το δεύτερο κάτω από τον δεξιό οφθαλμό). Τα δεύτερα τοποθετούνται σαν «σκουλαρίκια» στους λοβούς των αυτιών του κάθε εξεταζόμενου, πάλι αφού επικαλυφθούν τα «κλιψάκια» τους με την πάστα.



Σχήμα 3.4: Σκουφάκι Ηλεκτροεγκεφαλογράφησης με ενσωματωμένα τα ηλεκτρόδια



Σχήμα 3.5: Κατανομή και αρίθμηση ηλεκτροδίων στην επιφάνεια του κρανίου.



Σχήμα 3.6: Ιατρικά υλικά

Σε όλη την παραπάνω περιγραφή θα πρέπει να προσθέσουμε, τέλος, και την διάταξη ακτινοβολίας του εσωτερικού του θωρακισμένου θαλάμου που εγκαταστάθηκε στο εργαστήριο, ώστε να δύναται να ληφθούν μετρήσεις με ή χωρίς την παρεμβολή μιας ερευνούμενης ακτινοβολίας. Για το συγκεκριμένο πείραμα, χρησιμοποιήσαμε τη γεννήτρια *Agilent N5182A MXG RF Vector Signal Generator*, η οποία ανήκει στο εργαστήριο ασυρμάτου και επικοινωνίας μεγάλων αποστάσεων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών. Το σήμα οδηγήθηκε από τη γεννήτρια μέσω καλωδίου μήκους λίγων μέτρων (~2μ) στο εσωτερικό του θωρακισμένου θαλάμου προς μια μικρή κεραία κέρδους 5dBi. Η συγκεκριμένη γεννήτρια μας έδωσε τη δυνατότητα της ακριβούς εκπομπής ραδιοκυμάτων συγκεκριμένων χαρακτηριστικών που αναφέρονται σε πρωτοκόλλα κινητής τηλεφωνίας, καθώς το σήμα που εκπέμπει δεν είναι μονοχρωματικό αλλά με το επιθυμητό εύρος ζώνης, την επιθυμητή διαμόρφωση και κωδικοποίηση. Η καινοτομία αυτή, συγκριτικά με τα πειράματα που είχαν γίνει κατά το παρελθόν για τον έλεγχο της επίδρασης των ραδιοκυμάτων στα προκλητά δυναμικά του εγκεφάλου, είναι που κάνει και τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας εξέχουσας σημασίας και εξαιρετικού ενδιαφέροντος. Η ρύθμιση της γεννήτριας γινόταν μέσω ενός ακόμα υπολογιστή, ο οποίος ήταν συνδεδεμένος μαζί της και χρησιμοποιούσε το πρόγραμμα λειτουργίας της. Τέλος, κατά τη διάρκεια του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ένας μετρητής έντασης ακτινοβολίας, ώστε να ελέγχεται η πραγματική ένταση εσωτερικά του θωρακισμένου θαλάμου και συγκεκριμένα σε σημείο κοντά στο κρανίο του εξεταζόμενου, καθώς και ένας αναλυτής φάσματος (spectrum analyzer) ώστε να ελέγχεται η εκπομπή της κεραίας.

3.2 Έλεγχος Συμβατότητας Οργάνων (EMC)

Ο έλεγχος ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας⁸ μιας χρησιμοποιούμενης διάταξης είναι βασική και αναγκαία προϋπόθεση ώστε να διαφυλαχθεί η απρόσκοπτη λειτουργία των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών και οργάνων που εμπεριέχει. Κατά την εξέλιξη και ανάπτυξη, όμως, των τηλεπικοινωνιών οι ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές μεταξύ των συσκευών και των συστημάτων γίνοντουσαν όλο και πιο έντονες. Ήδη από τις πρώτες δεκαετίες του περασμένου αιώνα συστάθηκαν οι πρώτες επιτροπές εξέτασης και αντιμετώπισης των παρεμβολών σε διάφορες ανεπτυγμένες χώρες του κόσμου αλλά και δημιουργήθηκαν οι πρώτες κοινοτικές οργανώσεις για την από κοινού επίλυση των προβλημάτων των παρεμβολών (βλ. International Electrotechnical Commission). Το 1990 η IEC αριθμούσε ήδη 41 κράτη-μέλη και συνεργάζεται στενά με τον ISO (International Standards Organization). Για την Ευρώπη, φορέας θέσπισης προτύπων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας είναι η CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization) και για τον τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό είναι ο ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Από ελληνικής πλευράς, ο φορέας που συμμετέχει, ελέγχει και προτείνει στη CENELEC την προτυποποίηση των συσκευών είναι ο ΕΛΟΤ (Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης). Επιδιώξεις όλων των παραπάνω επιτροπών είναι η κατά το δυνατόν ελαχιστοποίηση της ακτινοβολίας ισχύος από τις ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές, ώστε να μην επηρεάζουν τη λειτουργία των υπολοίπων συστημάτων που βρίσκονται κοντά τους, καθώς και η κατά το δυνατόν αύξηση της ατρωσίας τους σε οποιαδήποτε τύπο παρεμβολής. Η πιστοποίηση ότι μια συσκευή ανταποκρίνεται στις διατάξεις των προτύπων που έχουν θεσπίσει οι παραπάνω οργανισμοί και που εφαρμόζεται στην περίπτωσή του δίδεται από τον κατασκευαστή του ή από εξουσιοδοτημένο αντιπρόσωπο και ονομάζεται «Βεβαίωση CE».

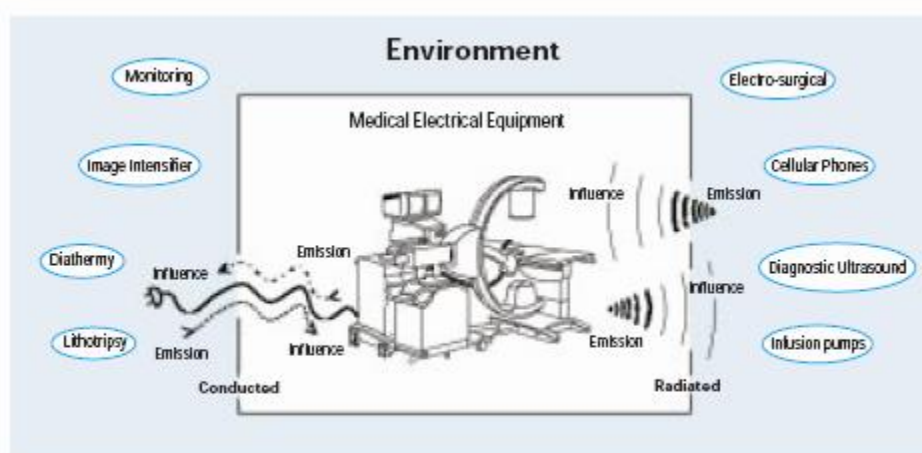
Οι συσκευές και τα συστήματα που παράγονται για ιατρικούς σκοπούς από μηχανικούς-κατασκευαστές πρέπει να καταδεικνύουν πολύ υψηλό επίπεδο EMC. Στην Ευρωπαϊκή ένωση υπάρχουν τρεις οδηγίες EMC για ιατρικές συσκευές οι οποίες αλληλεπικαλύπτονται σε αρκετά σημεία :

- η Active Implantable Medical Device (AIMD) Directive - 90/385/EEC για τις εμφυτεύσιμες συσκευές.

⁸Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) μιας διάταξης ορίζουμε την ικανότητα του να λειτουργεί ικανοποιητικά στο η/μ της περιβάλλον, χωρίς να προκαλεί ανεπιθύμητες η/μ διαταραχές σε οτιδήποτε βρίσκεται στο περιβάλλον αυτό.

- η In Vitro Diagnostic Device Directive (IVD) – 98/79/EC.
- η Medical Device Directive (MDD) – 93/42/EEC.

Ο περισσότερος ιατρικός εξοπλισμός συμμορφώνεται με την MDD (Medical Device Directive) για να μπορεί να φέρει το χαρακτηρισμό CE Marking. Σ' αυτήν την οδηγία, ενσωματώθηκε το διεθνές πρότυπο EN60601-1-2 (εκδόθηκε στο European Official Journal το Δεκέμβριο του 2002) το οποίο θέτει τα όρια των εκπομπών και τα επίπεδα ατρωσίας. Από το Νοέμβριο του 2004 είναι σε ισχύ το ανανεωμένο πρότυπο EN60601-1-2 ώστε να συμπεριληφθούν και συχνότητες έως 2.500MHz. Σύμφωνα με αυτό το πρότυπο για ατρωσία από ακτινοβολία σημάτων από 80 έως 2.500 MHz η ένταση του πεδίου στο χώρο που βρίσκεται ο εξοπλισμός δεν πρέπει να ξεπερνά τα 3V/m ενώ για εξοπλισμό που είναι κρίσιμος για τη ζωή των ατόμων δεν πρέπει να ξεπερνά τα 10V/m.



Σχήμα 3.7: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα ιατρικών μηχανημάτων

Οι ασυμβατότητες, ωστόσο, συνεχίζουν να ελλοχεύουν και μπορούν να οδηγήσουν σε δυσλειτουργίες καθώς επίσης και σε λανθασμένες διαγνωστικές, θεραπευτικές ή ελεγκτικές διαδικασίες, με αποτέλεσμα κάθε σοβαρή επιστημονική μελέτη να απαιτεί την διεξαγωγή πρώτιστα έλεγχο της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας των συσκευών που εμπλέκονται στο πείραμα και στο περιβάλλον του. Ειδικά μιλώντας για σήματα EEG, των οποίων η ευαισθησία στο θόρυβο έχει ήδη αναφερθεί, αξίζει να σημειωθεί ότι ένα επιπλέον πρόβλημα μπορεί να προκύψει από την αποδιαμόρφωση των παλμών των RF σημάτων από μη γραμμικά τμήματα των κυκλωμάτων των EEG ενισχυτών. Επίσης, τα τελευταία χρόνια εξετάζονται προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) που αφορούν στα σήματα της κινητής τηλεφωνίας. Βάσει όλων των παραπάνω και δεδομένου ότι

η πειραματική διάταξη των 32 ηλεκτροδίων θα χρησιμοποιηθεί για πειράματα όπου ένα σήμα κινητής επικοινωνίας θα εκπέμπεται στο χώρο διεξαγωγής των πειραμάτων, ήταν απαραίτητο να γίνουν EMC έλεγχοι της πειραματικής διάταξης για να εξασφαλισθεί η ατρωσία της.

Ο έλεγχος ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας της εργαστηριακής διάταξης, ανάχθηκε ουσιαστικά στον έλεγχο της συμβατότητας μεταξύ των οργάνων μέτρησης του EEG και της κεραίας εκπομπής, καθώς οι υπόλοιπες ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές είχαν επανεπιβεβαιωθεί για τη συμβατότητά τους και δεν είχαν υπεισέλθει υπό κάποια τροποποίηση (προενισχυτής, ενισχυτής, φίλτρο, καλώδια). Αντιθέτως, η κεραία ακτινοβολίας στο εσωτερικό του θωρακισμένου θαλάμου για πρώτη φορά θα χρησιμοποιούταν για την εκπομπή μη μονοχρωματικής ακτινοβολίας και μάλιστα πανομοιότυπης φύσης με τα τελευταία πρωτόκολλα της κινητής επικοινωνίας. Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της συμβατότητάς τους με τα όργανα λήψης του ηλεκτροεγκεφαλογράφηματος είναι το Long Term Evolution (LTE) και το Wideband Code Division Multiplexing Access (WCDMA). Μάλιστα, ο έλεγχος όσον αναφορά το LTE πρωτόκολλο, καθότι είναι ακόμα σε ερευνητικό στάδιο και δεν έχει καθιερωθεί σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, δεν περιορίστηκε σε μια μόνο παραλλαγή του, αλλά επεκτάθηκε για διαφορετικές διαμορφώσεις, συχνότητες, φασματικά εύρη, ισχύεις ακτινοβολίας του και τρόπους αμφιδρόμησης του. Από την άλλη πλευρά ο EMC έλεγχος υπό την ακτινοβολία σήματος WCDMA πραγματοποιήθηκε για το συγκεκριμένο συνδυασμό χαρακτηριστικών που έχει καθιερωθεί στα σημερινά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα της Ευρώπης και με τον οποίο χρησιμοποιήθηκε το σήμα και στη συνέχεια του πειράματος για τον έλεγχο πιθανής επίδρασής του στα προκλητά δυναμικά του ανθρώπινου εγκεφάλου.

Η διαδικασία του ελέγχου της συμβατότητας της διάταξης αποτελούταν από τη μέτρηση της τάσης σε κάθε ένα από τα 32 ηλεκτρόδια για ένα σετ μετρήσεων διάρκειας 1500ms, πρώτα χωρίς ακτινοβολία και στη συνέχεια υπό την ακτινοβολία από την κεραία του ερευνούμενου πρωτοκόλλου. Τα μετρούμενα αυτά δυναμικά λαμβάνονταν από ομοίωμα ανθρώπινου κεφαλιού, στο οποίο είχε τοποθετηθεί το ειδικό σκουφάκι με τα ηλεκτρόδια. Αν οι δύο λαμβανόμενες τιμές τάσης είχαν μικρή απόκλιση, ώστε να επαληθεύουν τα απαιτούμενα κριτήρια συμβατότητας (όπως είναι το t-test⁹), τότε το σύστημα καθοριζόταν ηλεκτρομαγνητικά συμβατό.

⁹ αλλιώς και «Student test». Βλέπε περισσότερα στο κεφ. 4.2, όπου αναλύεται διεξοδικά το συγκεκριμένο κριτήριο μέσα από την περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα της διάταξης υπό ακτινοβολία LTE.

Όπως αναφέραμε και πρωτίτερα, ο έλεγχος συμβατότητας για το πρωτόκολλο LTE πραγματοποιήθηκε για πολλές παραλλαγές του τελευταίου, ώστε να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα ως προς τα τελικώς επιλεγόμενα χαρακτηριστικά του στα μελλοντικά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Έτσι, σε κάθε δεύτερη μέτρηση διάρκειας 1500ms, η κεραία ρυθμιζόταν να ακτινοβολεί σε διαφορετική παραλλαγή του LTE πρωτοκόλλου και τελικώς είχαμε σε κάθε δεύτερο εξαγόμενο αρχείο από το LABVIEW την αντιστοίχισή του με μια διαφορετική παραλλαγή ακτινοβολίας του LTE. Τα αποτελέσματα του ελέγχου συμβατότητας για τις παραλλαγές του πρωτοκόλλου LTE αναπαριστώνται στους πίνακες του κεφαλαίου 4.2.1, ενώ για το πρωτόκολλο W-CDMA που επιλέχθηκε και στα πειράματα ελέγχου της επίδρασης του στο EEG και τα EPs τους, το αποτέλεσμα ήταν, όπως ήταν αναμενόμενο, θετικό.

3.3 Hayling Test

Μετά την επιβεβαίωση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας της διάταξης για ακτινοβολία σήματος WCDMA, ήμασταν σε θέση να ξεκινήσουμε την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας. Πριν την περιγραφή, όμως, της πειραματικής διαδικασίας, ας αναφερθούμε συνοπτικά στο τεστ που χρησιμοποιήσαμε για να προκαλέσουμε τα δυναμικά του εγκεφάλου που μετρήσαμε.

Το test συμπλήρωσης προτάσεων Hayling (Hayling Sentence Completion Test (HSCT)) δημιουργήθηκε από τους Burgess και Shallice. Αποτελείται από δύο μέρη. Στο Α' μέρος ο εξεταζόμενος ακούει μια σειρά προτάσεων στις οποίες λείπει η τελευταία λέξη και καλείται να συμπληρώσει την κάθε πρόταση με μια λέξη ούτως ώστε να προκύπτει ένα λογικό νόημα. Η τελευταία λέξη που λείπει συνδέεται άμεσα με την υπόλοιπη πρόταση. Π.χ. στην πρόταση «Αυτός ταχυδρόμησε το γράμμα χωρίς...» η απάντηση «γραμματόσημο» είναι αναμενόμενη με 99% πιθανότητα σύμφωνα με τα όσα βρήκαν οι Bloom και Fishler. Δύο δοκιμές γίνονται και αφού ο εξεταζόμενος δώσει ικανοποιητικές απαντήσεις ξεκινά η διαδικασία. Ο εξεταστής σημειώνει την απάντηση και τον χρόνο στον οποίο αυτή εδόθη. Αν ο εξεταζόμενος δεν απαντήσει, το test προχωρά στην επόμενη ερώτηση.

Στο Β' μέρος του test ο εξεταζόμενος ακούει πάλι μια σειρά προτάσεων στις οποίες λείπει η τελευταία λέξη και καλείται να συμπληρώσει την κάθε πρόταση με μια λέξη ούτως ώστε να μην προκύπτει κανένα λογικό νόημα. Η διαδικασία είναι ίδια όπως και στο Α' μέρος.

Το test αυτό για τις ανάγκες των πειραμάτων του Εργαστηρίου Ψυχοφυσιολογίας συμπληρώθηκε με ένα Γ' μέρος. Αποτελείται από μια σειρά ολοκληρωμένων προτάσεων, όπου μετά την αναπαραγωγή της καθεμίας, ο εξεταζόμενος καλείται να επαναλάβει την τελευταία λέξη. Η ηχογράφηση και επεξεργασία των μηνυμάτων έγινε με το λογισμικό Cool Edit και οι τύποι των αρχείων που δημιουργήθηκαν είναι 16bit stereo.

3.4 Περιγραφή Πειράματος με Ανθρώπους

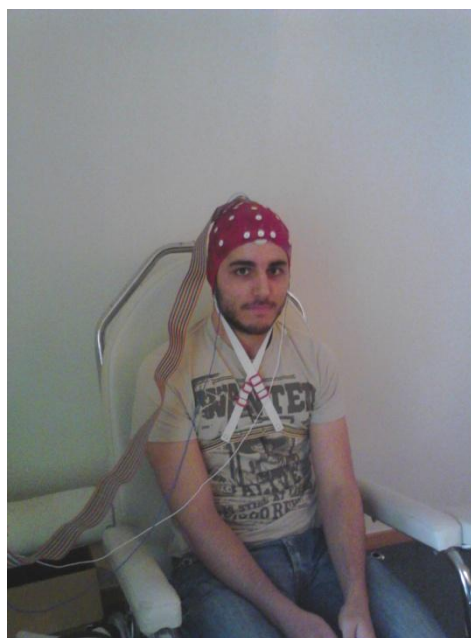
Στο περιγραφέν πείραμα επιλέχθηκαν, χάριν ομοιογένειας του μετρούμενου δείγματος, να λάβουν μέρος 15 άτομα παραπλήσιας ηλικίας και μορφωτικού επιπέδου. Ο μέσος όρος ηλικίας των 15 εθελοντών ήταν τα 24 έτη, εκ των οποίων κατά μέσο όρο τα 18,07 ήταν χρόνια εκπαίδευσης. Άρρενες ήταν οι 8 από τους 15 και θήλεις οι 7. Επιπλέον, οι εθελοντές ερωτήθηκαν για το χρόνο καθημερινής χρήσης του κινητού τους τηλεφώνου, προς διερεύνηση πιθανής μεταλλαγής του τρόπου επίδρασης τους από το WCDMA ραδιοκύμα, και ο μέσος όρος ήταν τα 30' και 20'' καθημερινής έκθεσης. Όλη η πειραματική διαδικασία τελέστηκε σύμφωνα με τις συνθήκες που προβλέπονται από τη Διακήρυξη του Ελσίνκι.

Το πείραμα έλαβε χώρα σε δύο στάδια. Στο πρώτο η μέτρηση του ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος (EEG) και των προκλητών δυναμικών (EPs) του εγκεφάλου από τα ακουστικά ερεθίσματα του Hayling Test για μέρος των εξεταζόμενων λαμβανόταν χωρίς την παράλληλη ακτινοβολία σήματος WCDMA από την κεραία στο εσωτερικό του θωρακισμένου θαλάμου, ενώ για τους υπόλοιπους υπό την επίδραση της ακτινοβολίας αυτής. Στο δεύτερο στάδιο, η συνθήκη ακτινοβολίας αντιστράφηκε για τον κάθε εθελοντή. Η έλλειψη γνώσης για την ύπαρξη ή μη της ακτινοβολίας στις δυο επισκέψεις τους στο Ε.Π.Ι.Ψ.Υ. ήταν απαραίτητη για την αποφυγή φαινομένων αυθυποβολής (single blind experiment). Οι δύο επισκέψεις έγιναν στα τέλη του Ιουνίου έως αρχές Ιουλίου του 2011 με διαφορά τριών περίπου εβδομάδων.

Σε κάθε μια από τις δυο επισκέψεις των εξεταζόμενων, η διαδικασία ήταν πανομοιότυπη. Το προς εξέταση άτομο που είχε σειρά εισερχόταν στο θωρακισμένο θάλαμο (κλωβός Faraday) και αφού έπαιρνε θέση στο ειδικό κάθισμα του εργαστηρίου, φορούσε το σκουφάκι με τα ενσωματωμένα ηλεκτρόδια. Ο υπεύθυνος του εργαστηρίου προσέθετε στις 30 υποδοχές του σκουφιού το ειδικό αγωγίμο αραιωμένο gel που περιγράψαμε προηγουμένως για την καλύτερη απαγωγή του προκλητού δυναμικού, καθώς και την ειδική διηλεκτρική πάστα στα τέσσερα εξωτερικά ηλεκτρόδια, τα οποία επικολλούνταν στα μάτια και τα αυτιά. Μετά την ολοκλήρωση της προετοιμασίας, το προς μέτρηση άτομο φορούσε τα ακουστικά που μετέφεραν το ακουστικό ερέθισμα του Hayling test από τον πρώτο υπολογιστή και ετοιμαζόταν να ξεκινήσει την πειραματική διαδικασία συμπλήρωσης των προτάσεων. Ταυτόχρονα, εξωτερικά του θωρακισμένου θαλάμου, ετίθετο σε λειτουργία στο δεύτερο υπολογιστή του εργαστηρίου το πρόγραμμα LABVIEW, που αποθήκευε τη σηματοληψία των EEG και των EPs του εξεταζόμενου ατόμου για το συγκεκριμένο test. Τέλος, εάν ο εξεταζόμενος επρόκειτο να πραγματοποιήσει το πείραμα υπό το στάδιο της ακτινοβολίας, ετίθετο σε λειτουργία μέσω ενός τρίτου υπολογιστή η γεννήτρια που έστελνε το σήμα WCDMA στην κεραία εκπομπής στο εσωτερικό του θωρακισμένου θαλάμου και

όταν ο εξεταζόμενος ήταν έτοιμος, ξεκινούσε η αναπαραγωγή των 30 ερωτήσεων του Hayling test.

Το συνολικό πείραμα για το κάθε άτομο αποτελούταν από 3 Hayling tests (30 ερωτήσεις το καθένα), τα οποία διαχωρίζονταν με ένα διάλειμμα ώστε να ξεκουραστεί ο εθελοντής. Μερικές φορές, οι μετρήσεις που λαμβάνονταν δεν ήταν αναμενόμενου πλάτους και μορφής είτε λόγω άγχους είτε λόγω κίνησης του εξεταζομένου. Μετά το τέλος και των 90 ερωτήσεων, αποθηκεύονταν οι μετρήσεις σε ξεχωριστό φάκελο με το όνομα του εκάστοτε εξεταζομένου, ο υπεύθυνος του εργαστηρίου αφαιρούσε τα ακουστικά και το σκουφάκι από τον εθελοντή και ερχόταν ο επόμενος στη σειρά για να επαναληφθεί από την αρχή όλη η προαναφερθείσα διαδικασία.



