

Είναι γνωστό ότι τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας έχουν κυψελοειδή δομή. Τι είναι όμως κυψέλη; Πως ορίζεται; Σε ποιους περιορισμούς υπόκειται ένα τέτοιο σύστημα;



Του Αριστοτέλη Μετσίνη
Μηχανικού Τηλεπικοινωνιών

Κυψελοειδής Δομή Δικτύων





Η βασική ιδέα σχεδίασης ενός αναλογικού ή ψηφιακού (π.χ. AMPS, TACS, GSM) ραδιοδικτύου, βασίζεται στην έννοια της κυψέλης. Κάθε γεωγραφική περιοχή, διαμερίζεται σε μικρότερες περιοχές (κυψέλες) - εφάπτομενα "εξάγωνα"- τα οποία συνθέτουν μία δομή κυψελών (cell pattern). Η συγκεκριμένη δομή, επαναλαμβανόμενη, παρέχει την απαιτούμενη ραδιοκάλυψη.

Η ισχύς εκπομπής διατηρείται σε τέτοια επίπεδα, ώστε να περιορίζει το σήμα στα όρια της κυψέλης, παρέχοντας ταυτόχρονα ικανοποιητική κάλυψη και ποιότητα υπηρεσιών.

Το πλεονέκτημα της

παρεμβολής μεταξύ γειτονικών κυψελών, αποτελεί η οργάνωση των κυψελών σε ομάδες-δομές (clusters). Στα πλαίσια μίας τέτοιας δομής, αξιοποιείται ολόκληρο το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων. Ένα μέρος από τον συνολικό αριθμό των διαθέσιμων καναλιών, κατανέμεται σε κάθε μία από τις κυψέλες ενώ σε γειτονικές κυψέλες της ίδιας δομής, παραχωρούνται διαφορετικές ομάδες καναλιών. Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση της ενδοκαναλικής παρεμβολής, η μέση απόσταση D επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων, καθορίζεται μέσω της εξίσωσης:

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3k}$$

όπου R δηλώνει την ακτίνα των κυψελών και k αναφέρεται στον αριθμό των κυψελών που σχηματίζουν την δομή, π.χ. k=3,4,7,9,12. Ο παραπάνω τύπος φανερώνει ότι η ενδοκαναλική παρεμβολή μειώνεται όσο αυξάνει ο αριθμός των κυψελών της δομής, διατηρώντας ταυτόχρονα σταθερή την ακτίνα της κυψέλης, με αποτέλεσμα όμως ένα μικρότερο διαθέσιμο αριθμό καναλιών ανά κυψέλη. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός, ότι η ενδοκαναλική παρεμβολή, σε

αντίθεση με τον θερμικό θόρυβο (thermal noise), δεν είναι δυνατόν να καταπολεμηθεί με αύξηση της ισχύος εκπομπής, καθώς κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε αύξηση της παρεμβολής σε γειτονικές κυψέλες.

Η αυξανόμενη ζήτηση χωρητικότητας δικτύου, είναι δυνατόν να οδηγήσει σε "διάσπαση" κυψελών (cell splitting), έτσι ώστε η αρχική κυψέλη να περιέχει αρκετές κυψέλες μικρότερης διάστασης.

