



Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Προηγμένα Συστήματα Πληροφορικής»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Τίτλος Διατριβής	ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΤΟΧΟΥ ΣΕ ΕΥΦΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΕΡΑΙΩΝ SURVEY OF TARGET LOCALIZATION ALGORITHMS IN INTELLIGENT ANTENNA SYSTEMS
Όνοματεπώνυμο Φοιτητή	Κατίνα-Αλεξία Σούγια
Πατρώνυμο	Παναγιώτης
Αριθμός Μητρώου	ΜΠΣΠ/ 13103
Επιβλέπων	Γεώργιος Τσιχριντζής, Καθηγητής

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

(υπογραφή)

Γεώργιος Τσιχριντζής,
Καθηγητής

(υπογραφή)

Ευθύμιος Αλέπης,
Αναπληρωτής Καθηγητής

(υπογραφή)

Διονύσιος Σωτηρόπουλος,
Επίκουρος Καθηγητής

Αφιερώνεται στους γονείς μου

ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΤΟΧΟΥ ΣΕ ΕΥΦΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΕΡΑΙΩΝ

Κατίνα-Αλεξία Σούγια

Σημαντικοί όροι: Ευφυείς κεραίες, UMTS, GSM, DoA αλγόριθμοι, κέρδος, air-interface

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ευφυείς κεραίες (smart antennas) αποτελούν μία από τις τεχνολογίες αιχμής στα σημερινά συστήματα ασυρμάτων κινητών και προσωπικών επικοινωνιών. Η εισαγωγή τους σήμερα κρίνεται αναγκαία καθώς οι απαιτήσεις των συστημάτων αυτών μεγαλώνουν ολοένα και περισσότερο και προστίθενται συνεχώς καινούριες υπηρεσίες.

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση της αρχιτεκτονικής των ευφών κεραιοσυστημάτων και η μελέτη της εφαρμογής ευφών κεραιών σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Μετά την αναγκαία εισαγωγή, ακολουθεί ένα κεφάλαιο παρουσίασης των ευφών κεραιοσυστημάτων, ένα επιπλέον κεφάλαιο που εμβαθύνει στην αρχιτεκτονική τους καθώς και ένα κεφάλαιο που εκθέτει μία σειρά από αλγόριθμους (AoA, εύρεση διεύθυνσης) την υλοποίηση των ευφών κεραιοσυστημάτων. Τέλος, παραθέτουμε κάποιες εφαρμογές σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας των ευφών κεραιοσυστημάτων.

ABSTRACT

Smart antennas are one of the cutting-edge technologies in today's mobile and personal wireless systems. Their introduction is nowadays necessary as the requirements of these systems are increasing and new services are constantly being added.

The purpose of this thesis is to analyze the architecture of intelligent antennas and to study the application of intelligent antennas to mobile telephony networks.

This thesis consists of five chapters. Following the necessary introduction, follows a presentation chapter on intelligent antennas, an additional chapter that delves deeper into their architecture as well as a chapter that exposes a series of algorithms (AoA, address finding) for the implementation of intelligent antennas. Finally, we list some applications in mobile antennas of intelligent antennas.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	Εισαγωγή.....	8
2.	Τα ευφυή κεραιοσυστήματα.....	8
2.1	Εισαγωγή.....	8
2.2	Χαρακτηριστικά Ευφών Κεραιών.....	9
2.3	Τεχνικές που εισάγουν νοημοσύνη σε μία κεραία.....	10
2.4	Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Χρήσης Ευφών Κεραιών.....	11
2.4.1	Πλεονεκτήματα.....	11
2.4.2	Μειονεκτήματα.....	12
2.5	Αλλαγές στις υπάρχουσες στρατηγικές ραδιοσχεδιασμού.....	13
3.	Τεχνολογικό υπόβαθρο-δομή ευφών κεραιοσυστημάτων.....	13
3.1	Στοιχειοκεραίες.....	13
3.2	Γραμμική Στοιχειοκεραία Ισαπέχοντων στοιχείων.....	14
3.3	Ο Δέκτης μιας Ευφούς στοιχειοκεραίας.....	15
3.3.1	Η κεραία.....	16
3.3.2	Η ραδιομονάδα και η μονάδα επεξεργασίας σήματος.....	18
3.3.3	Μονάδα Σχηματισμού Λοβών.....	19
3.4	Ο Πομπός.....	20
3.5	Τεχνικές Προκλήσεις Ευφών Κεραιών.....	21
4.	Ο Αλγόριθμος Angle of Arrival (Γωνία Άφιξης-ΑοΑ).....	22
4.1	Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου ΑοΑ.....	23
4.2	Οι Αλγόριθμοι Εύρεσης Διεύθυνσης.....	24
4.2.1	Φασματική Εκτίμηση.....	24
4.2.2	Ο MVDR εκτιμητής.....	24
4.2.3	Μέθοδος γραμμικής πρόβλεψης.....	24
4.2.4	Μέθοδοι ιδιοκατασκευής (eigenstructure).....	24

4.3	Αλγόριθμοι MUSIC.....	25
4.4	Η Μέθοδος Min-Norm.....	26
4.5	Η Μέθοδος CLOSEST.....	27
4.6	Μέθοδος ESPRIT.....	27
4.7	Ο Αλγόριθμος SAGE.....	27
5.	Παρουσίαση Πειραματικών Μετρήσεων Ευφών Κεραιών σε Δίκτυο Κινητής Τηλεφωνίας.....	27
	Βιβλιογραφία-Αναφορές.....	40

1. Εισαγωγή

Προβλέπεται ότι στο άμεσο μέλλον θα υπάρξει μία τεράστια αύξηση κίνησης στα συστήματα κινητών και προσωπικών επικοινωνιών. Αυτό οφείλεται τόσο στον αυξημένο αριθμό χρηστών όσο και στην εισαγωγή νέων υπηρεσιών δεδομένων υψηλότερου ρυθμού. Η τάση αυτή θα αποτελεί και κύριο χαρακτηριστικό των δικτύων 5^{ης} γενιάς 5G που βρίσκονται στο κατώφλι της ανθρώπινης τεχνολογικής τηλεπικοινωνιακής δραστηριότητας.

Η τεράστια ανάπτυξη των κυψελωτών συστημάτων, σε συνδυασμό με την μεγάλη ανάπτυξη των φορητών υπολογιστών και των υπολογιστών χειρός, αποτελούν μια ισχυρή ένδειξη για την ταχύτατη εξέλιξη των ασύρματων δικτύων. Τα μελλοντικά ασύρματα συστήματα επικοινωνιών θα επιτρέπουν την επικοινωνία του κινητού χρήστη με οποιονδήποτε συνδρομητή του ίδιου ή διαφορετικού συστήματος, οπουδήποτε κι αν βρίσκεται αυτός, οποιαδήποτε στιγμή, παρέχοντας υπηρεσίες πολυμέσων. Η αύξηση στην κίνηση θα δημιουργήσει μία ζήτηση αυξημένης χωρητικότητας στα δίκτυα τόσο προς τους κατασκευαστές όσο και προς τους διαχειριστές. Αυτή τη στιγμή, μία από τις πιο υποσχόμενες τεχνικές για την αύξηση της χωρητικότητας στα κυψελωτά συστήματα είναι οι ευφυείς ή προσαρμοστικές κεραίες (smart or adaptive antennas) (Boukalov 2018).