Σχήμα 3.8: Φωτογραφίες προετοιμασίας των εξεταζομένων από τον υπεύθυνο του εργαστηρίου

3.5 Αποθήκευση και Οργάνωση των Αποτελεσμάτων

Κάθε λαμβανόμενη μέτρηση, είτε κατά τον EMC έλεγχο της διάταξης είτε κατά το πείραμα με τους ανθρώπους, αποθηκευόταν, μετά την ενίσχυση, το φιλτράρισμά και την ψηφιοποίησή της, μέσω του προγράμματος LABVIEW στον 2^ο κατά σειρά υπολογιστή του εργαστηρίου. Κάθε λαμβανόμενη μέτρηση συμπεριλάμβανε την ταυτόχρονη σηματοληψία από 32 ανεξάρτητα ηλεκτρόδια 1500 διαφορετικών τιμών, μιας και ο χρόνος δειγματοληψίας είχε επιλεγεί στα 1500ms ανά μέτρηση και η συχνότητα δειγματοληψίας είχε τεθεί στο 1kHz. Αποτέλεσμα των παραπάνω ήταν η αποθήκευση για κάθε μέτρηση 1500ms τιμών τάσης ανά ηλεκτρόδιο ή 1500×32 (ηλεκτρόδια) = 48000 τιμών τάσης συνολικά.

Ειδικότερα, στο πείραμα με τους ανθρώπους για την εξαγωγή του EEG και των EPs που προκαλούνταν από το ακουστικό ερέθισμα, η μέτρηση των 1500 τιμών τάσης ανά ηλεκτρόδιο αφορούσε στο ακόλουθο διάστημα:

Χρόνος	A B C D E F A ...
AB (500ms)	Εγγραφή σήματος EEG
BC (100ms)	Ηχητικός Τόνος (500 or 3000Hz , 65 dB)
CD (900ms)	Καταγραφή των EPs
DE (100ms)	Ηχητικός Τόνος (500 or 3000Hz , 65 dB)
EF (2-3s)	Απάντηση Ερώτησης
FA (3-4s)	Επόμενη Ερώτηση

Σχήμα 3.9: Χρονοδιάγραμμα μέτρησης με ανθρώπους

Το παραπάνω επαναληπτικό διάγραμμα δείχνει την έναρξη σηματοληψίας αμέσως μετά το πέρας της ερώτησης του Hayling Test και τη λήξη της αμέσως πριν το δεύτερο ηχητικό τόνο («μπιπ»). Η συνολική διάρκεια μέτρησης ήταν 1500ms, εκ των οποίων τα πρώτα 500ms αφορούν στο EEG και τα επόμενα 1000ms στα EPs των εξεταζομένων. Μετά την αναμονή περίπου 2-3s ώστε να δοθεί η ανάλογη απάντηση από τους τελευταίους, επαναλαμβάνεται όλη η προαναφερθείσα διαδικασία για την επόμενη ερώτηση.

Όταν ολοκληρώνονταν όλες οι μετρήσεις, οι τιμές τους αποθηκεύονταν όπως προείπαμε μέσω του LABVIEW σε ένα ξεχωριστό αρχείο text, 32 ηλεκτρόδιων (στήλες) και 1500 X αριθμό των μετρήσεων (γραμμές). Ωστόσο, οι τιμές αυτές είναι αφενός στοιβατοποιημένες χωρίς διακριτικά μεταξύ των διαφορετικών μετρήσεων

που τις προκάλεσαν και αφετέρου είναι υπολογισμένες μαζί με την ενίσχυση που τους προστέθηκε. Για να γλιτώσουμε τη χρονοβόρα διαδικασία να τροποποιήσουμε το κάθε αρχείο text ένα-ένα, χρησιμοποιήσαμε κώδικα σε γλώσσα **matlab** ο οποίος πρώτα αφαιρεί την ενίσχυση των τιμών ώστε να λάβουμε την «καθαρή μέτρηση» σε μVolts και στη συνέχεια οργανώνει τις τιμές κάθε αρχείου σε ένα αρχείο Excel που αποτελείται από 32 sheets-ηλεκτρόδια, όπου το κάθε sheet έχει στήλες όσες ο αριθμός των μετρήσεων με 1500 γραμμές-σηματοληψίες η κάθε μια τους.

3.5.1 Οργάνωση των EMC μετρήσεων υπό ακτινοβολία LTE

Πριν την οργάνωση των μετρήσεων που πήραμε από τα εγκεφαλικά δυναμικά των ανθρώπων κατά τη διαδικασία εκτέλεσης των τριών Hayling test, αξίζει να ασχοληθούμε με τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πήραμε κατά τον έλεγχο της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας που πραγματοποιήσαμε μεταξύ της χρησιμοποιούμενης διάταξης και της LTE ακτινοβολίας. Ο λόγος που αξίζει να ασχοληθούμε με τη συμβατότητα του LTE πρωτοκόλλου είναι επειδή το τελευταίο είναι ακόμα σε ερευνητικό στάδιο και δεν έχει καθιερωθεί ακόμα σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Αξίζει, λοιπόν, να ερευνήσουμε τη συμβατότητα που θα έχει στις διάφορες παραλλαγές της διαμόρφωσης του, της συχνότητάς του, του φασματικού του εύρους, της ισχύος ακτινοβολίας του και των τρόπων αμφιδρόμησης του.

Για την οργάνωση, ωστόσο των EMC μετρήσεων, με τρόπο που να μας βολεύει στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, χρειάστηκε να τροποποιήσουμε ξανά τη δομή που είχαμε φτιάξει με τη βοήθεια της matlab. Πιο συγκεκριμένα, μετά την 1^η μετατροπή των αρχείων που εξήχθησαν από το LABVIEW, είχαμε χωρίσει τις «καθαρές», πλέον, σηματοληψίες σε αρχεία Excel («workbooks») το πολύ 30 στηλών-μετρήσεων το καθένα επί 32 φύλλων-ηλεκτροδίων («worksheet»). Προσπαθώντας να αναδιατάξουμε τις τελευταίες σε μια πιο βολική μορφή, όπου το κάθε φύλλο του Excel («sheet») να συγκεντρώνει τις σηματοληψίες όλων των ηλεκτροδίων για μια συγκεκριμένη παραλλαγή ακτινοβολίας LTE (βλ. κεφ. 3.2 για τον τρόπο εξαγωγής των EMC μετρήσεων), χρησιμοποιήσαμε τα **macros** του Excel. Με το macro που δημιουργήσαμε (βλ. **Παράρτημα 1**), προστίθεται στο τέλος κάθε workbook ένα επιπλέον sheet στο οποίο τοποθετείται η εκάστοτε στήλη-μέτρηση που έχουμε επιλέξει στον κώδικα του macro από όλα τα sheets-ηλεκτρόδια του τρέχοντος workbook. Αποτέλεσμα είναι, αν πχ έχουμε επιλέξει στο macro την 1^η στήλη-μέτρηση, να δημιουργηθεί ένα επιπλέον sheet το οποίο έχει αποθηκευμένη την 1^η μέτρηση που λάβαμε στον EMC έλεγχο με 32 στήλες-ηλεκτρόδια και 1500 γραμμές-μετρήσεις. Αποθηκεύουμε ξεχωριστά σε νέο αρχείο Excel (workbook) το μόλις δημιουργημένο sheet και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία για τις υπόλοιπες από τις 29 στήλες-μετρήσεις του workbook που αντιστοιχούν σε διαφορετική παραλλαγή ακτινοβολίας LTE. Επειδή η ακτινοβολία του LTE άλλαζε σε κάθε δεύτερη μέτρηση, από τις 30 στήλες - μετρήσεις κάθε «παλαιού» workbook δημιουργούμε 15 νέα workbooks - «παραλλαγές ακτινοβολίας». Όταν τελειώσουμε με το τρέχον «παλαιό» workbook, συνεχίζουμε με τα υπόλοιπα «παλαιά» workbooks που είχαμε δημιουργήσει κατά την αποθήκευση των EMC μετρήσεων υπό ακτινοβολία LTE.

Παρακάτω δίδονται οι πίνακες αντιστοίχισης του αριθμούμενων μετρήσεων, διάρκειας 1500ms έκαστη, με τις διάφορες παραλλαγές της ακτινοβολίας LTE που χρησιμοποιήθηκαν για την οργάνωση των μετρήσεων σε βολικά, για τη στατιστική επεξεργασία που θα ακολουθήσει, αρχεία.

Πίνακες αντιστοίχισης ερωτήσεων – παραλλαγών ακτινοβολίας LTE:

- TDD Dublexing:

BASE STATION				
frequency	bandwidth	Measurement No	field(v/m)	eirp
OFF		1	0,2	17dbm
1880	1,4	2,3	3,2	
	3	4,5		
	5	6,7		
	10	8,9		
	15	10,11		
	20	12,13		
2017,5	5	14,15	3,1	
	10	16,17		
	15	18,19		
2350	10	20,21	2,8	
	15	22,23		
	20	24,25		
2595	5	26,27	3	
	10	28,29,30		

Σχήμα – Πίνακας 3.10: Παραλλαγές για LTE TDD Dublexing (17dbm)

REMOTE TERMINAL				
frequency	bandwidth	Measurement No	field(v/m)	eirp
OFF		1	0,2	10dbm
1880	1,4	2,3	1,6	
	3	4,5		
	5	6,7		
	10	9, 10		
	15	11,12		
	20	13,14		
2017,5	5	16,17	1,5	
	10	18,19		
	15	20,21		
2350	10	22,23		
	15	24,25		
	20	26,27		
2595	5	28,29	1,7	
	10	30		

Σχήμα – Πίνακας 3.11: Παραλλαγές για LTE TDD Dublexing (10dbm)

— FDD Dublexing:

		UE (10dBm)			V/m	BS (17dBm)			V/m
		QPS K	16QAM	64QAM		QPS K	16QAM	64QAM	
OFF		1							0,5
737	1,4	2,3	4,5	6,7	1,5	8,9	10,11	12,13	3
	3	14,15	16,17	18,19		20,21	22,23	24,25	
	5	26,27	28,29,30	1,2		9,10	11,12	13,14	
	10	3,4	5,6	7,8		15,16	17,18	19,20	
942,5	1,4	21,22	25,26	27,28	1,8	21,22	23,24	25,26	3
	3	29,30	1,2	7,8		27,28	29,30	1,2	
	5	9,10	11,12	13,14		3,4	5,6	7,8	
	10	15,16	17,18	19,20		9,10	11,12	13,14	
1486,4	1,4	17,18	19,20	21,22	2,2	10,11	12,13	14,15	2,8
	3	23,24	25,26	27,28		16,17	18,19	20,21	
	5	29,30	1,2	3,4		22,23	24,25	26,27	
	10	5,6	7,8	9		28,29	30	4,5	
1960	1,4	6,7	8,9	10,11	2,9	13,14	15,16	17,18	3
	3	12,13	14,15	16,17		19,20	21,22	23,24	
	5	18,19	20,21	22,23		25,26	27,28	29,30	
	10	24,25	26,27	28,29		1,2	3,4	5,6	
	15	1,2	3,4	5,6		7,8	9,10	11,12	
	20	7,8	9,10	11,12		13,14	15,16	17,18	
2140	1,4	19,20	21,22	23,24	2	14,15	16,17	18,19	3
	3	25,26	27,28	29,30		20,21	22,23	24,25	
	5	1,2	3,4	5,6		26,27	28,29,30	1,2	
	10	7	9,10	11,12		3,4	5,6	7,8	

lte_fdd_1

lte_fdd_2

lte_fdd_3

lte_fdd_4

lte_fdd_5

lte_fdd_6

lte_fdd_7

lte_fdd_8

lte_fdd_9

lte_fdd_10

Σχήμα – Πίνακας 3.12: Παραλλαγές για LTE FDD Dublexing (10dbm)

Τελικώς, έχουμε δημιουργήσει 161 καινούργια workbooks με τις 1500 μετρήσεις τους σε κάθε ένα από τα 32 ηλεκτρόδια-στήλες, όπου κάθε ένα από τα 160 workbooks αντιπροσωπεύει μια διαφορετική παραλλαγή της LTE ακτινοβολίας που χρησιμοποιήσαμε και το 1 εναπομείναν workbook αντιπροσωπεύει τις EMC μετρήσεις που έγιναν χωρίς ακτινοβολία LTE.

Στο κεφάλαιο 4 χρησιμοποιούμε τα 161 αυτά αρχεία που δημιουργήσαμε για να οργανώσουμε τις EMC μετρήσεις υπό ακτινοβολία LTE ή όχι με πιο εύχρηστη δομή, ώστε να εξάγουμε από τα τελευταία στατιστικές παραμέτρους οι οποίες θα μας βοηθήσουν ώστε να περιγράψουμε αρχικά την κανονικότητα των μετρήσεων και στη συνέχεια ώστε να εξάγουμε μέσω του t-test συμπέρασμα για την συμβατότητα της LTE ακτινοβολίας, στις διάφορες παραλλαγές της, με το σύστημα σηματοληψίας των ηλεκτροεγκεφαλικών δυναμικών.

3.5.2 Οργάνωση των EEG και EP μετρήσεων υπό ακτινοβολία WCDMA

Μετά την ολοκλήρωση του πειράματος για κάθε εξεταζόμενο, για κάθε condition (OFF/ON) και για κάθε αντίστοιχο Hayling (A ή B ή C) έχουμε 32 φύλλα-sheet του Excel, ένα για κάθε ηλεκτρόδιο, τα οποία αποτελούνται από 1500 γραμμές που αντιστοιχούν σε 1500 χρονικές στιγμές και 30 στήλες που η κάθε μία αντιστοιχεί σε ερώτηση του test Hayling. Το νόημα των πολλών ερωτήσεων είναι η αποθρομβοποίηση των μετρήσεων, η οποία τελικά επιτυγχάνεται βρίσκοντας το μ.ο. των 30 ερωτήσεων για κάθε χρονική στιγμή. Τα πρώτα 500ms αντιστοιχούν στο EEG, γιατί είναι πριν το ακουστικό ερέθισμα, ενώ τα επόμενα 1000 λαμβάνονται μετά την έναρξη του ακουστικού ερεθίσματος οπότε είναι προκλητά δυναμικά (EP).

Με τη βοήθεια κώδικα γλώσσας matlab επεξεργαζόμαστε τις λαμβανόμενες μετρήσεις EEG και EP. Αρχικά, αφαιρούμε από κάθε τιμή του EEG το μέσο όρο όλων των τιμών του EEG (δηλαδή τον μ.ο. μεταξύ των 500 χρονικών τιμών και των 30 ερωτήσεων). Στη συνέχεια, αφαιρούμε από κάθε τιμή του EP το μ.ο. των τελευταίων 100 ms του EEG. Η τελευταία είναι μια πολύ συνηθισμένη τακτική στην επεξεργασία δεδομένων ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος, η οποία κατά κάποιο τρόπο καθιστά πιο ομαλή τη μετάβαση από το EEG στο EP. Οι τροποποιημένες πλέον μετρήσεις που προκύπτουν για τα EEG και EP αποθηκεύονται σε δύο διαφορετικά αρχεία xls με την αντίστοιχη ονομασία. Συνοψίζοντας, μετά το πέρας της εκτέλεσης του παραπάνω κώδικα για όλα τα διαθέσιμα αρχεία μας, έχουμε δημιουργήσει ένα πλήθος από

$$2 \text{ (ON/OFF)} \times 3 \text{ (Hayling A,B,C)} \times 15 \text{ (σύνολο εθελοντών)} \times 2 \text{ (EEG/EP)} = 180 \text{ αρχεία}$$

που τα ομαδοποιούμε ανάλογα, ώστε να προχωρήσουμε στην στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων, όπως θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι μέθοδοι στατιστικής επεξεργασίας των δεδομένων του EMC ελέγχου και στη συνέχεια του ηλεκτροεγκεφαλικού σήματος που καταγράφεται. Στο πρώτο μέρος, στις παραγράφους 4.1 και 4.2, δίνονται συνοπτικά οι απαραίτητες πληροφορίες για τους στατιστικούς ελέγχους που εφαρμόστηκαν στην επεξεργασία των μετρήσεων και ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματά τους για κάθε διαφορετική περίπτωση μέτρησης. Πιο συγκεκριμένα, δίνονται τα αποτελέσματα των ελέγχων από μετρήσεις που συλλαμβάνονται από ομοίωμα ανθρώπινου εγκεφάλου για τον EMC έλεγχο του συστήματος καθώς και από μετρήσεις του ανθρώπινου εγκεφάλου με ή χωρίς την ακτινοβολία σήματος. Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου, στην παράγραφο 4.3, η στατιστική ανάλυση επεκτείνεται σε διαφόρων ειδών συγκρίσεις μεταξύ των μετρήσεων που πάρθηκαν από το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα για κάθε περίπτωση ακτινοβολίας και στα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτές.

4.1 Έλεγχος Κανονικότητας των μετρήσεων

Το πρώτο βήμα στη στατιστική μελέτη των μετρήσεών μας είναι ο έλεγχος της κανονικότητάς³⁰ τους. Το αποτέλεσμα αυτού του ελέγχου θα καθορίσει το αν θα επιλεγούν παραμετρικά ή απαραμετρικά τεστ για την περαιτέρω μελέτη των μετρήσεων ώστε να αποφανθούμε για τη σημαντικότητα τους. Το τεστ το οποίο επιλέχθηκε για να εξετάσει την υπόθεση ότι οι μεταβλητές προέρχονται από κανονικό πληθυσμό είναι το Kolmogorov-Smirnov.

Έλεγχοι κανονικότητας Kolmogorov – Smirnov

Οι στατιστικοί έλεγχοι Kolmogorov – Smirnov χρησιμοποιούνται συνήθως αντί του χ^2 – ελέγχου στην περίπτωση που το μέγεθος του δείγματος N είναι μικρό και όταν οι απόλυτες συχνότητες της θεωρητικής κατανομής είναι μικρές. Είναι δύο ξεχωριστοί έλεγχοι που στηρίζονται στο ίδιο μαθηματικό υπόβαθρο. Αναφέρονται σαν έλεγχος «ενός δείγματος» ο οποίος αναπτύχθηκε από τον Kolmogorov και έχει σαν σκοπό τον έλεγχο καλής προσαρμογής ενός θεωρητικού νόμου σε μια εμπειρική κατανομή αθροιστικών συχνοτήτων και σαν έλεγχος «δύο δειγμάτων» (προτάθηκε από τον Smirnov) που αναφέρεται στη σύγκριση δύο αθροιστικών κατανομών συχνοτήτων. Ο τελικός σκοπός και στις δύο περιπτώσεις είναι να διαπιστωθεί αν τα δύο δείγματα προέρχονται ή όχι από τον ίδιο πληθυσμό.

Ο έλεγχος **Kolmogorov** συγκρίνει τις αθροιστικές εμπειρικές με τις αντίστοιχες αθροιστικές θεωρητικές συχνότητες, δηλαδή πρόκειται για έναν απαραμετρικό έλεγχο. Για την εφαρμογή του ακολουθούνται τα εξής στάδια:

- Ταξινομούνται τα δεδομένα του δείγματος κατ' αύξουσα τάξη.
- Υπολογίζεται η αθροιστική εμπειρική συχνότητα cfi από τη σχέση $cfi=i/N$ όπου $i=1, 2, \dots, N$ με N το μέγεθος του δείγματος.
- Υπολογίζονται οι αθροιστικές θεωρητικές συχνότητες (cFi) με βάση τη θεωρητική κατανομή που επιλέχθηκε.

¹⁰ «κανονική» ονομάζεται η κατανομή που το σύνολο των τιμών της συγκεντρώνεται γύρω από το μέσο και όσο «απομακρυνόμαστε» από αυτόν, τόσο μειώνονται και οι παρατηρήσεις (βλ. σχήμα 4.1)

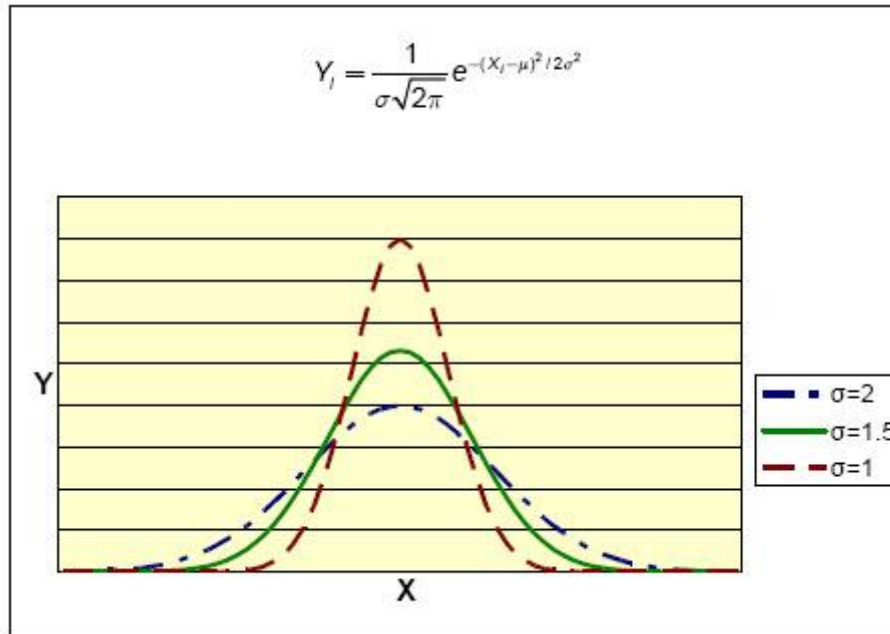
- Υπολογίζονται οι αποκλίσεις από τη θεωρητική κατανομή ανάλογα με το δείγμα και τον θεωρητικό νόμο. Για την περίπτωση των διακριτών μεταβλητών που εφαρμόζεται στην περίπτωσή μας υπολογίζονται οι απόλυτες αποκλίσεις μεταξύ αθροιστικών θεωρητικών συχνοτήτων (cFi) και των αντίστοιχων εμπειρικών θεωρητικών συχνοτήτων (cfi) και λαμβάνεται η μέγιστη απόλυτη διαφορά: $D = \max |cFi - cfi|$. Έπειτα εφαρμόζεται δίπλευρος έλεγχος όπου τίθεται μηδενική υπόθεση $H_0 : cFi = cfi$ έναντι της εναλλακτικής υπόθεσης $H_1 : cFi \neq cfi$. Στη συνέχεια ελέγχεται η μηδενική υπόθεση H_0 στη στάθμη σημαντικότητας α για N βαθμούς ελευθερίας. Ο έλεγχος γίνεται συγκρίνοντας την τιμή D με τις κρίσιμες τιμές του πίνακα των Kolmogorov – Smirnov για ένα δείγμα. Αν $D > D_\alpha$ τότε απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση δηλαδή δεν υπάρχει καλή προσαρμογή του θεωρητικού νόμου στην κατανομή συχνοτήτων των τιμών της μεταβλητής του δείγματος. Αν $D < D_\alpha$ τότε γίνεται αποδεκτή η μηδενική υπόθεση.

