

# ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ



ΤΜΗΜΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΜΣ-ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ & ΔΙΚΤΥΑ

Διπλωματική Εργασία

Μελέτη παρεμβολών σε κυψελωτό σύστημα με  
πολλαπλή πρόσβαση χρηστών

**Αθηνά Κοντογιάννη**

Πειραιάς 2011

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία μελέτη και ανάλυση του υπολογισμού ομοδιαυλικών παρεμβολών σε κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών με διαφορετικές μεθόδους πολλαπλής πρόσβασης. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πηλίκo σήματος προς συνολική παρεμβολή για διάφορα επίγεια κυψελωτά συστήματα όπως TDMA cellular, OFDM/CDMA κυψελωτά, και CDMA συστήματα πολλαπλής πρόσβασης. Επίσης μελετάμε την επίδοση των κυψελωτών επίγειων συστημάτων ως προς το πηλίκo σήματος προς συνολική παρεμβολή στην περίπτωση ομοκατευθυντικών και κατευθυντικών κεραιών βάσης. Στο δεύτερο κεφάλαιο δημιουργούμε και παρουσιάζουμε αναλυτικά μία προσομοίωση ενός κυψελωτού συστήματος στο λογισμικό Matlab και υπολογίζουμε την πιθανότητα διακοπής ζεύξης (outage probability) για διάφορες παραμέτρους του συστήματος όπως του συντελεστή επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων, το είδος των κεραιών βάσης, αλλά και του περιβάλλοντος διάδοσης με κυριότερη παράμετρο τον εκθέτη απωλειών διάδοσης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και τα συμπεράσματα για την επίδραση των διαφόρων παραμέτρων του συστήματος στην επίδοση της πιθανότητας διακοπής ζεύξης παρουσιάζονται στο τρίτο κεφάλαιο, ενώ ο συνολικός κώδικας της προσομοίωσης δίνεται στο παράρτημα.

# Περιεχόμενα

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>4</b>
1.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ.....	9
1.2 ΨΗΦΙΑΚΑ ΣΗΜΑΤΑ.....	11
1.3 ΕΠΙΓΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ.....	16
1.3.1 TDMA Cellular.....	17
1.3.2 OFDM/CDMA.....	18
1.3.3 CDMA Κυψελωτά Συστήματα.....	19
1.3.4 Μακροκυψελωτά και Μικροκυψελωτά Συστήματα.....	21
1.3.5 Λόγος ισχύος προς cochannel παρεμβολή σε Κινητό (C/I).....	23
1.3.6 Κυψελωτό σύστημα με ομοιοκατευθυντικές κεραιές.....	25
1.3.7 Κυψελωτό σύστημα με κατευθυντικές κεραιές.....	27
1.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ ΓΙΑ ΟΜΟΔΙΑΥΛΙΚΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ.....	29
1.5 ΜΕΤΡΙΚΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	31
<b>2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΟΝΤΕ CARLO.....</b>	<b>34</b>
2.1 ΒΗΜΑ 1ο: ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	36
2.2 ΒΗΜΑ 2ο: ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ N+1 ΚΙΝΗΤΩΝ ΣΤΙΣ ΚΥΨΕΛΕΣ.....	40
2.3 ΒΗΜΑ 3ο: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΒΑΣΗΣ.....	41
2.4 ΒΗΜΑ 4ο: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ.....	42
2.5 ΒΗΜΑ 5ο: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΤΟΥ SIR ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΔΥΟ ΣΥΝΔΕΞΕΙΣ.....	42
2.6 ΒΗΜΑ 6ο: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (OUTAGE PROBABILITY).....	43
<b>3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....</b>	<b>45</b>
3.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΙΑ ΤΙΜΕΣ $\Gamma=4$ .....	45
3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΙΑ ΤΙΜΕΣ $\Gamma=2$ .....	53
<b>4. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: MATLAB SCRIPT FILES.....</b>	<b>55</b>
4.1 SCRIPT FILE CELL_SIRROUTAGE.M.....	55
4.2 MATLAB FUNCTION ROUTAGE.M.....	61
4.3 MATLAB SCRIPT COMPRESULTS1.M.....	66
<b>5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....</b>	<b>67</b>

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι βασικές αρχές των κυψελωτών συστημάτων, που θεμελιώθηκαν με την εργασία του V. H. MacDonald το 1979, πηγάζουν από την ανάγκη για αποδοτική χρήση του φάσματος και τη δυνατότητα εξυπηρέτησης μεγάλου αριθμού χρηστών. Τα κυψελωτά ραδιοσυστήματα στηρίζονται στην έξυπνη απόδοση και την επαναχρησιμοποίηση των ραδιοδιαύλων στην περιοχή κάλυψης και εφαρμογής του συστήματος. Σε κάθε κυψελωτό Σταθμό Βάσης, αποδίδεται μία ομάδα ραδιοδιαύλων που χρησιμοποιείται σε μία μικρή γεωγραφική περιοχή που καλείται κυψέλη. Στους Σταθμούς Βάσης γειτονικών κυψελών αποδίδονται ομάδες διαύλων, που περιέχουν διαφορετικούς διαύλους από εκείνους των γειτονικών κυψελών.

Οι κεραιές των Σταθμών Βάσης είναι σχεδιασμένες να επιτυγχάνουν την επιθυμητή κάλυψη μέσα σε συγκεκριμένη κυψέλη. Περιορίζοντας την περιοχή κάλυψης στα όρια μιας κυψέλης είναι δυνατή η επαναχρησιμοποίηση ομάδων διαύλων σε άλλες κυψέλες που απέχουν μεταξύ τους απόσταση ικανή ώστε να εξασφαλίζεται το επίπεδο των ομοδιαυλικών παρεμβολών σε ανεκτά όρια.

Η διαδικασία σχεδίασης, επιλογής και απόδοσης των ομάδων διαύλων σε όλους τους κυψελωτούς Σταθμούς Βάσης του συστήματος, καλείται σχεδίαση απόδοσης συχνοτήτων (frequency planning), όπου χρήστες σε γεωγραφικά απομακρυσμένες κυψέλες χρησιμοποιούν ταυτόχρονα τον ίδιο διάυλο, δηλαδή την ίδια συχνότητα φέροντος.

Επιπλέον, η απόδοση των ασύρματων δικτύων εξαρτάται άμεσα από την χωρική διαμόρφωση των χώρων τους, επειδή η λαμβανόμενη δύναμη του σήματος και η παρεμβολή εξαρτώνται καθοριστικά από τις αποστάσεις μεταξύ των πολυάριθμων πομπών και δεκτών. Επομένως, ο στόχος είναι να καταδείξει τη

δύναμη των spatial models και τεχνικών ανάλυσης στο σχεδιασμό των ασύρματων δικτύων.

Η πρόκληση της χωρικής μοντελοποίησης μπορεί να φαίνεται από τη σύγκριση της χωρικής πηγής σε χρόνο / συχνότητα πηγή. Οι ασύρματες μεταδόσεις πρέπει να χωρίζονται σε χρόνο, συχνότητα, και / ή κενό για να αποφευχθεί η υπερβολική παρέμβαση.

Το κενό μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά, για δύο λόγους:

- Στο χώρο, πομποί και δέκτες δεν είναι εγκατεστημένοι μαζί, και
- Ρεύμα από ανεπιθύμητες διαρροές στο χώρο από πομπούς πάνω από σχετικά μεγάλες αποστάσεις.

Αντίθετα, όταν χρησιμοποιείται διαίρεση του χρόνου ή της συχνότητας, πομποί και δέκτες είναι εγκατεστημένοι μαζί (σε χρόνο / συχνότητα) και οι ανεπιθύμητες διαρροές να ελαχιστοποιηθούν.

Επειδή η χωρική διαμόρφωση μπορεί να διαφέρει σημαντικά πάνω από ένα τεράστιο (συχνά άπειρο) αριθμό πιθανοτήτων, δεν μπορεί κανείς να σχεδιάσει πολλά συστήματα για την κάθε ειδική διαμόρφωση, αλλά πρέπει αντίθετα να θεωρεί ένα στατιστικό χωρικό μοντέλο για τον κόμβο θέσεων. Η χρησιμότητα των πρόσφατων καινοτομιών, όπως κωδικοποίηση ασύρματου δικτύου και ευθυγράμμιση παρεμβολών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό στις σχετικές θέσεις των πομπών και δεκτών.

Η αποτελεσματικότητα και η αποδοτικότητα ενός ασύρματου δικτύου είναι καλύτερο να χαρακτηρίζονται από μετρήσεις, όπως συνδεσιμότητα, χωρητικότητα / απόδοση, και αξιοπιστία (π.χ., ποσοστό λάθους πακέτων ή η πιθανότητα διακοπής). Κάθε μια από αυτές τις μετρήσεις είναι μια περίπλοκη λειτουργία όλων των συνδέσεων του δικτύου που ενδεχομένως συνδέει κάθε ζεύγος κόμβων. Καθώς το

δίκτυο μεγαλώνει σε μέγεθος ακόμη και σε μέτριο αριθμό (10-100) κόμβων, ο αριθμός των πιθανών συνδυασμών επικοινωνίας εκρήγνυται και μία ντετερμινιστική αξιολόγηση αυτών των μετρήσεων είναι φορτική στην καλύτερη περίπτωση.

Κάθε μια από τις βασικές μετρήσεις προκύπτει άμεσα από την λαμβανόμενο σήμα-προς-παρεμβολές συν το λόγο θορύβου (SINR) σε έναν ή περισσότερους συνδέσμους, έτσι ώστε η κατανόηση το SINR να είναι απαραίτητη. Το SINR είναι η στιγμιαία αναλογία της επιθυμητής ενέργειας σε παρεμβολές και ενέργειας του θορύβου, και είναι έτσι μια τυχαία μεταβλητή που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες.

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες είναι οι εξής [1]-[3]:

- 1) Η απόσταση μεταξύ του επιθυμητού Πομπού και του επιθυμητού Δέκτη - Βασισμένο σε ηλεκτρομαγνητικούς νόμους, η επιθυμητή λαμβανόμενη ισχύς πέφτει με την απόσταση και υπακούει σε αντίστροφη power-law, όπου ο εκθέτης είναι γνωστός ως path loss exponent.
- 2) Καθορισμός των Ενεργών Πομπών – Υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί ενεργών πομπών, ακόμα και ένα μέτριο μεγέθους ασύρματο δίκτυο. Το σύνολο των ενεργών πομπών επιλέγεται συχνά από το πρωτόκολλο MAC. Για κάθε δέκτη, οι άλλοι ενεργοί πομποί εμφανίζονται ως παρεμβολές.
- 3) Το σύνολο της ισχύς της παρεμβολής - Το άθροισμα των παρεμβολών εξαρτάται από το σύνολο της παρεμβολής από τους πομπούς και τις αποστάσεις τους από κάθε επιθυμητό δέκτη. Στα δίκτυα της μέτριας έως υψηλής πυκνότητας η ισχύς της παρεμβολής είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από την ισχύ του θορύβου.
- 4) Η ισχύς Θορύβου – Η ισχύς θορύβου στην SINR εξαρτάται από το λαμβανόμενο σήμα και τις παρεμβολές: κάτω από χαμηλή ισχύ μετάδοσης του SINR ο θόρυβος

είναι περιορισμένος, ενώ κάτω από υψηλή ισχύ εκπομπής του SINR οι παρεμβολές είναι περιορισμένες.

Πολλοί άλλοι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν το SINR, όπως fading και shadowing, ή συγκεκριμένες πρακτικές σχεδιασμού πομποδέκτη (Για παράδειγμα, η χρήση πολλαπλών κεραιών ή παρεμβολή ακύρωσης).

Επομένως, το SINR μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιορίζει και, τελικά, να υπολογίζει την συνδεσιμότητα / κάλυψη και την ικανότητα / απόδοση.

Επιπλέον, το throughput είναι μία από τις πιο σημαντικές μετρήσεις για τα ασύρματα δίκτυα, καθώς και ένας αριθμός από των διαφορετικά throughput υπάρχουν.

**Throughput Link** - Χωροταξικά μοντέλα επιδέχονται σε αναλυτικό χαρακτηρισμό του perlink throughput, το οποίο είναι ένας κρίσιμος παράγοντας του end-to-end ποσοστό σε multi-hop δίκτυα και είναι η ποσότητα του ενδιαφέροντος για single-hop δίκτυα.

**Perlink throughput** υπαγορεύεται από το SINR, και μπορεί να οριστεί με διαφορετικούς τρόπους. Είναι σαφές ότι εάν λιγότεροι πομποί είναι ενεργοί, τότε το SINR και επομένως η ικανότητα διακοπής μπορεί να αυξημένη, αλλά η συνολική απόδοση του δικτύου θα μειωθεί επίσης. Με άλλα λόγια, η transmission capacity είναι ο μέσος αριθμός των επιτυχημένων ενεργών συνδέσεων από ένα ορισμένο ποσοστό που μπορούν να υποστηριχθούν ανά τετραγωνικό μέτρο στο πλαίσιο του δικτύου.

**End-to-End Rate** - Για μεγάλα ασύρματα δίκτυα (π.χ., ad hoc), όπου η single hop επικοινωνία δεν είναι εφικτή, είναι επιθυμητό να γνωρίζουμε το end-to-end ποσοστό που είναι ανεκτό μεταξύ ενός τυπικού ζεύγους πηγής-προορισμού στο δίκτυο. Αυτό

είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστεί επειδή εξαρτάται από στρατηγικές δρομολόγησης, αναμετάδοσης, και περαιτέρω εξαρτάται από την αξιοπιστία και το ποσοστό του κάθε hop. Για ορισμένες στρατηγικές, ωστόσο, end-to-end rate είναι μια απλή λειτουργία του per-link throughput και, επομένως, μπορούν να υπολογιστούν.



## 1.1 Μεθοδολογία Ανάλυσης Παρεμβολών

Ένας από τους βασικότερους στόχους σχεδιασμού στα κυψελωτά κινητά επίγεια και δορυφορικά συστήματα επικοινωνίας είναι η παροχή υψηλής χωρητικότητας, σε συνδυασμό με την απαιτούμενη ποιότητα των υπηρεσιών. Λόγω της αρχιτεκτονικής δομής των συστημάτων αυτών, ένα πολύ κρίσιμο ζήτημα είναι ο προσδιορισμός των μεθοδολογιών για την ανάλυση της φύσης και την επίδραση της κάθε είδους παρεμβολής. Μέχρι τώρα, ο σχεδιαστής του συστήματος σχεδόν πάντα θεωρούσε ότι το limiting corrupting σήμα έχει Gaussian χαρακτηριστικά, όπως τα χαρακτηριστικά του θερμικού θορύβου. Με την έλευση δεκτών χαμηλού θορύβου και τη συμφόρηση στις ζώνες ραδιοσυχνοτήτων, η υπόθεση αυτή δεν μπορεί πλέον να δικαιολογηθεί και η παρεμβολή της μη Gaussian φύσης στα τωρινά και μελλοντικά συστήματα επικοινωνίας είναι ένα σημαντικό ζήτημα. Η μέθοδος της ανάλυσης χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της επίδρασης του θερμικού θορύβου σχετικά με τα συστήματα επικοινωνίας και δεν μπορεί, επομένως, να χρησιμοποιηθεί στα τυφλά για να καθορίσει την επίδραση των παρεμβολών της μη-Gaussian φύσης για τα νέα και εξελισσόμενα ασύρματα συστήματα και, συνεπώς, να σχεδιάσει τα στοιχεία του συστήματος.

Διάφορα εργαλεία ανάλυσης έχουν αναπτυχθεί, τα οποία λαμβάνουν υπόψη τις παρεμβολές, όχι μόνο ως additive distorting παράγοντα αλλά και ως έναν multiplicative παράγοντα, όπως το fading. Ο κύριος στόχος είναι, στη συνέχεια, να αναλύσει τον τρόπο με τον οποίο η παρεμβολή ως γενικός παράγοντας παραμόρφωσης επηρεάζει καλά αποδεκτά κριτήρια της απόδοσης των ασύρματων συστημάτων, όπως το  $C / I$  ή  $S / I$  και BER, και στη συνέχεια να προχωρήσει στην ανάπτυξη βέλτιστων ή μη ικανοποιητικών εργαλείων σχεδιασμού που οδηγούν σε

πρακτικά συστήματα εφαρμογών και πληρούν συγκεκριμένα επίπεδα ελάχιστων επιδόσεων.

Η μεθοδολογία ανάλυσης που εμπλέκεται, προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος μας παρουσιάζεται παρακάτω και περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

1. Υπολογισμό ή εκτίμηση της πυκνότητας ισχύος της παρεμβολής.
2. Υπολογισμός του C / I power ratio.
3. Προσδιορισμός της σχέσης μεταξύ C / I και S / I ή πιθανότητα λάθους ( $P_e$ ).
4. Προσδιορισμός της σχέσης μεταξύ S / I ή  $P_e$  και τις επιδόσεις του συστήματος.
5. Προσδιορισμός της σχέσης μεταξύ της απόδοσης του συστήματος και του αποδεκτού επιπέδου αλλαγών των παραμέτρων του συστήματος για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος.
6. Χρήση της C / I ως μέτρο για τη βελτιστοποίηση της κατανομής των πόρων και της ποιότητας.
7. Ανάπτυξη μηχανισμών και κριτηρίων για τη μείωση των παρεμβολών. Σε κάθε περίπτωση, ανάπτυξη μεθόδων που βαθμονομούν την επιρροή των παρεμβολών από χειρισμό των παραμέτρων σχεδιασμού.

Οι δύο παράμετροι C / I και S / I ως μέτρο της ποιότητας σχετίζονται άρρηκτα με την ποιότητα των υπηρεσιών των ασύρματων συστημάτων και για την περίπτωση των κυψελωτών συστημάτων με τις ακόλουθες παραμέτρους

- Carrier to co-channel interference ratio.
- Blocking probability.

Με τα χρόνια, πρακτικές αξίες για αυτές τις παραμέτρους έχουν ληφθεί, οι οποίες καθορίζουν τα κριτήρια ποιότητας για συγκεκριμένα πρακτικά ασύρματα συστήματα σε χρήση.

## 1.2 Ψηφιακά Σήματα

Για την περίπτωση των ψηφιακών συστημάτων, θα λάβουμε ένα πρότυπο σήμα PSK της μορφής:

$$s(t) = A \cos(\omega_1 t + \varphi_1(t)) \quad (1.2.1)$$

Για απλότητα, επιλέγουμε  $A = 1$ . Η ψηφιακή διαμόρφωση μεταφέρεται από τη γωνία του  $s(t)$ , δηλαδή την  $\varphi_1(t)$ , η οποία καταλαμβάνει διακριτές τιμές από ένα σύνολο από  $M$  ισαπέχοντα σημεία στο διάστημα  $[0, 2\pi]$  σε κάθε χρόνο δειγματοληψίας που απέχουν μεταξύ τους κατά  $T$  δευτερόλεπτα. Έτσι το  $N$ -οστό μήνυμα διαμορφώνεται με την φάση  $\varphi_1(NT) = 2\pi k/M$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, M-1$ , όπου κάθε μία από  $M$  τιμές του  $k$  είναι εξίσου πιθανή.