Το ενδιαφέρον για αυτήν την τεχνολογία αυξάνεται καθώς η χωρική επεξεργασία (spatial processing) θεωρείται ως το «τελευταίο σύνορο» στη μάχη για χωρητικότητα στα κυψελωτά συστήματα με περιορισμένο μέγεθος ραδιοφάσματος. Οι τεχνικές ευφύων κεραιών είναι μία από τις λίγες τεχνικές, που προτείνονται για νέα σχεδίαση κυψελωτών δικτύων, οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν δραστικά την απόδοση του συστήματος. Οι ευφυείς κεραίες μπορούν να συνδυαστούν αποτελεσματικά με άλλες τεχνικές όπως ανίχνευση πολλαπλών χρηστών (multi-user detection, MU), διαφορικότητα πόλωσης (polarization diversity) και κωδικοποίηση διαύλων (channels coding). Τα πρότυπα των air-interfaces γίνονται όλο και πιο φιλικά για τις ευφυείς κεραίες και η μελλοντική εισαγωγή ραδιο λογισμικού (radio software) θα καταστήσει δυνατή τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης ραδιοσυστήματος για χωρική επεξεργασία και την ενσωμάτωση ευφύων κεραιών σε μελλοντικά προσαρμοστικά modem.

Τα κύρια πλεονεκτήματα που αναμένεται να προσφέρουν οι ευφυείς κεραίες είναι :

- υψηλότερη ευαισθησία λήψης,
- πιθανότητα εισαγωγής συστημάτων που χρησιμοποιούν πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χώρου (spatial division multiple access, SDMA),
- λειτουργίες εξάλειψης παρεμβολής στην άνω και την κάτω ζεύξη
- άμβλυνση του προβλήματος εξασθένισης λόγω διάδοσης πολλαπλών διαδρομών
- αποδοτικότερη χρήση του φάσματος
- δημιουργία νέων, οικονομικότερων και καλύτερης ποιότητας υπηρεσιών για το χρήστη

2. Τα ευφυή κεραιοσυστήματα

2.1 Εισαγωγή

Σε ένα κυψελοειδές σύστημα η επικοινωνία πραγματοποιείται ανάμεσα στον χρήστη και στον σταθμό βάσης που παρέχει κάλυψη στην κυψέλη. Η χωρητικότητα σ' ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να οριστεί σαν ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης ανά εύρος ζώνης ανά μονάδα εμβαδού ή bits/s/Hz/m². Επειδή το διαθέσιμο εύρος ζώνης συχνοτήτων είναι περιορισμένο, η χωρητικότητα δίνεται από την πυκνότητα κυψέλης, την απόσταση επαναχρησιμοποίησης συχνότητας (frequency reuse distance), και τον αριθμό των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα από τον κάθε σταθμό βάσης. Για την αύξηση

της χωρητικότητας στα κυψελοειδή συστήματα χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως: χρήση μικρότερων κυψελών, οι λεγόμενες μικροκυψέλες, και αναπήδηση συχνότητας, μια τεχνική που εξαφανίζει την παρεμβολή και εξομαλύνει τον ρυθμό εξασθένισης (Tracy 2013).

Οι κεραιές σταθμών βάσεων είναι μέχρι τώρα πολυκατευθυντικές ή τμηματοποιημένες. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως σπατάλη ισχύος δεδομένου ότι μεγαλύτερο μέρος της θα ακτινοβοληθεί προς άλλες κατευθύνσεις και λιγότερο προς το χρήστη. Επιπλέον, η προς άλλες κατευθύνσεις ακτινοβόλουμένη ισχύς θα ληφθεί ως παρεμβολή από άλλους χρήστες. Η ιδέα των ευφών κεραιών είναι να χρησιμοποιηθούν διαγράμματα κεραιών σταθμών βάσης που δεν καθορίζονται, αλλά προσαρμόζονται στις τρέχοντες ραδιοσυνθήκες. Αυτό μπορεί να απεικονιστεί σαν η κεραία να κατευθύνει μια ακτίνα, προς τον επικοινωνών χρήστη μόνο. Η διαφορά μεταξύ της σταθερής και της ευφούς κεραιάς απεικονίζεται στο σχήμα. Οι ευφείς κεραιές θα οδηγήσουν σε μια αποδοτικότερη χρήση της ισχύος και του φάσματος, αυξάνοντας τη χρήσιμη λαμβανόμενη ισχύ και μειώνοντας την παρεμβολή.

Παραδοσιακά, οι χρήστες που επικοινωνούν μέσω του ίδιου σταθμού βάσης χωρίζονται από συχνότητα (FDMA) από χρόνο (TDMA) ή από κώδικα (CDMA). Οι ευφείς κεραιές εισάγουν έναν καινούριο τρόπο για τον διαχωρισμό των χρηστών, μέσω διαστήματος (SDMA – Space Division Multiple Access). Το SDMA, το οποίο σημαίνει ότι οι χρήστες στην ίδια κυψέλη μπορούν να χρησιμοποιήσουν το ίδιο φυσικό κανάλι επικοινωνίας, είναι το τελικό βήμα σ' μια εξελικτική πορεία προς όλο και περισσότερο ανεπτυγμένη αξιοποίηση.

2.2 Χαρακτηριστικά Ευφών Κεραιών

Η θεωρία πίσω από τις ευφείς κεραιές δεν είναι καινούρια. Η τεχνική είχε για πολλά χρόνια χρησιμοποιηθεί στον ηλεκτρονικό πόλεμο (EWF) σαν αντίμετρο στην ηλεκτρονική παρεμβολή. Σε στρατιωτικά συστήματα ραντάρ παρόμοιες τεχνικές χρησιμοποιούνταν ήδη από τον 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο. Υπάρχουν σε γενικές γραμμές διάφοροι τρόποι με τους οποίους μια προσαρμοστικά διευθετήσιμη ακτίνα κεραιών μπορεί να παραχθεί, παραδείγματος χάριν με μηχανικά οδηγούμενες κεραιές. Εντούτοις, η τεχνολογία που σχεδόν αποκλειστικά προτείνεται για επίγεια συστήματα προσωπικών και κινητών επικοινωνιών είναι οι κεραιές συστοιχίας (array antennas). Η κύρια φιλοσοφία είναι ότι οι παρεμβολές σπανίως έχουν την ίδια γεωγραφική θέση με τον χρήστη. Με τη μεγιστοποίηση του κέρδους της κεραιάς στην επιθυμητή κατεύθυνση και ταυτόχρονα με την τοποθέτηση του ελάχιστου διαγράμματος ακτινοβολίας στις κατευθύνσεις των παρεμβολών, η ποιότητα της σύνδεσης μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά. Στην προσωπική και κινητή επικοινωνία, οι παρεμβολές είναι διαφορετικοί, από τον αναφερόμενο, χρήστες.

Ένας χρήσιμος και συνεπής ορισμός είναι ότι η διαφορά μεταξύ ευφούς/προσαρμοζόμενης και συμβατικής/σταθερής κεραιάς είναι η ιδιότητα του να έχουν ένα προσαρμοζόμενο και ένα σταθερό λοβό-διάγραμμα αντίστοιχα.