Ο έλεγχος δύο δειγμάτων (**Smirnov**) είναι ένας έλεγχος υπόθεσης που έχει σαν σκοπό να διαπιστωθεί αν δύο ανεξάρτητα δείγματα προέρχονται ή όχι από τον ίδιο πληθυσμό. Τα βήματα εργασίας έχουν ως εξής:

- Ελέγχεται το σύνολο των στοιχείων των δύο υπό εξέταση δειγμάτων με μεγέθη N_1 και N_2 .
- Διατηρώντας τα δύο δείγματα σε χωριστές στήλες ταξινομούνται όλα μαζί κατ' αύξουσα τάξη μεγέθους (σαν να ήταν ένα δείγμα).
- Υπολογίζονται σ' αυτήν τη διάταξη για κάθε δείγμα οι αθροιστικές συχνότητες $cfi = i / N_1$ όπου $i = 1, 2, \dots, N_1$ και $cfj = j / N_2$ όπου $j = 1, 2, \dots, N_2$
- Υπολογίζονται οι διαφορές $D = cf_{1,k} - cf_{2,k}$ με $k = 1, 2, \dots, (N_1 + N_2)$ για το σύνολο $N_1 + N_2$ των τιμών της παραμέτρου που εξετάζεται στα δύο δείγματα
- Τίθεται η μηδενική υπόθεση H_0 : τα δύο δείγματα προέρχονται από τον ίδιο πληθυσμό έναντι της εναλλακτικής υπόθεσης H_1 : τα δύο δείγματα προέρχονται από διαφορετικούς πληθυσμούς.
- Υπολογίζεται η μέγιστη απόλυτη διαφορά $D = \max |cf_{1,k} - cf_{2,k}|$ για $k = 1, 2, \dots, (N_1 + N_2)$ και συγκρίνεται στη στάθμη σημαντικότητας για N_1 και N_2 βαθμούς ελευθερίας. Αν $D > D_\alpha$ τότε απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση δηλαδή τα δύο δείγματα προέρχονται από διαφορετικούς πληθυσμούς. Αν $D < D_\alpha$ τότε γίνεται αποδεκτή η μηδενική υπόθεση.

Χρησιμοποιώντας ειδικό λογισμικό στατιστικής επεξεργασίας για το τεστ Kolmogorov – Smirnov παρατηρούμε πως όλες οι τιμές είναι πάνω από το σύνηθες επίπεδο σημαντικότητας, συνεπώς συμπεραίνουμε την κανονικότητα των μετρήσεων που πήραμε για τον έλεγχο EMC της διάταξης με τα προαναφερθέντα ακτινοβολούντα σήματα.

Η μορφή, συνεπώς, της κανονικής κατανομής των μετρήσεών μας απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα και μπορούμε πλέον να θεωρήσουμε ότι οι κατανομές ανήκουν σε παραμετροποιημένες οικογένειες κατανομών πιθανότητας, ώστε να εφαρμόσουμε τις παραμετρικές μεθόδους ανάλυσης.



Σχήμα 4.1: Γραφικές παραστάσεις κανονικών κατανομών (για πληθυσμούς με ίσους μέσους μ και διακυμάνσεις σ που φαίνονται στο σχήμα).

Η παραμετρική μέθοδος που επιλέχθηκε για να ελεγχθεί η *σημαντικότητα* των μετρήσεων είναι ο έλεγχος ισότητας των μέσων ή αλλιώς το Student t-test.

4.2 Έλεγχος Υποθέσεων

Μεταξύ των συνηθέστερα χρησιμοποιούμενων ελέγχων υποθέσεων ή στατιστικών δοκιμασιών σημαντικότητας (significance tests) που εφαρμόζονται σε ομάδες δεδομένων (πληθυσμιακά δείγματα) είναι η σειρά των δοκιμασιών Student.

Student Test (T-Test)

Σαν t-test ονομάζουμε γενικά οποιονδήποτε έλεγχο υποθέσεων στον οποίο το στατιστικό ακολουθεί την κατανομή Student. Βασική του προϋπόθεση είναι η κανονικότητα των δεδομένων, η οποία αποδείχθηκε παραπάνω. Μια από τις συνηθέστερες δοκιμασίες t-test είναι ο **έλεγχος ισότητας των μέσων**, δηλαδή η σύγκριση δύο μέσων τιμών. Το αποτέλεσμα αυτών των δοκιμασιών είναι η αποδοχή ή η απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης H_0 . Η μηδενική υπόθεση γενικά δηλώνει ότι: "Οι διαφορές, αποκλίσεις ή έκτροπα αποτελέσματα οφείλονται αποκλειστικά σε τυχαία και όχι σε συστηματικά σφάλματα". Η εναλλακτική υπόθεση H_a δηλώνει το ακριβώς αντίθετο.

Για το t-test *Ελέγχου Ισότητας των Μέσων* μηδενική υπόθεση είναι η ισότητα των μέσων τιμών (μ_1 και μ_2) δύο πληθυσμών από τους οποίους εξήχθησαν τα δείγματα n_1 και n_2 αντίστοιχα. Η εναλλακτική υπόθεση είναι ότι οι μέσες τιμές διαφέρουν σημαντικά. Δηλαδή:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad (\text{Τυχαίες αποκλίσεις})$$

$$H_a: \mu_1 \neq \mu_2 \quad (\text{Συστηματικές αποκλίσεις})$$

Εσφαλμένη απόρριψη της H_0 , ενώ ισχύει, συνιστά σφάλμα 1ου είδους, ενώ εσφαλμένη αποδοχή της H_0 , ενώ δεν ισχύει, συνιστά σφάλμα 2ου είδους. Όλες οι δοκιμασίες σημαντικότητας παρέχουν αποτελέσματα σε προκαθορισμένη στάθμη εμπιστοσύνης % (confidence level, CL%)¹¹. Οι πλέον χρησιμοποιούμενες στάθμες εμπιστοσύνης είναι 90%, 95% και 99%, με πλέον συνηθισμένη το 95%.

¹¹ CL 95% σημαίνει ότι: Σε περίπτωση απόρριψης της H_0 , είμαστε σίγουροι ότι κάναμε το σωστό στο 95% ή περισσότερο των περιπτώσεων. Με άλλα λόγια, διακινδυνεύουμε μια πιθανότητα όχι μεγαλύτερη από $(100-95)/100 = 0,05$ να κάνουμε σφάλμα 1ου είδους.

Οι δύο μέσες τιμές και οι αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις υπολογίζονται με βάση τις ακόλουθες γνωστές εξισώσεις:

$$\bar{x}_1 = \sum_{i=1}^{n_1} x_i / n_1 \qquad \bar{x}_2 = \sum_{i=1}^{n_2} x_i / n_2$$

$$s_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_1} (\bar{x}_1 - x_i)^2}{n_1 - 1}} \qquad s_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_2} (\bar{x}_2 - x_i)^2}{n_2 - 1}}$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η εκ συνένωσης, η τυπική απόκλιση s_{12} :

$$S_{12} = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

Και τελικά υπολογίζεται το στατιστικό στοιχείο t-πειραματικό t_{exp} :

$$t_{\text{exp}} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{S_{12} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}}$$

Η τιμή του t_{exp} συγκρίνεται με την κρίσιμη θεωρητική τιμή t_{th} που αντιστοιχεί στους δεδομένους βαθμούς ελευθερίας N (εδώ είναι $N = n_1 + n_2 - 2$) και στην επιλεγμένη στάθμη εμπιστοσύνης. Πίνακες κρίσιμων τιμών t βρίσκονται σε όλα τα βιβλία στατιστικής. Εάν $t_{\text{exp}} > t_{\text{th}}$ η H_0 απορρίπτεται, ειδαίλλως η H_0 γίνεται αποδεκτή.

Στην προκειμένη περίπτωση το t_{th} μας είναι 1.96, άρα από τις μετρήσεις που πήραμε από κάθε ένα από τα 32 ηλεκτρόδια για κάθε είδος ακτινοβολίας ελέγχουμε αν το t_{exp} του υπολείπεται της τιμής 1.96. Σε περίπτωση που $t_{\text{exp}} < 1.96$, οι μετρήσεις από το συγκεκριμένο ηλεκτρόδιο για τη συγκεκριμένη ακτινοβολία γίνονται αποδεκτές, καθώς η υπόθεση H_0 γίνεται αποδεκτή ($\mu_1 = \mu_2$) και άρα η μέτρηση είναι αποδεκτή.

Στην επόμενη παράγραφο παραθέτουμε για τις μετρήσεις από τα 32 ηλεκτρόδια τους μέσους όρους και τυπικές αποκλίσεις από αυτές σε συνθήκες ακτινοβολίας ή μη και στη συνέχεια δίνονται τα αποτελέσματα επιτυχίας του t-test σε κάθε περίπτωση. Για οικονομία χώρου, παραθέτουμε για το σύνολο των 32 ηλεκτροδίων, σε % ποσοστό, τη μέση τιμή, την τυπική απόκλιση και το αποτέλεσμα του t-test των μετρήσεων από τα 32 ηλεκτρόδια για κάθε περίπτωση ακτινοβολίας.

4.2.1 T-test μεταξύ EMC μετρήσεων υπό ακτινοβολία σήματος LTE ή όχι

Στο t-test *Ελέγχου Ισότητας των Μέσων*, όπως είπαμε και προηγουμένως, ελέγχουμε ουσιαστικά αν η διαφοροποίηση της μέσης τιμής δύο πληθυσμών είναι αρκετή ώστε να θεωρήσουμε ότι οι δυο πληθυσμοί διαφέρουν ουσιαστικά. Ο δεύτερος από τους παραπάνω δυο πληθυσμούς (μετρήσεων) προκύπτει από τροποποίηση που επήλθε στον πρώτο πληθυσμό. Αν οι μέσες τιμές τους διαφέρουν ουσιαστικά τότε θα σημαίνει πως η τροποποίηση που επήλθε στον πρώτο διαφοροποίησε ισχυρά την τιμή του αρχικού πληθυσμού και άρα κρίνεται αναγκαίο να θεωρηθούν στο εξής ως δύο αυτοτελείς και διαφορετικοί πληθυσμοί.

Στην προκειμένη περίπτωση της εργασίας μας, στον πρώτο πληθυσμό του t-test αντιστοιχεί πάντα το πλήθος των (1500 X 32) μετρήσεων από τα 32 ηλεκτρόδια του οργάνου ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος σε ομοίωμα ανθρώπινης κεφαλής, χωρίς την ακτινοβολία κανενός είδους ραδιοκύματος. Η τιμές του πρώτου πληθυσμού, αν δεν είναι μηδέν, είναι λοιπόν λίγο πάνω ή λίγο κάτω από τα 0mV εξαιτίας κάποιων μικρών θετικών ή αρνητικών τάσεων στο σύστημα πιθανότατα από τα όργανα μέτρησης και τη θερμοκρασία (H/M κύματα δεν μπορούν να παρεμβάλουν, καθώς το σύστημα είναι μονωμένο μέσα σε κλωβό Faraday). Από την άλλη, στο δεύτερο πληθυσμό του t-test αντιστοιχεί κάθε φορά το πλήθος των (1500 X 32) μετρήσεων από τα 32 ηλεκτρόδια του οργάνου ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος σε ομοίωμα ανθρώπινης κεφαλής, με διαφορετικών παραμέτρων σήμα LTE κάθε φορά στο κεφάλι.

Συνεπώς, δημιουργούνται τόσα ζεύγη πληθυσμών που υπόκεινται σε t-test έλεγχο, όσα και τα διαφορετικά σήματα ακτινοβολήσης του κεφαλικού ομοιώματος χρησιμοποιήσουμε.

Εμείς, για την πληρότητα του πειράματος, χρησιμοποιήσαμε και μετρήσαμε τα αποτελέσματα από διάφορες παραλλαγές του εξεταζόμενου πρωτοκόλλου LTE, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μια μεγάλης γκάμας στατιστικών αποτελεσμάτων για κάθε πιθανή παραλλαγή του σήματος ακτινοβολίας. Η πρώτη διάκριση του χρησιμοποιούμενου πρωτοκόλλου επικοινωνίας που έγινε ήταν ως προς το multiplexing method που θα χρησιμοποιεί για την full-duplex επικοινωνία και η οποία λαμβάνει χώρα στην πρώτη στήλη των πινάκων. Στη δεύτερη στήλη των στατιστικών αποτελεσμάτων γίνεται η διάκριση ως προς την ισχύ του σήματος που επιλέχθηκε για την ακτινοβολήση του κεφαλικού ομοιώματος, ενώ στη συνέχεια οι παραλλαγές έχουν να κάνουν με τη διαμόρφωση, τη συχνότητα και το εύρος ζώνης που επιλέχθηκε να έχει το σήμα. Σημειώνουμε πως στο Time Division Duplexing

(TDD) η διαμόρφωση που επιλέχθηκε είναι οικουμενική και μοναδική, καθώς η προδιαγραφή του πρωτοκόλλου δεν υποστηρίζει κάποια διαφορετική διαμόρφωση, εκτός της QPSK. Αντιθέτως, στο Frequency Division Duplexing (FDD) οι διαμορφώσεις που δύνανται να επιλεγθούν και χρησιμοποιηθούν είναι με τη σειρά που αναγράφονται στους πίνακες Q-PSK, 16-QAM και 64-QAM.

Τα στατιστικά αποτελέσματα από τη σύγκριση των μετρήσεων (από τα ηλεκτρόδια του οργάνου ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος στο κεφαλικό ομοίωμα) μεταξύ της περίπτωσης μη-ακτινοβολίας και της κάθε διαφορετικής περίπτωσης/παραλλαγής ακτινοβολίας της κεφαλής, παραθέτονται ακολούθως στους παρακάτω 4 πίνακες:

Dublexing	Power	MOD	f	BW	Average	Std Dev	t-test
FDD	10dBm	QPSK	737	1,4	-2,72865	6,312674	94%
				3	-2,82463	6,484647	84%
				5	-2,86586	6,504375	88%
				10	-2,86146	6,473713	84%
			942,5	1,4	-4,36727	6,675078	19%
				3	-2,37557	6,633159	13%
				5	-2,45192	6,64567	22%
				10	-2,39682	6,630263	13%
			1486,4	1,4	-2,56827	6,363772	84%
				3	-2,64163	6,379777	88%
				5	-2,62524	6,36003	88%
				10	-2,62605	6,350539	84%
			1960	1,4	-2,51006	6,464605	84%
				3	-2,51183	6,46259	81%
				5	-2,49456	6,441474	84%
				10	-2,51103	6,4452	81%
				15	-2,50317	6,421138	84%
				20	-2,49139	6,422876	78%
			2140	1,4	7,240515	6,228454	0%
				3	-1,60595	6,621574	13%
				5	-1,54608	6,60947	19%
				10	-1,57977	6,616578	13%
OFF					-2,81548	6,326535	

Dublexing	Power	MOD	f	BW	Average	Stdr Dev	t-test
FDD	10dBm	16QAM	737	1,4	-2,72865	6,312674	93,75%
				3	-2,82463	6,484647	84,38%
				5	-2,86586	6,504375	87,50%
				10	-2,86146	6,473713	84,38%
			942,5	1,4	-4,36727	6,675078	18,75%
				3	-2,37557	6,633159	12,50%
				5	-2,45192	6,64567	21,88%
				10	-2,39682	6,630263	12,50%
			1486,4	1,4	-2,56827	6,363772	84,38%
				3	-2,64163	6,379777	87,50%
				5	-2,62524	6,36003	87,50%
				10	-2,62605	6,350539	84,38%
			1960	1,4	-2,51006	6,464605	84,38%
				3	-2,51183	6,46259	81,25%
				5	-2,49456	6,441474	84,38%
				10	-2,51103	6,4452	81,25%
				15	-2,50317	6,421138	84,38%
				20	-2,49139	6,422876	78,13%
			2140	1,4	7,240515	6,228454	0,00%
				3	-1,60595	6,621574	12,50%
				5	-1,54608	6,60947	18,75%
				10	-1,57977	6,616578	12,50%
		64QAM	737	1,4	-2,72865	6,312674	93,75%
				3	-2,82463	6,484647	84,38%
				5	-2,86586	6,504375	87,50%
				10	-2,86146	6,473713	84,38%
			942,5	1,4	-4,36727	6,675078	18,75%
				3	-2,37557	6,633159	12,50%
				5	-2,45192	6,64567	21,88%
				10	-2,39682	6,630263	12,50%
			1486,4	1,4	-2,56827	6,363772	84,38%
				3	-2,64163	6,379777	87,50%
				5	-2,62524	6,36003	87,50%
				10	-2,62605	6,350539	84,38%
			1960	1,4	-2,51006	6,464605	84,38%
				3	-2,51183	6,46259	81,25%
				5	-2,49456	6,441474	84,38%
				10	-2,51103	6,4452	81,25%
				15	-2,50317	6,421138	84,38%
				20	-2,49139	6,422876	78,13%
			2140	1,4	7,240515	6,228454	0,00%
				3	-1,60595	6,621574	12,50%
				5	-1,54608	6,60947	18,75%
				10	-1,57977	6,616578	12,50%

Σχήμα – Πίνακας 4.2:
Στατιστικά αποτελέσματα μετρήσεων για σήμα LTE FDD και 10dBm ισχύος.

Dublexing	Power	MOD	f	BW	Average	Std Dev	t-test
FDD	17dBm	16QAM	737	1,4	-2,72865	6,312674	93,75%
				3	-2,82463	6,484647	84,38%
				5	-2,86586	6,504375	87,50%
				10	-2,86146	6,473713	84,38%
			942,5	1,4	-4,36727	6,675078	18,75%
				3	-2,37557	6,633159	12,50%
				5	-2,45192	6,64567	21,88%
				10	-2,39682	6,630263	12,50%
			1486,4	1,4	-2,56827	6,363772	84,38%
				3	-2,64163	6,379777	87,50%
				5	-2,62524	6,36003	87,50%
				10	-2,62605	6,350539	84,38%
			1960	1,4	-2,51006	6,464605	84,38%
				3	-2,51183	6,46259	81,25%
				5	-2,49456	6,441474	84,38%
				10	-2,51103	6,4452	81,25%
				15	-2,50317	6,421138	84,38%
				20	-2,49139	6,422876	78,13%
			2140	1,4	7,240515	6,228454	0,00%
				3	-1,60595	6,621574	12,50%
				5	-1,54608	6,60947	18,75%
				10	-1,57977	6,616578	12,50%
		64QAM	737	1,4	-2,72865	6,312674	93,75%
				3	-2,82463	6,484647	84,38%
				5	-2,86586	6,504375	87,50%
				10	-2,86146	6,473713	84,38%
			942,5	1,4	-4,36727	6,675078	18,75%
				3	-2,37557	6,633159	12,50%
				5	-2,45192	6,64567	21,88%
				10	-2,39682	6,630263	12,50%
			1486,4	1,4	-2,56827	6,363772	84,38%
				3	-2,64163	6,379777	87,50%
				5	-2,62524	6,36003	87,50%
				10	-2,62605	6,350539	84,38%
			1960	1,4	-2,51006	6,464605	84,38%
				3	-2,51183	6,46259	81,25%
				5	-2,49456	6,441474	84,38%
				10	-2,51103	6,4452	81,25%
				15	-2,50317	6,421138	84,38%
				20	-2,49139	6,422876	78,13%
			2140	1,4	7,240515	6,228454	0,00%
				3	-1,60595	6,621574	12,50%
				5	-1,54608	6,60947	18,75%
				10	-1,57977	6,616578	12,50%

Dublexing	Power	MOD	f	BW	Average	Std Dev	t-test
FDD	17dBm	QPSK	737	1,4	-2,72865	6,312674	94%
				3	-2,82463	6,484647	84%
				5	-2,86586	6,504375	88%
				10	-2,86146	6,473713	84%
			942,5	1,4	-4,36727	6,675078	19%
				3	-2,37557	6,633159	13%
				5	-2,45192	6,64567	22%
				10	-2,39682	6,630263	13%
			1486,4	1,4	-2,56827	6,363772	84%
				3	-2,64163	6,379777	88%
				5	-2,62524	6,36003	88%
				10	-2,62605	6,350539	84%
			1960	1,4	-2,51006	6,464605	84%
				3	-2,51183	6,46259	81%
				5	-2,49456	6,441474	84%
				10	-2,51103	6,4452	81%
				15	-2,50317	6,421138	84%
				20	-2,49139	6,422876	78%
			2140	1,4	7,240515	6,228454	0%
				3	-1,60595	6,621574	13%
				5	-1,54608	6,60947	19%
				10	-1,57977	6,616578	13%
OFF					-2,81548	6,326535	

Σχήμα – Πίνακας 4.3:

Στατιστικά αποτελέσματα μετρήσεων για σήμα LTE FDD και 17dBm ισχύος.

Dublexing	Power	f	BW	Average	Std Dev	t-test
TDD	10dBm	1880	1,4	-2,85369	6,542831	16%
			3	-2,98725	6,544291	16%
			5	-2,74193	6,546078	9%
			10	-2,81605	6,536942	9%
			15	-2,78425	6,535277	13%
			20	-2,80396	6,54076	13%
		2017,5	5	2,846924	5,794398	13%
			10	-2,92976	6,206911	91%
			15	-2,92842	6,200549	91%
		2350	10	-2,91655	6,183437	91%
			15	-2,96554	6,172965	88%
			20	-2,86431	6,168272	94%
		2595	5	-2,90792	6,165605	91%
			10	-2,88467	6,108152	88%

Σχήμα – Πίνακας 4.4:

Στατιστικά αποτελέσματα μετρήσεων για σήμα LTE TDD και 10dBm ισχύος.

Dublexing	Power	f	BW	Average	Std Dev	t-test
TDD	17dBm	1880	1,4	-2,38481	6,277705	72%
			3	-2,73584	6,304887	94%
			5	-2,7618	6,276538	97%
			10	-2,67346	6,277895	94%
			15	-2,70488	6,275002	94%
			20	-2,70694	6,284916	94%
		2017,5	5	-2,71593	6,542608	6%
			10	-2,14518	6,53148	13%
			15	-2,10206	6,535295	9%
		2350	10	-1,86372	6,540479	9%
			15	-2,15472	6,535949	9%
			20	-2,41491	6,552172	13%
		2595	5	1,568239	6,136691	19%
			10	-2,81114	6,343048	91%
OFF				-2,77503	6,271913	

Σχήμα – Πίνακας 4.5:

Στατιστικά αποτελέσματα μετρήσεων για σήμα LTE TDD και 17dBm ισχύος.

Όπως εύκολα παρατηρούμε από την τελευταία στήλη, σε μερικές περιπτώσεις, το t-πειραματικό¹² (του t-test) των δυο συγκρινόμενων πληθυσμών δεν ήταν μικρότερο του κρίσιμου 1.96, ώστε το αποτέλεσμα του t-test να καταστεί επιτυχές.