Για έναν συμφασικό (coherent) δέκτη ο οποίος συγκρίνει το λαμβανόμενο κύμα με το αδιαμόρφωτο carrier,  $A \cos(\omega_1 t)$ , και παράγει άμεσα τη διαφορά φάσης μεταξύ των δύο σημείων, το  $M$ -αδικό σύμβολο μεταδίδεται με την τιμή του  $k$ .

Ο εξωτερικός θερμικός θόρυβος μοντελοποιείται ως συνήθως με μία εργοδική Gaussian τυχαία διαδικασία με ομοιόμορφη φασματική πυκνότητα. Ως εκ τούτου έχουμε,

$$n(t) = n_1(t) \cos(\omega_1 t) - n_2(t) \sin(\omega_1 t) \quad (1.2.2)$$

όπου  $n_1(t)$  και  $n_2(t)$  είναι ανεξάρτητες Gaussian τυχαίες διεργασίες με μηδενική μέση τιμή και διακύμανση  $\sigma^2$ .

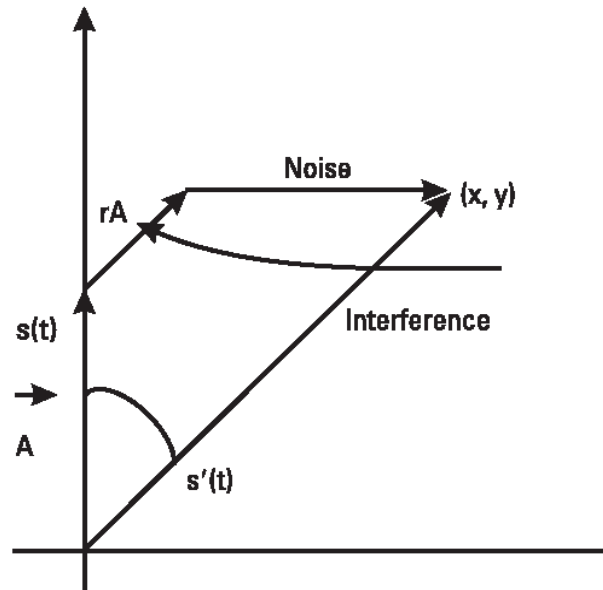
Το σήμα παρεμβολής μοντελοποιείται από τον τύπο:

$$i(t) = rA \cos(\omega_2 t + \varphi_2 t + \mu) \quad (1.2.3)$$

Σε κάποια στιγμή, το συνδυασμένο σήμα εισόδου στον ανιχνευτή δίνεται από:

$$s'(t) = s(t) + n(t) + i(t)$$

και παρουσιάζεται στο σχήμα 1.



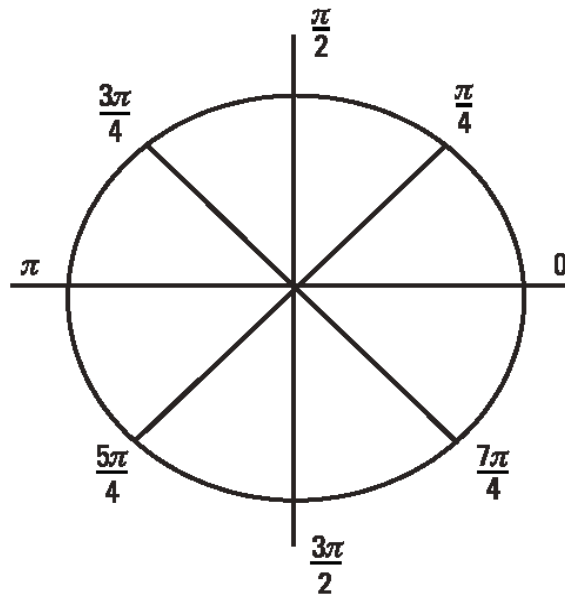
Σχήμα 1: Διάγραμμα φάσης του σήματος, θόρυβος και παρεμβολή

Ο ανιχνευτής εξετάζει τη διαφορά μεταξύ της φάσης του ληφθέντος σήματος και το στάδιο της αναφοράς και αποφασίζει ποιο σύμβολο διαβιβάστηκε. Υποθέτοντας ίσες πιθανότητες ενός σύμβολου, για μια σωστή απόφαση που χρειαζόμαστε για να οριστούν τα κατώτατα όρια με τη διαίρεση του κύκλου σε περιοχές, όπως φαίνεται παρουσιάζεται στο σχήμα 2, για την περίπτωση της  $M = 8$ :  $\pi/M, 3\pi/M, \dots, (2M-1)\pi/M$ .

Για αυτόν τον λόγο, κατά τη στιγμή της ανίχνευσης, εάν η φάση του λαμβανόμενου σήματος βρίσκεται εντός της περιοχής,  $0 \leq \theta \leq \pi/4$ , παίρνουμε την απόφαση ότι το σύμβολο, που έχει διαβιβαστεί, αντιστοιχεί στην τιμή  $k=1$ .

**i) C / I ή S / I ως Performance Measure—Digital Signals**

Είναι ευρέως γνωστό ότι το C / I και SNRs, ανάλογα με την υπηρεσία που θα προσφέρεται από το σύστημα, πρέπει να έχει ορισμένες τιμές, οι οποίες πρέπει να καθορίζονται από πριν.



Σχήμα 2: Signal-space διάγραμμα

Αυτές οι τιμές συνήθως καθορίζονται από την ποιοτική αξιολόγηση της παρεχόμενης υπηρεσίας. Για ψηφιακά σήματα, η ποιοτική αξιολόγηση εξαρτάται από τον αριθμό των σφαλμάτων που το συστήματος προκαλεί στα ληφθέντα δεδομένα που λειτουργούν σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον παρεμβολών. Έχοντας θέσει τις τιμές αυτών των δεικτών για την ικανοποιητική ποιότητα των υπηρεσιών, μπορούμε να τις χρησιμοποιήσουμε ως αναφορές και έτσι μπορεί να θεωρηθούν αυτές οι αναλογίες ως μέτρα ποιότητας.

## ii) PSK Συστήματα

Για να αναπτυχθεί ένα μέτρο της απόδοσης για τα ψηφιακά συστήματα είναι σύνηθες να εγκατασταθεί μια σχέση μεταξύ του λόγου της παρεμβολής της εκπεμπόμενης ισχύς του σήματος και της πιθανότητας λάθους. Με την πιθανότητα λάθους, κατανοούμε την πιθανότητα ότι η γωνία  $\theta$  είναι έξω από την περιοχή απόφασης.

Οι συντεταγμένες του  $\theta(x,y)$ , οι οποίες είναι τυχαίες μεταβλητές, έχουν μέσες τιμές που δίνονται από

$$\bar{X} = r \sin \varphi \quad (1.2.4)$$

$$\bar{Y} = 1 + r \cos \varphi$$

υπό-συνθήκη τη γωνία  $\varphi$ . Θέτουμε επίσης  $A=1$  για απλότητα. Η υπο-συνθήκη κοινή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των  $x, y$  δίνονται από τη σχέση:

$$F_{XY}(x, y | \varphi) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}[(x-r\sin\varphi)^2 + (y-1-r\cos\varphi)^2]} \quad (1.2.5)$$

Εάν πολλαπλασιάσουμε την (1.2.5) με την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της  $\varphi$ , η οποία είναι  $1/(2\pi)$  και ολοκληρώσουμε στο διάστημα  $[0, 2\pi]$  παίρνουμε [1-3]:

$$f_{XY}(x, y) = \frac{e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x^2 + (y-1)^2 + r^2)}}{(2\pi\sigma)^2} \int_0^{2\pi} e^{\frac{r}{\sigma^2}(x^2 + (y-1)^2)^{1/2} \cos(\varphi + \eta)} d\varphi \quad (1.2.6)$$

όπου:

$$\eta = \tan^{-1} \frac{y-1}{x}$$

Η εξίσωση (1.2.6) δίνει

$$f_{XY}(x, y) = \frac{e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x^2 + (y-1)^2 + r^2)}}{(2\pi\sigma)^2} I_0 \left( \frac{r}{\sigma^2} (x^2 + (y-1)^2)^{1/2} \right) \quad (1.2.7)$$

όπου:

$I_0(\ )$  είναι η τροποποιημένη μηδενική συνάρτηση Bessel του πρώτου είδους.

Η εξίσωση (1.2.7) δίνει την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των συνιστωσών του λαμβανόμενου σήματος. Χρειαζόμαστε επίσης τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της φάσης του λαμβανόμενου σήματος. Επιτυγχάνουμε τον στόχο μας,

αν αλλάξουμε τη μεταβλητή  $x, y$  σε πολικές συντεταγμένες και ολοκληρώσουμε στο μήκος του phasor. Αν θέσουμε

$$x = \delta \sin a \quad (1.2.8)$$

$$y = \delta \cos a$$

Η ισότητα γίνεται:

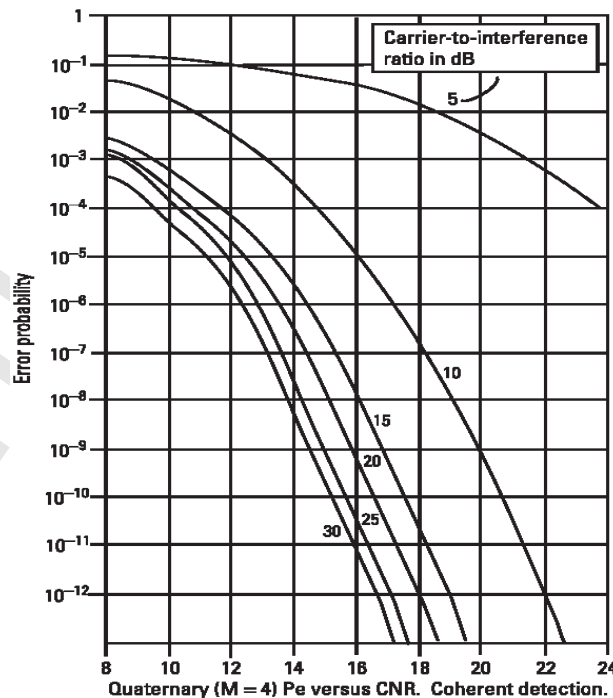
$$f_{\Theta}(\theta) = \frac{1}{(2\pi\sigma)^2} \int_0^{\infty} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(\delta^2+r^2+1-2\delta\cos a)} I_0\left(\frac{r}{\sigma^2}(\delta^2+1-2\delta\cos a)\right)^{1/2} \delta d\delta \quad (1.2.9)$$

Αν τώρα ολοκληρώσουμε την εξίσωση (1.2.9) στην περιοχή που βρίσκεται έξω από τα όρια  $-\pi/M$  μέχρι  $\pi/M$ , παίρνουμε

$$\text{Probability of error} = P_e = 2 \int_{(\pi/M)}^{\pi} f_{\Theta}(\theta) d\theta \quad (1.2.10)$$

όπου χρησιμοποιούμε τον παράγοντα 2 επειδή η  $f_{\Theta}(\theta)$  είναι συμμετρική ως προς  $\theta$ .

Μία γραφική αναπαράσταση των (1.2.10) δίνεται στην εικόνα 3 για  $M = 4$  [3].



Σχήμα 3: Καμπύλες πιθανότητας λάθους έναντι CNR (Από [3]).

Παρατηρούμε από την (1.2.10) και το σχήμα 3 ότι η  $P_e$  εξαρτάται άμεσα από τις παραμέτρους  $1/\gamma$  και  $1/\sigma$ , οι οποίες είναι η  $C/I$  και  $CNR$ , αντίστοιχα. Έχοντας επομένως συσχετίσει το σημαντικό μέτρο ποιότητας της πιθανότητας λάθους με το  $C/I$  με τις παραμέτρους σχεδιασμού, η παραπάνω ανάλυση έχει οδηγήσει στον αρχικό μας στόχο, να συσχετίσουμε τα μέτρα ποιότητας για το σχεδιασμό του συστήματος σε κάθε είδους περιβάλλον παρεμβολών. Παρακάτω θα επικεντρωθούμε στον υπολογισμό του  $C/I$  για διαφορετικά ασύρματα συστήματα.

### 1.3 Επίγεια Συστήματα Επικοινωνιών κινητής τηλεφωνίας

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε μια μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του  $C/I$  για κυψελοειδή και κινητά συστήματα. Η μεθοδολογία αυτή θα εφαρμοστεί στη συνέχεια ώστε να υπολογισθεί ο  $C/I$  για τα γνωστά κινητά συστήματα που χρησιμοποιούνται σήμερα. Η  $C/I$  του ενός κυψελοειδούς συστήματος μπορεί να προσεγγιστεί από τον τύπο:

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{M} \left( \frac{D}{R} \right)^n \quad (1.3.1)$$

όπου

$M$  = ο αριθμός των cochannel κελιών που προκαλούν παρεμβολές

$n$  = ο εκθέτης απώλειας ελευθέρου χώρου που κυμαίνεται μεταξύ δύο και τεσσάρων σε αστικά κυψελοειδή συστήματα

$D$  = απόσταση μεταξύ δύο cochannel κυψελών

$R$  = η ακτίνα της κυψέλης.



### 1.3.1 TDMA Cellular

Για τα TDMA κυψελωτά δίκτυα, η μέση  $C / I$  σε οποιαδήποτε δεδομένη θέση δίνεται από τον τύπο [4], [5]:

$$C / I = 10 \log \left[ S_d / \sum_{i=1}^n I_i \right] \quad (1.3.2)$$

όπου

$S_d$  = η ισχύς του επιθυμητού σήματος

$I_i$  = η παρεμβολή από τον  $i$ -στό cochannel σταθμό βάσης

#### Υπολογισμός του σήματος στις παρεμβολές και λόγος θορύβου για TDMA

Πολλοί σύγχρονοι κυψελοειδής αλγόριθμοι διαχείρισης ραδιο-πόρων για μετεκπομπές (handoffs), εκχώρηση καναλιών, και έλεγχο ισχύος (power control) χρειάζονται γρήγορες και ακριβείς εκτιμήσεις για το πηλίκο του σήματος προς το άθροισμα των παρεμβολές και το θόρυβο  $S / (I + N)$ .

Αρκετές μέθοδοι έχουν πρόσφατα αναπτυχθεί για την παραγωγή εκτιμήσεων σε πραγματικό χρόνο των  $S / (I + N)$  σε TDMA κυψελωτά συστήματα:

1. Interference projection (IP), η οποία χρησιμοποιεί το training και/ή color code sequences που συνήθως παρουσιάζονται στα κυψελωτά TDMA slots για να αποκτήσουν μία εκτίμηση του  $S / (I + N)$ .
2. Η χρήση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης των δειγμάτων του λαμβανόμενου σήματος για μικρό χρονικό διάστημα.

3. Subspace-based (SB) εκτιμήσεις των S/(I+N) λαμβάνονται με τη χρήση των ιδιοτιμών του co-variance matrix της ακολουθίας του λαμβανόμενου σήματος.
4. Χρήση εκτίμησης του σήματος προς variation power (SVP). Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης από τα δείγματα του λαμβανόμενου σήματος για ένα σύντομο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, τα αριθμητικά αποτελέσματα (σε DECT SYS) αποκαλύπτουν ότι ο εκτιμητής πάσχει από μεγάλη προκατάληψη (biased) στην περιοχή των ενδιαφερόσων τιμών του S / I.
5. Η μέθοδος Signal projection (SP) έχει συγκρίσιμη υπολογιστική πολυπλοκότητα με την IP μέθοδο και ένα μέσο απόλυτο σφάλμα πρόβλεψης S/(I + N) το οποίο είναι συγκρίσιμο με τις μεθόδους του SB.

### 1.3.2 OFDM/CDMA

Η βασική εξίσωση για το C/I ενός χρήστη και ενός carrier για ένα OFDM/CDMA σύστημα σε περίπτωση σημάτων που φτάνουν συγχρόνως είναι [6]:

$$(C / I)_i = \frac{P_{iR} G_p}{\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^N a_j \cdot P_{jR} + \sum_{k=0}^M \beta_{iC} \cdot P_{kR}^{tot} + N_0} \quad (1.3.3)$$

όπου

$P_{iR}$  = η ισχύς λήψης του  $i$  carrier.

$P_{kR}^{tot}$  = η συνολική ισχύς που λαμβάνεται από τον σταθμό βάσης του  $k$  πομποδέκτη

$G_p$  = το processing gain του συστήματος πολλαπλής πρόσβασης.

$a_j$  = ο παράγοντας ορθογωνικότητας για την ύπαρξη παρεμβολής μέσα στην κυψέλη.

$\beta_{IC}$  = μοντελοποιεί την απώλεια ορθογωνικότητας εξαιτίας μη ιδανικής εκτίμησης του καναλιού και ύπαρξης πολυδιαδρομικού καναλιού (fading multipath channel).

$N_0$  = ισχύς θερμικού θορύβου.

Η σχέση για ένα απλό carrier δίνεται από τον τύπο:

$$(C / I)_i = \frac{P_{iR} G_p}{\left[ \sum_{k=0}^M \beta_{IC} \cdot P_{kR}^{tot} \right] \cdot \gamma} \quad (1.3.4)$$

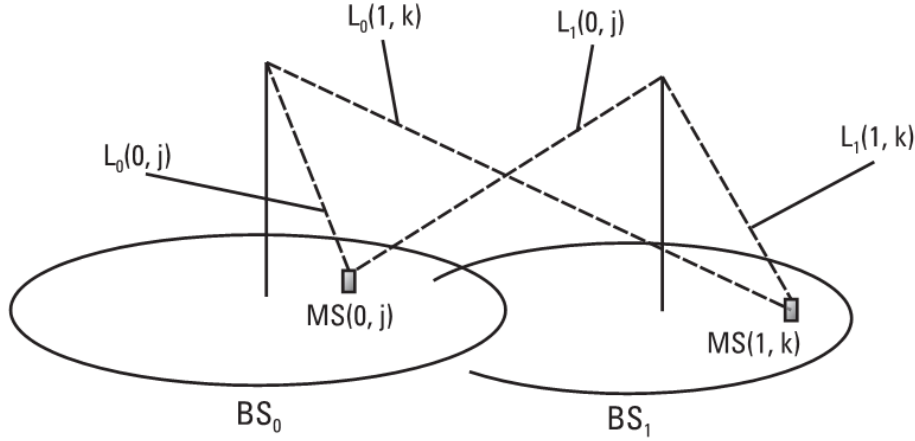
Η σχέση για έναν χρήστη θα γίνει τώρα:

$$C / I = \frac{P_R G_p}{\left[ \sum_{k=0}^M \beta_{IC} \cdot P_{kR}^{tot} \right] \cdot \gamma} \quad \text{οπου} \quad P_R = \sum_{i=0}^N \frac{P_{iR}}{N} \quad (1.3.5)$$

Στη σχέση (1.3.4), η παράμετρος  $\gamma$  μοντελοποιεί την ορθογωνικότητα μεταξύ των σημάτων από διαφορετικούς BTS.