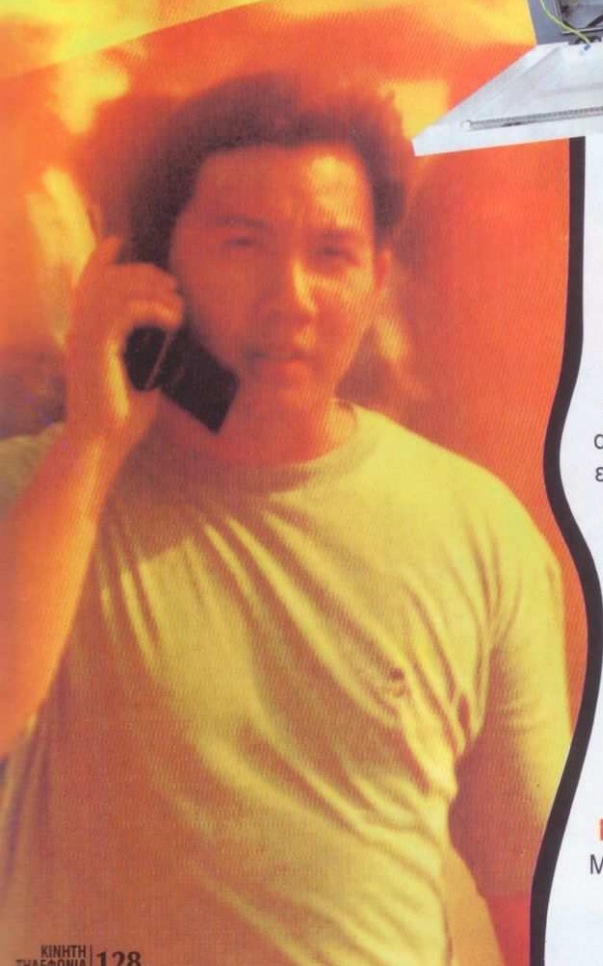
Κάθε κυψέλη μικρότερης ακτίνας, παρέχει τον ίδιο αριθμό καναλιών όπως η αρχική, χωρίς την ανάγκη ευρύτερου φάσματος. Η συγκεκριμένη προσέγγιση απαιτεί περισσότερους πομπούς μικρότερης ισχύος για την κάλυψη της ίδιας ουσιαστικά σε έκταση περιοχής. Σε μία σχετικά μικρή διαδρομή μετάδοσης (transmission path) του σήματος, είναι συχνά δυνατό να πετύχουμε ζεύξη πομπού και δέκτη σε ελεύθερο χώρο χωρίς εμπόδια (line of



παραπάνω στρατηγικής είναι η αύξηση της "χωρητικότητας" του δικτύου (network capacity), μέσω της "επαναχρησιμοποίησης" συχνοτήτων (frequency reuse) για την παροχή πλήρους ραδιοκάλυψης με την προϋπόθεση ότι το δίκτυο έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε οι κυψέλες να απέχουν επαρκώς η μία από την άλλη, ελαχιστοποιώντας το φαινόμενο της ενδοκαναλικής παρεμβολής (co-channel interference). Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται στην επίδραση που ασκείται στο κανάλι (στο οποίο είναι συντονισμένο ένα κινητό), από την εκπομπή ενός απομακρυσμένου σταθμού βάσης του δικτύου στο ίδιο κανάλι.

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΥΨΕΛΩΝ - ΕΝΔΟΚΑΝΑΛΙΚΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ

Μέτρο ελαχιστοποίησης της



sight). Σε μία τέτοια δομή μικρο-κυψελών (micro-cells), οι σχετικά χαμηλού ύψους πομποί, τοποθετημένοι πάνω από την τοπική κίνηση, αλλά χαμηλότερα από τα περιβάλλοντα κτίρια, προσφέρουν δύο πλεονεκτήματα: η εξασθένηση εξαιτίας της τοπικής κίνησης των οχημάτων μπορεί να ελαχιστοποιηθεί και το σήμα είναι δυνατόν να περιοριστεί στα πλαίσια μίας περιορισμένης σε έκταση μικρο-κυψέλης. Επίσης, οι κεραιές με μικρότερο ύψος, περιορίζουν την επιπλέον διασπορά της καθυστέρησης του σήματος (excess signal delay spread), η οποία προκαλείται εξαιτίας των πολλαπλών διαδρομών ανάκλασης (multipath reflection), δεδομένου ότι οι απομακρυσμένες ανακλαστικές επιφάνειες είναι τώρα αποκλεισμένες. Έτσι ελαχιστοποιείται η πιθανότητα αλληλοπαρεμβολής των μεταδιδόμενων (δυναδικών) συμβόλων (inter-symbol interference). Από την άλλη πλευρά, η συγκεκριμένη λύση είναι πιθανόν να οδηγήσει σε αύξηση της ενδοκαναλικής παρεμβολής. Σε μία τέτοια περίπτωση, ο διαμερισμός των κυψελών σε τομείς, είναι δυνατόν να βελτιώσει το λόγο της φέρουσας του