Στις περιπτώσεις, λοιπόν αυτές, οι οποίες είναι χρωματισμένες και με κόκκινο χρώμα προς ευκολότερο διαχωρισμό κατά την ανάγνωση, οι μετρήσεις που πάρθηκαν κατά την ακτινοβολήση των συγκεκριμένων σημάτων LTE διέφεραν ουσιαστικά από τις μετρήσεις που πάρθηκαν ομοίως χωρίς την ύπαρξη κάποιου ακτινοβολούμενου σήματος στο κεφαλικό ομοίωμα, καθώς $t_{\text{exp}} > 1.96$ και το t-test απέτυχε.

¹² Θυμίζουμε το τ-πειραματικό του t-test είναι:

$$t_{\text{exp}} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{S_{12} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}}$$

όπου

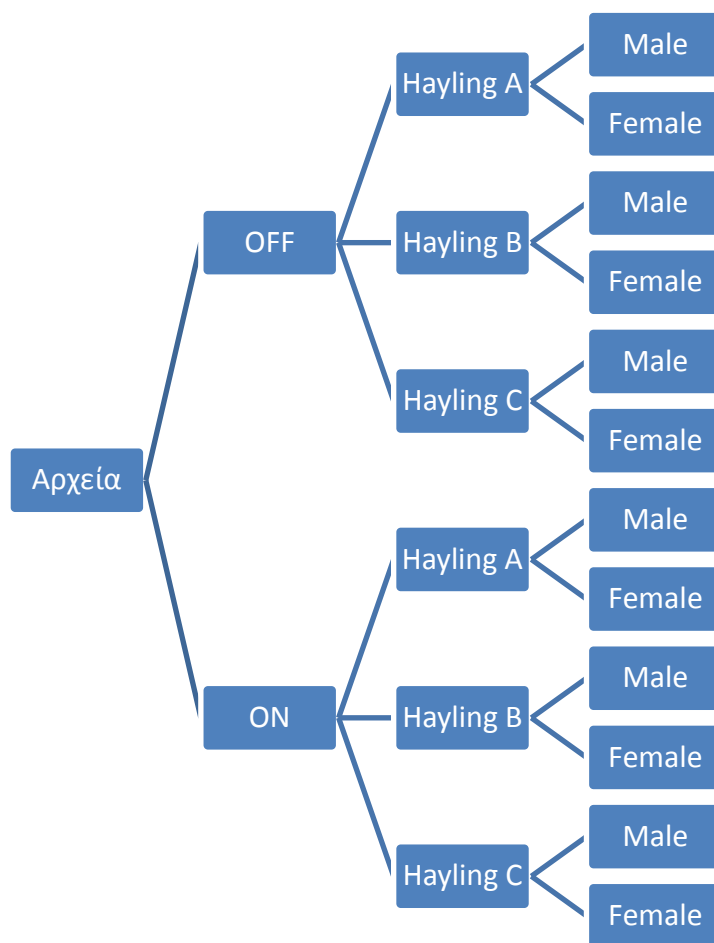
$$S_{12} = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

Ως επακόλουθο, συμπεραίνουμε από το παραπάνω πως για τις χρωματισμένες με κόκκινο ακτινοβολίες το σύστημα μέτρησης ηλεκτροεγκεφαλογραφημάτων δε καθίσταται ηλεκτρομαγνητικά συμβατό (EMC) με την κεραία εκπομπής σήματος LTE των συγκεκριμένων ιδιοτήτων.

Σε όλες τις άλλες, ωστόσο, περιπτώσεις ακτινοβολίας οι λαμβανόμενες μετρήσεις δε διαφέρουν σημαντικά από εκείνες δίχως ακτινοβολία, συνεπώς για τις μη-χρωματισμένες παραλλαγές του σήματος LTE το σύστημα μέτρησης ηλεκτροεγκεφαλογραφημάτων καθίσταται ηλεκτρομαγνητικά συμβατό με κεραία εκπομπής.

4.3 Συγκρίσεις Μετρήσεων EEG

Όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 3.5.2, έχουμε ήδη δημιουργήσει: $2 \text{ (ON/OFF)} \times 3 \text{ (Hayling A,B,C)} \times 15 \text{ (σύνολο εθελοντών)} \times 2 \text{ (EEG/EP)} = 180 \text{ αρχεία}$ τύπου xls. Επειδή στη συγκεκριμένη περίπτωση μας ενδιαφέρουν μόνο οι EEG μετρήσεις, έχουμε να ομαδοποιήσουμε τα 90 μόνο από αυτά τα αρχεία. Η ομαδοποίηση των τελευταίων γίνεται για να βγάλουμε το μέσο όρο των ενεργειών ανά ηλεκτρόδιο από το σύνολο των ατόμων κάθε φύλου (male/female). Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται εκτενώς η ιεραρχία που ακολουθήσαμε.



Σχήμα 4.6:

Ιεραρχία των ομαδοποιήσεων που ακολουθήθηκε για την οργάνωση των μετρήσεων

Σε κάθε ένα από τα 90 xls αρχεία, υπολογίσαμε, μέσω εντολών του Microsoft Excel, το άθροισμα των τετραγώνων των μV της εκάστοτε στήλης (που αναφέρεται σε ένα ηλεκτρόδιο) για κάθε χρονική στιγμή, για να βρούμε μία ποσότητα που να αντιστοιχεί στην ενέργεια κάθε ηλεκτροδίου, όπως φαίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\hat{E} = \int x^2 dx$$

Ο οποίος για σύνολο διακριτών μετρήσεων, και ειδικά για την περίπτωση μας, μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\hat{E} = \sum_{i=1}^{N=500} x^2$$

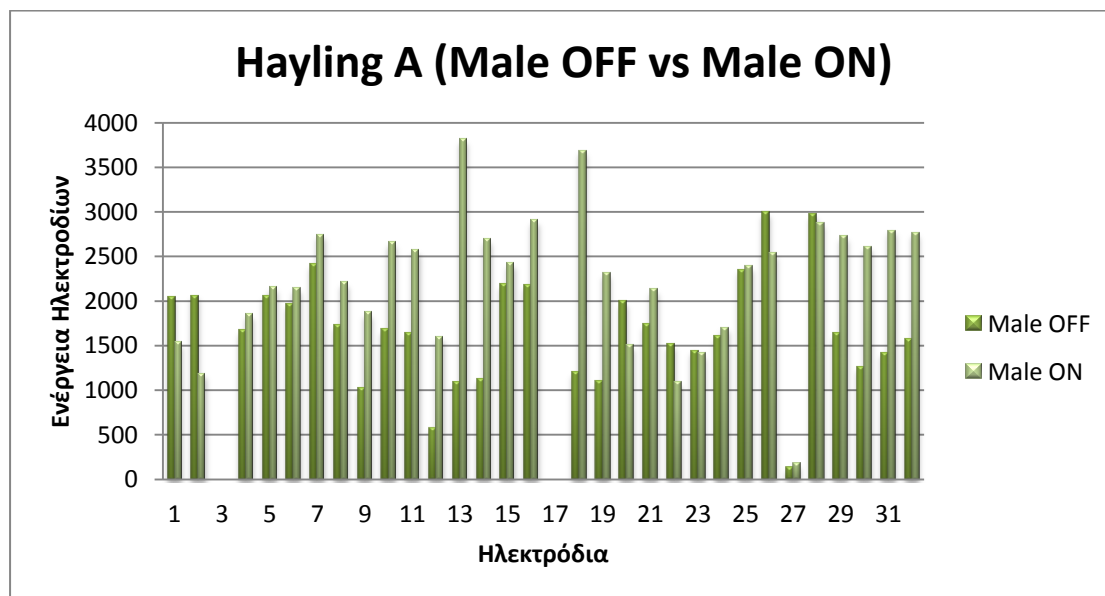
Στη συνέχεια, δημιουργήσαμε ένα συγκεντρωτικό xls με βάση το σχήμα της ιεραρχίας των ομαδοποιήσεων, ώστε να βρούμε τους μέσους όρους των ενεργειών του κάθε ηλεκτροδίου, για κάθε φύλο, σε κάθε περίπτωση τεστ (Hayling A,B,C) και συνθήκης ακτινοβολίας (ON/OFF).

Τα προς σύγκριση αποτελέσματα, σε κάθε ένα από τα 3 τεστ (Hayling A,B,C), που ενδιαφέρουν είναι:

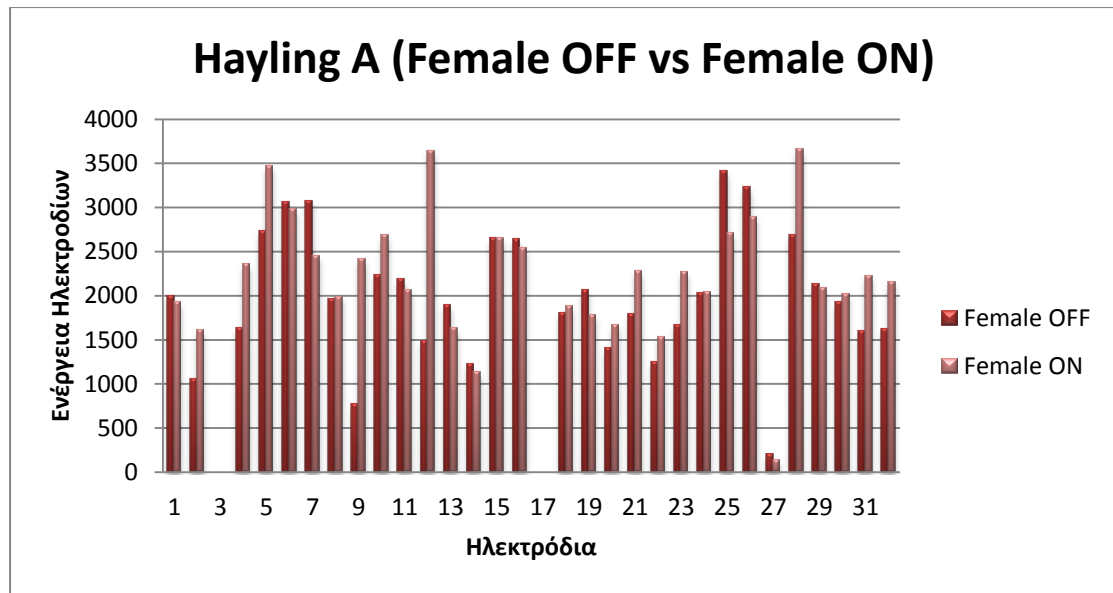
- Male OFF – Male ON
- Female OFF – Female ON
- Male OFF – Female OFF
- Male ON – Female ON

Τα διαγράμματα που προέκυψαν φαίνονται παρακάτω.

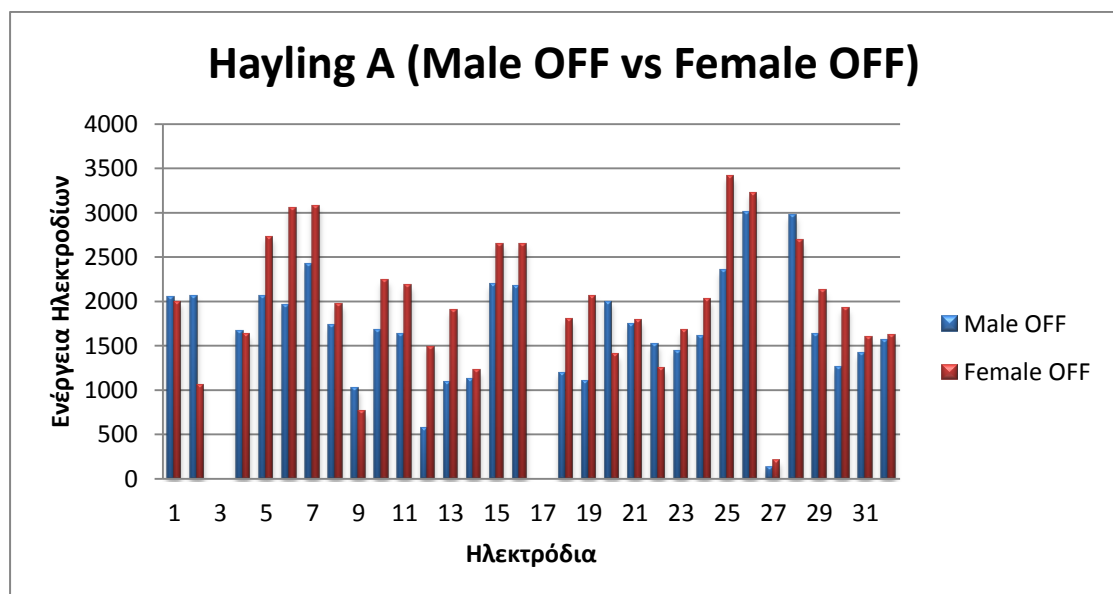
- Για το Hayling A έχουμε το παρακάτω σκετ διαγραμμάτων:



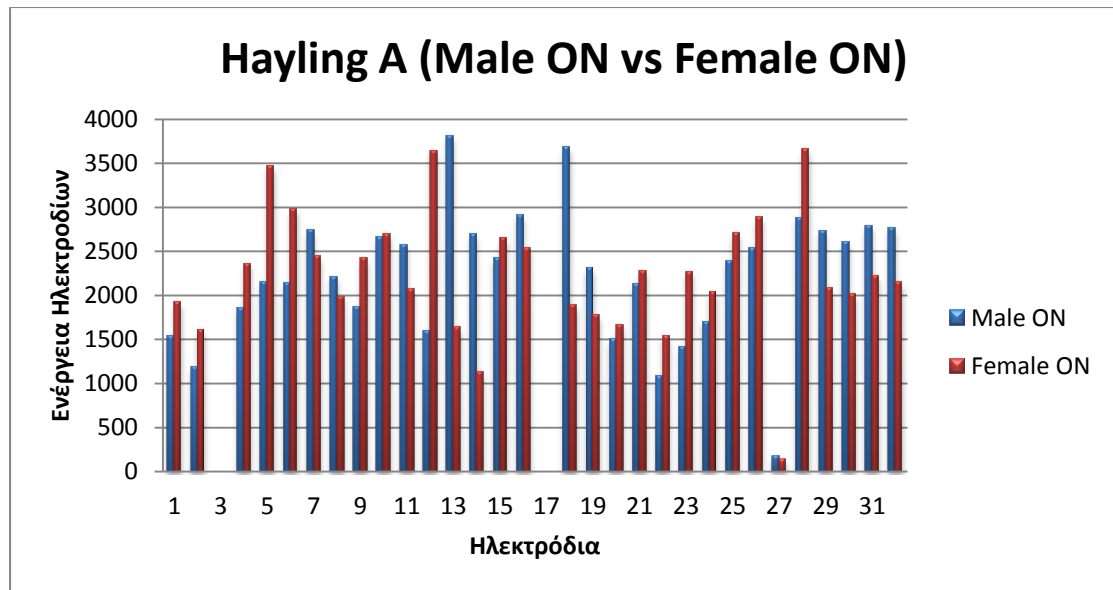
Σχήμα 4.7: Hayling A (Male OFF vs Male ON)



Σχήμα 4.8: Hayling A (Female OFF vs Female ON)

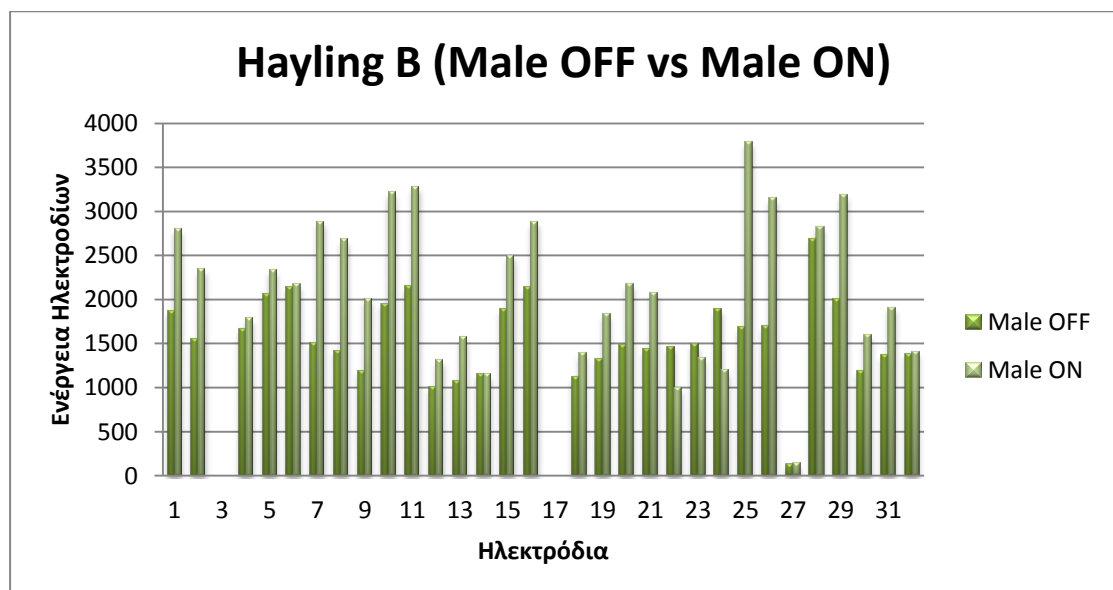


Σχήμα 4.9: Hayling A (Male OFF vs Female OFF)

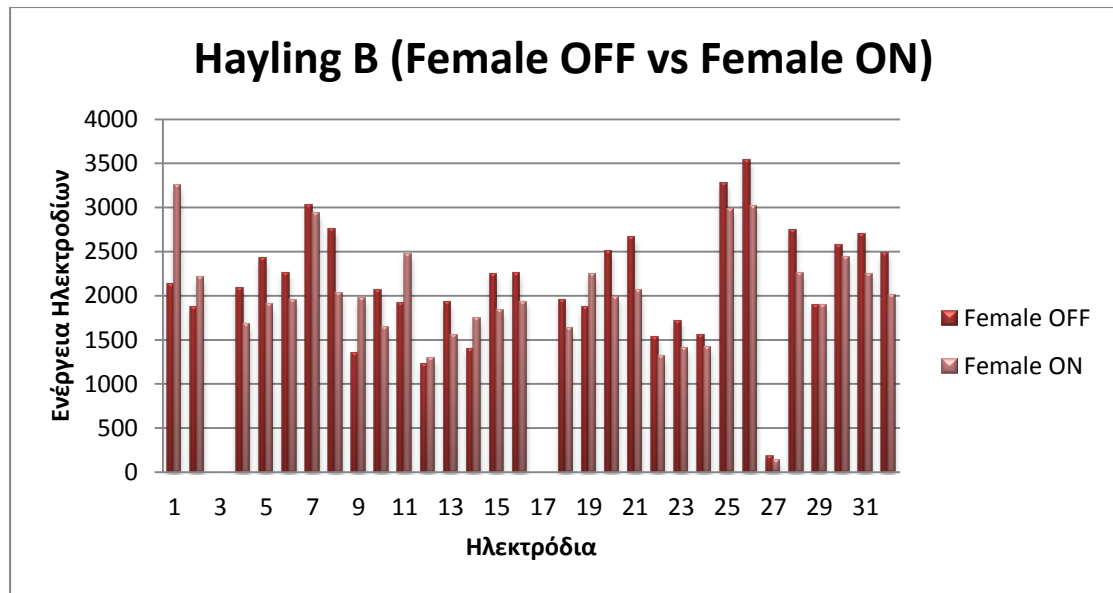


Σχήμα 4.10: Hayling A (Male ON vs Female ON)

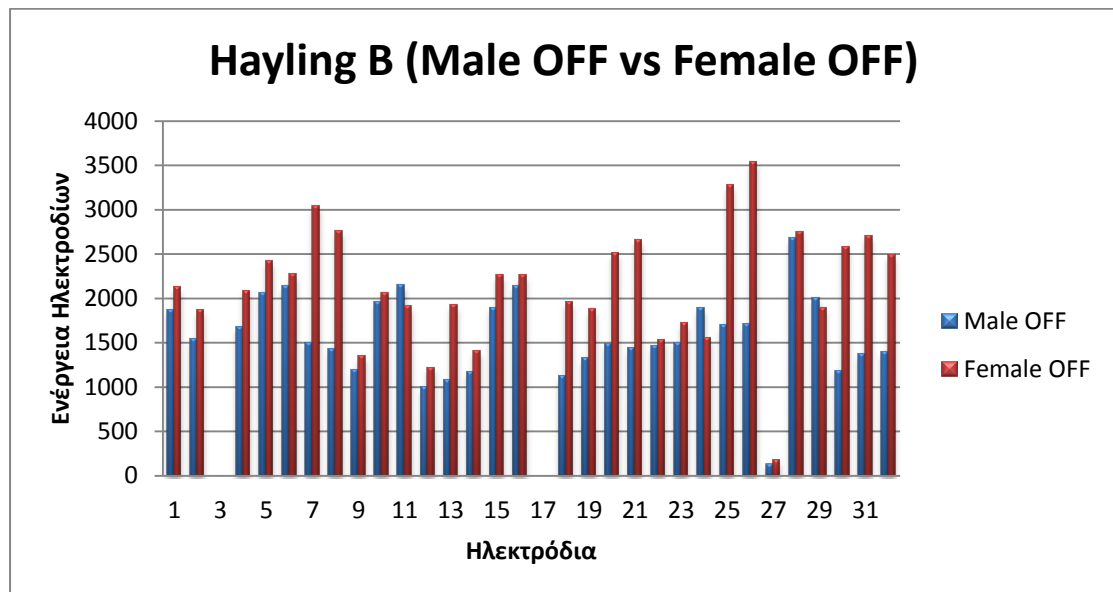
- Αντίστοιχα για το Hayling B:



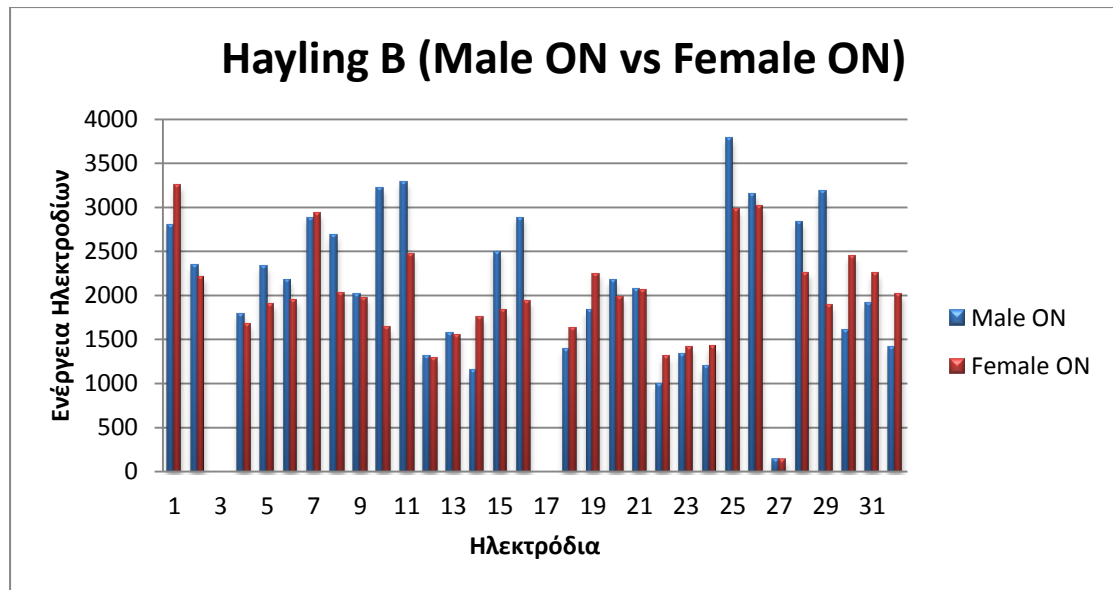
Σχήμα 4.11: Hayling B (Male OFF vs Male ON)