### 1.3.3 CDMA Κυψελωτά Συστήματα

Σε CDMA συστήματα κινητών επικοινωνιών για να διατηρηθεί η ποιότητα στο επιθυμητό επίπεδο, S/I-based μέθοδοι ελέγχου της ισχύος έχουν προταθεί. Στο uplink, όλα οι κινητοί χρήστες σε ένα κελί ελέγχουν την ισχύ μετάδοσης, ώστε η λαμβανόμενη ισχύς να επιτυγχάνει το επιθυμητό επίπεδο ισχύος στο συνδεδεμένο σταθμό βάσης. Στο downlink, ένας σταθμός βάσης διαθέτει την ισχύ εκπομπής του, έτσι ώστε οι κινητοί δέκτες στο κελί να έχουν παρόμοιο πηλίκο S/I. Ως εκ τούτου, όλα οι κινητοί σταθμοί σε ένα κελί πρέπει να έχουν παρόμοιο uplink S / I και παρόμοιο downlink S / I, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.



Σχήμα 4. Ζεύξεις σε ένα κυψελωτό σύστημα (Από [9]).

Η uplink ποιότητα επικοινωνίας του  $BS_0$ ,  $SIR_{0\_up}$ , εκφράζεται ως

$$SIR_{0\_up} = \frac{P_{R0}}{(N_0 - 1)P_{R0} + B_0} = \frac{1}{(N_0 - 1) + B_0 / P_{R0}} \quad (1.3.6)$$

όπου η  $P_{R0}$  αντιπροσωπεύει το επιθυμητό επίπεδο ισχύος στο  $BS_0$  και γίνεται ο στόχος για τον έλεγχο μετάδοσης ισχύος, όταν οι κινητοί δέκτες συνδέονται στο  $BS_0$ . Ο πρώτος όρος στον παρονομαστή είναι η παρεμβολή από άλλα κινητά στην ίδια κυψέλη, ενώ ο δεύτερος όρος εκφράζει τις παρεμβολές από άλλες κυψέλες, και συμβολίζεται ως  $B_0$ .

Η downlink ποιότητα επικοινωνίας του κινητού  $MS(0, j)$  που συνδέεται στο  $BS_0$ ,  $SIR(0, j)_{down}$  εκφράζεται ως

$$SIR(0, j)_{down} = \frac{P_A(0, j) \cdot L_0(0, j)}{(1 - F_0) \cdot P_{BS_0} \cdot L_0(0, j) + C(0, j)} \quad (1.3.7)$$

Το σήμα που στέλνεται από  $BS_0$  στο  $MS(0, j)$  μεταδίδεται με ισχύ  $P_A(0, j)$ . Η απώλεια διάδοσης ελευθέρου χώρου μεταξύ των  $MS(0, j)$  και  $BS_0$  εκφράζεται από τον όρο  $L_0(0, j)$  [7].

Ο παρονομαστής στη δεξιά πλευρά στον τύπο (1.3.7) αντιπροσωπεύει τη συνολική παρεμβολή στο  $MS(0, j)$ . Η συνολική ισχύς μετάδοσης στο  $BS_0$  εκφράζεται ως  $P_{BS_0}$ .

$C(0, j)$  είναι η συνολική παρεμβολή από τα άλλα κελιά στο MS(0, j). Ορίζουμε έναν παράγοντα ορθογωνιότητας  $F_0$  στο downlink, και ως εκ τούτου  $(1-F_0)$  αντιπροσωπεύει το βαθμό απώλειας ορθογωνιότητας. Ο παράγοντας ορθογωνιότητας εξαρτάται από χαρακτηριστικά όπως ο αριθμός των πολυδιαδρομικών μονοπατιών διάδοσης, το power ratio μεταξύ των μονοπατιών, καθώς και τον αριθμό των δαχτύλων στο δέκτη RAKE.

Η downlink SIR στο BS<sub>0</sub>,  $SIR_{0\_down}$  μπορεί να εκφραστεί ως:

$$SIR_{0\_down} = \frac{P_{BS_0} - P_{pl}}{N_0 \cdot (1 - F_0) \cdot P_{BS_0} + \sum_{j=1}^{N_0} \frac{C(0, j)}{L_0(0, j)}} \quad (1.3.8)$$

όπου  $P_{pl}$  δηλώνει την ισχύ μετάδοσης του pilot-signal.

Από τον τύπο (1.3.8), η ποιότητα επικοινωνίας στο downlink επηρεάζεται από τους επόμενους παράγοντες:

- τον αριθμό των κινητών  $N_0$  στη κεντρική κυψέλη.
- την συνολική ισχύ μετάδοσης  $P_{BS}$ .
- τον παράγοντα ορθογωνιότητας  $F_0$ .
- την παρεμβολή από άλλα κελιά  $C(i, j)$ .
- την απώλεια διάδοσης  $L(i, j)$

#### 1.3.4 Μακροκυψελωτά και Μικροκυψελωτά Συστήματα

Χωρίς τον έλεγχο ισχύος για το downlink, η εκπεμπόμενη ισχύς του BS στο MS οπουδήποτε και να βρίσκεται είναι το ίδιο. Η C/I όπως φαίνεται από τον κινητό σταθμό στην κεντρική μακροκυψέλη και στην μικροκυψέλη μπορεί να εκφραστεί αντίστοιχα ως [7], [8]:

$$\left[ \frac{C}{I} \right]_l = \frac{\frac{p_{tl}(1-a_l)}{N} \cdot L_p}{\left[ 1 - \frac{(1-a_l)}{N} \right] p_{tl} \cdot L_p + p'_{ts} \cdot L'_p + \sum_{i=1}^6 p_{tl} \cdot L'_{pi}} \quad (1.3.9)$$

$$\left[ \frac{C}{I} \right]_s = \frac{\frac{p'_{ts}(1-a_s)}{M} \cdot L'_p}{\left[ 1 - \frac{(1-a_s)}{M} \right] p'_{ts} \cdot L'_p + p_{tl} \cdot L_p + \sum_{i=1}^6 p_{tl} \cdot L'_{pi}} \quad (1.3.10)$$

όπου:

$p_{tl}$  και  $p_{ts}$  η εκπεμπόμενη ισχύς από την μακροκυψέλη BS και την μικροκυψέλη BS.

$L_p$ ,  $L'_p$  και  $L'_{pi}$  είναι η απώλεια ισχύος λόγω διάδοσης για μακροκυψέλες, μικροκυψέλες και τις παρακαείμενες μακροκυψέλες, αντίστοιχα, και  $a_l$  και  $a_s$  οι παράμετροι που τίθενται σε ορισμένες τιμές (περίπου 0.1) ώστε να μεγιστοποιείται η χωρητικότητα της μακροκυψέλης και μικροκυψέλης και

$$\sum_{i=1}^6 p_{tl} \cdot L'_{pi} = \text{η παρεμβολή από τις 6 γειτονικές μακροκυψέλες} \quad (1.3.11)$$

Αυτές οι σχέσεις αποτελούν και τους κανόνες για το downlink ώστε να δεχτούμε ένα νέο ενεργό MS.

Η συνολική ισχύς μετάδοσης της μακροκυψέλης ή μικροκυψέλης για τους χρήστες πρέπει να είναι λιγότερη από  $(1-a)$  της συνολικής ισχύς. Επομένως,

$$\sum_{i=1}^N P(y) \leq p_t (1-a) \quad (1.3.12)$$

όπου

$N$  = ο αριθμός των χρηστών στο κελί που μας ενδιαφέρει.

$\alpha$  = το ποσοστό της ισχύος του pilot.

Με τον έλεγχο ισχύος στο downlink να εφαρμόζεται στην μακροκυψέλη η μικροκυψέλη, το  $(C/I)$  για το κινητό  $i$  τροποποιείται ως:

$$\left[ \frac{C}{I} \right]_d = \frac{f(y_i) \cdot P_R \cdot L_P}{(P_t - f(y_i) \cdot P_R) \cdot L_P + p'_t \cdot L'_p + \sum_{i=1}^6 p'_t \cdot L'_{Pi}} \geq \left( \frac{C}{I} \right)_{td} = -16 \text{ dB} \quad (1.3.13)$$

;οπου

$p_t$  = η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς από τους BS που ανήκουν σε άλλο είδους κελιού με την αντίστοιχη απώλεια διαδρομής.

$p'_t$  = η εκπεμπόμενη ισχύς από BS γειτονικής μακροκυψέλης με την αντίστοιχη απώλεια διαδρομής.

Η εξίσωση (1.3.13) αποτελεί τον κανόνα για την αποδοχή ενός νέου ενεργού MS στο downlink.

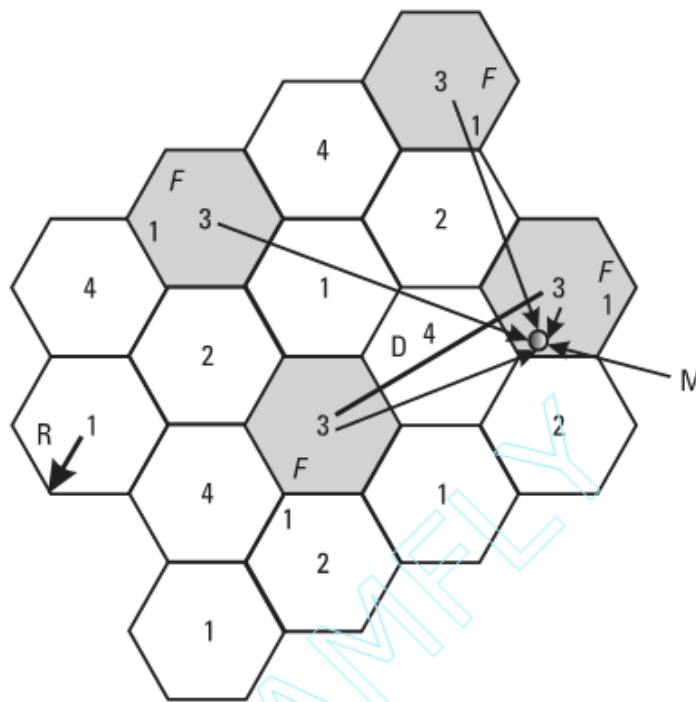
### 1.3.5 Λόγος ισχύος προς cochannel παρεμβολή σε Κινητό (C/I)

Στην ενότητα αυτή, θα χρησιμοποιήσουμε απλουστευμένα μοντέλα των κυψελωτών κινητών συστημάτων που εφαρμόζονται σήμερα προκειμένου να καθοριστεί το  $C/I$  λόγω της cochannel παρεμβολής. Η κινητή μονάδα στη θέση  $M$  λαμβάνει το επιθυμητό σήμα σε συχνότητα  $F_1$  από τον πλησιέστερο σταθμό βάσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5. Ταυτόχρονα, η κινητή μονάδα στη θέση  $M$  λαμβάνει, επίσης, ανεξάρτητα ανεπιθύμητα σήματα παρεμβολής από άλλους σταθμούς βάσης στην ίδια συχνότητα. Ο ίδιος δέκτης λαμβάνει αυτά τα ανεξάρτητα σήματα στην ίδια συχνότητα, ταυτόχρονα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία cochannel παρεμβολής.

Η επαναχρησιμοποίηση της συχνότητας σε απόσταση  $D$  είναι μια συνάρτηση του αριθμού  $K_0$  των κυψελών που δημιουργούν παρεμβολή καθώς και του λόγου  $C/I$  στο κινητό δέκτη. Η αναλογία αυτή ορίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση [9]:

$$\frac{C}{I} = \frac{C}{\sum_{k=1}^{K_0} I_k} \quad (1.3.14)$$

όπου,  $I_k$  είναι η ισχύς του παρεμβαλλόμενου σήματος που προέρχεται από την  $K_{th}$  cochannel κυψέλη. Τα παρεμβαλλόμενα σήματα που προέρχονται από άλλους σταθμούς βάσης από εκείνα που ανήκουν στην πρώτη βαθμίδα γειτονίας θεωρούνται αμελητέα.



Σχήμα 5 Ομοδιαυλική παρεμβολή (Από [9]).

Είναι γνωστό ότι η ισχύς λήψης ακολουθεί τη σχέση:

$$C \propto R^{-\gamma} \quad (1.3.15)$$



και

$$I \propto D^{-\gamma} \quad (1.3.16)$$

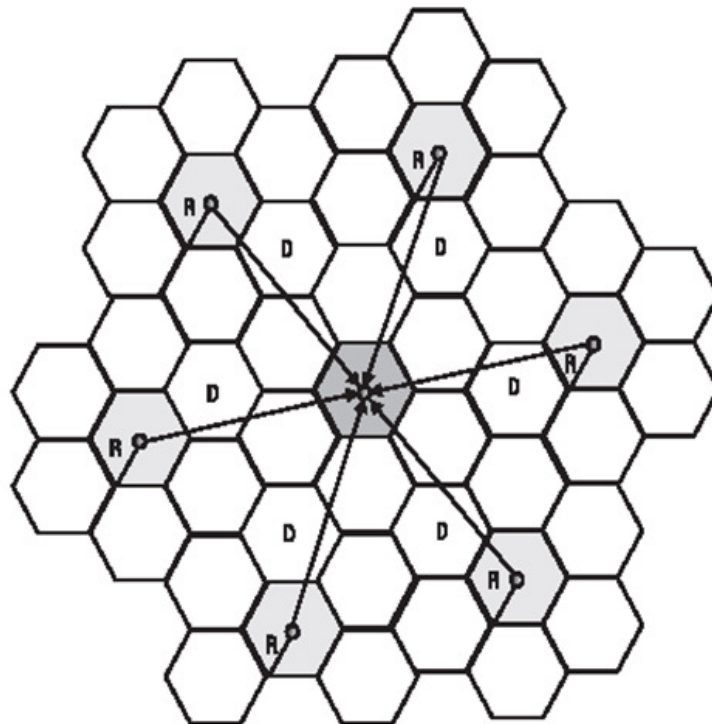
οπότε μπορεί εύκολα να βρεθεί ότι:

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{\sum_{k=1}^{K_0} D_k^{-\gamma}} \quad (1.3.17)$$

όπου  $R$  είναι η ακτίνα της κυψέλης. Παρακάτω θα εξετάσουμε χωριστά τις περιπτώσεις των σταθμών βάσης κυψελωτών συστημάτων με ομοιοκατευθυντικές κεραιές και με κατευθυντικές κεραιές.

### 1.3.6 Κυψελωτό σύστημα με ομοιοκατευθυντικές κεραιές

Πρώτα θα εξεταστεί η περίπτωση cluster με 7 κυψέλες, όπως φαίνεται στο σχήμα 6. Σε ένα cluster με 7 κυψέλες, με την παρουσία 6 παρεμβαλλόμενων κυψελών στην πρώτη βαθμίδα γειτονίας, ο λόγος  $C/I$  γίνεται:



Σχήμα 6: Cluster 7 κυψελών με ομοιοκατευθυντικές κεραιές

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{\sum_{k=1}^{K_0} D_k^{-\gamma}} = \frac{1}{\sum_{k=1}^6 \left(\frac{D_k}{R}\right)^{-\gamma}} = \frac{1}{\sum_{k=1}^6 q_k^{-\gamma}} \quad (1.3.18)$$

όπου  $q_k$  είναι ο παράγοντας μείωσης της cochannel παρεμβολής στην  $k_{th}$  κυψέλη. Υποθέτοντας ότι η απώλεια διάδοσης,  $\gamma$ , ισούται με 4, και όλες οι αποστάσεις  $D_k$  είναι ίσες με  $D$ , η (1.3.18) γίνεται:

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{6 (1 / D)^{-4}} \quad (1.3.19)$$

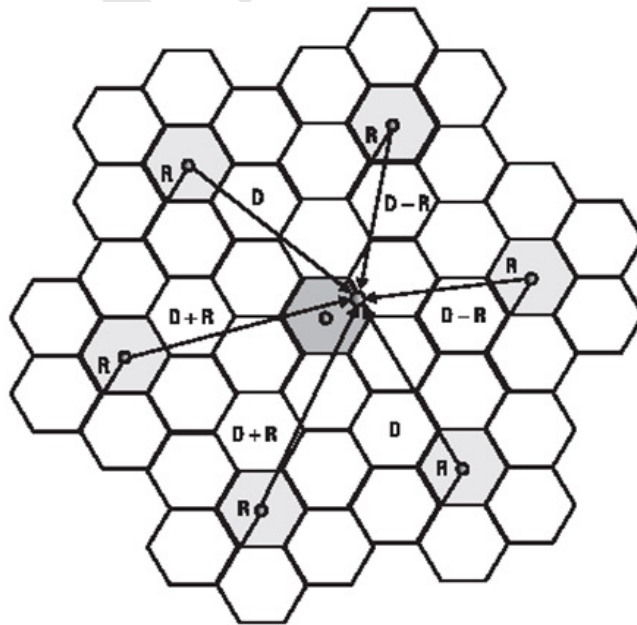
Σε ένα cluster με 7 κυψέλες, με την παρουσία 6 σημάτων παρεμβολών στην κινητή μονάδα τοποθετημένη στα όρια κυψέλης (χειρότερη περίπτωση), το  $C/I$  γίνεται:

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{2(D-R)^{-\gamma} + 2(D)^{-\gamma} + 2(D+R)^{-\gamma}} = \frac{1}{2(q-1)^{-\gamma} + 2(q)^{-\gamma} + 2(q+1)^{-\gamma}} \quad (1.3.20)$$

Για  $\gamma = 4$ , η (1.3.20) γίνεται:

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-4}}{6(D-R)^{-4}} = \frac{1}{6(q-1)^{-4}} \quad (1.3.21)$$

Αυτή η περίπτωση φαίνεται στο σχήμα 7.