χρησιμοποιούμενου σήματος συχνότητας (carrier signal) προς το σήμα παρεμβολής. Η συγκεκριμένη λύση απαιτεί την αντικατάσταση των κεραιών που εκπέμπουν σήμα κυκλικά προς κάθε κατεύθυνση του ορίζοντα (omni-directional), από κατευθυντικές (directive) κεραιές για κάθε έναν από τους τομείς (60, 120 μοιρών) μιας κυψέλης. Ψυνέπεια όμως της συγκεκριμένης επιλογής για την βελτίωση του λόγου του σήματος προς την παρεμβολή, είναι η αύξηση του αριθμού των πομπών σε κάθε σταθμό βάσης του δικτύου και στην πραγματικότητα ένας μειωμένος αριθμός διαθέσιμων καναλιών, καθώς ο αριθμός των μεμονωμένων κυψελών μίας δομής, πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή ίσο με τον αριθμό των νεο-δημιουργηθέντων τομέων. Οι συνθήκες αυτές αυξάνουν τον αριθμό των μεταπομπών (handoff). Επιπλέον βελτίωση του λόγου του σήματος προς την παρεμβολή, παρέχεται από την ηλεκτρική κλίση των κεραιών, έτσι ώστε η εκπεμπόμενη ενέργεια να εστιάζεται προς το

έδαφος παρά προς τον ορίζοντα, περιορίζοντας την έκταση της παρεχόμενης ραδιοκάλυψης στα πλαίσια των νεο-σχηματισμένων μικροκυψελών ή τομέων. Σημειώνουμε, ότι εγκατάσταση σταθμού βάσης με τρεις κατευθυντικές κεραιές 120 μοιρών στις κορυφές των κυψελών-εξαγώνων, είναι δυνατόν να προσφέρει κάλυψη σε τρεις κυψέλες αντί μίας (σε περίπτωση τοποθέτησης του σταθμού βάσης στο κέντρο της κυψέλης), ελαττώνοντας τον αριθμό των σταθμών βάσης. Στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών, η σχεδίαση των διαστάσεων των κυψελών εξαρτάται από την πυκνότητα των χρηστών. Στις αστικές περιοχές (urban areas) σχεδιάζονται





κυψέλες μικρότερης ακτίνας, ενώ σε υπαίθριες περιοχές εκτός πόλεων (rural areas) όπου ο απαιτούμενος αριθμός καναλιών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο είναι μικρότερος, οι κυψέλες σχεδιάζονται τόσο μεγάλες όσο η εξασθένηση του σήματος επιτρέπει.

Πρακτικά, τα GSM900 και GSM1800 δίκτυα αστικών περιοχών, αποτελούνται από παρόμοιου μεγέθους κυψέλες, αλλά σε υπαίθριες εκτός πόλεων περιοχές, μία επιπλέον εξασθένηση της τάξης των 10dB εξαιτίας της υψηλότερης συχνότητας



λειτουργίας ενός συστήματος GSM1800, μειώνει στο μισό την ακτίνα των κυψελών.

Το εξαγωγικό σχήμα μίας κυψέλης, αποτελεί πρακτικά αφηρημένη έννοια και απλοποιημένο μοντέλο της κάλυψης που παρέχει η κεραία κάθε σταθμού βάσης. Η πραγματική κάλυψη κυψέλης, καθορίζεται από το περίγραμμα στα πλαίσια του οποίου ο πομπός παρέχει ικανοποιητική ποιότητα υπηρεσιών.

ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ ΓΕΙΤΟΝΙΚΩΝ ΚΑΝΑΛΙΩΝ

Η παρεμβολή είναι σοβαρότερη στις αστικές περιοχές εξαιτίας του μεγαλύτερου κατωτάτου επιπέδου θορύβου (noise floor) και του μεγάλου αριθμού σταθμών βάσης και κινητών. Αναγνωρίζοντας την ενδοκαναλική παρεμβολή ως μία από τις δύο κυριότερες παρεμβολές που επιφέρει η φύση ενός συστήματος

κυψελαιδών επικοινωνιών, η παρεμβολή γειτονικών καναλιών (adjacent channel interference) αποτελεί σημαντικό ανασταλτικό παράγοντα της ικανοποιητικής λειτουργίας ενός δικτύου.