Κανονικά, ο όρος κεραία περιλαμβάνει μόνο την μηχανική κατασκευή η οποία μετατρέπει ελεύθερα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε σήματα ραδιοσυχνότητας που ταξιδεύουν σε ένα θωρακισμένο καλώδιο και αντιστρόφως. Ονομάζεται ακτινοβολών στοιχείο. Στην ευφή κεραία, ο όρος κεραία έχει μια πιο εκτεταμένη έννοια. Αποτελείται από έναν αριθμό ακτινοβολούντων στοιχείων, ένα δίκτυο συνδυασμού / διαχωρισμού και μια μονάδα ελέγχου. Η μονάδα ελέγχου καλείται νοημοσύνη της ευφούς κεραιάς και πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας έναν ψηφιακό επεξεργαστή σήματος (Digital Signal Processor, DSP). Ο επεξεργαστής ελέγχει παραμέτρους τροφοδοτών της κεραιάς, βασισμένες σε διάφορες εισόδους, έτσι ώστε να βελτιστοποιήσει τη σύνδεση. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα κριτήρια βελτιστοποίησης. Αυτό δείχνει ότι η ευφής κεραία είναι περισσότερο από μια απλή κεραία. Είναι μια ολοκληρωμένη έννοια πομποδέκτη.

2.3 Τεχνικές που εισάγουν νοημοσύνη σε μία κεραία

Μπορούν να οριστούν διάφορα επίπεδα νοημοσύνης-ευφυΐας σε μία κεραία. Τα επίπεδα αυτά παρατίθενται στη συνέχεια.

- **Switched Lobe (SL)**

Ονομάζεται και switched beam. Είναι η πιο απλή τεχνική και περιλαμβάνει μόνο μια βασική λειτουργία μεταγωγής μεταξύ χωριστών κατευθυντικών κεραιών ή προκαθορισμένων ακτινών μιας συστοιχίας. Επιλέγεται η λύση που παρέχει την καλύτερη απόδοση, συνήθως σε όρους λαμβανόμενης ισχύος. Επιτυγχάνεται κάποιο κέρδος λόγω της υψηλότερης κατευθυντικότητας σε σχέση με μια συμβατική κεραία. Μια τέτοια κεραία είναι ευκολότερο να υλοποιηθεί στις υπάρχουσες κυβελικές δομές, σε σχέση με τις πολυπλοκότερες προσαρμοζόμενες συστοιχίες, αλλά δίνει περιορισμένη βελτίωση.

- **Dynamically Phased Array (PA)**

Με την εισαγωγή ενός αλγορίθμου DoA (Direction of Arrival) για το λαμβανόμενο από τον χρήστη σήμα, μπορεί να επιτευχθεί συνεχής παρακολούθηση. Αυτό μπορεί να ιδωθεί σαν μια γενίκευση της έννοιας switched lobe. Σε αυτή την περίπτωση μεγιστοποιείται η λαμβανόμενη ισχύς.

- **Adaptive Array (AA)**

Σε αυτή την περίπτωση προστίθεται ένας αλγόριθμος DoA για να υπολογιστεί η κατεύθυνση προς τις πηγές παρεμβολής. Το διάγραμμα ακτινοβολίας μπορεί να προσαρμοστεί για να αποκλείσει τις παρεμβολές. Επιπροσθέτως, με τη χρήση ειδικών αλγορίθμων και τεχνικών διαφορικότητας χώρου, το διάγραμμα ακτινοβολίας μπορεί να προσαρμοστεί έτσι ώστε να λαμβάνει σήματα πολλαπλών διαδρομών που μπορούν να συνδυαστούν. Αυτές οι τεχνικές μπορούν να μεγιστοποιήσουν τον λόγο σήματος προς παρεμβολή (Signal to Interference Ratio SIR) ή τον λόγο σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (Signal to Noise and Interference Ratio SINR).

Τα συμβατικά συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών συνήθως χρησιμοποιούν κάποιο είδος διαφορικότητας κεραίας (π.χ. διαφορικότητα χώρου ή πόλωσης). Οι προσαρμόσιμες κεραίες μπορούν να θεωρηθούν ως ένα πλάνο εκτεταμένης διαφορικότητας, καθώς έχουν πάνω από δύο παρακλάδια διαφορικότητας. Έτσι οι προσαρμόσιμες συστοιχίες (AAs) έχουν μεγαλύτερο περιθώριο κέρδους από τις κεραίες μεταγωγής λοβού (SLs) καθώς όλα τα στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συνδυασμό διαφορικότητας.

Όλα τα επίπεδα νοημοσύνης που περιγράφηκαν είναι τεχνικώς πραγματοποιήσιμα σήμερα. Η εξελικτική διαδικασία που, στον τομέα των προσωπικών και κινητών επικοινωνιών, μπορεί να οδηγήσει στην αξιοποίηση των ευφών κεραιών σε περισσότερο ανεπτυγμένες εφαρμογές, μπορεί να χωριστεί σε τρεις φάσεις (Mohammed 2014):

1. Οι ευφείς κεραίες χρησιμοποιούνται μόνο στην άνω ζεύξη (ο χρήστης εκπέμπει και ο σταθμός βάσης λαμβάνει). Με τη χρήση ευφούς κεραίας για την αύξηση του κέρδους στον σταθμό βάσης, αυξάνονται τόσο η ευαισθησία όσο και η εμβέλεια. Αυτή η έννοια ονομάζεται Δέκτης υψηλής ευαισθησίας (High Sensitivity Receiver – HSR) και, ως προς την αρχή, δεν είναι διαφορετική από τις διαφορικές τεχνικές που εφαρμόζονται στα σημερινά συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών.
2. Στη δεύτερη φάση, χρησιμοποιούνται κατευθυνόμενες ακτίνες στην κάτω ζεύξη (ο σταθμός βάσης εκπέμπει και ο χρήστης λαμβάνει) επιπρόσθετα με τον HSR. Με αυτόν τον τρόπο το κέρδος της κεραίας αυξάνεται τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη, πράγμα το οποίο υπονοεί την ύπαρξη χωρικού (spatial) φιλτραρίσματος και προς τις δύο κατευθύνσεις. Οι

συχνότητες μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν κοντύτερα, και έτσι αυξάνεται η χωρητικότητα του συστήματος. Αυτή η μέθοδος ονομάζεται χωρικό φίλτράρισμα για μείωση της παρεμβολής (Spatial Filtering for Interference Reduction, SFIR). Είναι δυνατή η εισαγωγή αυτής της μεθόδου σε συστήματα 2^{ης} γενιάς.

3. Το τελευταίο στάδιο αυτής της ανάπτυξης θα είναι πλήρης πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης διαστήματος (Space Division Multiple Access). Αυτό σημαίνει, ότι περισσότεροι από έναν χρήστες θα μπορούν να τοποθετηθούν στο ίδιο φυσικό κανάλι, ταυτόχρονα και στην ίδια κυψέλη, χωριζόμενοι μόνο από γωνία. Σε ένα TDMA σύστημα, δύο χρήστες θα βρίσκονται την ίδια χρονική σχισμή και φέρον συχνότητας στον ίδιο χρόνο και στην ίδια κυψέλη.

Στη δεύτερη φάση, η χωρητικότητα αυξάνεται λόγω κοντινότερης επαναχρησιμοποίησης συχνότητας, καθώς έτσι επιτρέπεται η ύπαρξη περισσότερων φερόντων ανά σταθμό βάσης. Στην τρίτη φάση επιτυγχάνεται μία επιπλέον αύξηση της χωρητικότητας καθώς επιτρέπονται περισσότεροι χρήστες ανά φέρον.

2.4 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Χρήσης Ευφυών Κεραίων

Η εισαγωγή των ευφύων κεραιών έχει ένα μεγάλο αντίκτυπο στην απόδοση των κυψελοειδών δικτύων. Επηρεάζει επίσης πολλούς τομείς, τόσο του σχεδιασμού όσο και της ανάπτυξης των συστημάτων κινητών επικοινωνιών.