Σχήμα 7: Η χειρότερη περίπτωση cluster 7 κυψελών με ομοιοκατευθυντικές κεραίες

### 1.3.7 Κυψελωτό σύστημα με κατευθυντικές κεραιές

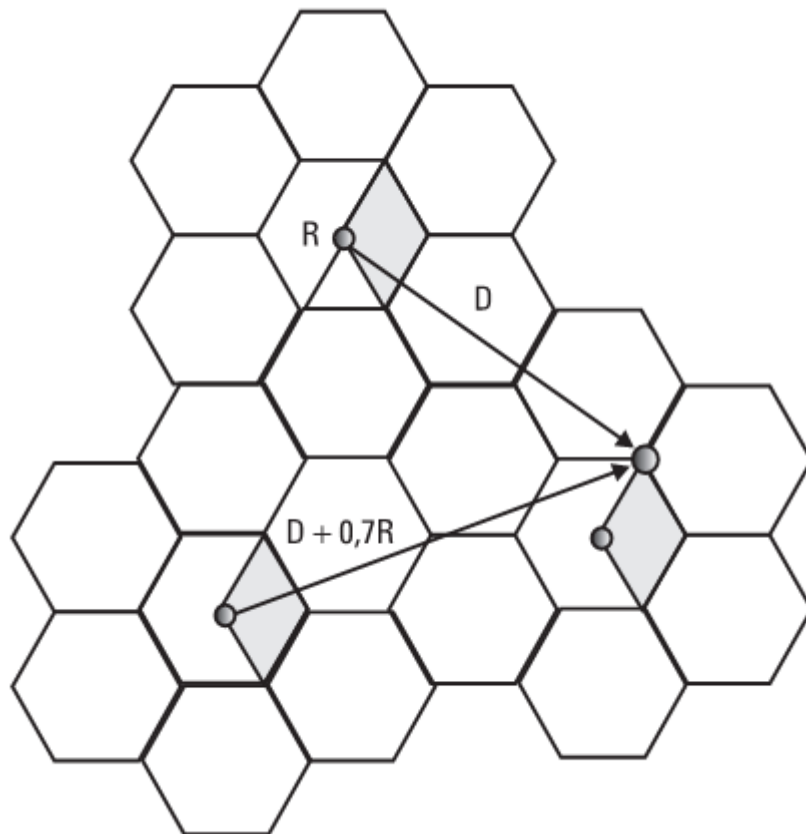
Χρησιμοποιώντας κατευθυντικές κεραιές για τους σταθμούς βάσης στην αρχιτεκτονική του cluster των 7 κυψελών, έχουμε τις ακόλουθες πιθανές περιπτώσεις:

#### Three-sector case

Η περίπτωση αυτή φαίνεται στο σχήμα 8, όπου χρησιμοποιούνται κατευθυντικές κεραιές των  $120^\circ$  κατευθυντικότητας.

Στη χειρότερη περίπτωση με την κινητή μονάδα στα όρια της κυψέλης το C/I γίνεται:

$$\frac{C}{I} = \frac{R^4}{(D+0.7R)^4 + D^4} = \frac{1}{\left(\frac{D}{R} + 0.7\right)^4 + \left(\frac{D}{R}\right)^4} = \frac{1}{(q+0.7)^4 + q^4} \quad (1.3.22)$$

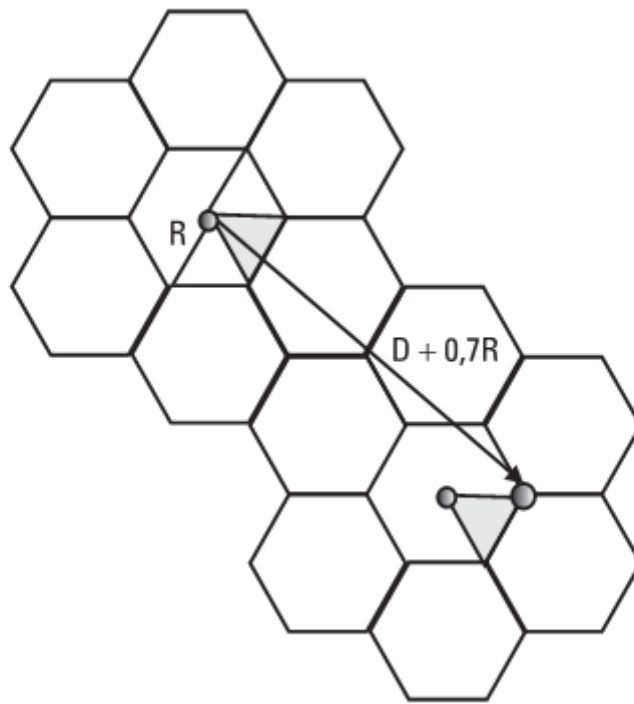


Σχήμα 8: Χειρότερη περίπτωση cluster 7 κυψελών με κεραιές κατευθυντικότητας  $120^\circ$

### Six-Sector case

Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται κατευθυντικές κεραιές των  $60^\circ$ . Στη χειρότερη περίπτωση, όπως φαίνεται στο σχήμα 9, το  $C/I$  γίνεται:

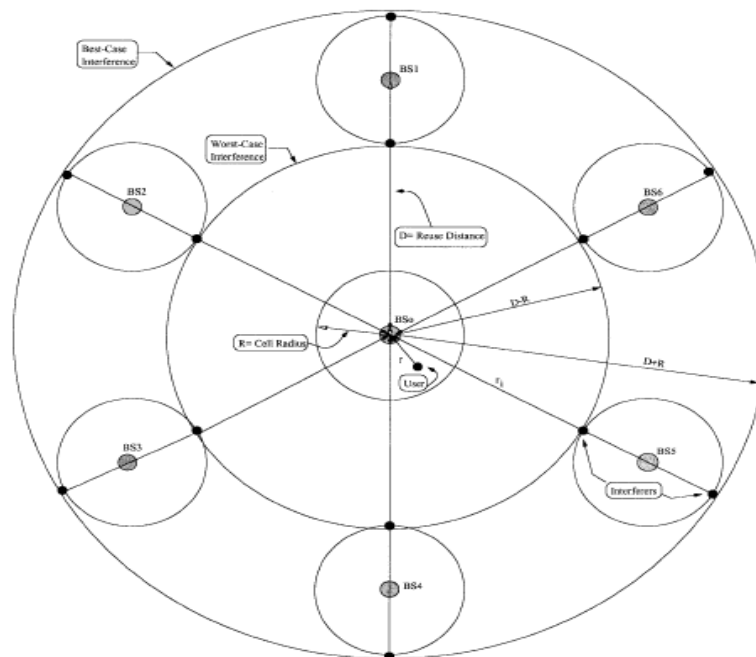
$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-4}}{(D + 0.7R)^{-4}} = \frac{1}{\left(\frac{D}{R} + 0.7\right)^{-4}} = \frac{1}{(q + 0.7)^{-4}} \quad (1.3.23)$$



Σχήμα 9: Χειρότερη περίπτωση cluster 7 κυψελών με κεραιές κατευθυντικότητας  $60^\circ$

## 1.4 Συμπέρασμα για Ομοδιαυλική Παρεμβολή

Όπως είδαμε παραπάνω, ένας από τους βασικότερους παράγοντες που επηρεάζει την ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας που παρέχει ένα κυψελωτό δίκτυο προς τους χρήστες του αποτελεί η επίδραση της παρεμβολής (interference). Στην περίπτωση που οι χρήστες βρίσκονται μέσα στα όρια της ίδιας κυψέλης όπου εφαρμόζεται για παράδειγμα τεχνική πολλαπλής πρόσβασης OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) δεν επηρεάζονται μεταξύ τους καθώς εκπέμπουν προς το σταθμό βάσης και αντίστοιχα λαμβάνουν από το σταθμό βάσης ορθογώνιες μεταξύ τους κυματομορφές. Η κύρια πηγή παρεμβολών είναι μεταξύ χρηστών που εκπέμπουν με τις ίδιες παραμέτρους συχνότητας και χρόνου και οι οποίοι βρίσκονται στις αντίστοιχες κυψέλες γειτονικών ομάδων (clusters) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 10: Ομοδιαυλική παρεμβολή μεταξύ ενός κεντρικού κελιού και 6 αντίστοιχων κελιών σε γειτονικά clusters.

Ο λόγος της απόστασης μεταξύ γειτονικών ομοδιαυλικών κυψελών  $D$ , προς την ακτίνα της κυψέλης  $R$ , καλείται λόγος ομοδιαυλικής επαναχρησιμοποίησης (co – channel reuse ratio) ή περίοδος επαναχρησιμοποίησης και εξαρτάται από τον αριθμό  $N$  κελιών ανά cluster.

Υπάρχει συνεπώς εξάρτηση του λόγου επαναχρησιμοποίησης καναλιών με τον αριθμό των κυψελών ανά cluster. Στην ανάπτυξη των δικτύων η επιλογή του αριθμού των κυψελών ανά cluster καθορίζεται τόσο από τις αναμενόμενες ομοδιαυλικές παρεμβολές όσο και από τη χωρητικότητα του συστήματος. Σε αντίθεση με το θερμικό θόρυβο που αντιμετωπίζεται με αύξηση του σηματοθορυβικού λόγου (αύξηση ωφέλιμου σήματος), η ομοδιαυλική παρεμβολή δεν καταπολεμάται με αύξηση της ισχύος του φέροντος στον πομπό, γιατί με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η παρεμβολή στις γειτονικές ομοδιαυλικές κυψέλες. Για την μείωση της ομοδιαυλικής παρεμβολής, οι ομοδιαυλικές κυψέλες πρέπει να απέχουν μία ελάχιστη απόσταση ώστε να παρέχεται ικανή απομόνωση που προσφέρεται λόγω των απωλειών διάδοσης.

Όσο το  $N$  αυξάνει, η σχετική απόσταση μεταξύ ομοδιαυλικών κυψελών αυξάνει και συνεπώς μειώνεται η πιθανότητα για ομοδιαυλική παρεμβολή. Εξαιτίας του γεγονότος αυτού ο λόγος  $D / R$  πολλές φορές καλείται και συντελεστής μείωσης ομοδιαυλικής παρεμβολής. Ο λόγος όμως  $D / R$  σχετίζεται και με την επιθυμητή χωρητικότητα κάθε κυψέλης και επομένως και όλου του συστήματος, λόγω της εξάρτησης από το  $N$ . Άρα προκύπτει ένα θέμα προσδιορισμού της ελάχιστης επιτρεπόμενης τιμής του λόγου  $D / R$ . Η μείωση του λόγου στη χαμηλότερη δυνατή τιμή εξυπηρετεί τους στόχους του χαμηλού κόστους και της μεγάλης χωρητικότητας. Η αύξηση όμως στη μέγιστη δυνατή τιμή εξυπηρετεί το στόχο της καλής ποιότητας μετάδοσης.

## 1.5 Μετρικές Ποιότητας Δικτύου

Με βάση την προϋπόθεση ότι τα λαμβανόμενα μεμονωμένα σήματα παρεμβολής επηρεάζονται από τη σκίαση και την απώλεια διάδοσης, η συνολική co-channel παρεμβολή διαμορφώνεται σαν άθροισμα των σημάτων παρεμβολής, των οποίων τα τοπικά μέσα επίπεδα ισχύος ακολουθούν τις λογαριθμικές κανονικές κατανομές.

Συνήθως υποτίθεται ότι η φάση λήψης που παρατηρείται σε κάθε μεμονωμένο σήμα παρεμβολής ποικίλει σημαντικά λόγω της διασποράς, έτσι ώστε να μπορούμε να υποθέσουμε ότι οι φάσεις είναι τυχαίες και έτσι τα σήματα αθροίζονται ασυνάρτητα (asynchronously), όταν υπολογίζονται σε μία τοπική θέση. Επομένως, η συνολική ομοδιαυλική (co-channel) παρεμβολή  $I$ , έχοντας υπόψη μία δεδομένη θέση δίνεται ως το άθροισμα λογαριθμικά κανονικών σημάτων. Έτσι:

$$I = \sum_{i=1}^k I_i \quad (1.5.1)$$

όπου  $I_i$  εκφράζεται σε μονάδες decibel. Γίνεται αποδεκτό ότι το άθροισμα των λογαριθμικά κανονικών τυχαίων μεταβλητών μπορεί να προσεγγιστεί με μία άλλη λογαριθμική κανονική κατανομή και διάφοροι μέθοδοι έχουν προταθεί για τον υπολογισμό της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης του συνισταμένου σήματος παρεμβολής. Οι δύο δημοφιλέστερες τεχνικές είναι η μέθοδος Wilkinson και η μέθοδος Schwartz και Yeh.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η μέθοδος Wilkinson για τον υπολογισμό της μέσης τιμής  $m_I$  και της τυπικής απόκλισης  $\sigma_I$  της συνολικής παρέμβασης  $I$  με βάση τις κατανομές των μεμονωμένων co-channel σημάτων παρέμβασης  $I_i$ , ή με άλλα λόγια, τα μέσα  $m_i$  και τις τυπικές αποκλίσεις  $\sigma_i$  του  $I_i$ .

Επίσης κατά τον υπολογισμό της συνολικής ομοδιαυλικής παρεμβολής  $I$  εξετάζεται η επίδραση του τεμαχισμού κυψελών η οποία μειώνει την co-channel παρεμβολή, αλλά εις βάρος μίας μείωσης της αποδοτικότητας ζεύξεων που, στη συνέχεια, μειώνει τη συνολική χωρητικότητα που υποστηρίζει η κυψέλη.

Σε κάθε τομέα του κελιού διατίθεται ένα υποσύνολο του συνόλου διαθέσιμων καναλιών. Από τη θεωρία, γνωρίζουμε ότι όταν χωρίζεται μια ομάδα των καναλιών σε υποσύνολα των καναλιών, η χωρητικότητα που φέρεται από τα υποσύνολα είναι πάντα χαμηλότερη από τη μέγιστη χωρητικότητα που φέρεται από ολόκληρη την ομάδα των καναλιών.

Μια από τις βασικές μετρικές απόδοσης του δικτύου είναι ο **μέσος λόγος σήματος-παρεμβολής (SIR, Signal-to-Interference Ratio)** ο οποίος δίνεται σε decibel από τη σχέση :

$$SIR_{mean} (dB) = m_s (dB) - m_i (dB) \quad (1.5.2)$$

όπου  $m_s$  είναι η μέση ισχύς του επιθυμητού σήματος και το  $m_i$  είναι η μέση ισχύς της συνολικής παρεμβολής (και οι δύο σε dB).

Τα  $m_s$  και  $m_i$  υπολογίζονται με βάση τη σχέση:

$$m_x = P_T + G_T(\theta_T, \phi_T) + G_R(\theta_R, \phi_R) - 10 \cdot K \cdot \gamma \cdot \log_{10} d (dBW) \quad (1.5.3)$$

όπου η τιμή της  $m_x$  διαμορφώνεται ως συνάρτηση της απόστασης  $d$  μεταξύ πομπού και δέκτη, του εκθέτη  $\gamma$  της απώλειας ελευθέρου χώρου, της εκπεμπόμενης ισχύος  $P_T$  σε dBW, και τα κέρδη  $G_T$  και  $G_R$  των κεραιών πομπού και δέκτη, αντίστοιχα.

Το SIR είναι τυχαία μεταβλητή η οποία εξαρτάται από τη χωρική κατανομή των κινητών χρηστών λόγω της ύπαρξης σκίασης.

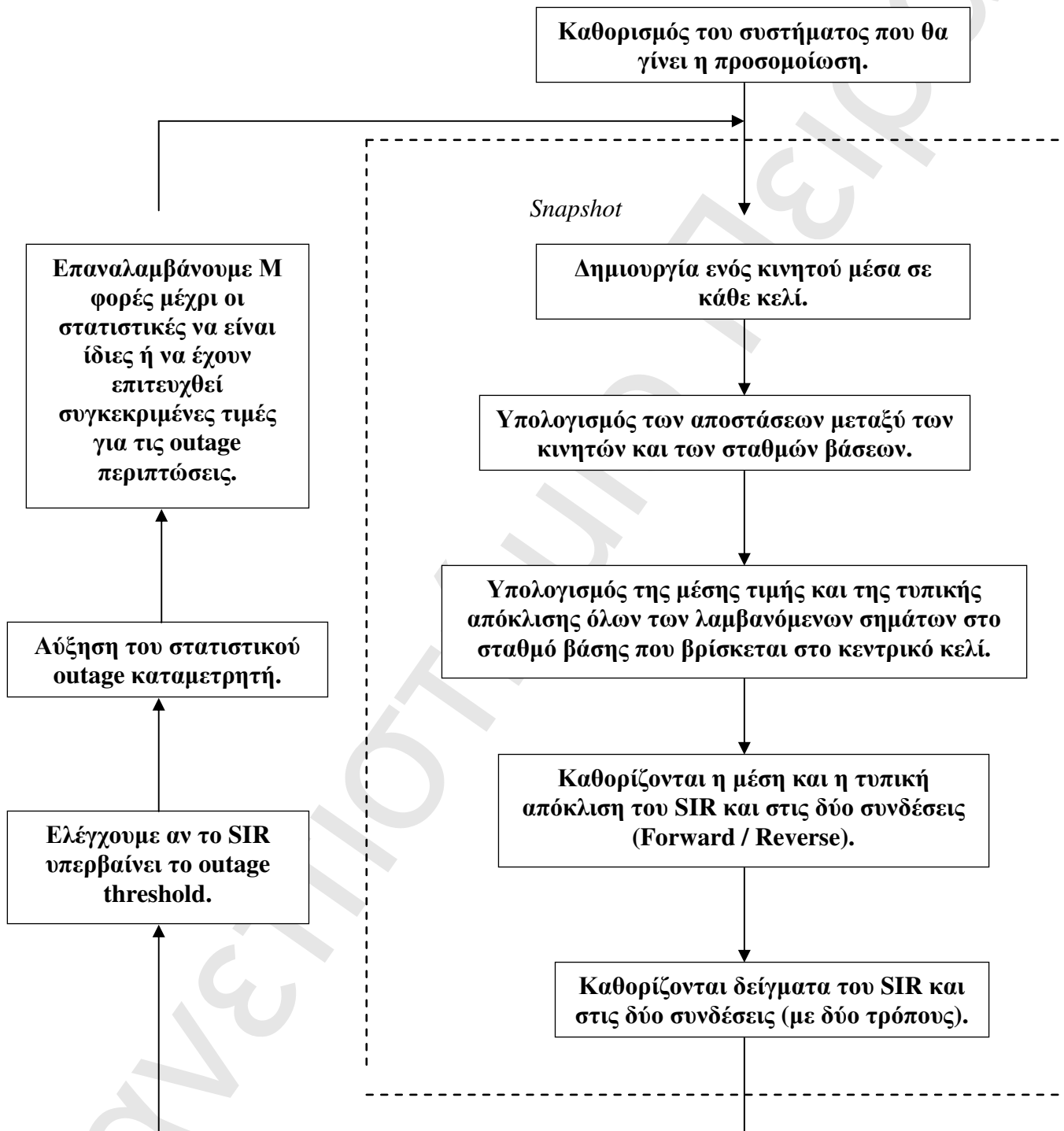


Η μετρική της επίδοσης του κυψελοειδούς συστήματος είναι η πιθανότητα μη διαθεσιμότητας (**outage probability**) η οποία καθορίζεται ως η **πιθανότητα ότι το SIR είναι κάτω από ένα κατώτατο αποδεκτό επίπεδο SIR<sub>0</sub>**.

Στην παρούσα εργασία προσομοιώνονται με τη μέθοδο Monte-Carlo κυψελωτά δίκτυα με διαφορετικές παραμέτρους και εξάγονται στατιστικά αποτελέσματα Outage Probability.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MONTE CARLO

Η μεθοδολογία προσομοίωσης Monte Carlo που εφαρμόστηκε ακολουθεί τα βήματα της μεθοδολογίας που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1: Αλγόριθμος για τον υπολογισμό του SIR και του outage σε ένα κυψελοειδές σύστημα χρησιμοποιώντας προσομοίωση Monte Carlo.