Το φαινόμενο είναι αποτέλεσμα της πλημμελούς λειτουργίας των φίλτρων του δέκτη, τα οποία επιτρέπουν σε γειτονικές συχνότητες να διαρρέουν στο εύρος διελεύσεως (passband) των φίλτρων. Μία τέτοια παρεμβολή, επιδρά αρνητικά στην επικοινωνία πομπού και δέκτη, εφόσον ο χρήστης γειτονικού καναλιού είναι είτε πολύ κοντά στον σταθμό βάσης (στην περίπτωση όπου το κινητό-δέκτης εκπέμπει ασθενές σήμα στο κυρίως κανάλι), είτε πολύ κοντά στον δέκτη. Ελαχιστοποίηση του φαινομένου, το οποίο είναι σοβαρό τόσο στην περίπτωση δομών που αποτελούνται από μικρές κυψέλες όσο και σε κυψέλες με μεγάλη πυκνότητα χρηστών, είναι δυνατή με βελτίωση της απόδοσης των φίλτρων και προσεκτική παροχή συχνοτήτων μεταξύ γειτονικών κυψελών.

Ωστόσο, το κυριότερο πρόβλημα στα κινητά τηλεπικοινωνιακά συστήματα, προκύπτει εξαιτίας της ίδιας της φύσης του ραδιοκαναλιού, και αναφέρεται ως παρεμβολή πολλαπλών διαδρομών μετάδοσης (multipath interference), η οποία είναι δυνατόν να προκαλέσει εξασθένηση και διασπορά του σήματος.

ΜΕΤΑΠΟΜΠΗ

Η μεταπομπή (handover/handoff) είναι ο μηχανισμός που εναλλάσσει την σύνδεση ενός χρήστη από συχνότητες οι οποίες χρησιμοποιούνται σε μία κυψέλη, σε συχνότητες που χρησιμοποιούνται σε παρακείμενη κυψέλη, ενώ το κινητό μετατοπίζεται μεταξύ των κυψελών. Η έναρξη του μηχανισμού προκαλείται είτε με πώση του σήματος κάτω από ένα επιτρεπτό επίπεδο λειτουργίας (threshold level), είτε με τον εντοπισμό ενός μεγάλου αποθέματος ισχύος από παρακείμενο σταθμό βάσης, είτε από φτωχό σε ποιότητα σήμα (όπως υποδεικνύεται π.χ. από έναν ρυθμό σφάλματος - error rate - ο οποίος ξεπερνά ένα επιτρεπτό μέγεθος) ή ακόμη από μία υπέρμετρη χρονική αύξηση (excess timing advance) ενώ το κινητό εντοπίζεται πολύ μακριά από τον σταθμό βάσης. Ένας αποτελεσματικός και αξιόπιστος μηχανισμός μεταπομπής, μπορεί να



παίξει σημαντικό ρόλο στον έλεγχο της ενδοκαναλικής παρεμβολής, ιδιαίτερα όσο το μέγεθος της κυψέλης μειώνεται, όπως επίσης και στον έλεγχο της ισχύος του κινητού. Ουσιαστικά, ο έλεγχος της ισχύος του κινητού, μειώνει την πιθανότητα πρόκλησης παρεμβολής από την συσκευή ενώ παράλληλα αυξάνει την αυτονομία της. Από την άλλη πλευρά, ένας αξιόπιστος μηχανισμός μεταπομπής, απαιτεί την εξασφάλιση τού ότι η πτώση στο παρατηρούμενο σήμα δεν προκαλείται εξαιτίας στιγμιαίας εξασθένησης η οποία είναι δυνατό να οδηγήσει σε μη αναγκαίες μεταπομπές. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμα και όταν το κινητό είναι στάσιμο, περιβαλλοντική κίνηση πλησίον του σταθμού βάσης ή/και του κινητού μπορούν να προκαλέσουν εξασθένηση. Στην περιοχή μίας κυψέλης