2.4.1 Πλεονεκτήματα

- **Αύξηση χωρητικότητας** – Ο κυρίαρχος λόγος του αυξανόμενου ενδιαφέροντος για τις ευφείς κεραιές είναι η αύξηση της χωρητικότητας. Σε πυκνοκατοικημένες περιοχές η κύρια πηγή θορύβου στο σύστημα είναι οι παρεμβολές από άλλους χρήστες. Αυτό σημαίνει ότι ο λόγος σήματος προς παρεμβολή (SIR) είναι πολύ μεγαλύτερος από τον λόγο σήματος προς θερμικό θόρυβο (SNR). Οι ευφείς κεραιές θα αυξάνουν τον SIR, καθώς ταυτόχρονα θα αυξάνουν το επίπεδο του χρήσιμου λαμβανόμενου σήματος και θα μειώνουν το επίπεδο της παρεμβολής. Ειδικά η προσαρμοζόμενη συστοιχία(AA) παρέχει σημαντική βελτίωση. Πειραματικά αποτελέσματα αναφέρουν μια αύξηση 10dB κατά μέσο όρο σε αστικές περιοχές (Inacon 2019).

Σε TDMA συστήματα η επίπτωση του αυξημένου SIR είναι η πιθανότητα μειωμένης απόστασης επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων. Προσομοιώσεις που έγιναν σε ένα FH-GSM δίκτυο με απόσταση επαναχρησιμοποίησης 1/3 και με χρήση SFIR δείχνουν μια αύξηση της χωρητικότητας της τάξεως του 300%.

Τα CDMA συστήματα όπως το UMTS είναι περισσότερο εξαρτημένα από την παρεμβολή σε σχέση με τα TDMA συστήματα. Η κυρίαρχη πηγή θορύβου στο σύστημα είναι η παρεμβολή από άλλους χρήστες λόγω της μη ιδανικής ορθογωνικότητας των κωδικών διάδοσης. Αυτό σημαίνει ότι η αύξηση της χωρητικότητας είναι ακόμα μεγαλύτερη για ένα CDMA σύστημα από ότι για ένα TDMA. Έχει αναφερθεί μια αύξηση της χωρητικότητας της τάξεως του 500% για το CDMA (Vocational Training Council 2016).

- **Αύξηση εμβέλειας** – Σε αραιοκατοικημένες περιοχές η ραδιοκάλυψη είναι πιο σημαντική από την χωρητικότητα για την απόφαση της ανάπτυξης ενός σταθμού βάσης. Η αύξηση της εμβέλειας πραγματοποιείται λόγω του ότι οι ευφείς κεραιές είναι περισσότερο κατευθυντικές από τις παραδοσιακές τμηματοποιημένες ή πολυκατευθυντικές κεραιές. Αυτό σημαίνει ότι οι σταθμοί βάσης μπορούν να τοποθετηθούν πιο μακριά ο ένας από τον άλλον, πράγμα το οποίο οδηγεί σε μια πιο αποτελεσματική από άποψη κέρδους ανάπτυξη. Το κέρδος της κεραιάς συγκρινόμενο με αυτό κεραιάς ενός στοιχείου μπορεί να αυξηθεί κατά έναν αριθμό ίσο με τον

αριθμό στοιχείων της συστοιχίας, για παράδειγμα μια συστοιχία 8 στοιχείων μπορεί να αποδώσει ένα κέρδος της τάξεως του 8 (9dB)

- **Νέες υπηρεσίες** – Με την χρήση των ευφών κεραιών το δίκτυο θα έχει πρόσβαση σε χωρικές πληροφορίες των χρηστών. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των θέσεων των χρηστών με περισσότερη ακρίβεια απ' ό,τι στα υπάρχοντα δίκτυα.
- **Ασφάλεια** – Είναι πολύ πιο δύσκολο να παγιδευτεί μία σύνδεση όταν χρησιμοποιούνται ευφείς κεραιές. Για να παγιδευτεί μια σύνδεση θα πρέπει ο εισβολέας να βρίσκεται στην ίδια κατεύθυνση με τον χρήστη ως προς το σταθμό βάσης.
- **Μειωμένο πρόβλημα διάδοσης πολλαπλών διαδρομών (multipath propagation)** – Το πρόβλημα της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών μπορεί κάπως να ελαττωθεί με τη χρήση στενής ακτίνας κεραιάς στο σταθμό βάσης. Η πραγματική μείωση εξαρτάται από το σενάριο και δεν είναι πάντα σημαντική. Παρ' όλο που οι εξισορροπητές καναλιού και οι δέκτες RAKE χειρίζονται, ακόμα και εκμεταλλεύονται τα συστατικά των πολλαπλών διαδρομών, αυτό δεν είναι το ζητούμενο σε συνδέσεις πολύ υψηλής ταχύτητας. Η ελάττωση του προβλήματος αυτού μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην χαλάρωση των απαιτήσεων στη σχεδίαση modem.

2.4.2 Μειονεκτήματα

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα της χρήσης ευφών κεραιών υπάρχουν επίσης και κάποια μειονεκτήματα και παράγοντες κόστους.

- **Πολυπλοκότητα πομποδέκτη** – Είναι φανερό ότι ο πομποδέκτης μιας ευφούς κεραιάς είναι πολύ πιο πολύπλοκος από αυτόν ενός παραδοσιακού σταθμού βάσης. Η κεραιά χρειάζεται ξεχωριστές αλυσίδες πομποδεκτών για καθένα από τα στοιχεία της συστοιχίας και ακριβή ρύθμιση πραγματικού χρόνου για καθένα από αυτά. Επιπροσθέτως η διαδικασία του beamforming της κεραιάς είναι μια υπολογιστικά έντονη διαδικασία, ειδικά στην περίπτωση των προσαρμοσμένων συστοιχιών (AAs). Αυτό σημαίνει ότι ο σταθμός βάσης της ευφούς κεραιάς θα πρέπει να περιλαμβάνει πολύ ισχυρούς αριθμητικούς επεξεργαστές και συστήματα ελέγχου. Επίσης χρειάζονται αποτελεσματικοί αλγόριθμοι για βελτιστοποίηση πραγματικού χρόνου και παρακολούθηση σήματος.
- **Διαχείριση πόρων** – Όταν πρόκειται να εγκατασταθεί μια νέα σύνδεση ή όταν μια υπάρχουσα σύνδεση δίνεται σε έναν νέο σταθμό βάσης, τότε ο νέος σταθμός βάσης δεν έχει κάποια πληροφορία γωνίας και χρειάζεται κάποια μέσο έτσι ώστε να «βρει» τον κινητό σταθμό. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αφήνοντας το σταθμό βάσης να σαρώνει (sweep) την κυψέλη με μια ακτίνα αναζήτησης ψάχνοντας για κάποια νέα σύνδεση ή για κάποιο handover. Μια άλλη πιθανότητα είναι η χρήση κάποιου εξωτερικού συστήματος εύρεσης θέσης, π.χ. GPS. Όσον αφορά το handover υπάρχει και μία τρίτη πιθανότητα : μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το δίκτυο πληροφορίες κατεύθυνσης από την υπάρχουσα κυψέλη, έτσι ώστε να υπάρξει κάποια εκτίμηση ως προς το σε ποια κυψέλη μπορεί να αποδοθεί η σύνδεση.