Σχήμα 4.12: Hayling B (Female OFF vs Female ON)

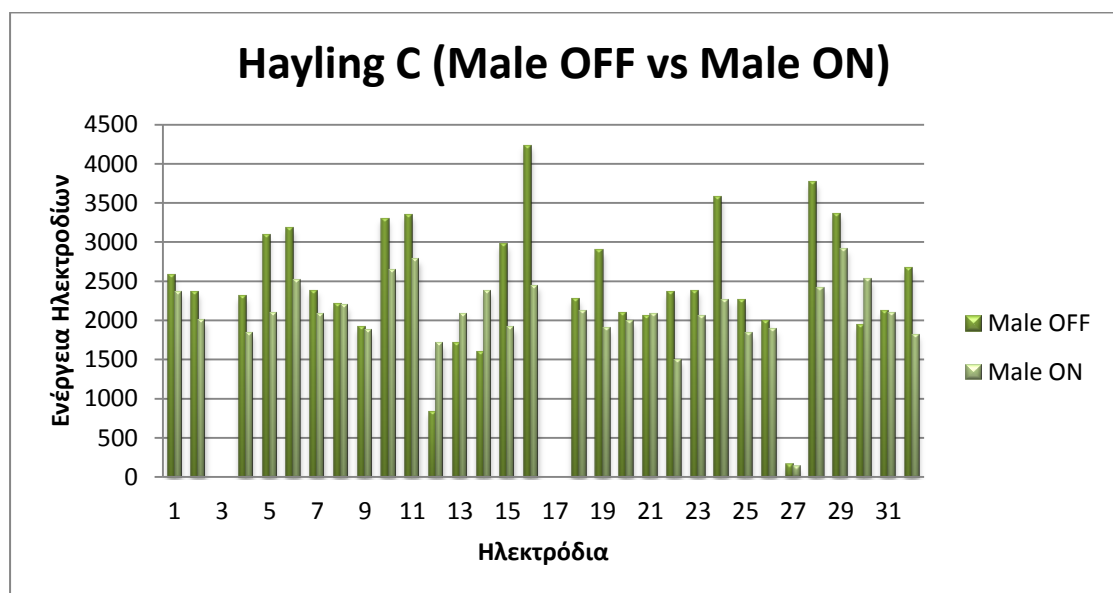


Σχήμα 4.13: Hayling B (Male OFF vs Female OFF)

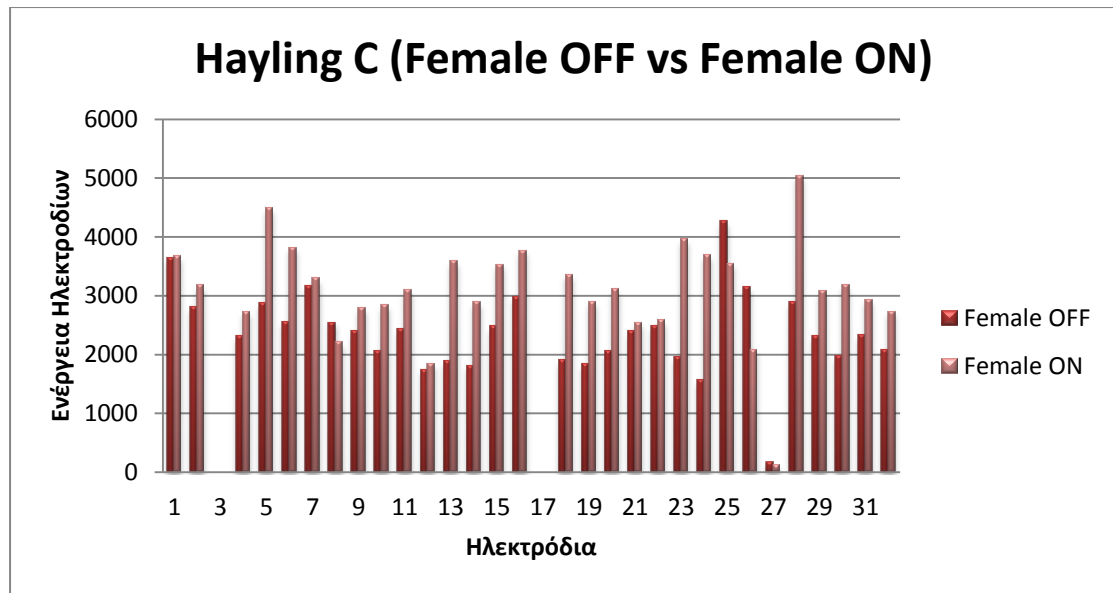


Σχήμα 4.14: Hayling B (Male ON vs Female ON)

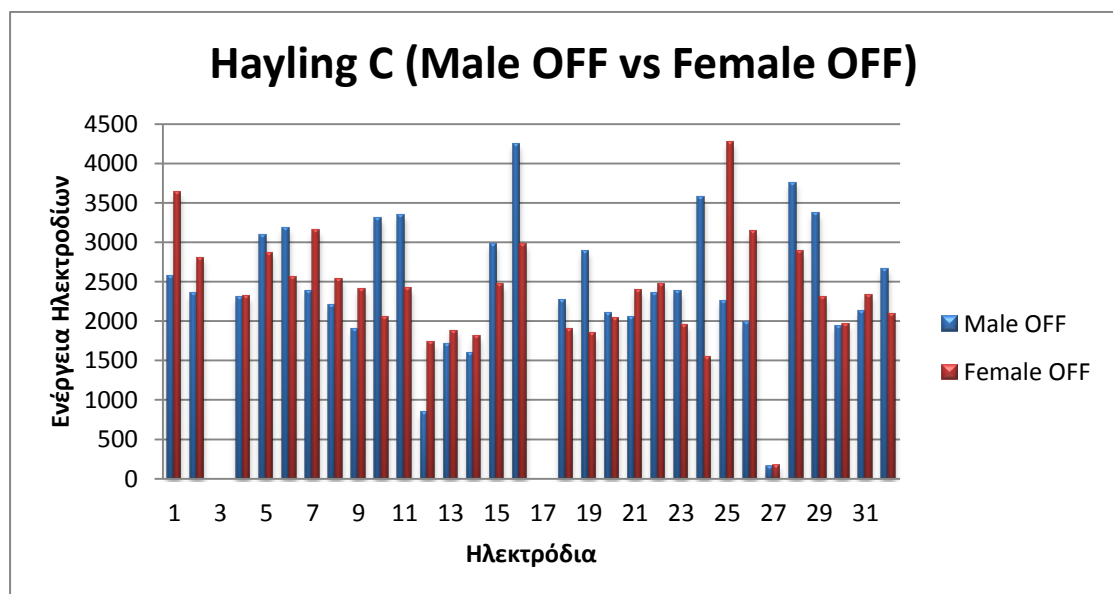
- Και για το Hayling C:



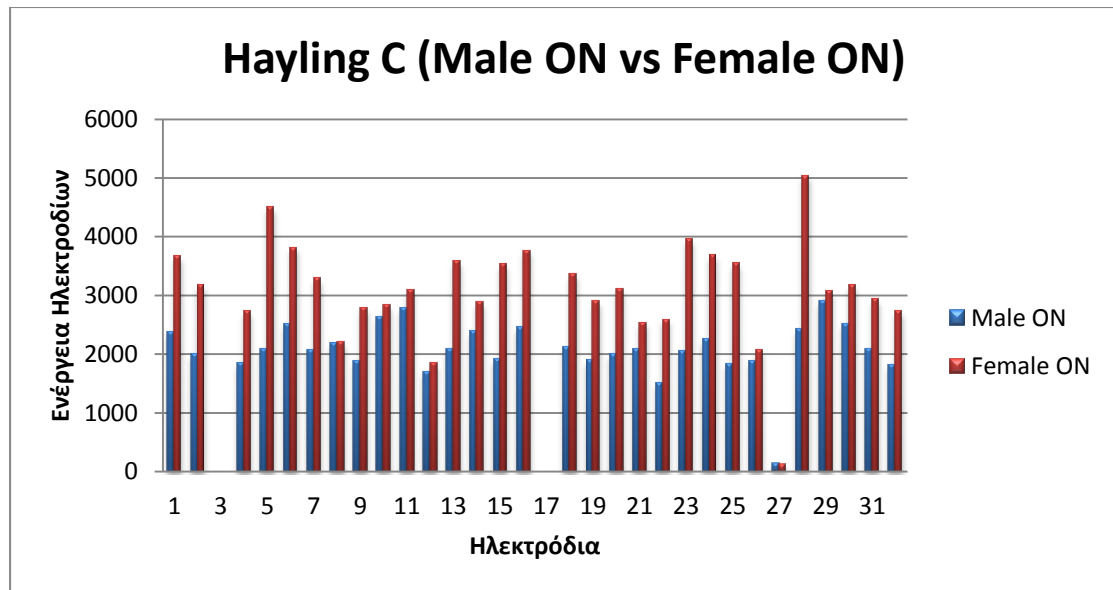
Σχήμα 4.15: Hayling C (Male OFF vs Male ON)



Σχήμα 4.16: Hayling C (Female OFF vs Female ON)

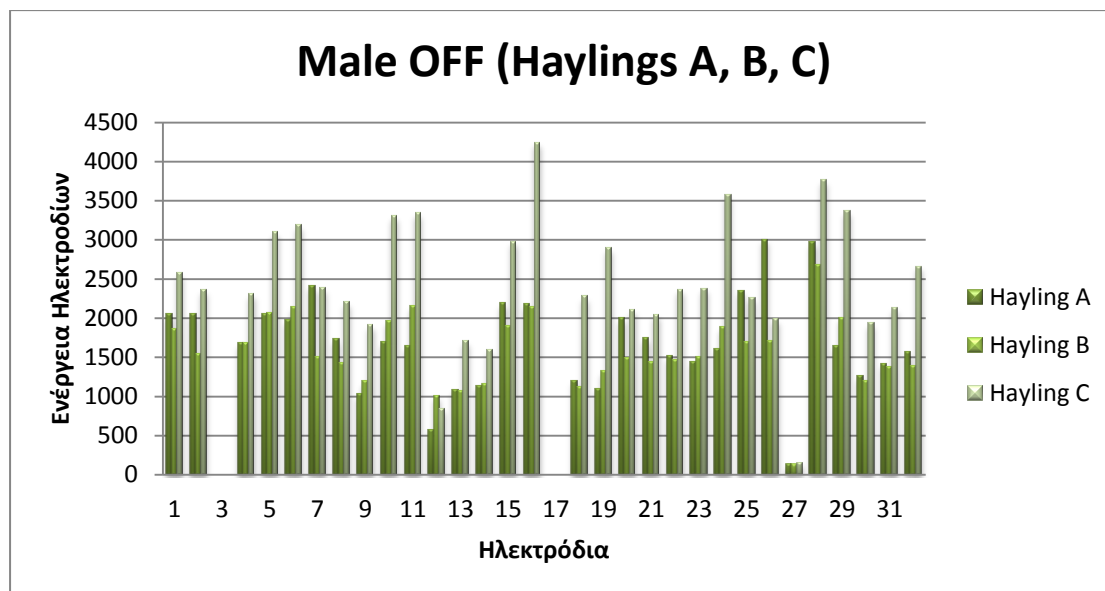


Σχήμα 4.17: Hayling C (Male OFF vs Female OFF)

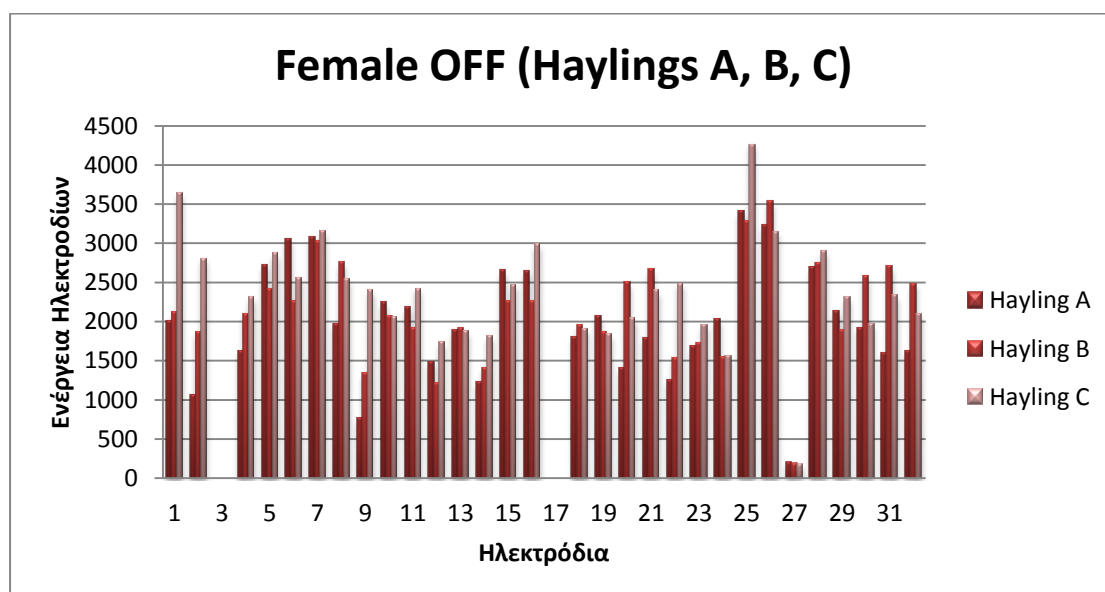


Σχήμα 4.18: Hayling C (Male ON vs Female ON)

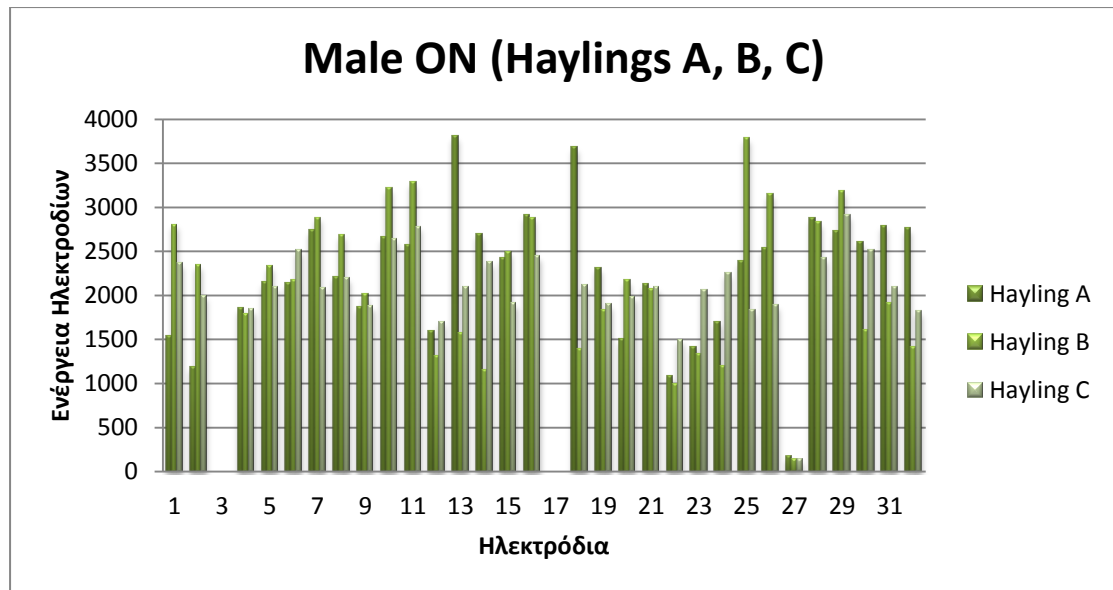
Τέλος, μας ενδιαφέρει και η σύγκριση μεταξύ των ενεργειών των ηλεκτροδίων ανάλογα μόνο με τον τύπο του test (με σταθερά το φύλο και τη συνθήκη ακτινοβολίας κάθε φορά). Επομένως προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα:



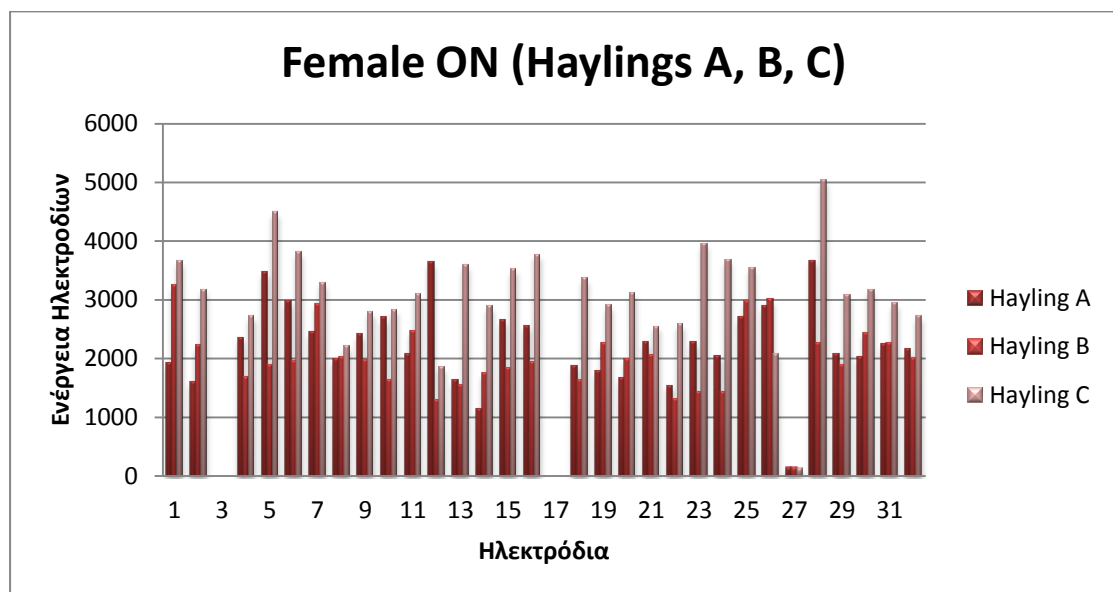
Σχήμα 4.19: Male OFF (Haylings A, B, C)



Σχήμα 4.20: Female OFF (Haylings A, B, C)



Σχήμα 4.21: Male ON (Haylings A, B, C)



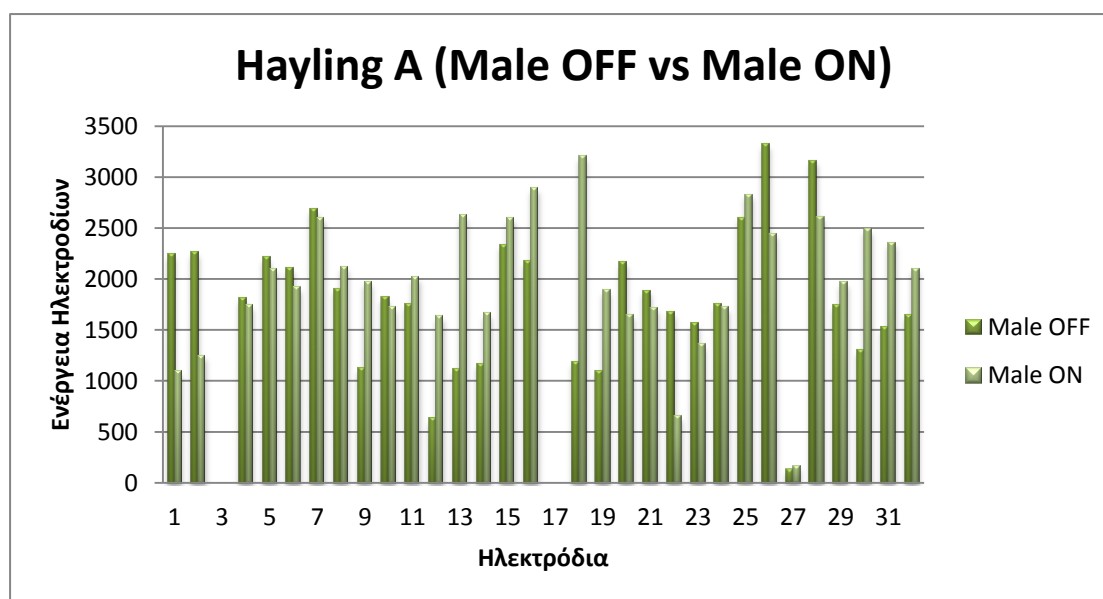
Σχήμα 4.22: Female ON (Haylings A, B, C)

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, παρατηρήσαμε ότι κάποιες μετρήσεις εθελοντών δεν είχαν το επιθυμητό αποτέλεσμα που να αντιστοιχεί σε «καθαρή» κυματομορφή ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος, ενώ έμοιαζαν περισσότερο με υψίσυχνο θόρυβο, πράγμα που οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ψυχολογία του εκάστοτε εθελοντή, ή στην κίνησή του κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Αυτές οι «**προβληματικές**» μετρήσεις αφορούν κυρίως:

- Σε όλες τις μετρήσεις ON και OFF ενός εθελοντή.
- Στο ON - Hayling A, ενός άλλου εθελοντή.
- Σε όλα τα OFF και στο ON - Hayling C μίας εθελόντριας.

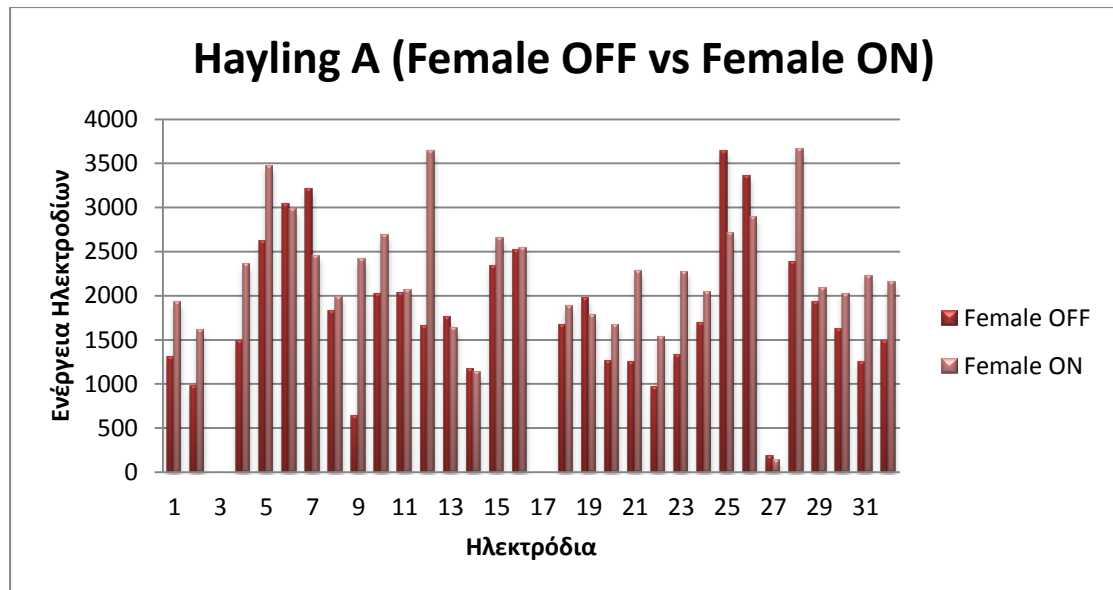
Για λόγους πληρότητας, παραθέτουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα που προκύπτουν για τους μέσους όρους των ενεργειών των ηλεκτροδίων **χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη τις «προβληματικές» μετρήσεις**.