Στη συνέχεια δίνονται επεξηγηματικά σχόλια πάνω στον τελικό κώδικα MATLAB ο οποίος είναι διαρθρωμένος όπως περιγράφεται στον παρακάτω πίνακα :

Όνομα Αρχείου	Τύπος/Version Αρχείου	Περιγραφή Λειτουργίας
Cell_SIRPoutage.m	Script file v1.0	Probability of Outage in Cellular Wireless Network using Monte Carlo Simulation
Wilkinson.m	Function file v1.0	Calculation of total interference statistics

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης βασίζονται στην υπόθεση ομοιόμορφης κατανομής κινητών TS ανά μονάδα επιφάνειας του cell. Με βάση την παραπάνω παραδοχή οι πολικές συντεταγμένες των θέσεων των κινητών είναι τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν τις παρακάτω κατανομές:

- Η γωνία της θέσης του κάθε κινητού στο κελί  $\beta_i$  κατανέμεται ομοιόμορφα στο διάστημα  $[0, 2\pi]$
- Η απόσταση  $r$  ακολουθεί την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f_R(r_i) = 2 \cdot \frac{r_i}{R^2} \quad \text{για τιμές της απόστασης } r \text{ στο διάστημα } 0 \leq r_i \leq R$$

Για απλότητα, η κυψέλη υποτίθεται ότι έχει κυκλικό σχήμα στην προσομοίωση. Ο τομέας που χρησιμοποιείται σε ένα ειδικό στιγμιότυπο επιλέγεται τυχαία, με ίσες πιθανότητες επιλογής για οποιοδήποτε τομέα:

$120^\circ$  τεμαχισμός =>  $\Pr\{\text{τομέας } i \text{ που επιλέγεται}\} = 1/3, i = 1, 2, 3.$

$60^\circ$  τεμαχισμός =>  $\Pr\{\text{τομέας } i \text{ που επιλέγεται}\} = 1/6, i = 1, \dots, 6.$

Μόλις επιλεγεί ο τομέας, οι γωνίες  $\beta_i$  μπορούν να καθοριστούν, σημειώνοντας ότι η  $\beta_i$  κατανέμεται ομοιόμορφα στον επιλεγμένο τομέα :

$$120^\circ \text{ τεμαχισμός} \Rightarrow (2s - 3)\pi/3 < \beta_i < (2s - 1)\pi/3$$

$$60^\circ \text{ τεμαχισμός} \Rightarrow (s - 1)\pi/3 < \beta_i < s\pi/3.$$

όπου το  $s$  είναι ο τομέας που επιλέγεται ( $s = \{1, 2, 3\}$  για τον τεμαχισμό  $120^\circ$  και  $s = \{1, \dots, 6\}$  για τον τεμαχισμό  $60^\circ$ ).

### **2.1 ΒΗΜΑ 1ο: Καθορισμός του συστήματος προσομοίωσης**

Στο βήμα αυτό γίνεται αρχικοποίηση των παραμέτρων του συστήματος προς προσομοίωση. Ορισμένες παράμετροι παίρνουν προκαθορισμένες τιμές, ενώ άλλες δίνονται από το χρήστη (user input), ο οποίος έχει τη δυνατότητα επιλογής default τιμών πατώντας ENTER.

Οι παράμετροι με προκαθορισμένες τιμές είναι οι παρακάτω:

Όνομα Παραμέτρου	Τιμή	Περιγραφή
r_cell	1000	Ακτίνα κυψέλης σε μέτρα (m)
n_co_ch_users	6	Αριθμός ομοδιαυλικών παρεμβολέων (co-channel interferers)
P_BS	0	Ισχύς εκπομπής Σταθμού Βάσης BS (σε dBW)
P_MS	0	Ισχύς εκπομπής Κινητού MS (σε dBW)
corr_fwd	0	Συντελεστής συσχέτισης για τις συνδέσεις f από τον κεντρικό σταθμό βάσης BS προς το επιθυμητό κινητό
corr_rev	0	Συντελεστής συσχέτισης για τις συνδέσεις r από το επιθυμητό κινητό προς τον κεντρικό σταθμό βάσης BS
K	1	Σταθερά K της σχέσης (1.5.2)
in_beam=0;	0	Μέγιστο κέρδος τμηματοποιημένων κεραιών (σε dB)

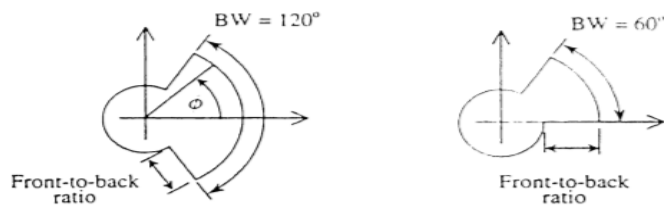
**Σημ:** Στον κώδικα MATLAB οι παράμετροι με προκαθορισμένες τιμές έχουν τη μορφή διανυσμάτων 3 στοιχείων, καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε τεμαχισμό κυψέλης (sectorization) σε τομείς εύρους 120ο, 60ο ή 360ο (μη τεμαχισμό) αντίστοιχα.

Οι παράμετροι που ελέγχονται από το χρήστη είναι οι παρακάτω :

Όνομα Παραμέτρου	Default Τιμή	Περιγραφή
M	10000	Αριθμός στιγμιοτύπων προσομοίωσης
N	7	Αριθμός κελιών ανά cluster
n_path	4	Εκθέτης $\gamma$ της απώλειας ελευθέρου χώρου
sigma_int	8	Τυπική απόκλιση σκίασης ομοδιαυλικού παρεμβολέα
sigma_S	8	Τυπική απόκλιση σκίασης επιθυμητού κινητού
Sec	3	Τεμαχισμός κελιού 1: 60 μοίρες 2: 120 μοίρες 3: πανκατευθυντικές κεραιές
Ftb	30	μπρος-πίσω εξασθένιση εκπομπής κεραιών (σε dB).

Οι τομεακές κεραιές στους σταθμούς βάσης έχουν μία μπρος-πίσω εξασθένιση (ftb) που ισούται με 30dB. Η τυπική απόκλιση σκίασης (sigma\_int και sigma\_S) τίθεται στα 8dB, και ο εκθέτης απώλειας διάδοσης (n\_path) υποτίθεται ότι είναι  $\gamma = 4$ .

Προκειμένου να επιτευχθούν στατιστικά έγκυρα αποτελέσματα, χρησιμοποιούμε 10.000 στιγμιότυπα (num\_snapshots) .

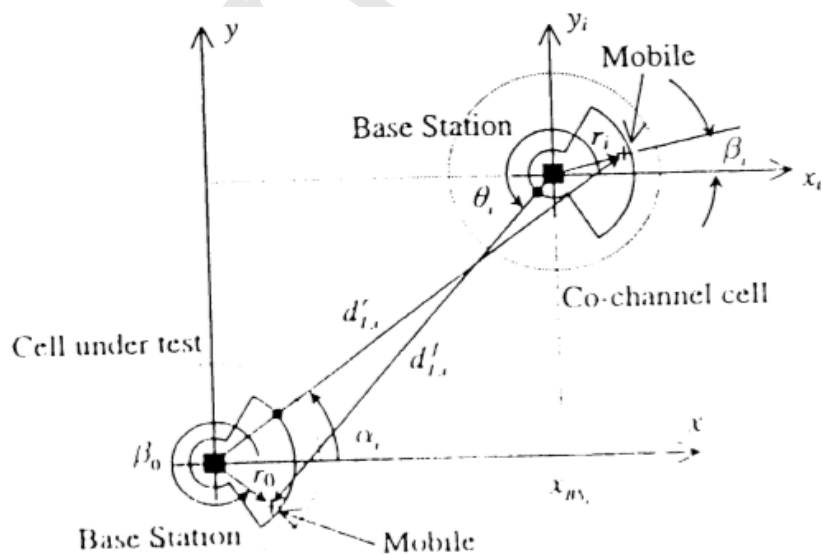


Σχήμα 2 : Μοντέλο για τμηματοποιημένες κεραίες 120 και 60 μοιρών.

Υπολογίζονται οι συντεταγμένες  $(x,y)$  των κέντρων των 6 (1st-tier) co-channel κελιών με βάση τις παραμέτρους  $N, D$  και  $\theta_N$  εφαρμόζοντας τη σχέση :

$$x_{BS}, \vec{x} + y_{BS}, \vec{y} = \sqrt{3 \cdot N} \cdot R \cdot \left[ \cos(\theta_N + (i-1) \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \vec{x} + \sin(\theta_N + (i-1) \cdot \frac{\pi}{6}) \cdot \vec{y} \right] \quad (2.1)$$

η οποία προκύπτει από εφαρμογή τριγωνομετρικών σχέσεων στη διάταξη του παρακάτω σχήματος:



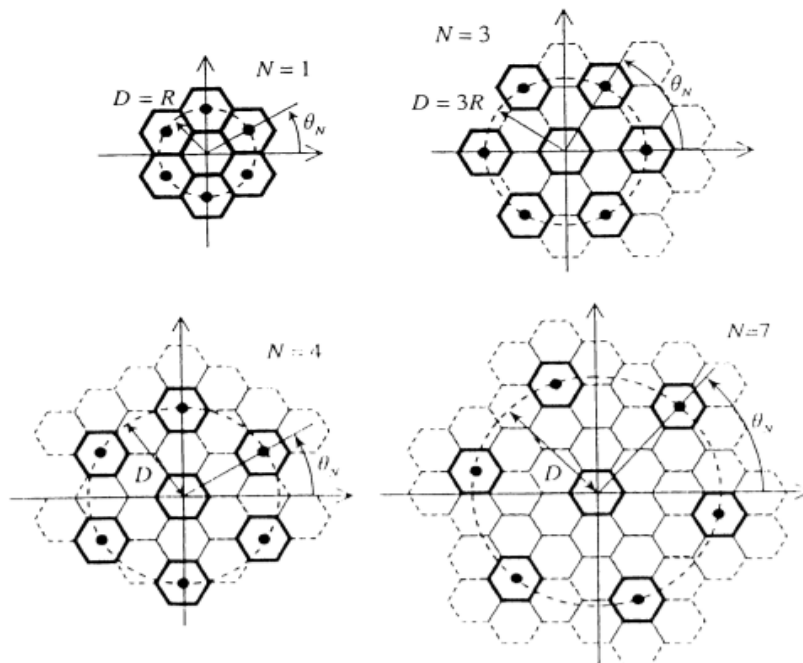
Σχήμα 3: Γεωμετρία θέσεων κινητού, σταθμών βάσης και ομοδιαυλικών παρεμβολών

Οι παραπάνω συντεταγμένες αποθηκεύονται στον πίνακα `bs_position` διαστάσεων 6x2 όπου η πρώτη στήλη αντιστοιχεί στη συντεταγμένη x και η δεύτερη στην y.

Η παράμετρος  $\theta_N$  καθορίζει τη γωνιακή θέση του πρώτου co-channel κελιού και δίνεται από τον παρακάτω πίνακα:

Cluster size N	D	$\theta_N$
1	R	$\pi / 6$
3	3R	0
4	$2\sqrt{3} R$	$\pi / 6$
7	$\sqrt{21} R$	$\arctan(1/2\sqrt{3})$

Οι υπολογισμοί του πίνακα γίνονται με βάση το παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5 : Τοποθεσία των co - channel κελιών για  $N = 1, N = 3, N = 4, N = 7$ .

## 2.2 ΒΗΜΑ 2ο: Τοποθέτηση N+1 Κινητών στις κυψέλες

Υπολογίζουμε τις πολικές συντεταγμένες ( $r_i$ ,  $\beta_i$ ) του επιθυμητού κινητού και των κινητών που μοιράζονται το ίδιο κανάλι (co-channel interferers) στα αντίστοιχα κελιά του cluster με βάση τις παρακάτω κατανομές:

- Η τυχαία μεταβλητή  $r_i$  που ισούται με την απόσταση μεταξύ του κινητού  $i$  και του κέντρου του αντίστοιχου κελιού έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) :

$$f_{R_i}(r_i) = 2 \cdot \frac{r_i}{R^2} \quad \text{τιμές του } r \text{ στο διάστημα } 0 \leq r_i \leq R \quad (2.2)$$

- Η τυχαία μεταβλητή  $\beta_i$  που ισούται με τη γωνία που σχηματίζει η θέση του κινητού  $i$  και του άξονα παράλληλου με τον άξονα  $x$  που διέρχεται από το κέντρο του αντίστοιχου κελιού ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή εντός των ορίων του εύρους του τομέα που κελιού ο οποίος αντιστοιχεί στη συχνότητα που εκπέμπει το επιθυμητό κινητό.

Οι αντίστοιχοι υπολογισμοί στον κώδικα MATLAB είναι:

```
des_user_beta=rand(1)*phi_BW(sec)+phi_center(sector,sec);
```

```
co_ch_user_beta=rand(6,1)*phi_BW(sec)+phi_center(sector,sec);
```



### 2.3 ΒΗΜΑ 3ο: Προσδιορισμός των αποστάσεων μεταξύ των κινητών και των σταθμών βάσης

Υπολογίζουμε τις καρτεσιανές συντεταγμένες (x,y) θέσεων των N+1 κινητών με βάση τις οποίες μπορούμε να υπολογίσουμε τις αποστάσεις  $d^f$  και  $d^r$  μεταξύ κινητών και BS στα κέντρα των κυψελών για τις συνδέσεις f (forward ή downlink) δηλαδή από τον κεντρικό BS προς το επιθυμητό κινητό σε συχνότητα  $f^f$  και r(reverse ή uplink) δηλαδή από το επιθυμητό κινητό προς τον κεντρικό BS σε συχνότητα  $f^r$  αντίστοιχα.

Οι αποστάσεις  $d^f$  και  $d^r$  υπολογίζονται με βάση τις διανυσματικές σχέσεις:

$$(d^r)_{I,i} (\cos \alpha_i \cdot \vec{x} + \sin \alpha_i \cdot \vec{y}) = r_i \cdot (\cos \beta_i \cdot \vec{x} + \sin \beta_i \cdot \vec{y}) + (x_{BS}, \vec{x} + y_{BS}, \vec{y}) \quad (2.3)$$

$$(d^f)_{I,i} (\cos \theta_i \cdot \vec{x} + \sin \theta_i \cdot \vec{y}) = r_0 \cdot (\cos \beta_0 \cdot \vec{x} + \sin \beta_0 \cdot \vec{y}) - (x_{BS}, \vec{x} + y_{BS}, \vec{y}) \quad (2.4)$$

Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί ότι η σύνδεση f δέχεται παρεμβολές από τους co-channel σταθμούς βάσης στη συχνότητα  $f^f$  ενώ η σύνδεση r δέχεται παρεμβολές από τα co-channel κινητά στη συχνότητα  $f^r$ .

Οι αντίστοιχοι υπολογισμοί στον κώδικα MATLAB είναι:

```
des_user_position=des_user_r*[cos(des_user_beta) sin(des_user_beta)];  
co_ch_user_position=  
[co_ch_user_r.*cos(co_ch_user_beta)  
co_ch_user_r.*sin(co_ch_user_beta)]+bs_position;
```

## **2.4 ΒΗΜΑ 4ο: Προσδιορισμός στατιστικής των σημάτων**

Υπολογίζουμε τις μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις του επιθυμητού σήματος και του αθροίσματος των co-channel σημάτων στην forward και reverse σύνδεση εφαρμόζοντας τη μέθοδο Wilkinson η οποία μας δίνεται έτοιμη από τη συνάρτηση MATLAB wilkinson.m

## **2.5 ΒΗΜΑ 5ο: Προσδιορισμός στατιστικής του SIR και στις δύο συνδέσεις**

Υπολογίζουμε τα στατιστικά του SIR με δύο μεθόδους A και B:

- Με τη μέθοδο A παράγουμε δείγματα του SIR χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση normrnd() η οποία παράγει τιμές Gaussian τυχαίας μεταβλητής με παραμέτρους τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της κατανομής. Ο υπολογισμός της συνολικής co-channel παρεμβολής στηρίζεται στην υπόθεση ότι αυτή ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή με:

$$m_{SIR}^f = m_S^f - m_I^f \quad (2.5)$$

$$\sigma_{SIR}^f = \sqrt{(\sigma_S^f)^2 + (\sigma_I^f)^2} \quad (2.6)$$

Οι αντίστοιχοι υπολογισμοί στον κώδικα MATLAB είναι:

```
SIR_fwd_2(i)=normrnd(m_SIR_fwd(i),sigma_SIR_fwd(i));
```

```
SIR_rev_2(i)=normrnd(m_SIR_rev(i),sigma_SIR_rev(i));
```

- Με τη μέθοδο B παράγουμε δείγματα του SIR χωρίς να κάνουμε καμία υπόθεση σχετικά με την κατανομή της συνολικής co-channel παρεμβολής. Στην περίπτωση αυτή υπολογίζουμε τη συνολική παρεμβολή αθροίζοντας τα δείγματα των μεμονωμένων σημάτων παρεμβολής:

$$SIR_{2B}^f = S^f - I^f \quad (2.7)$$

$$SIR_{2B}^r = S^r - I^r \quad (2.8)$$

Οι αντίστοιχοι υπολογισμοί στον κώδικα MATLAB είναι:

```
des_sig_spl_fwd=normrnd(m_S_fwd, sigma_S);
int_sig_spl_fwd=normrnd(m_I_fwd, sigma_I_fwd);
tot_int_sig_spl_fwd=10*log10(sum(10.^(int_sig_spl_fwd/10)));
SIR_spl_fwd_2B(i)=des_sig_spl_fwd-tot_int_sig_spl_fwd;
des_sig_spl_rev=normrnd(m_S_rev, sigma_S);
int_sig_spl_rev=normrnd(m_I_rev, sigma_I_rev);
tot_int_sig_spl_rev=10*log10(sum(10.^(int_sig_spl_rev/10)));
SIR_spl_rev_2B(i)=des_sig_spl_rev-tot_int_sig_spl_rev;
```

## **2.6 ΒΗΜΑ 6ο: Υπολογισμός πιθανότητας διακοπής λειτουργίας (Outage Probability)**

Υπολογίζουμε τη μέση πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του κυψελοειδούς συστήματος, στο κινητό και στον σταθμό βάσεως, για διάφορες τιμές παραμέτρων και τμηματοποίησης κελιών. Η μέση πιθανότητα διακοπής της λειτουργίας του κυψελοειδούς συστήματος  $P_{\text{outage}}(\text{SIR0})$ , υπολογίζεται στη συνέχεια με τον μέσο όρο των δειγμάτων των πιθανοτήτων διακοπής λειτουργίας  $P_{\text{outage}}(\text{SIR0})$ , υπολογισμένα για κάθε στιγμιότυπο.