Το SDMA περιλαμβάνει διάφορους χρήστες οι οποίοι χρησιμοποιούν το ίδιο φυσικό κανάλι στην ίδια κυψέλη και χωρίζονται μόνο κατά γωνία. Όταν υπάρξει κάποια γωνιακή σύγκρουση ανάμεσά τους τότε ένας από αυτούς θα πρέπει να αλλάξει γρήγορα σε κάποιο άλλο κανάλι έτσι ώστε να μην πέσει η σύνδεση. Αυτό σημαίνει ότι σε συστήματα που παρέχουν πλήρες SDMA θα υπάρχουν πολύ περισσότερα εσωκυψελικά handovers και θα χρειάζεται περισσότερη παρακολούθηση από το δίκτυο σε σχέση με τα συμβατικά CDMA και TDMA συστήματα.

Φυσικό μέγεθος – Για να έχει μια ευφής κεραιά λογικό κέρδος, χρειάζεται μια στοιχειοκεραία με αρκετά στοιχεία. Για εξωτερικά περιβάλλοντα έχουν προταθεί συστοιχίες που αποτελούνται από 6 έως 10, οριζόντια χωριζόμενα, στοιχεία. Η απαραίτητη απόσταση των στοιχείων είναι 0.4-0.5 μήκη κύματος. Αυτό σημαίνει ότι κεραιά 8 στοιχείων θα έχει πλάτος περίπου 1.2 μέτρα στα 900 MHz και 60 εκατοστά

στα 2 GHz. Με αυξανόμενη την απαίτηση του κόσμου για λιγότερο ορατούς σταθμούς βάσης, αυτό το μέγεθος, παρ' όλο που δεν είναι υπερβολικό θα μπορούσε να προκαλέσει πρόβλημα.

2.5 Αλλαγές στις υπάρχουσες στρατηγικές ραδιοσχεδιασμού

Για να έχουν οι ευφυείς κεραιές το επιθυμητό κέρδος, θα πρέπει οι σταθμοί βάσης να έχουν τη δυνατότητα να ξεχωρίζουν τους χρήστες σύμφωνα με τη γωνία. Αυτό σημαίνει ότι κάποιες από τις υπάρχουσες στρατηγικές ραδιοσχεδιασμού θα πρέπει να μεταβληθούν. Στα υπάρχοντα δίκτυα οι σταθμοί βάσης τοποθετούνται συνήθως κατά μήκος των δρόμων ταχείας κυκλοφορίας και των σιδηροδρομικών σταθμών. Από την πλευρά μιας ευφυούς κεραιάς είναι πολύ πιο αποτελεσματική η τοποθέτηση του σταθμού βάσης μακριά από τον δρόμο ή τον σιδηρόδρομο. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να γίνει εκμετάλλευση της χωρικής διάστασης. Ένα άλλο δύσκολο σημείο είναι οι μικρές αστικές κυψέλες με σταθμούς βάσης τοποθετημένους κάτω από το επίπεδο των στεγών. Σε αυτές τις περιπτώσεις το σήμα, τόσο από τους επιθυμητούς χρήστες όσο και από τους παρεμβολείς θα τείνει να φτάνει μέσω των οδών, καθιστώντας δύσκολο το γωνιακό τους διαχωρισμό. Τα μοντέλα ραδιοδιαύλων και τα εργαλεία ραδιοσχεδιασμού χρειάζονται ανανεωμένη προσοχή με την εισαγωγή των ευφών κεραιοσυστημάτων. Στατιστικά μοντέλα ραδιοδιαύλων χρησιμοποιούνται σε τεστ επίδοσης και στον σχεδιασμό ραδιοσυστημάτων.

3. Τεχνολογικό υπόβαθρο-δομή ευφών κεραιοσυστημάτων

Το κεφάλαιο αυτό εξηγεί το τεχνολογικό υπόβαθρο για την εισαγωγή των ευφών κεραιών. Η τεχνολογία βασίζεται σε στοιχειοκεραίες όπου το διάγραμμα ακτινοβολίας μεταβάλλεται με την προσαρμογή του πλάτους και της σχετικής φάσης των διαφορετικών στοιχείων της συστοιχίας. Στην συνέχεια εξηγούνται οι βασικές αρχές του beamforming συστοιχίας και πώς αυτό εφαρμόζεται στην ευφυείς κεραιές. Παρ' όλο που τα τμήματα της λήψης και της μετάδοσης είναι συχνά ενσωματωμένα, και πολλές φορές χρησιμοποιείται το ίδιο υλικό, θα εξηγηθούν χωριστά. Αυτό θα γίνει επειδή η άνω και η κάτω ζεύξη είναι κάπως διαφορετικές σε όρους ευφών κεραιών.

3.1 Στοιχειοκεραίες

Ηλεκτρονικά κινούμενα διαγράμματα κεραιών συνήθως παράγονται χρησιμοποιώντας στοιχειοκεραίες. Αυτές είναι κεραιές που αποτελούνται από έναν αριθμό στοιχειωδών κεραιών στις οποίες το σήμα χωρίζεται ή συνδυάζεται τόσο σε φάση όσο και σε πλάτος. Γενικά, οποιοσδήποτε αριθμός στοιχείων μπορεί να σχηματίσει μια συστοιχία. Παρ' όλα αυτά συνήθως χρησιμοποιούνται ισοδύναμα στοιχεία σε κανονική γεωμετρία.

Οι συστοιχίες μπορεί να είναι μίας, δύο ή τριών διαστάσεων πράγμα το οποίο εξαρτάται από τη διάσταση του χώρου στον οποίο θέλουμε να έχουμε πρόσβαση. Σ' αυτό το σημείο θα αναλυθεί σαν παράδειγμα η αρχή της γραμμικής συστοιχίας. Τα μαθηματικά μπορούν να επεκταθούν σε περισσότερες διαστάσεις και σε άλλες γεωμετρίες αλλά η αρχή είναι η ίδια.

Το συνολικό διάγραμμα ακτινοβολίας δίνεται από τον τύπο του στοιχείου, τις σχετικές θέσεις, και τη διέγερση (πλάτος και φάση). Με τη χρήση στοιχειοκεραίας, είναι εφικτή η απόκτηση πολύ καλού ελέγχου του διαγράμματος ακτινοβολίας π.χ. του σχήματος του κυρίως λοβού και το επίπεδο των πλευρικών λοβών (Side Lobe Level SLL). Το διάγραμμα ακτινοβολίας δίνεται κατά μοναδικό τρόπο από τις προαναφερθείσες παραμέτρους.

3.2 Γραμμική Στοιχειοκεραία Ισαπέχοντων στοιχείων

Η πιο απλή γεωμετρία είναι αυτή της γραμμικής μιας διαστάσεως συστοιχίας ισαπέχοντων στοιχείων. Η έκφραση στο μακρινό πεδίο του ηλεκτρικού πεδίου για ένα στοιχείο δίνεται από την εξίσωση (1) :

$$\vec{E}_n(r, \theta, \varphi) = I_n \cdot \frac{e^{-jk r}}{r} \cdot \vec{e}(\theta, \varphi) \quad (1)$$

όπου I_n είναι το μιγαδικό ρεύμα στοιχείου, \vec{e} είναι το διάγραμμα της κεραίας-στοιχείου, το οποίο συνήθως ονομάζεται παράγοντας στοιχείου, και r, θ, φ είναι οι σφαιρικές συντεταγμένες από το σημείο παρατήρησης.