μπορούν να κινούνται οχήματα υψηλών ταχυτήτων παράλληλα με πεζούς χρήστες, οι οποίοι ενδέχεται να μην χρειαστούν ποτέ μεταπομπή κατά την διάρκεια μίας τηλεφωνικής κλήσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, χρησιμοποιώντας διαφορετικού ύψους κεραιές και διαφορετικά επίπεδα ισχύος, είναι δυνατόν να παρέχουμε "μεγάλες" και "μικρές" κυψέλες συνεχαστημένες στην ίδια περιοχή, προσφέροντας μεγάλη περιοχή κάλυψης σε υψηλών ταχυτήτων χρήστες και μικρότερη κάλυψη σε χαμηλών ταχυτήτων χρήστες. Η προσέγγιση αυτή εξασφαλίζει ότι ο αριθμός των μεταπομπών ελαχιστοποιείται για την πρώτη περίπτωση χρηστών και παρέχει επιπρόσθετη χωρητικότητα μικροκυψελών σε πεζούς χρήστες.

ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ GSM900/1800

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) έχει διαθέσει τις περιοχές 890 - 915 MHz και 935 - 960 MHz για την λειτουργία των δικτύων GSM 900. Η πρώτη περιοχή χρησιμοποιείται για την επικοινωνία του κινητού με τον σταθμό βάσης (ανοδική ζεύξη - uplink), ενώ η δεύτερη ζώνη συχνοτήτων

χρησιμοποιείται για την επικοινωνία του σταθμού βάσης με την κινητή μονάδα (καθοδική ζεύξη - downlink), υποστηρίζοντας την πλήρως αμφίδρομη (full duplex) μετάδοση με την διάθεση δύο υπο-περιοχών που απέχουν μεταξύ τους 45 MHz. Η κατανομή των ραδιοκαναλιών ανά 200 KHz, επιτρέπει μέχρι 124 κανάλια σε κάθε ζώνη. Σε ένα δίκτυο GSM1800, η ζώνη συχνοτήτων εκτείνεται από τους 1710 - 1785 MHz για την ανοδική ζεύξη και από τους 1805 - 1880 MHz για την καθοδική ζεύξη, υποστηρίζοντας την πλήρως αμφίδρομη μετάδοση με την διάθεση δύο υπο-περιοχών που απέχουν μεταξύ τους 95 MHz. Η κατανομή των ραδιοκαναλιών ανά 200 KHz, επιτρέπει μέχρι 374 κανάλια σε κάθε ζώνη. Ουσιαστικά, στο GSM1800 διατηρείται η δομή ενός



δικτύου GSM900. Ωστόσο, η εξέλιξη από το GSM900 στο GSM1800 παρέχει πρόσβαση σε μία περισσότερο εκτεταμένη διαθέσιμη ζώνη συχνοτήτων (150 MHz σε σύγκριση με αυτή των 50 MHz ενός συστήματος GSM 900), όπως επίσης μικρότερες και χαμηλότερης ισχύος κινητές συσκευές (250 mWatt - 1 Watt σε σύγκριση με αυτές των 20 mWatt - 2 Watt ενός GSM900 συστήματος).

Επιπρόσθετα, οι κυψέλες GSM1800 καλύπτουν

Ένα δίκτυο GSM σχεδιάζεται έτσι ώστε ο κινητός σταθμός να καθοδηγείται στην χρησιμοποίηση μόνο του ελαχίστου απαραίτητου επιπέδου ισχύος για την επίτευξη αποτελεσματικής επικοινωνίας με τον σταθμό βάσης, αυξάνοντας την διάρκεια λειτουργίας της μπαταρίας και ελαττώνοντας την παρεμβολή. Η παροχή ισχύος του πομποδέκτη ενός σταθμού βάσης, μπορεί να ρυθμίζεται σε βήματα των 2dB, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη επίδοση στα πλαίσια της ενδοκαναλικής παρεμβολής.

Κλάσεις ισχύος	Ισχύς Π/Δ Στ.Βάσης (Watt)	Ισχύς κινητού (Watt)
1	320	20 (τηλεφωνική συσκευή τοποθετημένη σε αυτοκίνητο - car mounted phone)
2	160	8 (μεταφερόμενη μονάδα - transportable)
3	80	5 (μεταφερόμενη μονάδα - transportable)
4	40	2 (κινητή μονάδα χειρός - handportable)
5	20	0,8 (κινητή μονάδα χειρός - handportable)
6	10	
7	5	
8	2,5	