Το βασικό MATLAB script Cell\_SIRPoutage.m καταλήγει στο γράφημα της πιθανότητας Poutage ως προς την τιμή κατωφλίου S<sub>IR0</sub> για τις συνδέσεις f και r αντίστοιχα με τιμές παραμέτρων που καθορίζονται από το χρήστη.

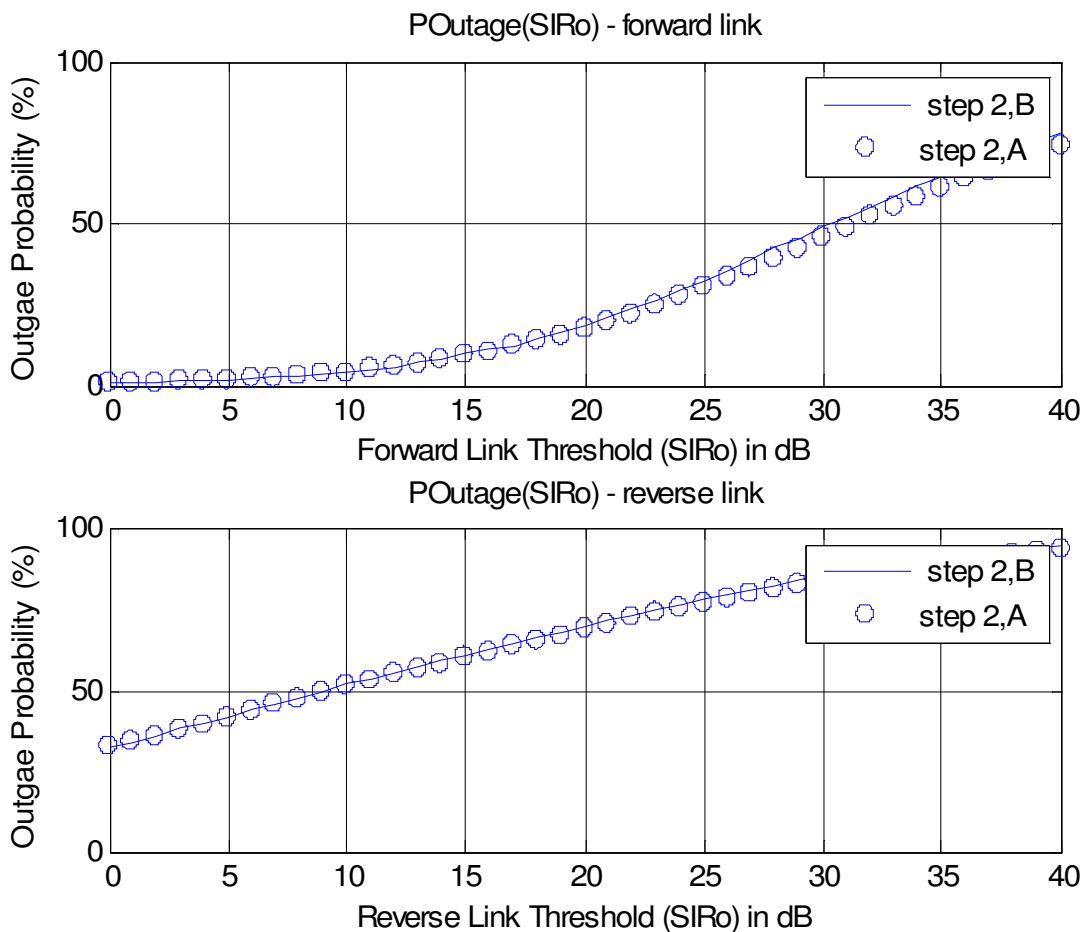
Διαμορφώνοντας τον κώδικα MATLAB με μορφή function και παραμέτρους τον αριθμό κελιών στο cluster(N) και τον εκθέτη απώλειας ελευθέρου χώρου ( $\gamma$ ) παρουσιάζονται συγκριτικά γραφήματα και εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την επίδοση του δικτύου όπως περιγράφεται αναλυτικότερα στην επόμενη παράγραφο.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

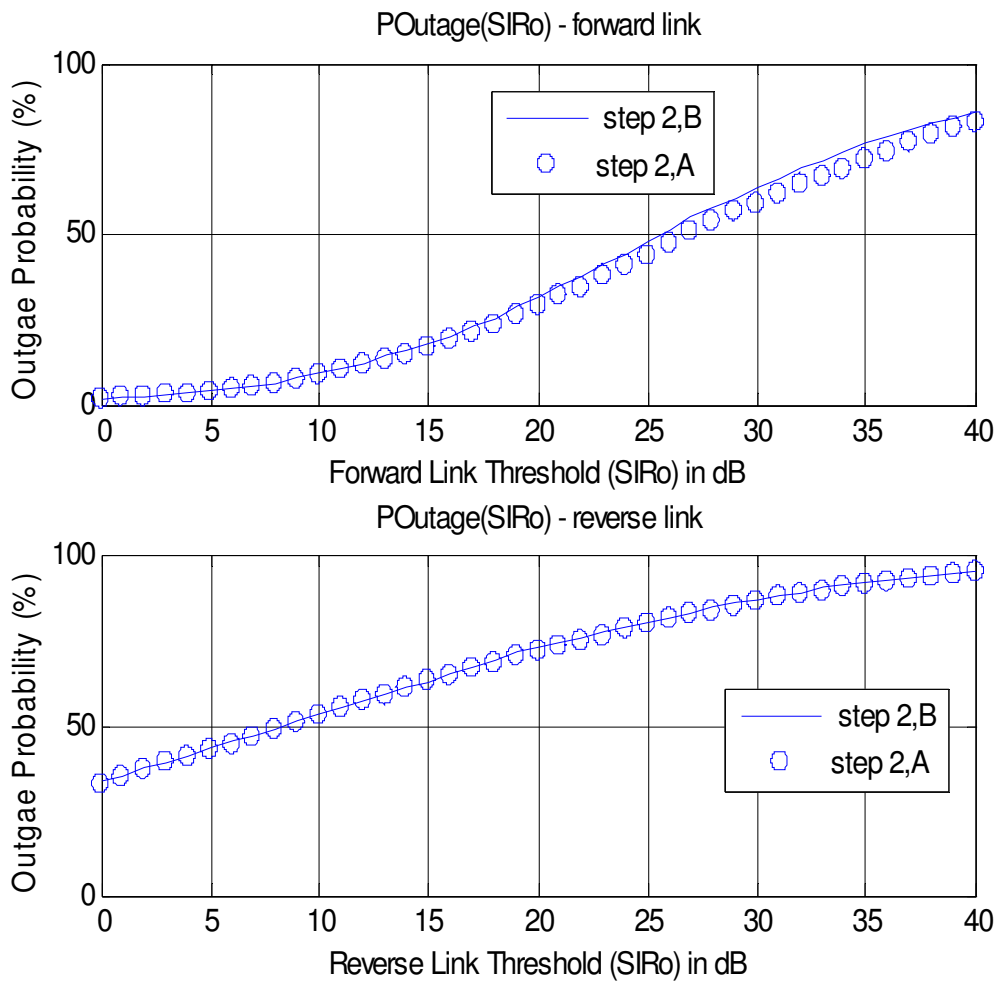
#### 3.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ για τιμές $\gamma=4$

Υπολογίζουμε την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για τη σύνδεση f και τη σύνδεση r με τις δύο μεθόδους του βήματος 5 και παράγουμε τα παρακάτω γραφικά αποτελέσματα για τιμή εκθέτη απώλειας ελευθέρου χώρου  $\gamma=4$ .

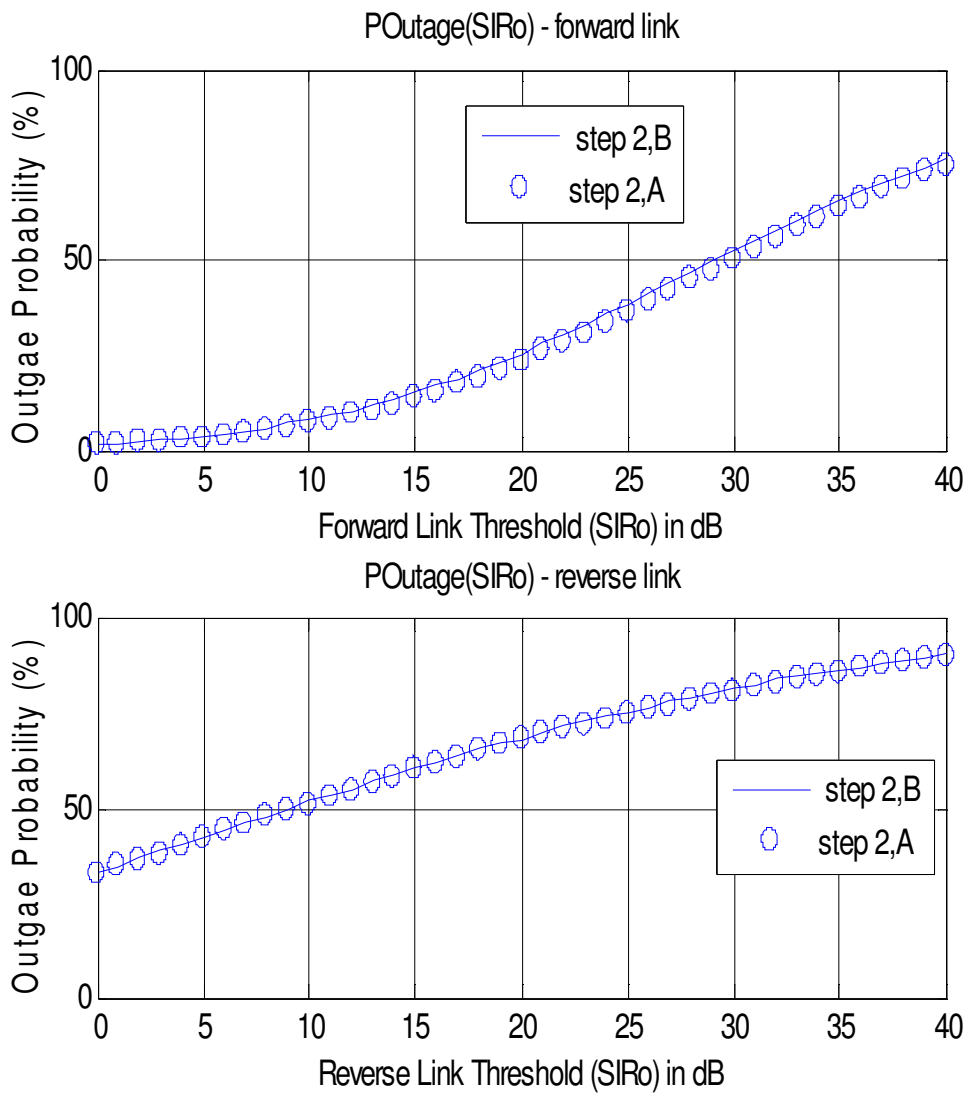
- Μέγεθος συστάδων  $N = 7$  και τεμαχισμός  $120^\circ$  (default τιμές)



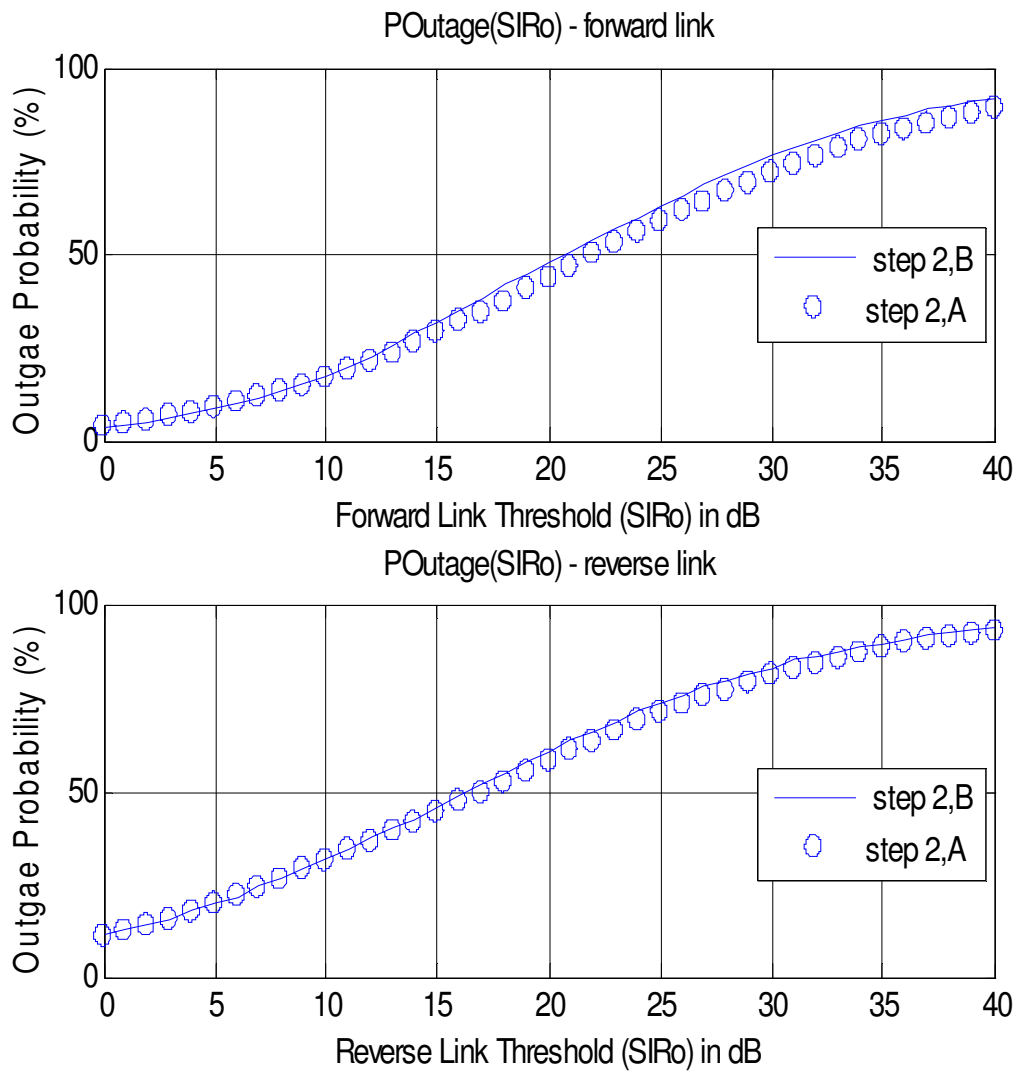
- Μέγεθος συστάδων  $N = 7$  και πανκατευθυντικές κεραιές σταθμών βάσεων.



- Μέγεθος συστάδων  $N = 7$  και τεμαχισμός  $60^\circ$ .

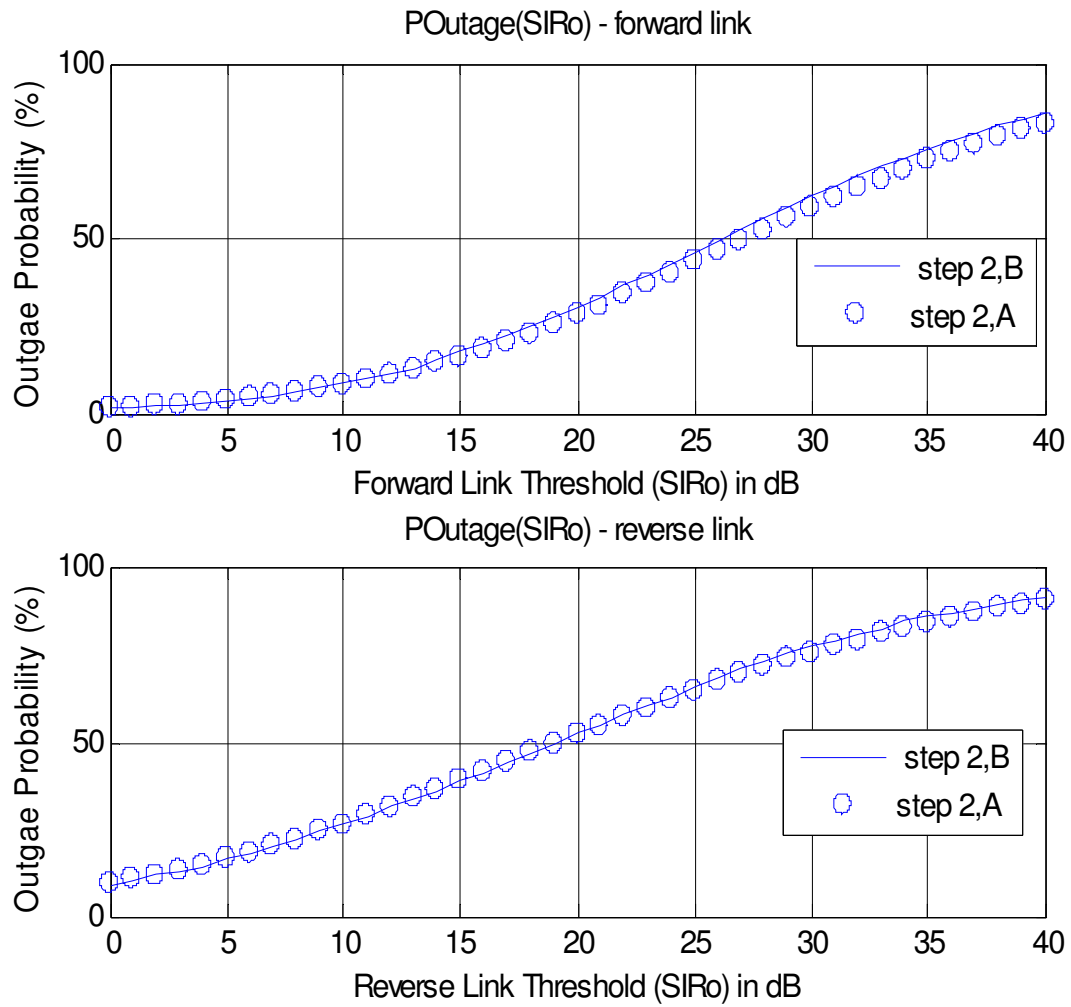


- Μέγεθος συστάδων  $N = 4$  και πανκατευθυντικές κεραιές σταθμών βάσεων.