Το συνολικό πεδίο μιας συστοιχίας αποτελούμενης από N στοιχεία είναι η επαλληλία της συνεισφοράς του κάθε στοιχείου, όπως εκφράζεται στην εξίσωση (2) :

$$\vec{E}(r, \theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{N-1} I_n \cdot \frac{e^{-jk r}}{r} \cdot e^{jk r_n' \cos \psi_n} \cdot \vec{e}(\theta, \varphi) \quad (2)$$

όπου $r_n' \cos \psi_n = z_n' \cos \theta = nd \cos \theta \quad (3)$

είναι η διαφορά στην απόσταση για το στοιχείο n σε σύγκριση με το στοιχείο 0 ως προς το σημείο παρατήρησης στην κατεύθυνση θ λόγω του χωρικού διαχωρισμού στη συστοιχία. Η απόσταση μεταξύ των στοιχείων είναι d (είναι η απόσταση του στοιχείου n από την αρχή τους συστήματος συντεταγμένων, είναι η αντίστοιχη γωνία, και θ η απόσταση κατά μήκος του άξονα της συστοιχίας). Στην περίπτωση μιας συστοιχίας ισοδύναμων στοιχείων η έκφραση για το μακρινό πεδίο γίνεται:

$$\vec{E}(r, \theta, \varphi) = \frac{e^{-jk r}}{r} \cdot \vec{e}(\theta, \varphi) \sum_{n=0}^{N-1} I_n \cdot e^{jk nd \cos \theta} \quad (4)$$

Το άθροισμα στην εξίσωση (4) είναι ο παράγοντας συστοιχίας ο οποίος είναι ανεξάρτητος τόσο από τον τύπο στοιχείου όσο και από την απόσταση από την κεραία. Εξαρτάται μόνο από την γεωμετρία της συστοιχίας και τη διέγερση του στοιχείου. Έτσι το συνολικό μακρινό πεδίο δίνεται από το γινόμενο του παράγοντα στοιχείου με τον παράγοντα συστοιχίας. Ο παράγοντας συστοιχίας μπορεί να νοηθεί ως το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας που αποτελείται από ισοτροπικά στοιχεία.

Καθώς το διάγραμμα ακτινοβολίας δίνεται μοναδικώς από τις παραμέτρους διέγερσης, μία προσεκτική επιλογή μπορεί να μας δώσει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ας θεωρήσουμε, για παράδειγμα, ότι επιθυμούμε να στρέψουμε τον κύριο λοβό της κεραίας προς μία διεύθυνση φ . Επομένως, θέλουμε τα σήματα μακρινού πεδίου από όλα τα στοιχεία να προστεθούν σε φάση στην επιθυμητή κατεύθυνση. Η επόμενη εικόνα δείχνει τι σημαίνει αυτό.

Αν στο στοιχείο 0 δοθεί ως αναφορά η γωνία φάσης μηδέν, τότε η γωνία φάσης του στοιχείου αριθμός 1 πρέπει να ολισθήσει (σε αυτή την περίπτωση αρνητικά) κατά μία τιμή a , όπου a είναι η κυματική σταθερά. Ας ονομάσουμε αυτή τη γωνία a . Έτσι το στοιχείο αριθμός 2 πρέπει να ολισθήσει κατά $2a$, το στοιχείο 3 πρέπει να ολισθήσει κατά $3a$, και ούτω καθεξής. Για να έχουμε μέγιστο κέρδος στη διεύθυνση φ , πρέπει τα πλάτη όλων των στοιχείων να είναι ίσα. Αυτό το παράδειγμα καλείται ομοιόμορφη διέγερση.

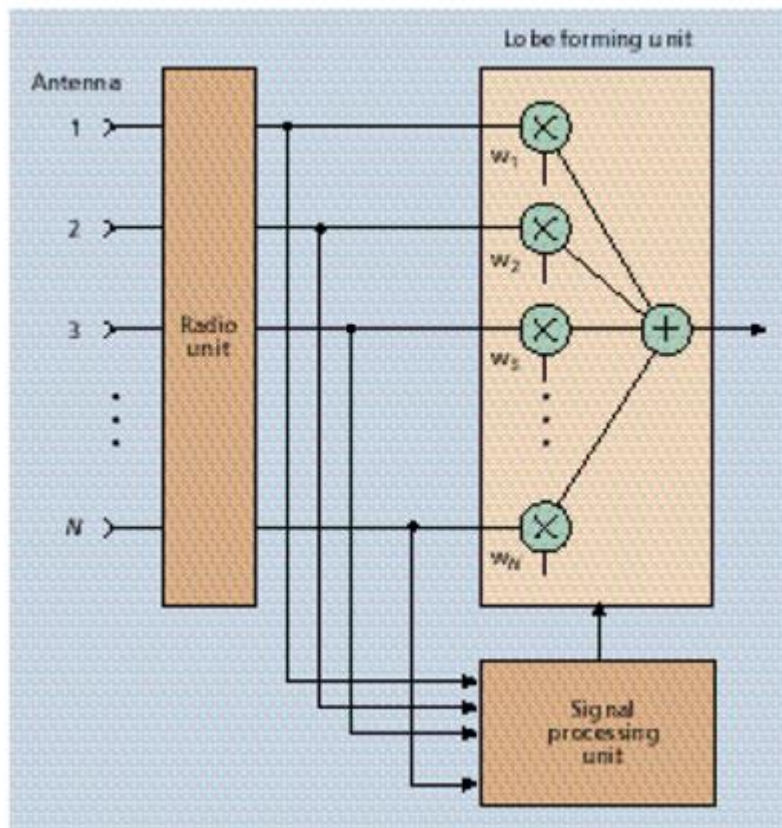
Ένα μειονέκτημα της γραμμικής συστοιχίας είναι η μπρος-πίσω αμφιβολία (front back ambiguity). Ένας καθρέφτης του διαγράμματος κεραίας θα εμφανιστεί γύρω από τον άξονά της π.χ. στην διεύθυνση $-\varphi$ (). Συνήθως θέλουμε να υπάρχει μόνο ένας κύριος λοβός και αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας κατευθυντικά στοιχεία. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι για αποκλίνοντες γωνίες, το κέρδος μειώνεται και το πλάτος του κυρίως λοβού αυξάνεται, επειδή η απόσταση μεταξύ των στοιχείων φαίνεται μικρότερη στη μέγιστη διεύθυνση του κυρίως λοβού (φαινόμενη απόσταση). Πρακτικά, η γραμμική συστοιχία είναι χρήσιμη μόνο σε έναν τομέα των 120ο το πολύ.

Η χρήση της ομοιόμορφης διέγερσης δίνει το περισσότερο κέρδος αλλά επίσης και το υψηλότερο επίπεδο πλευρικών λοβών (SLL) της τάξεως των -3,2 dB. Από την έκφραση του παράγοντα συστοιχίας φαίνεται ότι το μακρινό πεδίο δίνεται από τον μετασχηματισμό Fourier του ρεύματος που διανέμεται κατά μήκος της συστοιχίας. Έτσι, το πλάτος του κυρίως λοβού και του διανεμόμενου ρεύματος είναι αντίστροφα. Η χρήση μη ομοιόμορφης διέγερσης με μια εξασθένιση πλάτους προς το τέλος της συστοιχίας έχει σαν αποτέλεσμα τόσο έναν ευρύτερο κυρίως λοβό όσο και ένα χαμηλότερο SLL.