απόσταση ως τα 5 Km σε σύγκριση με τα 35 Km του GSM900. Η υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας στην περίπτωση ενός συστήματος GSM1800, συνεπάγεται υψηλότερες απώλειες μετάδοσης και σήμα περισσότερο επιρρεπές σε παρεμβολή και διασπορά εξαιτίας ανακλάσεων. Από την άλλη πλευρά, ένα τέτοιο σύστημα είναι κατάλληλο για μετάδοση στα πλαίσια μίας δομής μικροκυβελών, η οποία παρέχει αποκλειστική κάλυψη σε κτίρια, υπογείους σταθμούς τρένου - μετρό, κλπ., εξαιτίας της μικρότερης σε έκταση κυψέλης και της χαμηλότερης ισχύος εκπομπής.

Ο πίνακας παρουσιάζει τις κλάσεις επιπέδων ισχύος πομποδέκτη (Π/Δ) σταθμού βάσης και κινητής μονάδας. Υψηλής ισχύος αναμεταδότες, χρησιμοποιούνται σε υπαίθριες περιοχές εκτός πόλεων, όπου η καθορισμένη ακτίνα κυψέλης θα μπορούσε να εκτείνεται πέραν των 3 Km (έως 35 Km), ενώ χαμηλής ισχύος αναμεταδότες, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές εσωτερικού χώρου. Σε αστικές περιοχές, η εφαρμοζόμενη ακτίνα κυψέλης μπορεί να είναι μικρότερη του 1 χιλιομέτρου και ενίοτε -στην περίπτωση μικροκυβελών- περιορίζεται στα 200 - 300 μέτρα. Το επίπεδο του σήματος που λαμβάνεται από κινητά και πομποδέκτες σταθμών βάσης, πρέπει να ικανοποιεί το όριο που καθορίζεται στις τεχνικές προδιαγραφές του GSM (05.05), το οποίο αναφέρεται ως ευαισθησία αναφοράς (reference sensitivity). Για την περίπτωση κινητής μονάδας χειρός, η ευαισθησία αναφοράς καθορίζεται στα -102 dBm, ενώ για ένα πομποδέκτη σταθμού βάσης καθορίζεται στα -104 dBm. Τέλος, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του GSM, ένας δέκτης λειτουργεί

ικανοποιητικά, εφόσον ο λόγος του σήματος προς την ενδοκαναλική παρεμβολή (εξαιτίας της αλληλοπαρεμβολής των μεταδομένων συμβόλων ή της παρεμβολής από πομπούς GSM άλλων κυψελών) είναι μεγαλύτερος από 9 dB.

Βιβλιογραφία

1. Lovnes, G., Paulsen, S., Raekken, R., "Estimating GSM coverage using 900 MHz multipath measurements", Proceedings of the IEEE VTC, 1994, pp. 1798 - 1802.
2. Xia, H. H., Bertoni, H. L., Maciel, L. R., Lindsaystewart, A., Rowe, R., "Radio propagation characteristics for line-of-sight microcellular and personal communications", IEEE transactions on antennas and propagation, 1993, vol. 41, no. 10, pp. 1439 - 1447.
3. Adawi, N. S., Bertoni, H. L., Child, J. R., Daniel, W. A., Dettra, J. E., Eckert, R. P., Flath, E. H., Forrest, R. T., "Coverage prediction for mobile radio systems operating in the 800/900 Mhz frequency range", IEEE transactions on vehicular technology, 1988, vol. 37, no. 1, p. 3.
4. Rappaport, T. S., "Wireless communications, principles and practice", Prentice Hall, 1996.
5. Macario, R. C. V., "Modern personal radio systems", The Institution of Electrical Engineers, 1996.
6. Balston, D. M., Macario, R. V. C., "Cellular radio systems", Artech House, 1993.
7. Σούλης, Δ., "Το Πανερωπαϊκό σύστημα κινητής τηλεφωνίας GSM και η εφαρμογή του στην Ελλάδα", Laser Press, 1992.
8. Jones, E. V., "Transmission systems", University of Essex - Dept. of Electronic Systems Engineering, EE902 Transmission Systems, 1997.
9. Bebbington, D., "Radio systems design, satellite systems, radar systems", University of Essex - Dept. of Electronic Systems Engineering, EE414 Radio Frequency Systems, 1996.