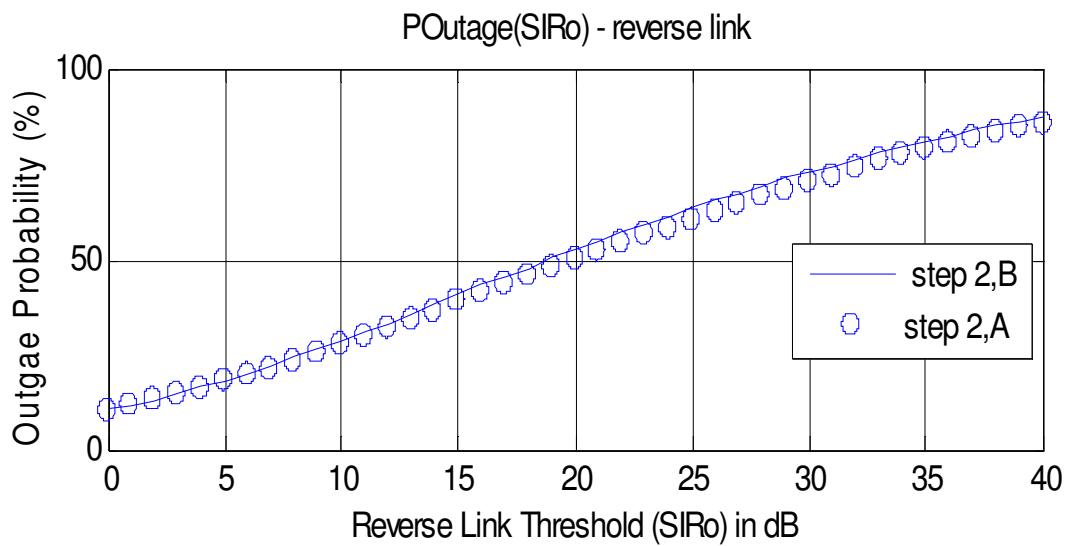
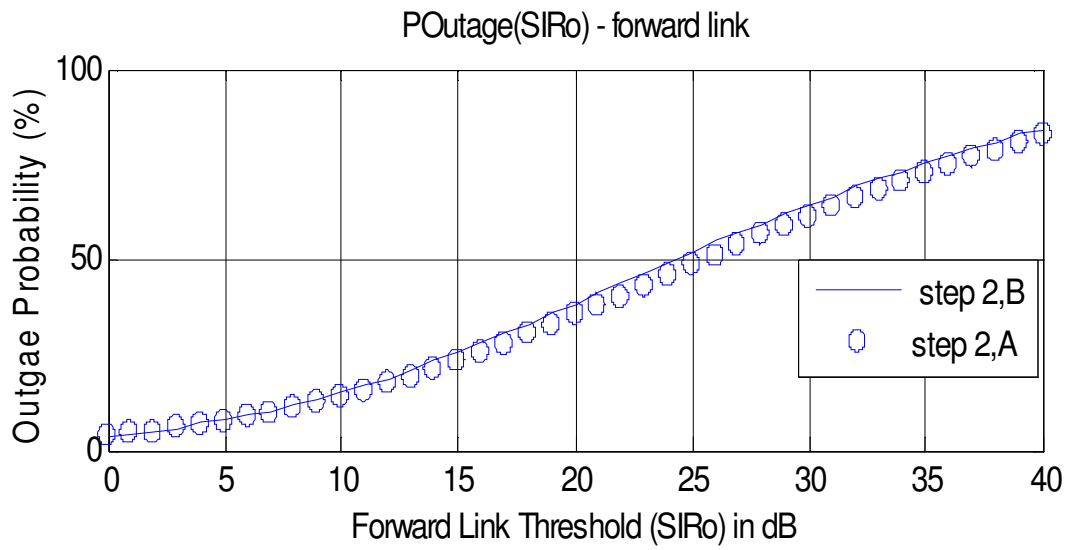




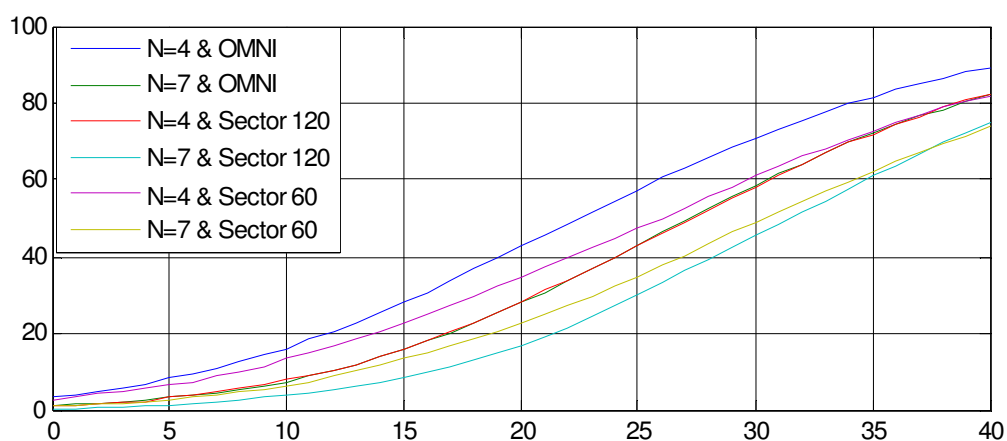
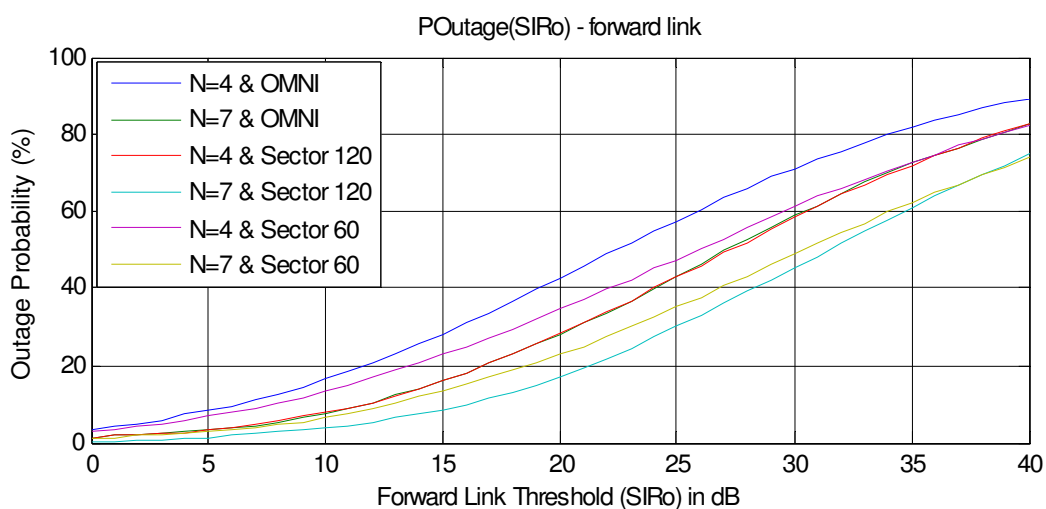
- *Μέγεθος συστάδων  $N=4$  και τεμαχισμός  $120^\circ$ .*



- Μέγεθος συστάδων  $N = 4$  και τεμαχισμός  $60^\circ$ .



Η απόδοση και των έξι παραπάνω περιπτώσεων συγκρίνεται εκτελώντας το MATLAB script compresults1.m. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι καμπύλες Outage Probability της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας για κάθε διαμόρφωση, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο A:



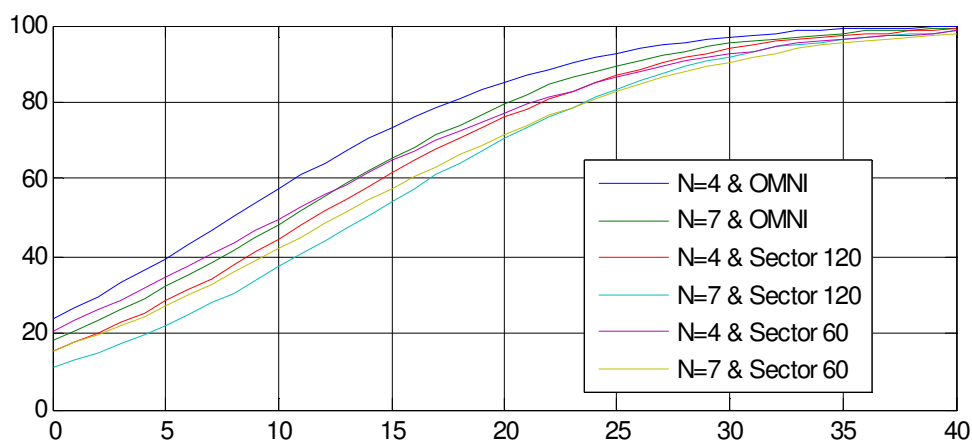
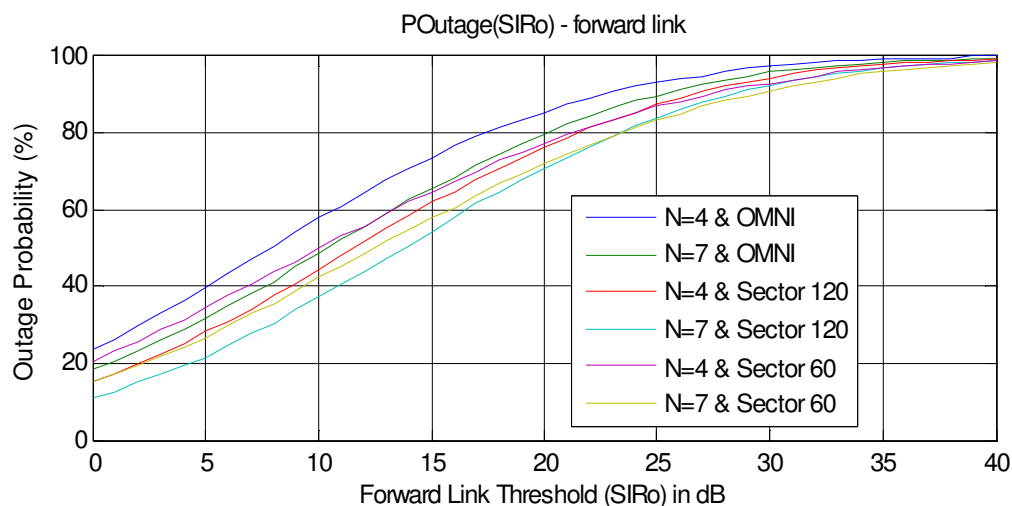
Παρατηρούμε ότι η βέλτιστη (μικρότερη) πιθανότητα διακοπής αντιστοιχεί στη διαμόρφωση  $N=7$  και τεμαχισμό  $120^\circ$  ενώ η αμέσως καλύτερη αντιστοιχεί στη διαμόρφωση  $N=7$  και τεμαχισμό  $60^\circ$ .

Άρα ο τεμαχισμός βελτιώνει την απόδοση ενός κυψελοειδούς συστήματος, δηλαδή μειώνει την πιθανότητα ότι το SIR θα πέσει κάτω από ένα δεδομένο κατώτατο όριο.

Η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για  $SIR_0 = 18\text{dB}$  (που είναι το κατώτατο όριο που χρησιμοποιείται συνήθως σε AMPS) στην καλύτερη περίπτωση ( $N=7$  και τεμαχισμό  $120^\circ$ ) είναι στην περιοχή του 15%, ενώ στη χειρότερη περίπτωση ( $N=7$  χωρίς τεμαχισμό) είναι στην περιοχή του 38%.

### 3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ για τιμές $\gamma=2$

Επαναλαμβάνουμε τα προηγούμενα βήματα για τιμή εκθέτη απωλειών  $\gamma=2$ . Η απόδοση των έξι παραπάνω περιπτώσεων συγκρίνεται εκτελώντας το MATLAB script compresults2.m και παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:



Τα αποτελέσματα στην περίπτωση αυτή είναι αντίστοιχα με εκείνα για  $\gamma=4$ .

Παρατηρούμε επιπρόσθετα ότι για τιμές SIR0 μεγαλύτερες των 35dB η πιθανότητα διακοπής προσεγγίζει το 100% σε όλες τις περιπτώσεις ενώ για  $\gamma=4$  είναι μικρότερη.

Επίσης παρατηρούμε ότι για  $SIR0 = 18\text{dB}$  η πιθανότητα διακοπής κυμαίνεται μεταξύ 65% και 85% άρα η επίδοση του δικτύου είναι αρκετά καλύτερη σε σχέση με την περίπτωση  $\gamma=4$ .

## 4. Παράρτημα: MATLAB script files

### 4.1 Script File Cell\_SIRPoutage.m

```
%-----  
% File:      Cell_SIRPoutage.m  
% Version:   Revision: 1.0  
% Date:      17/1/11  
% Desc:      Probabibility of Outage in Cellular Wireless Network  
%            using Monte-Carlo Simulation  
%-----  
-  
% Section:   Change Log  
%-----  
-  
% Revision 1.x  Date  
% Summary:  
%  
%  
clear all;  
close all  
  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%  
% STEP 1: System Parameters  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%  
  
%pre-defined simulation parameters  
r_cell=1000;           %cell radius in meters  
n_co_ch_users=6;      %number of co-channel users  
P_BS=0;               %BS transmitter power in dBW  
P_MS=0;               %MS transmitter power in dBW  
corr_fwd=0.0;         %correlation coefficient-forward link  
corr_rev=0.0;         %correlation coefficient-reverse link  
K=1;                  %constant in the link equation  
in_beam=0;           %maximum gain of sectorized antennas  
  
%limits (angles) of sectors for 120, 60 and 360 degree sectorization  
sector_min=zeros(6,3); % initialize all lower  
angular limits to 0  
sector_max=zeros(6,3); % initialize all upper  
angular limits to 0  
sector_min(:,1)=pi/3*[-3:2]'; % 6x lower angular limits for  
120-degree sectorization  
sector_min([1:3],2)=pi/3*[-3 -1 1]'; % 3x lower angular limits for  
60-degree sectorization  
sector_min(1,3)=-pi; % 1x lower angular limit for  
360-degree sectorization  
sector_max(:,1)=sector_min(:,1)+pi/3; % 6x upper angular limits for  
120-degree sectorization  
sector_max([1:3],2)=sector_min([1:3],2)+2*pi/3; % 3x upper angular  
limits for 60-degree sectorization  
sector_max(1,3)=pi; % 1x upper angular limits for  
360-degree sectorization  
  
%center of sectors for 120, 60 and 360 degree sectorization
```

```

phi_center=zeros(6,3);           % initialize all center
values to 0 degrees
phi_center(:,1)=(pi/3)*[-3:2]';   % 6x center angular values
for 120-degree sectorization
phi_center([1:3],2)=(pi/3)*[-3 -1 1]'; % 3x center angular values
for 60-degree sectorization

%beamwidth of each sector
phi_BW=[1 2 6]*pi/3;           % beamwidth values 60, 120
and 360 degrees

%number of sectors
num_sectors=[6 3 1];           % number of sectors: 6, 3 and
1 respectively

% Interactive user inputs
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 1.number of snapshots
input1 = input('Enter Number of snapshots M [10000]: ', 's');
if isempty(input1)
    num_snapshots = 10000;
else num_snapshots=str2num(input1);
end

% 2.cluster size
input2 = input('Enter Cluster Size N [7]: ', 's');
if isempty(input2)
    cluster_size = 7;
else cluster_size=str2num(input2);
end

% 3.path loss exponent
input3 = input('Enter value of path loss exponent g [4]: ', 's');
if isempty(input3)
    n_path = 4;
else n_path=str2num(input3);
end

% 4.shadowing std deviation-interferer(dB)
input4 = input('Enter value of shadowing std deviation-interferer(dB)
[8]: ', 's');
if isempty(input4)
    sigma_int=8;
else sigma_int=str2num(input4);
end

% 5.shadowing std deviation-desired signal(dB)
input5 = input('Enter value of shadowing std deviation-desired
signal(dB) [8]: ', 's');
if isempty(input5)
    sigma_S=8;
else sigma_S=str2num(input5);
end

% 6.sectorization(1=>60degree,2=>120degree,3=>omni)
disp(' Sectorization options: 1=>60degree, 2=>120degree, 3=>omni ')
input6 = input('Choose Sectorization option [2]: ', 's');
if isempty(input6)
    sec=2;
else sec=str2num(input6);
end

```



```

% 7.front-to-back ratio of the BS antennas(dB)
input7 = input('Enter value of front-to-back ratio of BS antennas(dB)
[30]: ', 's');
if isempty(input7)
    ftb=30;
else ftb=str2num(input7);
end

% Difference of antenna transmission power in dB between front and
rear
out_beam=in_beam-ftb;

% Co-Channel Cell locations

%location of base station (center cell is located at x=0,y=0)
%location (angular) of the center cell of each cluster in the first
tier
% according to table in reference notes
theta_N=[pi/6 0 pi/6 asin(1/(2*sqrt(3)))];

%angular distance between the center cells of all 6 clusters in first
tier.
theta=pi/3*[0:5]'; % separation of 360 degree space in
60 degree sectors
aux_1=[1 0 2 3 0 0 4]; % mark sepation points for N=1,3,4
and 7
ind=aux_1(cluster_size); % auxiliary pointer to angular
distance per value of N

%location [x.y] of the co-channel cell per 1st-tier cluster
% according to Eq. (6.2.2) in reference notes
bs_position=sqrt(3*cluster_size)*r_cell*[cos(theta+theta_N(ind))
sin(theta+theta_N(ind))];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% STEP 2: Placement of Mobile Terminals in Cells
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
for i=1:num_snapshots

    %determination of the sector to simulated in this snapshot.
    %
    % Select (randomly) a sector from 1 to num_sectors
    sector=unidrnd(num_sectors(sec));
    %
    % place the desired mobile within the selected sector
    des_user_beta=rand(1)*phi_BW(sec)+phi_center(sector,sec); % desired
user angular position
    des_user_r=sqrt(rand(1).*(r_cell^2)); % desired
user radial position
    %
    % place co-channel mobiles within the selected sector of 1st-tier
% co-channel cells
    co_ch_user_beta=rand(6,1)*phi_BW(sec)+phi_center(sector,sec); %
interferer angular position
    co_ch_user_r=sqrt(rand(6,1))*(r_cell); %
interferer radial position

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% STEP 3: Calculation of distances between Mobile Terminals and
% Central Cell BS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% x,y coordinates of desired user
des_user_position=des_user_r*[cos(des_user_beta) sin(des_user_beta)];
% x,y coordinates of interferer
co_ch_user_position=bs_position+ [co_ch_user_r.*cos(co_ch_user_beta)
co_ch_user_r.*sin(co_ch_user_beta)];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% STEP 4: Calculation of signal statistics
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Power received by DESIRED USER from central BS (forward link)
% according to eq.(6.2.6) in reference notes
m_S_fwd=P_BS - 10*K*n_path*log10(des_user_r);

% CO-CHANNEL USERS
%Location of desired mobile with respect to co-channel cells
% calculation of desired user position in complex form x+jy in cell
aux_01=((des_user_position(1) - bs_position(:,1))+sqrt(-
1)*(des_user_position(2) - bs_position(:,2)));
% calculation of desired user angular position in cell
beta_fwd=angle(aux_01);
% calculation of desired user radial position in cell
d_I_fwd=abs(aux_01);

%Computation of antenna gain at co-channel cells
clear gain_fwd
for k = 1:n_co_ch_users
    if
(beta_fwd(k)>=sector_min(sector,sec)) & (beta_fwd(k)<sector_max(sector,
sec))
        gain_fwd(k)=in_beam;    % forward antenna gain
    else
        gain_fwd(k)=out_beam;   % rear antenna gain
    end
end

%Calculation of mean power value per co-channel interferer
% in forward link according to eq.(6.2.11) in reference notes
m_I_fwd=P_BS - 10*K*n_path*log10(d_I_fwd)+gain_fwd. ';

%Calculation of standard deviation per co-channel interferer
% in forward link using the Wilkinson metod
sigma_I_fwd=sigma_int*ones(length(m_I_fwd),1);
[m_I_total_fwd, sigma_I_total_fwd]=wilkinson(m_I_fwd, sigma_I_fwd,
corr_fwd);

% Power received by central BS from DESIRED USER (reverse link)
% according to eq.(6.2.7) in reference notes