Μέχρι τώρα θεωρήσαμε ότι τα διαγράμματα των στοιχείων είναι όλα παρόμοια και «τέλεια». Σε μια πραγματική στοιχειοκεραία δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο. Τα διάφορα στοιχεία της κεραίας θα έχουν στην πραγματικότητα ελαφρώς διαφορετικά διαγράμματα. Επιπροσθέτως όταν τοποθετούνται αρκετά στοιχεία κοντά το ένα στο άλλο (τυπικά λιγότερο από $\lambda/2$) τότε επηρεάζουν το ένα το άλλο. Αυτά τα δύο προκαλούν αλλαγές τόσο στα διαγράμματα των στοιχείων όσο και στη προσαρμογή της σύνθετης αντιστάσεως. Αυτό σημαίνει ότι η πραγματική απόδοση της συστοιχίας θα είναι κάπως υποβαθμισμένη.

3.3 Ο Δέκτης μιας Ευφυούς στοιχειοκεραίας

Το σχήμα που ακολουθεί δείχνει τα στοιχεία του τμήματος λήψεως μιας ευφυούς κεραίας. Η στοιχειοκεραία αποτελείται από N στοιχεία. Τα N σήματα συνδυάζονται σε ένα, το οποίο είναι η είσοδος στον υπόλοιπο δέκτη (αποκωδικοποίηση καναλιού κτλ).

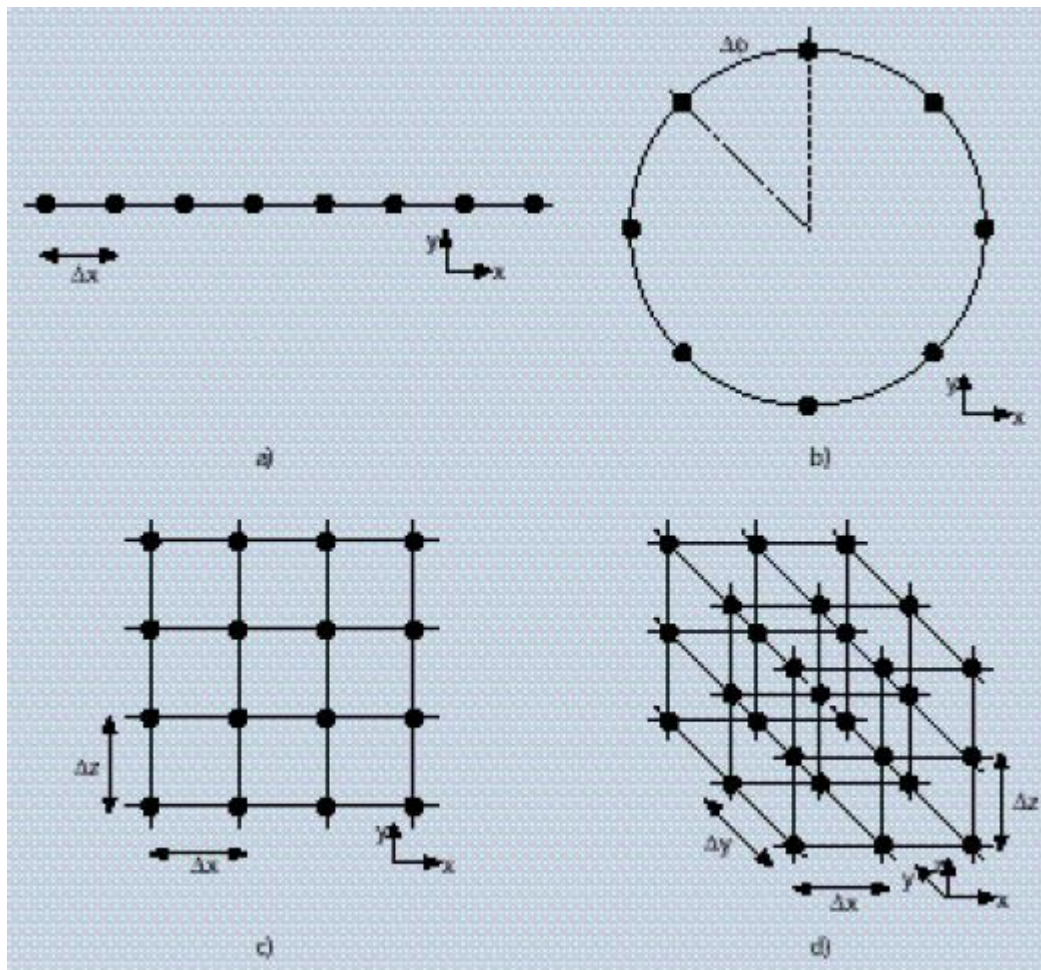


Εικόνα 3.1: Δέκτης Ευφούς Στοιχειοκεραίας

Όπως φαίνεται στην εικόνα το τμήμα λήψης της ευφούς κεραίας αποτελείται από τέσσερις μονάδες. Επιπρόσθετα με την κεραία, περιλαμβάνει μια ράδιο-μονάδα, μια μονάδα σχηματισμού λοβών και μια μονάδα επεξεργασίας σήματος (Lehne 2019).

3.3.1 Η κεραία

Η συστοιχία συχνά αποτελείται από έναν σχετικά μικρό αριθμό στοιχείων έτσι ώστε να αποφευχθεί μη αναγκαία πολυπλοκότητα στην επεξεργασία σήματος. Η εικόνα δείχνει τέσσερα παραδείγματα διαφορετικών γεωμετριών συστοιχίας.



Εικόνα 3.2 Οι διαφορετικές γεωμετρίες συστοιχίας

Οι πρώτες δύο δομές χρησιμοποιούνται για beamforming στην οριζόντια διάσταση (αζιμούθιο) μόνο. Αυτό συνήθως είναι επαρκές για εξωτερικά περιβάλλοντα, τουλάχιστον σε μεγάλες κυψέλες. Το παράδειγμα (a) δείχνει μια μονοδιάστατη γραμμική συστοιχία με ομοιόμορφη απόσταση στοιχείων Δx . Αυτή η δομή μπορεί να κάνει beamforming σε μια αζιμούθια γωνία εντός ενός γωνιακού τομέα. Αυτή, λόγω της μικρής πολυπλοκότητας είναι η πιο κοινή δομή. Το δεύτερο παράδειγμα (b) δείχνει την κάτοψη μιας κυκλικής συστοιχίας με γωνιακή απόσταση στοιχείων $\Delta\theta$. Αυτή η δομή μπορεί να κάνει beamforming σε όλες τις αζιμούθιες γωνίες. Οι δύο τελευταίες δομές χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση beamforming σε δύο διαστάσεις, τόσο στις αζιμούθιες όσο και στις κατακόρυφες γωνίες. Αυτό μπορεί να είναι επιθυμητό για εσωτερικούς χώρους ή για πυκνές αστικές περιοχές. Η εικόνα (c) είναι η μπροστινή άποψη μιας δύο διαστάσεων γραμμικής συστοιχίας με οριζόντια απόσταση στοιχείων Δx και κάθετη απόσταση στοιχείων Δz . Αυτή η δομή πραγματοποιεί beamforming σε μια στερεά γωνία (solid angle). Για να πραγματοποιηθεί beamforming σε όλο τον χώρο και σε όλες τις στερεές γωνίες, απαιτείται κάποιου είδους σφαιρικής ή κυβικής δομής. Το σχήμα (d) δείχνει ένα παράδειγμα κυβικής δομής με αποστάσεις στοιχείων Δx , Δy , Δz .