- Για το Hayling A έχουμε το παρακάτω σετ διαγραμμάτων:



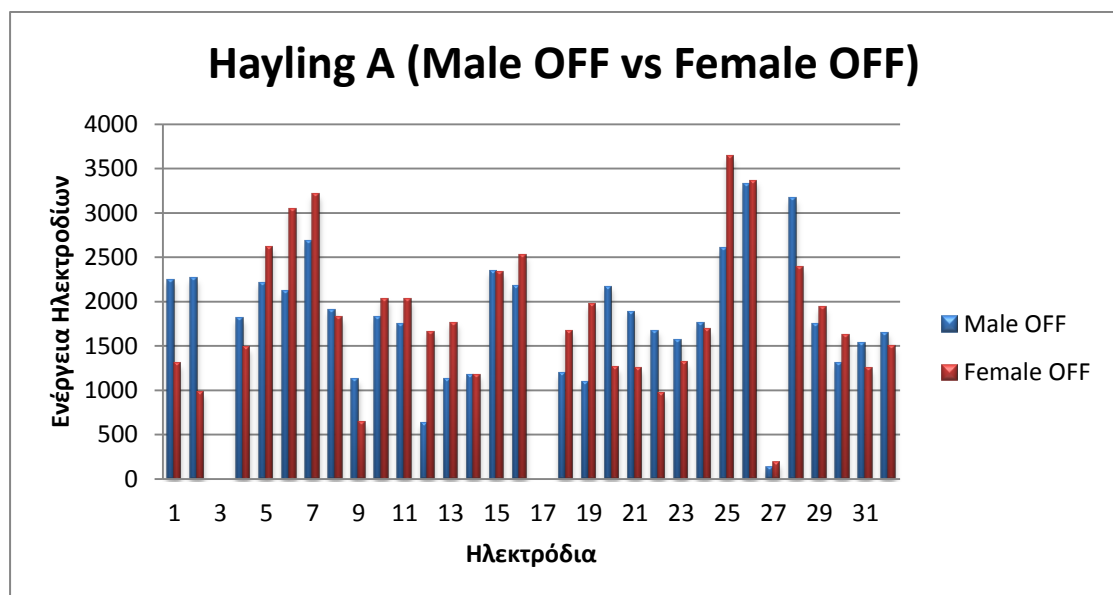
Σχήμα 4.23:

Hayling A (Male OFF vs Male ON) αγνοώντας τις προβληματικές μετρήσεις



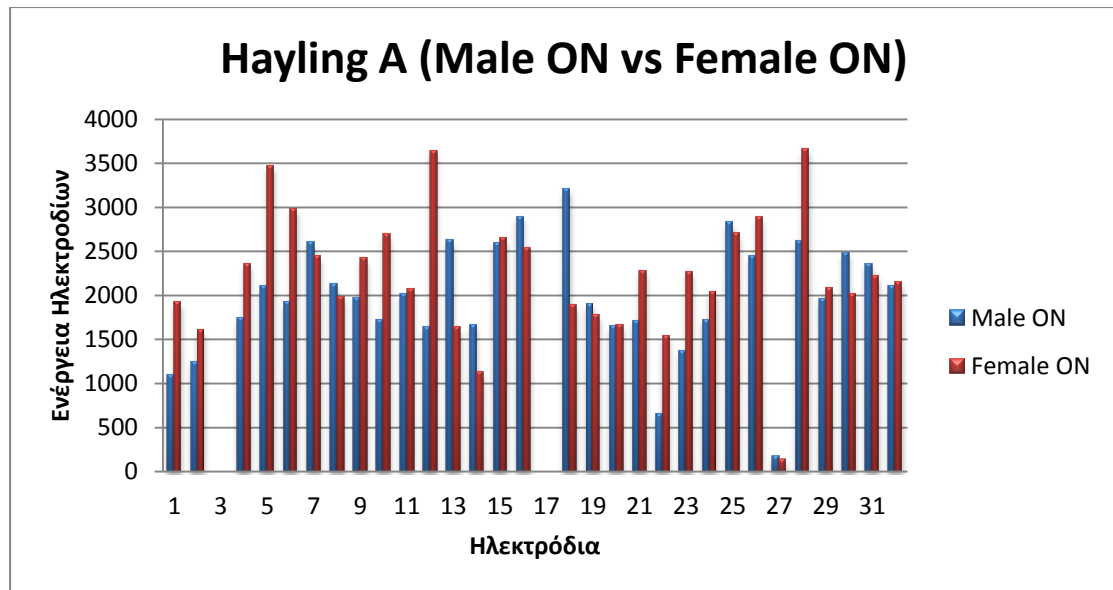
Σχήμα 4.24:

Hayling A (Female OFF vs Female ON) αγνοώντας τις προβληματικές μετρήσεις



Σχήμα 4.25:

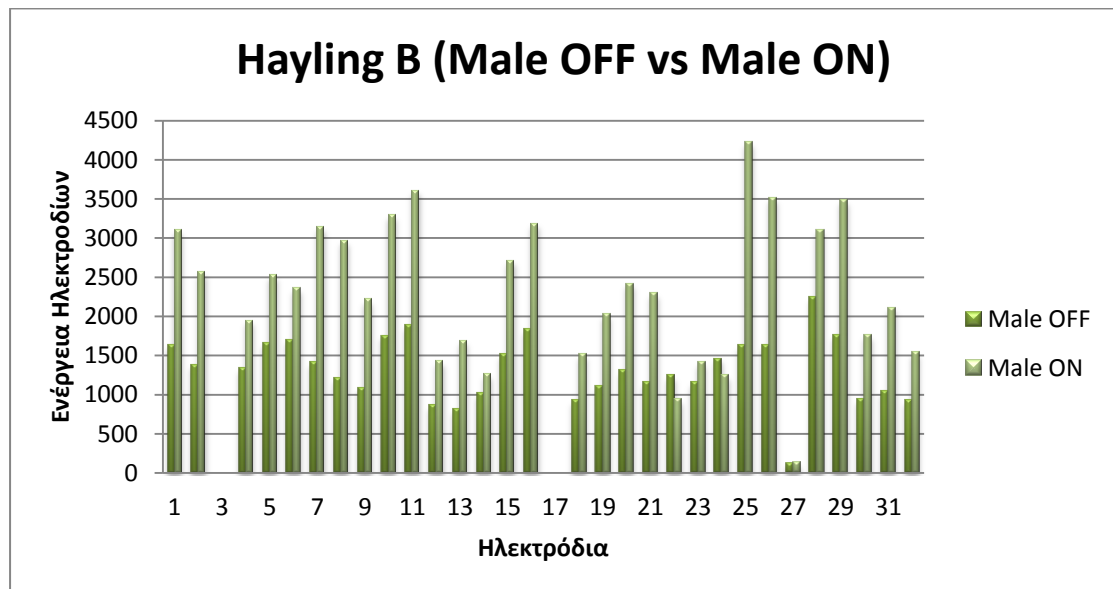
Hayling A (Male OFF vs Female OFF) αγνοώντας τις προβληματικές μετρήσεις



Σχήμα 4.26:

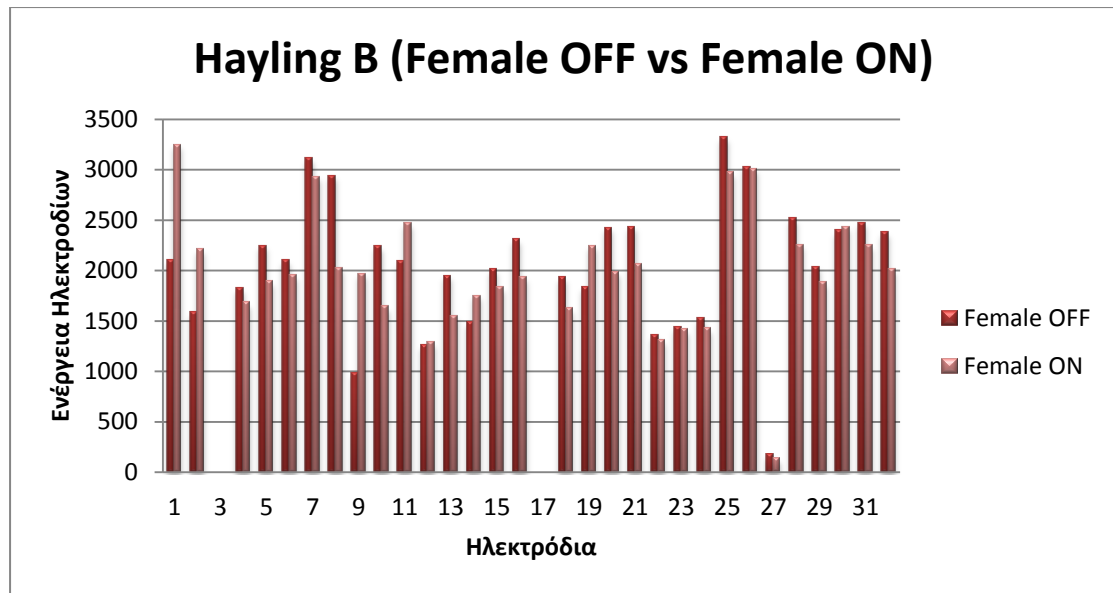
Hayling A (Male ON vs Female ON) αγνοώντας τις προβληματικές μετρήσεις

- Αντίστοιχα για το Hayling B:



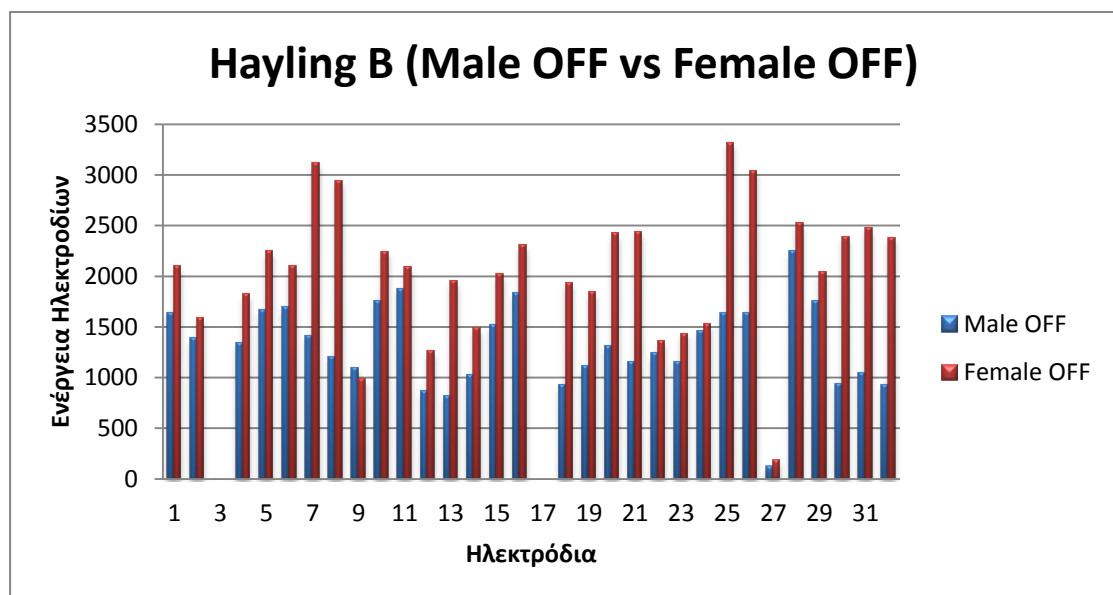
Σχήμα 4.27:

Hayling B (Male OFF vs Male ON) αγνοώντας τις προβληματικές μετρήσεις



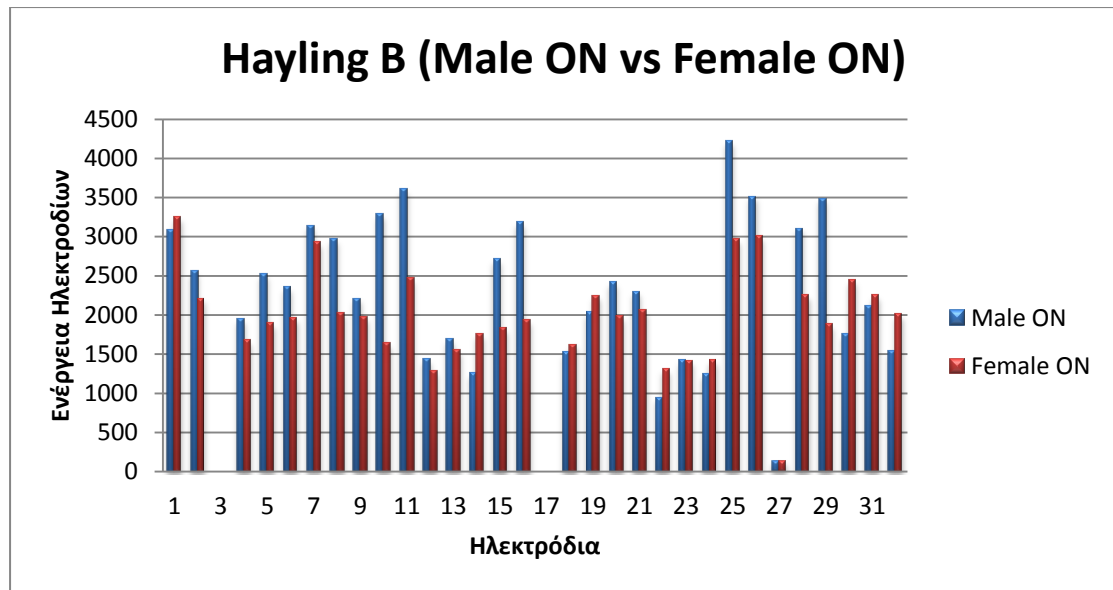
Σχήμα 4.28:

Hayling B (Female OFF vs Female ON) αγνοώντας τις προβληματικές μετρήσεις



Σχήμα 4.29:

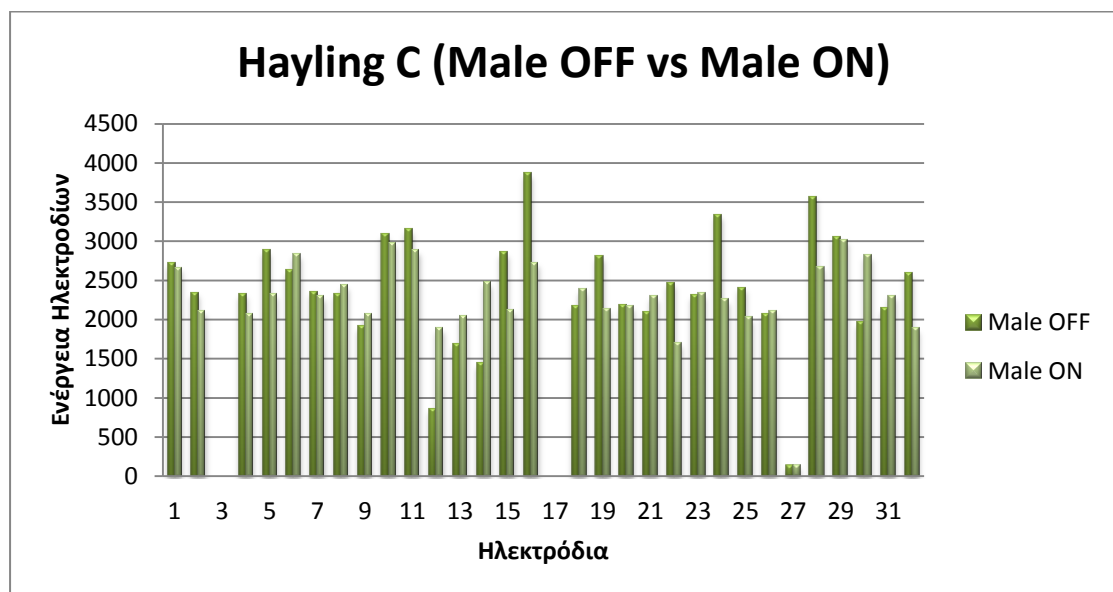
Hayling B (Male OFF vs Female OFF) αγνοώντας τις προβληματικές μετρήσεις



Σχήμα 4.30:

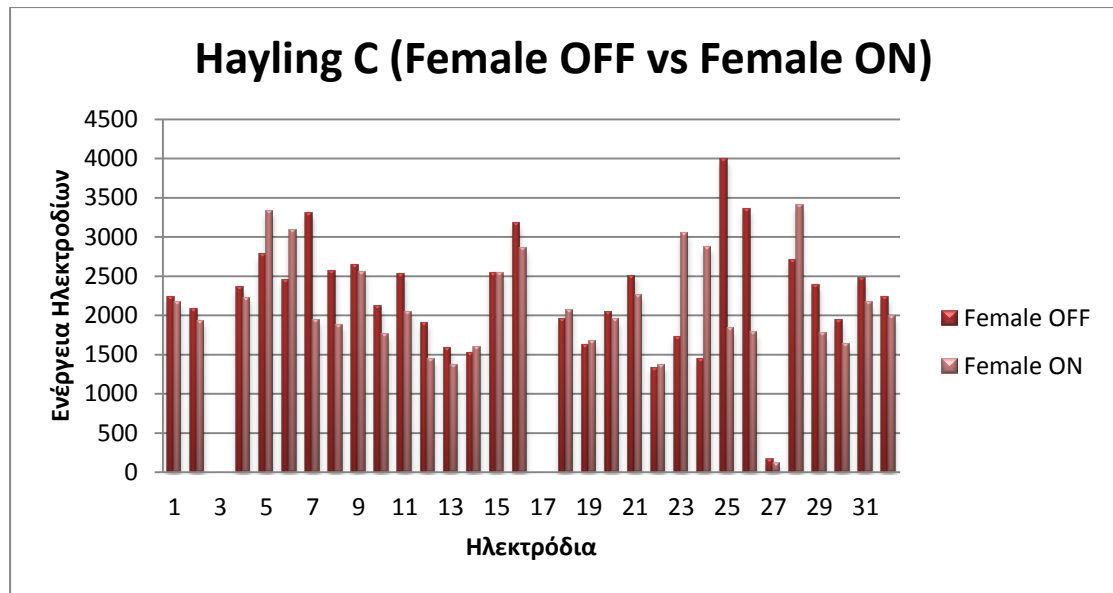
Hayling B (Male ON vs Female ON) αγνοώντας τις προβληματικές μετρήσεις

- Και για το Hayling C:



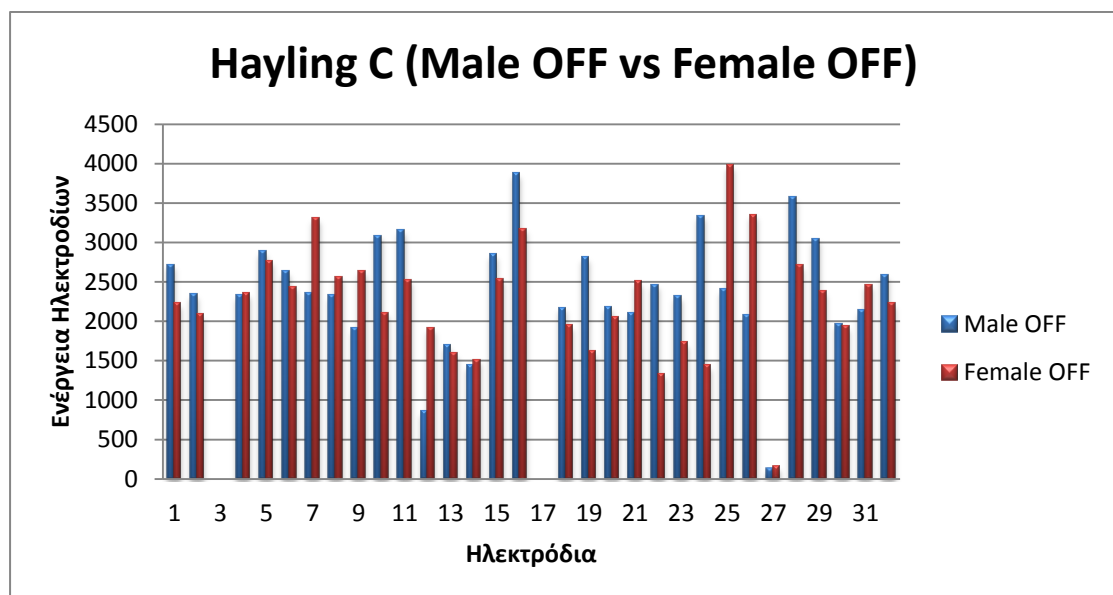
Σχήμα 4.31:

Hayling C (Male OFF vs Male ON) αγνοώντας τις προβληματικές μετρήσεις



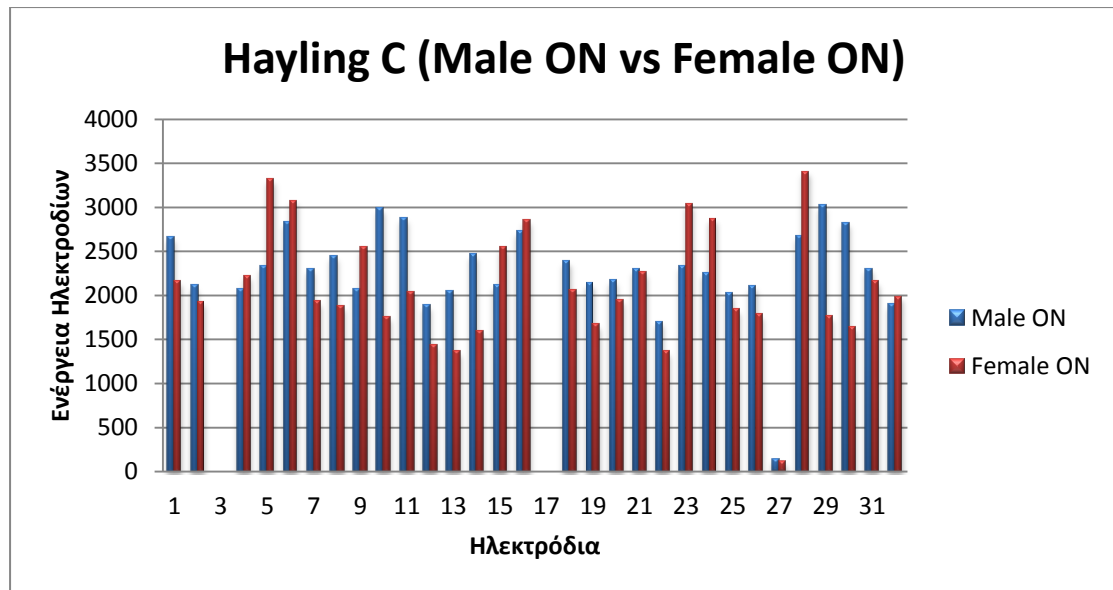
Σχήμα 4.32:

Hayling C (Female OFF vs Female ON) αγνοώντας τις προβληματικές μετρήσεις



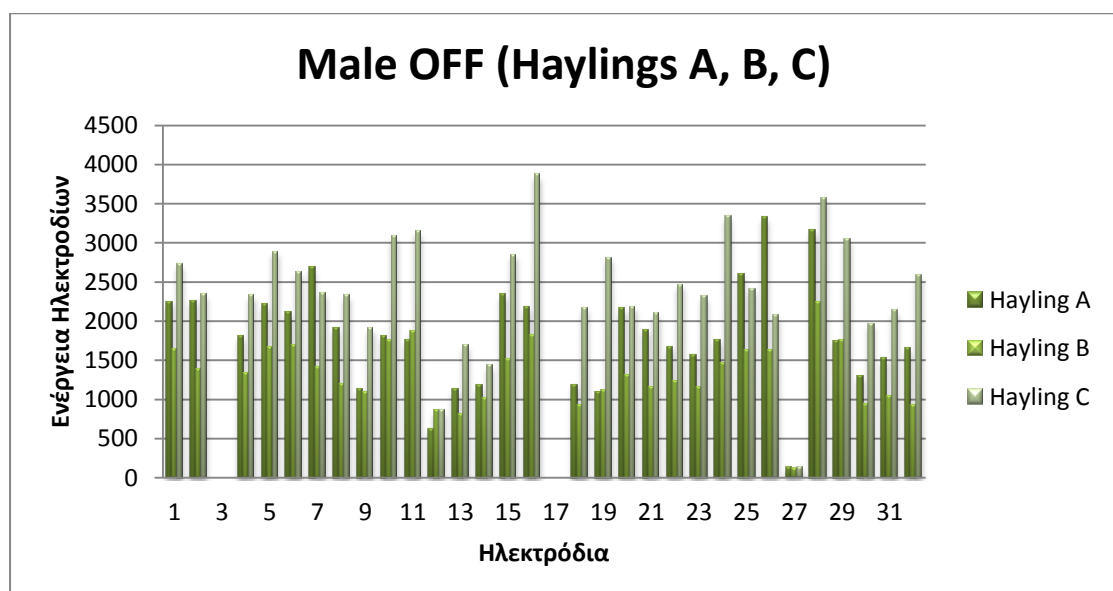
Σχήμα 4.33:

Hayling C (Male OFF vs Female OFF) αγνοώντας τις προβληματικές μετρήσεις

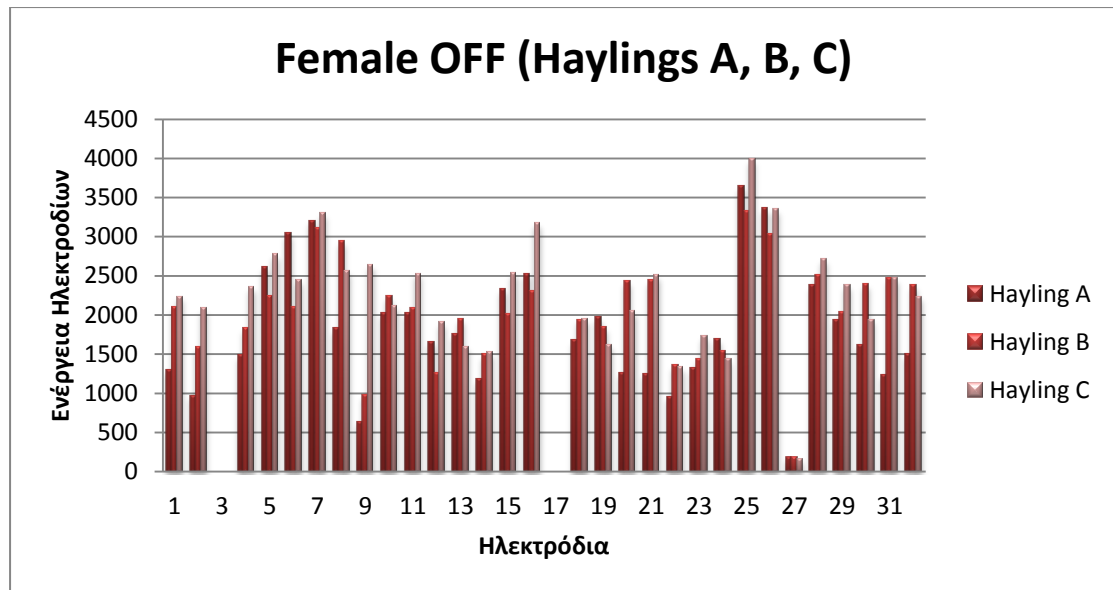


Σχήμα 4.34:
Hayling C (Male ON vs Female ON) αγνοώντας τις προβληματικές μετρήσεις

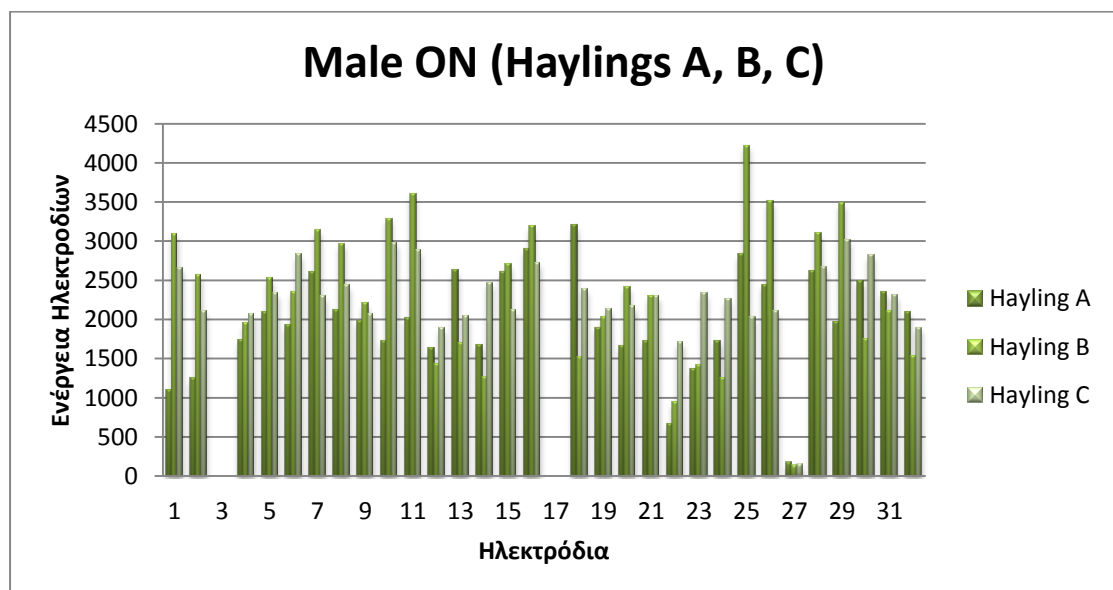
Τέλος, προκύπτουν και τα αντίστοιχα διαγράμματα για τη σύγκριση ενεργειών των ηλεκτροδίων ανάλογα μόνο με τον τύπο του test (με σταθερά το φύλο και τη συνθήκη ακτινοβολίας κάθε φορά):



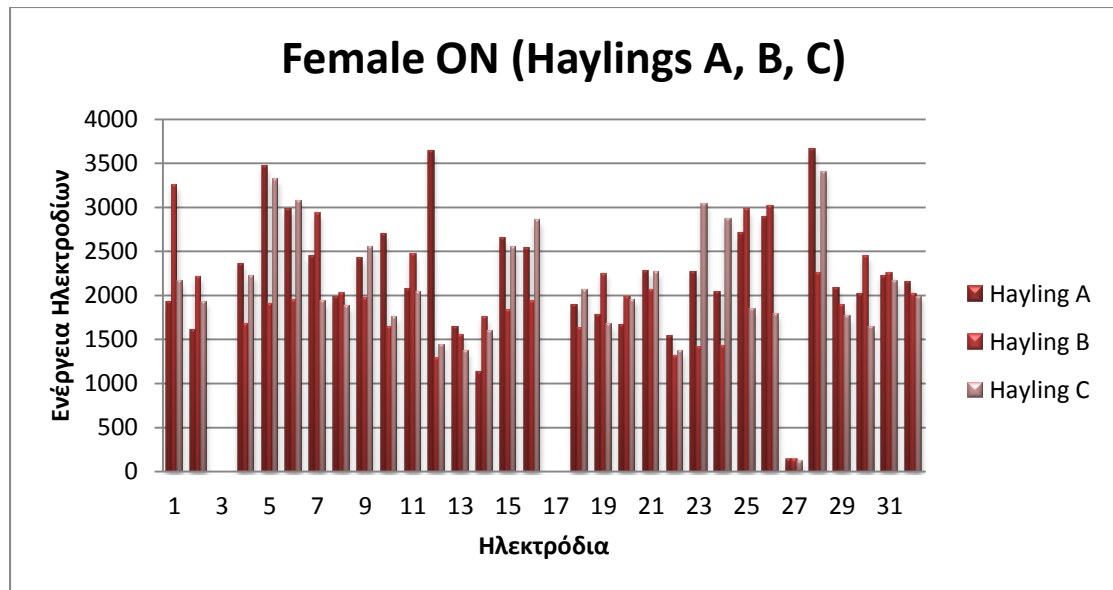
Σχήμα 4.35:
Male OFF (Haylings A, B, C) αγνοώντας τις προβληματικές μετρήσεις



Σχήμα 4.36:
Female OFF (Haylings A, B, C) αγνοώντας τις προβληματικές μετρήσεις



Σχήμα 4.37:
Male ON (Haylings A, B, C) αγνοώντας τις προβληματικές μετρήσεις



Σχήμα 4.38:

Female ON (Haylings A, B, C) αγνοώντας τις προβληματικές μετρήσεις

Σημείωση: Κατά την εξαγωγή των παραπάνω στατιστικών διαγραμμάτων δε λάβαμε υπόψη μας τις ενέργειες των ηλεκτροδίων 3 και 17 καθώς αυτά αντιστοιχούν στη δραστηριότητα των αυτιών, που εν προκειμένω, ειδικά για την μελέτη των εγκεφαλικών δυναμικών, δεν ενδιαφέρουν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο τελευταίο κεφάλαιο αναπτύσσονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων, καθώς και από τη συνολική αποτίμηση της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη παράγραφο επισημαίνονται οι προβληματικές περιπτώσεις ακτινοβολίας του LTE πρωτοκόλλου που προέκυψαν κατά τον EMC έλεγχο, ενώ στη δεύτερη παράγραφο παρατηρούνται οι διάφορες αλληλεπιδράσεις των μετρούμενων ενεργειών των ηλεκτροδίων με τις πειραματικές συνθήκες. Εν κατακλείδι, στην τελική παράγραφο δίδεται η συνολική αποτίμηση της εργασίας.

5.1 Συμπεράσματα για τις EMC μετρήσεις του LTE

Στην 2^η παράγραφο του 4^{ου} κεφαλαίου παρουσιάσαμε τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των EMC μετρήσεων που λάβαμε για τις διάφορες παραλλαγές του LTE πρωτοκόλλου με τη διάταξη του εργαστηρίου. Ο EMC έλεγχος επεκτάθηκε σε πολλές διαμορφώσεις, συχνότητες, φασματικά εύρη, ισχύεις ακτινοβολίας του και τρόπους αμφιδρόμησης ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα ως προς τη συμπεριφορά των εκάστοτε ερευνούμενων παραλλαγών του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου. Αποτέλεσμα του παραπάνω ελέγχου (έλεγχος ισότητας των μέσων ή *t-test*) ήταν η παρατήρηση ακραίων συμπεριφορών συμβατότητας ή μη για καθέναν από τους προαναφερθέντες συνδυασμούς χαρακτηριστικών ακτινοβολίας και άρα ο διαχωρισμός τους σε δύο κατηγορίες ως προς τη συμβατότητά τους με την εργαστηριακή διάταξη. Στην πρώτη ανήκει το μεγαλύτερο ποσοστό των παραπάνω συνδυασμών χαρακτηριστικών LTE ακτινοβολίας για τους οποίους οι ληφθείσες μετρήσεις από τα 32 ηλεκτρόδια καθίστανται κατά πλειοψηφία ηλεκτρομαγνητικά συμβατές και στη δεύτερη εκείνες που παρουσιάζουν αντίστοιχα ηλεκτρομαγνητική ασυμβατότητα. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι «προβληματικοί» συνδυασμοί:

Dublexing	Power	Modulation	Frequency (MHz)	Bandwidth (MHz)
FDD	10dBm	QPSK	942,5	1.4, 3, 5, 10
			2140	1.4, 3, 5, 10
		16 QAM	942,5	1.4, 3, 5, 10
			2140	1.4, 3, 5, 10
		64 QAM	942,5	1.4, 3, 5, 10
			2140	1.4, 3, 5, 10
	17dBm	QPSK	942,5	1.4, 3, 5, 10
			2140	1.4, 3, 5, 10
		16 QAM	942,5	1.4, 3, 5, 10
			2140	1.4, 3, 5, 10
		64 QAM	942,5	1.4, 3, 5, 10
			2140	1.4, 3, 5, 10

Σχήμα – Πίνακας 5.1: «Προβληματικοί» συνδυασμοί για FDD LTE χαρακτηριστικά

Dublexing	Power	Modulation	Frequency (MHz)	Bandwidth (MHz)
TDD	10dBm	QPSK	1880	1.4, 3, 5, 10, 15, 20
			2017,5	5
	17dBm		2017,5	5, 10, 15
			2350	10, 15, 20
			2595	5

Σχήμα – Πίνακας 5.2: «Προβληματικοί» συνδυασμοί για TDD LTE χαρακτηριστικά

Όπως διαφαίνεται και από τους παραπάνω δύο πίνακες, οι «προβληματικοί» συνδυασμοί των χαρακτηριστικών για το FDD LTE σήμα, σε αντίθεση με το TDD LTE, παρουσιάζουν μια κανονικότητα ως προς τη χρησιμοποιούμενη συχνότητα. Ειδικότερα, στο FDD LTE οι συχνότητες των **942,5MHz** και **2140MHz** αποτυγχάνουν στον έλεγχο EMC για κάθε δυνατό συνδυασμό ισχύος, διαμόρφωσης και εύρους ζώνης που μελετήθηκε. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μπορούμε να αποφανθούμε την απόρριψη των παραπάνω δύο συχνοτήτων στο υπό διαμόρφωση LTE πρωτόκολλο ως προς τη χρήση τους σε εργαστηριακές μετρήσεις EEG. Αντιθέτως, στο TDD LTE οι «προβληματικοί» συνδυασμοί παρουσιάζουν μια τυχαιότητα ως προς τη συνδυαζόμενη ισχύ και το εύρος ζώνης και δε μπορούμε να εξάγουμε κάποιο αντίστοιχο γενικό συμπέρασμα.

5.2 Συμπεράσματα για τις EEG μετρήσεις

Παρατηρώντας τα διαγράμματα που δόθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, καταλήγουμε σε κάποια συμπεράσματα, βλέποντας τι ισχύει για την πλειοψηφία των ηλεκτροδίων στο καθένα. Αναλυτικά, παρατηρήσαμε τα εξής:

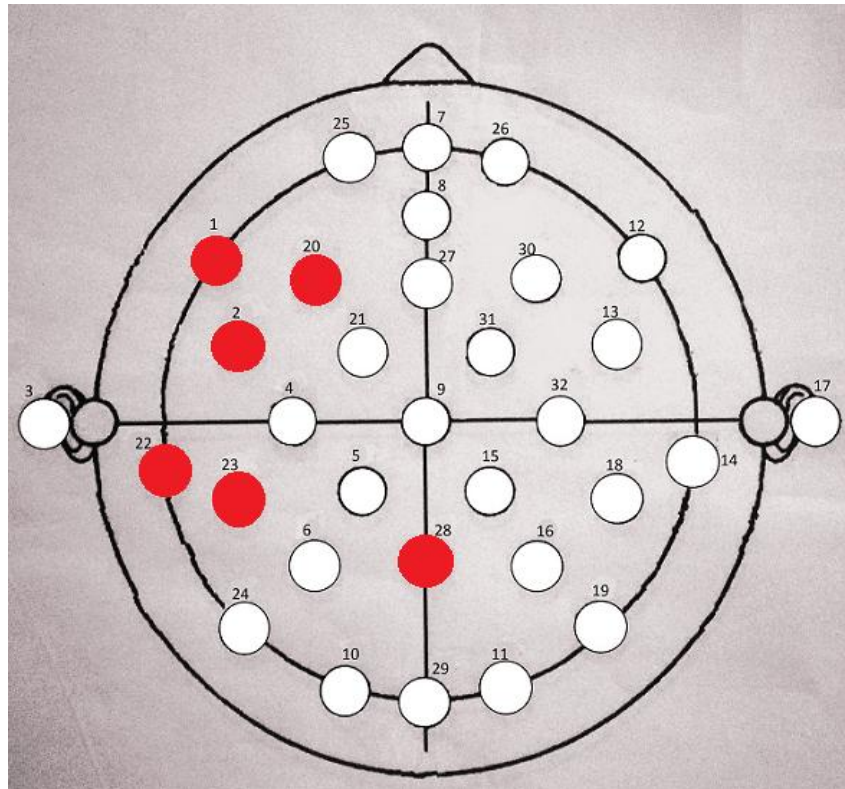
- i) Η πειραματική συνθήκη (Hayling A,B,C) στους άντρες αλλάζει την κατανομή της ενέργειας στα ηλεκτρόδια **ανάλογα με την ακτινοβολία**. Δηλαδή, στο Hayling A, στους άντρες, υπό την επίδραση ακτινοβολίας τα περισσότερα ηλεκτρόδια έχουν μεγαλύτερη ενέργεια από ό,τι χωρίς ακτινοβολία. Το ίδιο ισχύει και στο Hayling B, όμως στο Hayling C τα πράγματα είναι αντίστροφα. Αυτό σημαίνει ότι στους άνδρες υπάρχει αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την πειραματική συνθήκη.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται αναλυτικά ποιο συμπέρασμα προκύπτει κρίνοντας από τη συμπεριφορά των πλειοψηφούντων ηλεκτροδίων, καθώς και ποια είναι τα ηλεκτρόδια που δεν ακολουθούν το επικρατούν μοτίβο (παρεκκλίνοντα ηλεκτρόδια).

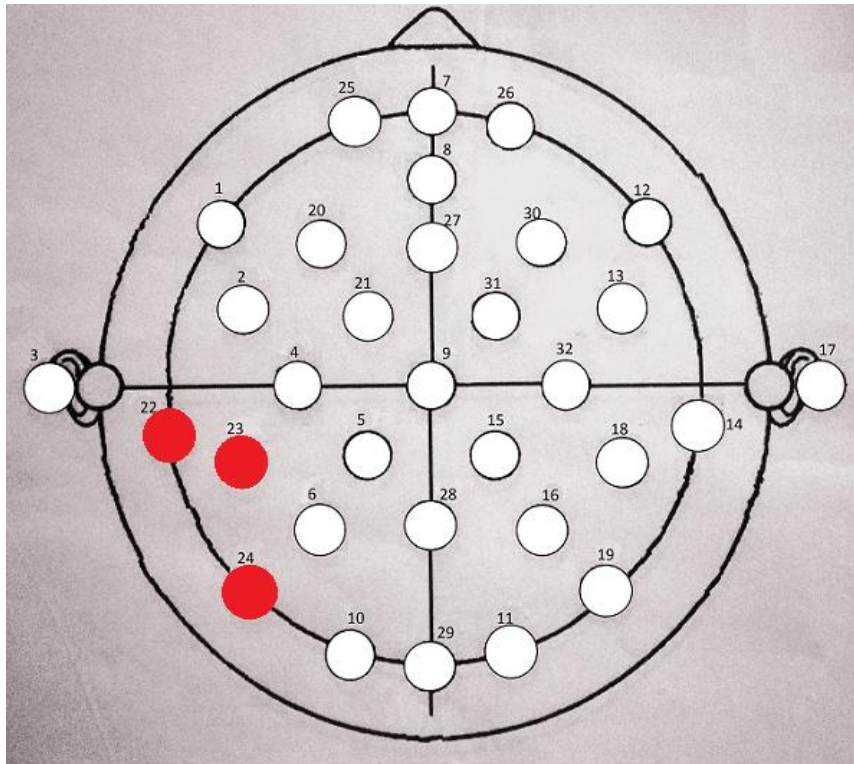
Διάγραμμα	Συμπέρασμα για τις Ενέργειες	Παρεκκλίνοντα ηλεκτρόδια (Με bold όσα παρεκκλίνουν σημαντικά)
Hayling A Male OFF vs Male ON	OFF < ON	1, 2, 20, 22, 23, 28
Hayling B Male OFF vs Male ON	OFF < ON	22, 23, 24
Hayling C Male OFF vs Male ON	OFF > ON	12, 13, 14, 30

Σχήμα – Πίνακας 5.3: Συμπέρασμα για τις Ενέργειες σε κάθε περίπτωση.