```

```

m_S_rev=P_MS - 10*K*n_path*log10(des_user_r);
%
% CO - CHANNEL USERS
% Vector of positions of co-channel interferers with respect to
central BS
% in complex form x+jy
aux_02=((co_ch_user_position(1) - bs_position(:,1))+sqrt(-
1)*(co_ch_user_position(2) - bs_position(:,2)));
% Vector of co-channel interfeferers angular positions
beta_rev=angle(aux_02);
% Vector of co-channel interfeferers radial positions
d_I_rev=abs(aux_02);

% Computation of antenna gain at center cell
clear gain_rev
for k = 1:n_co_ch_users
    if
(beta_rev(k)>=sector_min(sector,sec)) & (beta_rev(k)<sector_max(sector,
sec))
        gain_rev(k)=in_beam; % forward antenna gain
    else
        gain_rev(k)=out_beam; % rear antenna gain
    end
end

%Calculation of mean power value per co-channel interferer
% in reverse link according to eq.(6.2.12) in reference notes
m_I_rev=P_MS - 10*K*n_path*log10(d_I_rev)+gain_rev.';

%Calculation of standard deviation per co-channel interferer
% in reverse link using the Wilkinson metod
sigma_I_rev=sigma_int*ones(length(m_I_rev),1);
[m_I_total_rev,
sigma_I_total_rev]=wilkinson(m_I_rev,sigma_I_rev,corr_rev);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% STEP 5: Calculation of SIR statistics in f and r directions
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% STEP 5 Method A
m_SIR_fwd(i) = m_S_fwd - m_I_total_fwd;
sigma_SIR_fwd(i) = sqrt(sigma_S^2 + sigma_I_total_fwd^2 -
2*corr_fwd*sigma_S*sigma_I_total_fwd);

m_SIR_rev(i) = m_S_rev - m_I_total_rev;
sigma_SIR_rev(i) = sqrt(sigma_S^2 + sigma_I_total_rev^2 -
2*corr_rev*sigma_S*sigma_I_total_rev);

SIR_fwd_2(i)=normrnd(m_SIR_fwd(i),sigma_SIR_fwd(i));
SIR_rev_2(i)=normrnd(m_SIR_rev(i),sigma_SIR_rev(i));

% STEP 5 Method B
des_sig_spl_fwd=normrnd(m_S_fwd,sigma_S);
int_sig_spl_fwd=normrnd(m_I_fwd,sigma_I_fwd);
tot_int_sig_spl_fwd=10*log10(sum(10.^(int_sig_spl_fwd/10)));
SIR_spl_fwd_2B(i)=des_sig_spl_fwd-tot_int_sig_spl_fwd;

des_sig_spl_rev=normrnd(m_S_rev,sigma_S);

```

```

int_sig_spl_rev=normrnd(m_I_rev, sigma_I_rev);
tot_int_sig_spl_rev=10*log10(sum(10.^(int_sig_spl_rev/10)));
SIR_spl_rev_2B(i)=des_sig_spl_rev-tot_int_sig_spl_rev;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% STEP 6: Calculation of Outage Probability and Presentation of
Simulation Results
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

% Calculation of Poutage for various SIR thresholds using methods A
and B
threshold = 0:1:40;
L=length(threshold);

method_2A= zeros(L,2);           % Poutage result using method A
method_2B= method_2A;          % Poutage result using method B

for j=1:L
    thres=threshold(j);         % Threshold value
    tmpA=[0 0];                 % Counter of outage instances using
method A
    tmpB=[0 0];                 % Counter of outage instances using
method B
    for i=1:num_snapshots
        % Count outage instances for Method A - forward link
        if SIR_fwd_2(i) <= thres
            tmpA(1)=tmpA(1)+1;
        end

        % Count outage instances for Method B - forward link
        if SIR_spl_fwd_2B(i) <= thres
            tmpB(1)=tmpB(1)+1;
        end

        % Count outage instances for Method A - reverse link
        if SIR_rev_2(i) <= thres
            tmpA(2)=tmpA(2)+1;
        end

        % Count outage instances for Method B - rreverse link
        if SIR_spl_rev_2B(i) <= thres
            tmpB(2)=tmpB(2)+1;
        end
    end
    method_2A(j,:)=tmpA;
    method_2B(j,:)=tmpB;
end

% Plot Simulation Results

% a. Forward link
subplot(2,1,1)
plot(threshold, method_2B(:,1)*100/num_snapshots, '-');
hold on
plot(threshold, method_2A(:,1)*100/num_snapshots, 'o');
axis([0 40 0 100]);
title(' POutage(SIRo) - forward link')

```

```

xlabel('Forward Link Threshold (SIRo) in dB')
ylabel('Outgae Probability (%)')
legend(' step 2,B','step 2,A')
grid

% b. Reverse link
subplot(2,1,2)
plot(threshold, method_2B(:,2)*100/num_snapshots, '-');
hold on
plot(threshold, method_2A(:,2)*100/num_snapshots, 'o');
axis([0 40 0 100]);
title(' POutage(SIRo) - reverse link')
xlabel('Reverse Link Threshold (SIRo) in dB')
ylabel('Outgae Probability (%)')
legend(' step 2,B','step 2,A')
grid

```

## **4.2 MATLAB function poutage.m**

```

function pr = proutage(N,g,sc)
%Function calculating Probability of Outage for Cellular Network with
parameters;
% N cells per cluster
% g path loss exponent
% sc cell sectorization option: (1=>60degree,2=>120degree,3=>omni)

% Version:      Revision: 1.0
% Date:         17/2/11

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% STEP 1: System Parameters
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%parameters
r_cell=1000;           %cell radius in meters
n_co_ch_users=6;      %number of co-channel users
P_BS=0;               %BS transmitter power in dBW
P_MS=0;               %MS transmitter power in dBW
corr_fwd=0.0;         %correlation coefficient-forward link
corr_rev=0.0;         %correlation coefficient-reverse link
K=1;                  %constant in the link equation
in_beam=0;            %maximum gain of sectorized antennas
num_snapshots = 10000; % number of snapshots
cluster_size = N;     % number of cells per cluster
n_path = g;           % path loss exponent
sigma_int=8;          % shadowing standard deviation- interferers
sigma_S=8;            % shadowing standard deviation - desired user
sec=sc;               %
sectorization(1=>60degree,2=>120degree,3=>omni)
ftb=30;               % antenna front-back ratio in dB

if (sc==1 | sc==2 |sc==3) % Check valid input

%limits (angles) of sectors for 120, 60 and 360 degree sectorization

```

```

sector_min=zeros(6,3); % initialize all lower
angular limits to 0
sector_max=zeros(6,3); % initialize all upper
angular limits to 0
sector_min(:,1)=pi/3*[-3:2]'; % 6x lower angular limits for
120-degree sectorization
sector_min([1:3],2)=pi/3*[-3 -1 1]'; % 3x lower angular limits for
60-degree sectorization
sector_min(1,3)=-pi; % 1x lower angular limit for
360-degree sectorization
sector_max(:,1)=sector_min(:,1)+pi/3; % 6x upper angular limits for
120-degree sectorization
sector_max([1:3],2)=sector_min([1:3],2)+2*pi/3; % 3x upper angular
limits for 60-degree sectorization
sector_max(1,3)=pi; % 1x upper angular limits for
360-degree sectorization

%center of sectors for 120, 60 and 360 degree sectorization
phi_center=zeros(6,3); % initialize all center
values to 0 degrees
phi_center(:,1)=(pi/3)*[-3:2]'; % 6x center angular values
for 120-degree sectorization
phi_center([1:3],2)=(pi/3)*[-3 -1 1]'; % 3x center angular values
for 60-degree sectorization

%beamwidth of each sector
phi_BW=[1 2 6]*pi/3; % beamwidth values 60, 120
and 360 degrees

%number of sectors
num_sectors=[6 3 1]; % number of sectors: 6, 3 and
1 respectively

% Difference of antenna transmission power in dB between front and
rear
out_beam=in_beam-ftb;

% Co-Channel Cell locations

%location of base station (center cell is located at x=0,y=0)
%location (angular) of the center cell of each cluster in the first
tier
% according to table in reference notes
theta_N=[pi/6 0 pi/6 asin(1/(2*sqrt(3)))];

%angular distance between the center cells of all 6 clusters in first
tier.
theta=pi/3*[0:5]'; % separation of 360 degree space in
60 degree sectors
aux_1=[1 0 2 3 0 0 4]; % mark sepation points for N=1,3,4
and 7
ind=aux_1(cluster_size); % auxiliary pointer to angular
distance per value of N

%location [x.y] of the co-channel cell per 1st-tier cluster
% according to Eq. (6.2.2) in reference notes
bs_position=sqrt(3*cluster_size)*r_cell*[cos(theta+theta_N(ind))
sin(theta+theta_N(ind))];

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% STEP 2: Placement of Mobile Terminals in Cells
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
for i=1:num_snapshots

    %determination of the sector to simulated in this snapshot.
    %
    % Select (randomly) a sector from 1 to num_sectors
    sector=unidrnd(num_sectors(sec));
    %
    % place the desired mobile within the selected sector
    des_user_beta=rand(1)*phi_BW(sec)+phi_center(sector,sec); % desired
    user angular position
    des_user_r=sqrt(rand(1).*(r_cell^2)); % desired
    user radial position
    %
    % place co-channel mobiles within the selected sector of 1st-tier
    % co-channel cells
    co_ch_user_beta=rand(6,1)*phi_BW(sec)+phi_center(sector,sec); %
    interferer angular position
    co_ch_user_r=sqrt(rand(6,1))*(r_cell); %
    interferer radial position

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% STEP 3: Calculation of distances between Mobile Terminals and
% Central Cell BS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% x,y coordinates of desired user
des_user_position=des_user_r*[cos(des_user_beta) sin(des_user_beta)];
% x,y coordinates of interferer
co_ch_user_position=bs_position+ [co_ch_user_r.*cos(co_ch_user_beta)
co_ch_user_r.*sin(co_ch_user_beta)];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% STEP 4: Calculation of signal statistics
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Power received by DESIRED USER from central BS (forward link)
% according to eq.(6.2.6) in reference notes
m_S_fwd=P_BS - 10*K*n_path*log10(des_user_r);

% CO-CHANNEL USERS
%Location of desired mobile with respect to co-channel cells
% calculation of desired user position in complex form x+jy in cell
aux_01=((des_user_position(1) - bs_position(:,1))+sqrt(-
1)*(des_user_position(2) - bs_position(:,2)));
% calculation of desired user angular position in cell
beta_fwd=angle(aux_01);
% calculation of desired user radial position in cell
d_I_fwd=abs(aux_01);

```

```

%Computation of antenna gain at co-channel cells
clear gain_fwd
for k = 1:n_co_ch_users
    if
(beta_fwd(k)>=sector_min(sector,sec)) & (beta_fwd(k)<sector_max(sector,
sec))
        gain_fwd(k)=in_beam;    % forward antenna gain
    else
        gain_fwd(k)=out_beam;    % rear antenna gain
    end
end

%Calculation of mean power value per co-channel interferer
% in forward link according to eq.(6.2.11) in reference notes
m_I_fwd=P_BS - 10*K*n_path*log10(d_I_fwd)+gain_fwd.';

%Calculation of standard deviation per co-channel interferer
% in forward link using the Wilkinson metod
sigma_I_fwd=sigma_int*ones(length(m_I_fwd),1);
[m_I_total_fwd, sigma_I_total_fwd]=wilkinson(m_I_fwd, sigma_I_fwd,
corr_fwd);

% Power received by central BS from DESIRED USER (reverse link)
% according to eq.(6.2.7) in reference notes
m_S_rev=P_MS - 10*K*n_path*log10(des_user_r);
%
% CO - CHANNEL USERS
% Vector of positions of co-channel interferers with respect to
central BS
% in complex form x+jy
aux_02=((co_ch_user_position(1) - bs_position(:,1))+sqrt(-
1)*(co_ch_user_position(2) - bs_position(:,2)));
% Vector of co-channel inteferers angular positions
beta_rev=angle(aux_02);
% Vector of co-channel inteferers radial positions
d_I_rev=abs(aux_02);

% Computation of antenna gain at center cell
clear gain_rev
for k = 1:n_co_ch_users
    if
(beta_rev(k)>=sector_min(sector,sec)) & (beta_rev(k)<sector_max(sector,
sec))
        gain_rev(k)=in_beam;    % forward antenna gain
    else
        gain_rev(k)=out_beam;    % rear antenna gain
    end
end

%Calculation of mean power value per co-channel interferer
% in reverse link according to eq.(6.2.12) in reference notes
m_I_rev=P_MS - 10*K*n_path*log10(d_I_rev)+gain_rev.';

%Calculation of standard deviation per co-channel interferer
% in reverse link using the Wilkinson metod
sigma_I_rev=sigma_int*ones(length(m_I_rev),1);
[m_I_total_rev,
sigma_I_total_rev]=wilkinson(m_I_rev, sigma_I_rev, corr_rev);

```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% STEP 5: Calculation of SIR statistics in f and r directions
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

% STEP 5 Method A
m_SIR_fwd(i) = m_S_fwd - m_I_total_fwd;
sigma_SIR_fwd(i) = sqrt(sigma_S^2 + sigma_I_total_fwd^2 -
2*corr_fwd*sigma_S*sigma_I_total_fwd);

m_SIR_rev(i) = m_S_rev - m_I_total_rev;
sigma_SIR_rev(i) = sqrt(sigma_S^2 + sigma_I_total_rev^2 -
2*corr_rev*sigma_S*sigma_I_total_rev);

SIR_fwd(i)=normrnd(m_SIR_fwd(i), sigma_SIR_fwd(i));
SIR_rev(i)=normrnd(m_SIR_rev(i), sigma_SIR_rev(i));
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% STEP 6: Calculation of Outage Probability and Presentation of
Simulation Results
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

% Calculation of Poutage for various SIR thresholds using method A
threshold = 0:1:40;
L=length(threshold);

method_2A= zeros(L,2);           % Poutage result using method A

for j=1:L
    thres=threshold(j);         % Threshold value
    tmpA=[0 0];                 % Counter of outage instances using
method A
    tmpB=[0 0];                 % Counter of outage instances using
method B
    for i=1:num_snapshots
        % Count outage instances for Method A - forward link
        if SIR_fwd(i) <= thres
            tmpA(1)=tmpA(1)+1;
        end

        % Count outage instances for Method A - reverse link
        if SIR_rev(i) <= thres
            tmpA(2)=tmpA(2)+1;
        end
    end
    method_2A(j,:)=tmpA;
end

% Return Simulation Results
pr= method_2A*100/num_snapshots;
else
    disp('Invalid number of sectors - Try again')
    return
end
end

```

### 4.3 MATLAB script compresults1.m

```
%-----  
% File:      compresults1.m  
% Version:   Revision: 1.0  
% Date:      17/2/11  
% Desc:      Comparison of Poutage results  
%            using Monte-Carlo Simulation  
%-----  
-  
% Section:   Change Log  
%-----  
-  
% Revision 1.x  Date  
% Summary:  
%  
%  
clear all;  
close all  
  
ncurves = 6;           % Number of Poutage curves  
Npar= [ 4 7 4 7 4 7]; % Values of parameter N  
secpa=[3 3 2 2 1 1]; % Values of sectorization parameters  
g=4;  
SIR0 = 0:1:40;  
  
for icount=1:ncurves  
    simres=proutage(Npar(icount),g,secpa(icount));  
    fcurves(:,icount)=simres(:,1); % curves forward link  
    rcurves(:,icount)=simres(:,2); % curves reverse link  
end  
  
% Plot Simulation Results  
  
% a. Forward link  
subplot(2,1,1)  
plot(SIR0, fcurves);  
axis([0 40 0 100]);  
title(' POutage(SIRo) - forward link')  
xlabel('Forward Link Threshold (SIRo) in dB')  
ylabel('Outage Probability (%)')  
legend('N=4 & OMNI', 'N=7 & OMNI', 'N=4 & Sector 120', 'N=7 & Sector  
120', 'N=4 & Sector 60', 'N=7 & Sector 60')  
grid  
  
% b. Reverse link  
subplot(2,1,2)  
plot(SIR0, rcurves);  
axis([0 40 0 100]);  
title(' POutage(SIRo) - reverse link')  
xlabel('Forward Link Threshold (SIRo) in dB')  
ylabel('Outage Probability (%)')  
legend('N=4 & OMNI', 'N=7 & OMNI', 'N=4 & Sector 120', 'N=7 & Sector  
120', 'N=4 & Sector 60', 'N=7 & Sector 60')  
grid
```

## 5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Mohamed-Slim Alouini, Andrea J. Goldsmith, “Area Spectral Efficiency of Cellular Mobile Radio Systems”, *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, Vol. 48, No. 4, July 1999, p.1047-1066.
- [2] Proakis, J. G., *Digital Communications*, second edition, New York: McGraw-Hill Book Company, 1989.
- [3] Stavroulakis P., *Interference Analysis and Reduction for Wireless Systems*, Artech House, 2003.
- [4] Vatalaro, F., et al., “CDMA Cellular Systems Performance with Imperfect Power Control and Shadowing,” *IEEE VTC '96*, Atlanta, GA, April 28–May 1, 1996.
- [5] Sathyendran, G. W. Tunnichoffe, and A. R. March, “Multi-Layered Underlay Overlay Frequency Planning Scheme for Cellular Networks,” *IEEE VTC*, 1997.
- [6] Toskala, Antti, et al., “Cellular OFDM/CDMA Downlink Performance in the Link and System Levels,” *IEEE VTC '97*, Phoenix, AZ, May 4–7, 1997.
- [7] Wu, Jung-Shyr, Jen-Kung Chung, and Yu-Chuan Yang, “Performance Improvement for a Hotspot Embedded in CDMA Systems,” *IEEE VTC '97*, Phoenix, AZ, May 4–7, 1997.
- [8] Nakano, Keisuke, et al., “Teletraffic Modelling in CDMA Cellular Systems,” *IEEE VTC '97*, Phoenix, AZ, May 4–7, 1997.
- [9] Rappaport, T. S., *Wireless Communications*, Upper Saddle River NJ: Prentice Hall, 1996.
- [10] Jeffrey G. Andrews and Radha Krishna Ganti: “A Primer on Spatial Modeling and Analysis in Wireless Networks” *IEEE Communications Magazine* November 2010.