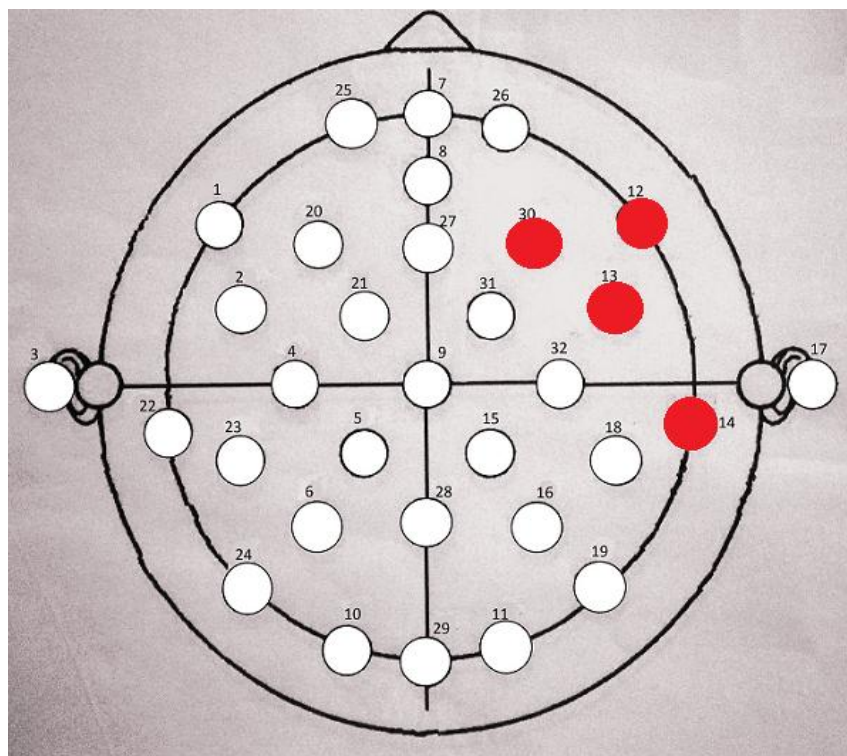
Στα επόμενα σχήματα φαίνονται τα παρεκκλίνοντα ηλεκτρόδια για κάθε περίπτωση, και η σχετική τους θέση (τυχόν γειτνίαση):



Σχήμα 5.4: Σχετική θέση παρεκκλινόντων ηλεκτροδίων για το συμπέρασμα του διαγράμματος:
Hayling A Male OFF vs Male ON



Σχήμα 5.5: Σχετική θέση παρεκκλινόντων ηλεκτροδίων για το συμπέρασμα του διαγράμματος:
Hayling B Male OFF vs Male ON



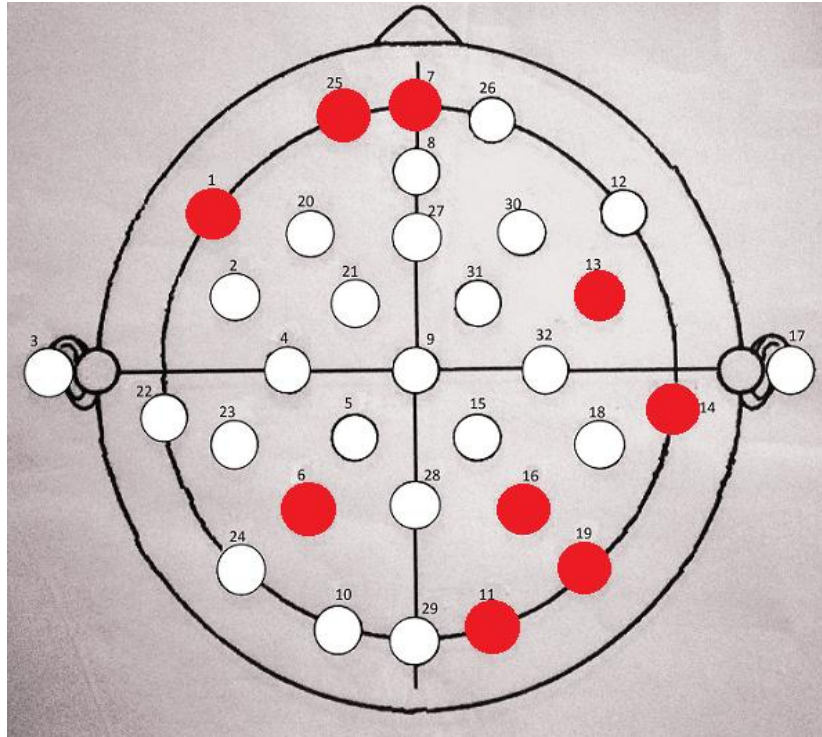
Σχήμα 5.6: Σχετική θέση παρεκκλινόντων ηλεκτροδίων για το συμπέρασμα του διαγράμματος:
Hayling C Male OFF vs Male ON

- ii) Η πειραματική συνθήκη (Hayling A,B,C) στις γυναίκες αλλάζει επίσης την κατανομή της ενέργειας στα ηλεκτρόδια **ανάλογα με την ακτινοβολία**. Παρατηρούμε ότι στα Hayling A και C τα περισσότερα ηλεκτρόδια έχουν μεγαλύτερη ενέργεια υπό την επίδραση ακτινοβολίας, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στο Hayling B.

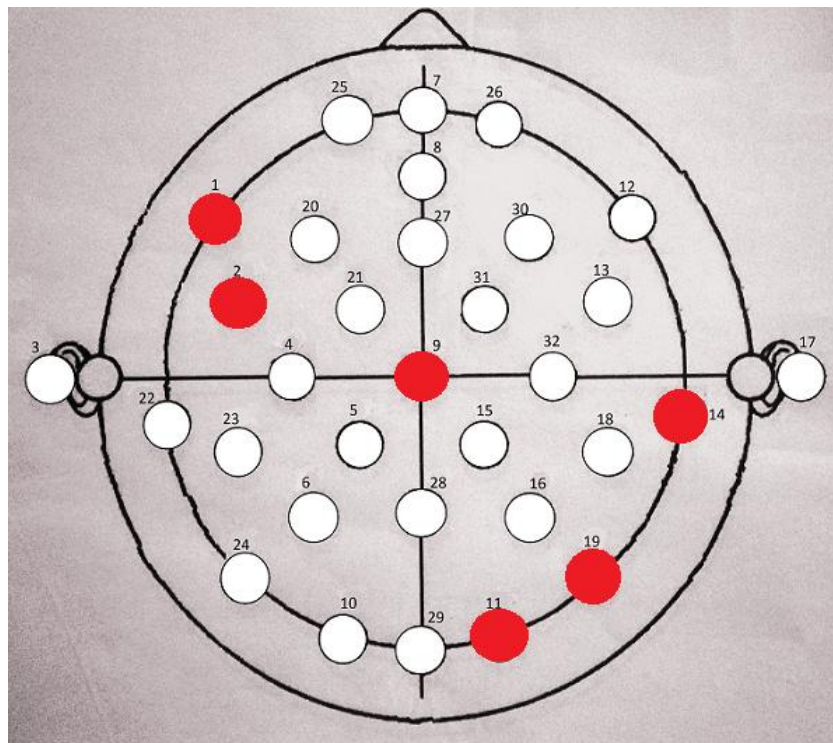
Διάγραμμα	Συμπέρασμα για τις Ενέργειες	Παρεκκλίνοντα ηλεκτρόδια (Με bold όσα παρεκκλίνουν σημαντικά)
Hayling A Female OFF vs Female ON	OFF < ON	1, 6, 7, 11, 13, 14, 16, 19, 25
Hayling B Female OFF vs Female ON	OFF > ON	1, 2, 9, 11, 14, 19
Hayling C Female OFF vs Female ON	OFF < ON	8, 25, 26

Σχήμα – Πίνακας 5.7: Συμπέρασμα για τις Ενέργειες σε κάθε περίπτωση.

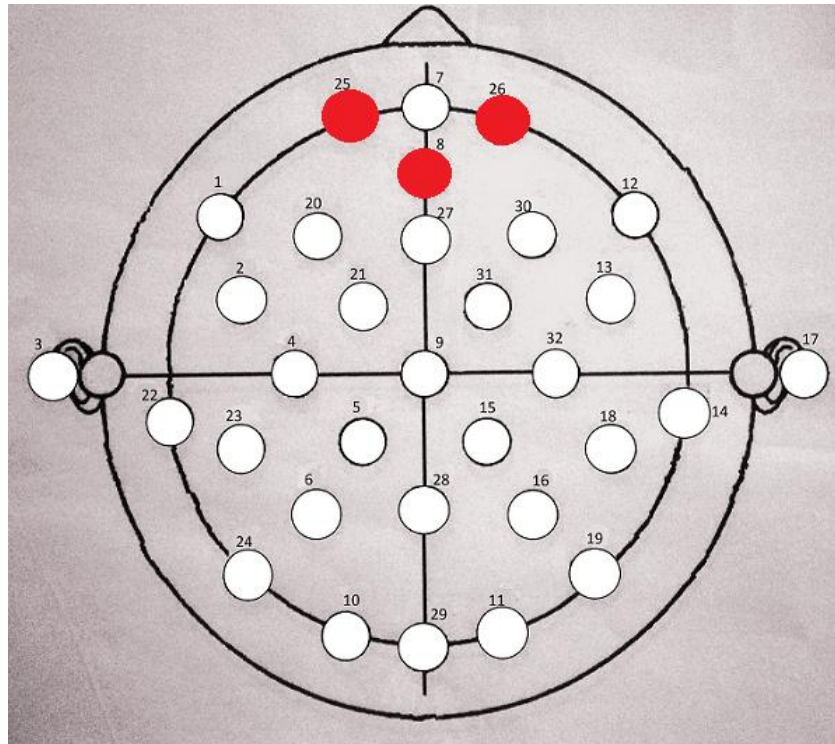
Τα παρεκκλίνοντα ηλεκτρόδια και η σχετική τους θέση φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 5.8: Σχετική θέση παρεκκλινόντων ηλεκτροδίων για το συμπέρασμα του διαγράμματος: Hayling A Female OFF vs Female ON



Σχήμα 5.9: Σχετική θέση παρεκκλινόντων ηλεκτροδίων για το συμπέρασμα του διαγράμματος: Hayling B Female OFF vs Female ON



Σχήμα 5.10: Σχετική θέση παρεκκλινόντων ηλεκτροδίων για το συμπέρασμα του διαγράμματος: Hayling C Female OFF vs Female ON

- iii) Άξιο αναφοράς αποτελεί, επίσης, η **κοινή συμπεριφορά** που εντοπίζεται σε **ορισμένα ηλεκτρόδια** στα διαγράμματα των μετρήσεων μεταξύ διαφορετικών φύλων για κάθε Hayling test με σταθερή τη συνθήκη ακτινοβολίας.

Διάγραμμα	Ηλεκτρόδια με κοινή συμπεριφορά υψηλής ενέργειας	Ηλεκτρόδια με κοινή συμπεριφορά χαμηλής ενέργειας	Ηλεκτρόδια με έντονα διαφορετική συμπεριφορά μεταξύ δύο φύλων
Hayling A (Male OFF vs Female OFF)	7, 25, 26, 28	9, 14, 22 , 31, 32	2
Hayling A (Male ON vs Female ON)	7, 10, 15, 25, 26, 28	2, 22	12, 14, 18
Hayling B (Male OFF vs Female OFF)	5, 6, 16, 28	9, 12	25, 26
Hayling B (Male ON vs Female ON)	1, 7, 25, 26	12, 22 , 23, 24	10
Hayling C (Male OFF vs Female OFF)	16	12, 13, 14	24, 25
Hayling C (Male ON vs Female ON)	-	8, 12 , 26	5, 28

Σχήμα – Πίνακας 5.11: Συμπέρασμα για τις Ενέργειες σε κάθε περίπτωση.

Στον παραπάνω πίνακα παραθέτουμε, για κάθε περίπτωση διαγράμματος, εκτός από τα ηλεκτρόδια που εμφανίζουν πανομοιότυπη συμπεριφορά (υψηλής ή χαμηλής ενέργειας) και τα ηλεκτρόνια που εμφανίζουν ακραία διαφορετική συμπεριφορά μεταξύ των δύο φύλων. Τα ηλεκτρόδια που εμφανίζουν την ίδια συμπεριφορά στα μισά τουλάχιστον από τα παραπάνω αναφερθέντα διαγράμματα επισημαίνονται με **bold**. Για παράδειγμα, παρατηρούμε ότι το ηλεκτρόδιο 12 στα 4 από τα 6 διαγράμματα

αποτελεί ηλεκτρόδιο κοινής συμπεριφοράς χαμηλής ενέργειας (βλ. τη δεύτερη στήλη του παραπάνω πίνακα), και άρα έχει επισημανθεί με **bold**. Επομένως, μπορούμε χονδρικά να πούμε, βάσει της παραπάνω παραδοχής, ότι:

- Τα ηλεκτρόδια που εμφανίζουν υψηλή ενέργεια τόσο στους άνδρες όσο και στις γυναίκες είναι τα: **7, 25, 26, 28**
- Τα ηλεκτρόδια που εμφανίζουν χαμηλή ενέργεια τόσο στους άνδρες όσο και στις γυναίκες είναι τα: **12, 22**
- Δεν παρατηρήθηκε κάποια επαναληψιμότητα ως προς τα ηλεκτρόδια που εμφάνισαν ακραίες συμπεριφορές μεταξύ ανδρών και γυναικών. Επομένως μπορούμε να συμπεράνουμε πως η συγκεκριμένη (ακραία) συμπεριφορά είναι στοχαστική.

iv) Πολύ σημαντικό συμπέρασμα αποτελεί η διαφοροποίηση των ενεργειών για διαφορετικά φύλα, με σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους. Αναλυτικότερα:

- Στο Hayling A OFF οι άνδρες εμφανίζουν ξεκάθαρα μικρότερη ενέργεια από τις γυναίκες, ενώ στο αντίστοιχο ON η ενέργεια είναι περίπου η ίδια. Αυτό σημαίνει ότι η ακτινοβολία προκάλεσε αύξηση της ενέργειας των ανδρικών προκλητών δυναμικών, για την περίπτωση Hayling A.
- Στο Hayling B OFF οι άνδρες εμφανίζουν επίσης ξεκάθαρα μικρότερη ενέργεια από τις γυναίκες, ενώ στο αντίστοιχο ON η ενέργεια είναι περίπου η ίδια για τα δυο φύλα, αλλά και συνολικά πολύ περισσότερη σε σχέση με το OFF. Αυτό σημαίνει ότι ναι μεν η ακτινοβολία προκάλεσε αύξηση της ενέργειας των προκλητών δυναμικών και για τα δύο φύλα αλλά επιπλέον η αύξηση αυτή ήταν σημαντικά μεγαλύτερη στους άνδρες (με αποτέλεσμα να παρατηρηθεί εξισορρόπηση με τις γυναίκες στο ON).
- Στο Hayling C OFF δεν υπάρχει κάποια εμφανής διαφοροποίηση μεταξύ ανδρών και γυναικών, ενώ όμως στο αντίστοιχο ON οι άνδρες εμφανίζουν σαφέστατα μικρότερη ενέργεια, με ταυτόχρονη διατήρηση των ενεργειών στις γυναίκες. Αυτό σημαίνει ότι, αντίθετα με το Hayling B, στο Hayling C η ακτινοβολία προκάλεσε μείωση της ενέργειας των ανδρικών προκλητών δυναμικών.

- ν) Τέλος, από τα σχήματα 4.19 - 4.22 μπορούμε να δούμε διαφορές στην ενέργεια τόσο μεταξύ διαφορετικών φύλων, για ίδια ή διαφορετική συνθήκη ακτινοβολίας όσο και διαφοροποιήσεις ανάλογα με την πειραματική συνθήκη, με σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους. Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι:
- Το Hayling C διατηρεί τη μεγαλύτερη ενέργεια σε σχέση με τα άλλα τεστ για την πλειοψηφία των ηλεκτροδίων, τόσο για την περίπτωση του MALE OFF όσο και FEMALE ON. Για τις άλλες δύο περιπτώσεις (MALE ON και FEMALE OFF) δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο παρόμοιο συμπέρασμα, καθώς διακρίνεται μια τυχαιότητα ως προς τις ενέργειες για κάθε Hayling συγκριτικά.
 - Επιπλέον παρατηρούμε ότι το MALE ON εμφανίζει, αθροιστικά για τα 3 Hayling, μεγαλύτερη ενέργεια από ότι το MALE OFF. Στις γυναίκες όμως συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο. Το FEMALE ON υπολείπεται ενεργειακά του FEMALE OFF, αθροιστικά για τα 3 τεστ.
- vi) Το **ηλεκτρόδιο 27** παρατηρούμε πως σε όλα τα διαγράμματα παρουσιάζει σχεδόν μηδενική ενέργεια συγκριτικά με τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια. Το γεγονός αυτό δε μας προξενεί έκπληξη, καθώς κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας ο πολυπλέκτης που χρησιμοποιήθηκε είχε αναμμένη την αντίστοιχη ενδεικτική λυχνία που ειδοποιούσε για πρόβλημα απαγωγής. Παρ' όλη την προσπάθεια που καταβάλαμε, δεν κατέστη τελικώς δυνατό να επιτευχθεί πλήρης απαγωγή στο συγκεκριμένο ηλεκτρόδιο.

5.3 Συνολική Αποτίμηση της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η εξαγωγή γόνιμων συμπερασμάτων αναφορικά με τη συμβατότητα εκπομπής Η/Μ σήματος LTE και WCDMA με εξοπλισμό ηλεκτροεγκεφαλογράφησης, καθώς και ο έλεγχος της επίδρασης της WCDMA ακτινοβολίας στα ανθρώπινα εγκεφαλικά δυναμικά. Πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας μελετήθηκε η σχετική βιβλιογραφία που υπήρχε στο συγκεκριμένο αντικείμενο και παρατέθηκαν τα βασικά θεωρητικά στοιχεία στο πρώτο μέρος της εργασίας. Το σύνολο του πειράματος πραγματοποιήθηκε σε ειδικά εξοπλισμένο εργαστήριο, όπου έγινε ο έλεγχος συμβατότητας και η μέτρηση των σημάτων εγκεφαλογράφησης 15 εθελοντών. Τα εξαχθέντα αποτελέσματα από τον EMC έλεγχο και την EEG σηματοληψία αναλύθηκαν στις δύο προηγούμενες παραγράφους του κεφαλαίου.

Στην περίπτωση των μετρήσεων από τα EEG δυναμικά των εθελοντών, η έρευνα κατέδειξε σημαντικά ευρήματα, αλλά μπορεί επίσης να επεκταθεί με περισσότερες συγκρίσεις σε διάφορα επίπεδα, ανάλογα με το ενδιαφέρον του εκάστοτε ερευνητή. Ταυτόχρονα, η μελέτη χρειάζεται να συνεχιστεί από ειδικά καταρτισμένους επιστήμονες νευρολογίας - ψυχιατρικής ώστε να συσχετιστούν τα προκύπτοντα στατιστικά αποτελέσματα με συγκεκριμένες εγκεφαλικές λειτουργίες και ιδιομορφίες ανάλογα με το φύλο, τη συνθήκη ακτινοβολίας και το είδος του Hayling τεστ.

Επιπλέον, προϊόν της επεξεργασίας των μετρήσεων υπήρξαν και τα ERP δυναμικά των εθελοντών, τα οποία διατίθενται προς χρήση στο προσωπικό του εργαστηρίου ασυρμάτου και επικοινωνίας μεγάλων αποστάσεων για περαιτέρω έρευνα. Η έρευνα αυτή συνίσταται στη στατιστική επεξεργασία των συγκεκριμένων μετρήσεων ώστε να εξαχθούν τα αντίστοιχα με το EEG συγκριτικά συμπεράσματα ανάλογα με τις πειραματικές συνθήκες και ακολούθως στην ερμηνεία τους από εξειδικευμένο ιατρικό προσωπικό.

Συμπερασματικά, θα μπορούσαμε να πούμε ότι η παρούσα εργασία εξάγει σαφή και χρήσιμα συμπεράσματα ως προς τη συμβατότητα του LTE σήματος με τα όργανα ηλεκτροεγκεφαλογράφησης, ενώ παράλληλα συνεισφέρει με την ολοκλήρωσή της σημαντικά αποτελέσματα στη μέχρι πρότινος βιβλιογραφία του κλάδου ελέγχου της επίδρασης των εγκεφαλικών δυναμικών από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και παραδίδει τη σκυτάλη στην ιατρική επιστήμη ώστε να τα ερμηνεύσει. Είναι βέβαιο πως τα ερωτήματα που σχετίζονται με το τελευταίο ερευνητικό αντικείμενο δεν μπορούν να απαντηθούν πλήρως στα πλαίσια της ανάλυσης που διεξάγεται σε μια διπλωματική εργασία. Χρειάζονται επιπλέον έρευνες με μεγαλύτερα εξεταζόμενα δείγματα ώστε να προσεγγιστεί επαρκώς η επίδραση της RF ακτινοβολίας στον πολυσύνθετο ανθρώπινο εγκέφαλο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: Κώδικας του Excel **macro**

```
Function LastCol(sh As Worksheet)
    On Error Resume Next
    LastCol = sh.Cells.Find(What:="*", _
        After:=sh.Range("A1"), _
        Lookat:=xlPart, _
        LookIn:=xlFormulas, _
        SearchOrder:=xlByColumns, _
        SearchDirection:=xlPrevious, _
        MatchCase:=False).Column
    On Error GoTo 0
End Function

Sub AppendDataAfterLastColumn()
    Dim sh As Worksheet
    Dim DestSh As Worksheet
    Dim Last As Long
    Dim CopyRng As Range

    With Application
        .ScreenUpdating = False
        .EnableEvents = False
    End With

    'Delete the sheet "RDBMergeSheet" if it exist
    Application.DisplayAlerts = False
    On Error Resume Next
    ActiveWorkbook.Worksheets("RDBMergeSheet").Delete
    On Error GoTo 0
    Application.DisplayAlerts = True

    'Add a worksheet with the name "RDBMergeSheet"
    Set DestSh = ActiveWorkbook.Worksheets.Add
    DestSh.Name = "RDBMergeSheet"

    'loop through all worksheets and copy the data to the DestSh
    For Each sh In ActiveWorkbook.Worksheets
        If sh.Name <> DestSh.Name Then
```

```
'Find the last Column with data on the DestSh
Last = LastCol(DestSh)

'Fill in the column(s) that you want to copy
Set CopyRng = sh.Range("a:a")

'Test if there enough rows in the DestSh to copy all the data
If Last + CopyRng.Columns.Count > DestSh.Columns.Count Then
    MsgBox "There are not enough columns in the Destsh"
    GoTo ExitTheSub
End If

'This example copies values/formats and Column width
CopyRng.Copy
With DestSh.Cells(1, Last + 1)
    .PasteSpecial 8 ' Column width
    .PasteSpecial xlPasteValues
    .PasteSpecial xlPasteFormats
    Application.CutCopyMode = False
End With

End If
Next

ExitTheSub:

Application.Goto DestSh.Cells(1)
With Application
    .ScreenUpdating = True
    .EnableEvents = True
End With
End Sub
```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Διονύσιος-Δημήτριος Κουτσούρης: Εισαγωγή στη Βιοϊατρική Τεχνολογία, Επεξεργασία και Ανάλυση Ιατρικών Σημάτων (2003). Εκδόσεις Τζιόλα.
- [2] Αθανάσιος Κανατάς, Φίλιππος Κωνσταντίνου, Γεώργιος Πάντος: Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών (2008). Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- [3] Μ. Ε. Θεολόγου: Δίκτυα Κινητών & Προσωπικών Επικοινωνιών (2008). Εκδόσεις Τζιόλα.
- [4] Χ. Ν. Καψάλης, Π. Θ. Τρακαδάς: Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) (2006). Εκδόσεις Τζιόλα.
- [5] Paul A. Chatterton–Michael A. Houlder: Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) (2000). Εκδόσεις Τζιόλα.
- [5] Κωνσταντίνος Ε. Ευσταθίου: Δοκιμασία του t-test: Σύγκριση δύο μέσων τιμών Ανάλυση Δεδομένων – Χημειομετρία, Εκπαιδευτικές Εφαρμογές, Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (2003).
- [6] Ιωάννης Ι. Γεροντίδης: Ανάλυση της Διακύμανσης Διαλέξεις στο μάθημα «Στατιστική Επιχειρήσεων», Τμήμα Διαχείρισης Πληροφοριών ΑΤΕΙ/ΚΑΒ-ΔΠ (2008)
- [7] Γ. Κοκολάκης, Ι. Σπηλιώτης: Εισαγωγή στη θεωρία πιθανοτήτων και στατιστική (1999). Εκδόσεις Συμεών.
- [8] <http://www.3gpp.org/>
- [9] <http://www.etsi.org/WebSite/homepage.aspx>
- [10] <http://www.radio-electronics.com/>