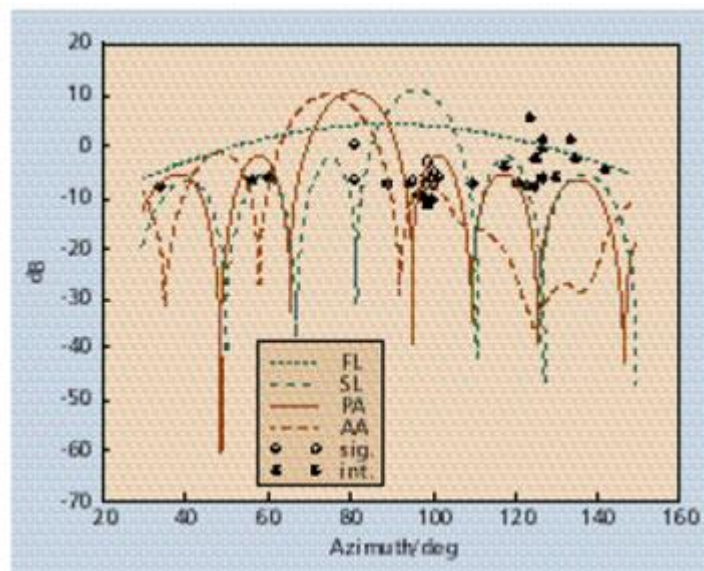
3.3.2 Η ραδιομονάδα και η μονάδα επεξεργασίας σήματος

Η ραδιο-μονάδα αποτελείται από αλυσίδες μετατροπής προς τα κάτω (down-conversion chains) και πολύπλοκους μετατροπείς αναλογικού προς ψηφιακό (A/D converters). Πρέπει να υπάρχουν N αλυσίδες μετατροπής προς τα κάτω, μία για καθένα από τα στοιχεία της συστοιχίας.

Η μονάδα επεξεργασίας σήματος, βασιζόμενη στο ληφθέν σήμα, υπολογίζει τα μιγαδικά βάρη w_1 - w_N με τα οποία το ληφθέν, από το καθένα από τα στοιχεία της κεραίας, σήμα πολλαπλασιάζεται. Αυτά τα βάρη θα αποφασίσουν για το διάγραμμα κεραίας στην διεύθυνση της άνω ζεύξης. Τα βάρη μπορούν να βελτιστοποιηθούν με δύο κύρια κριτήρια : με μεγιστοποίηση του ληφθέντος, από τον επιθυμητό χρήστη, σήματος (π.χ. Switched Lobe ή Phased Array) ή με μεγιστοποίηση του SIR καταπιέζοντας το σήμα που προέρχεται από τις παρεμβάλουσες πηγές (π.χ. Adaptive Array). Θεωρητικά με M στοιχεία κεραίας μπορούν να μηδενιστούν $M-1$ παρεμβολές, αλλά λόγω του προβλήματος της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών ο αριθμός αυτός είναι συνήθως μικρότερος.

Η μέθοδος για τον υπολογισμό των βαρών διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του κριτηρίου βελτιστοποίησης. Όταν χρησιμοποιείται Switched Lobe (SL), ο δέκτης θα ελέγξει όλα τα προκαθορισμένα διανύσματα βάρους (που αντιστοιχούν στους λοβούς) και θα επιλέξει αυτό που δίνει το ισχυρότερο επίπεδο λαμβανόμενου σήματος. Αν χρησιμοποιείται η Phased Array (PA) προσέγγιση, η οποία περιλαμβάνει την κατεύθυνση μιας ακτίνας μέγιστου κέρδους προς το ισχυρότερο σήμα, τότε πρώτα υπολογίζεται η διεύθυνση άφιξης (Direction-of-Arrival, DoA) και στη συνέχεια υπολογίζονται τα βάρη με ομοιόμορφο, με την επιθυμητή γωνία στρέψης, πλάτος και φάση. Υπάρχει ένας αριθμός μεθόδων, με καλό υπόβαθρο για τον υπολογισμό της DoA, όπως οι αλγόριθμοι MUSIC, ESPRIT και SAGE.

Εάν πρέπει να επιτευχθεί μεγιστοποίηση του SIR (περίπτωση AA), τότε το βέλτιστο διάνυσμα βάρους (της διάστασης N) W_{opt} δίνεται από το κυρίαρχο γενικευμένο ιδιοδιάνυσμα του ζεύγους πινάκων $[R_k, Q_k]$ όπου R_k είναι ο $N \times N$ πίνακας συσχέτισης του συνολικού ληφθέντος σήματος και Q_k είναι ο $N \times N$ πίνακας συσχέτισης της συνολικής παρεμβολής. Αυτό ονομάζεται βέλτιστος συνδυασμός. Η επόμενη εικόνα δείχνει ένα παράδειγμα των παραγόμενων διαγραμμάτων κεραίας για PA, SL και AA στην περίπτωση που τόσο το σήμα όσο και η παρεμβολή μετρώνται σε πραγματικό κανάλι. Παρατηρούμε πώς η AA κατευθύνει μηδενικά προς τις ισχυρότερες παρεμβολές. Είναι δυνατές και άλλες τεχνικές όπως για παράδειγμα οι αλγόριθμοι διασποράς διαφορικότητας όπως είναι ο MRMD (Maximum-Ratio in Multiple Dimensions).

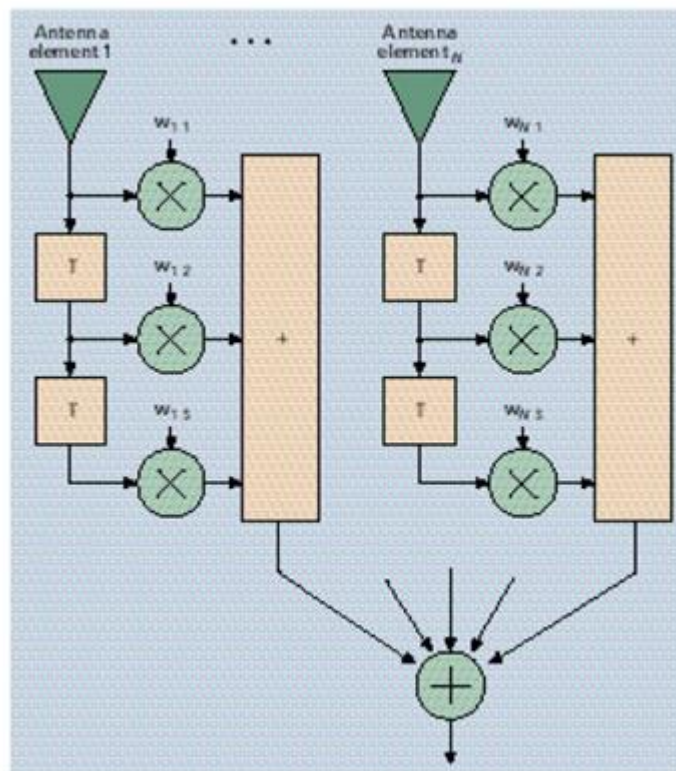


Εικόνα 3.3: Παραγόμενα Διαγράμματα για PA, SL, AA

Για να μπορέσει ο σταθμός βάσης να εκτιμήσει τους ραδιο-διαύλους, χρειάζεται συνήθως μια αναφορά ή μια εκπαιδευτική αλληλουχία π.χ. πρέπει να μεταδίδεται περιοδικά μία γνωστή αλληλουχία bit. Οι μέθοδοι που μεγιστοποιούν τον SIR απαιτούν γνώση της άμεσης απόκρισης διαύλου τόσο από τον επιθυμητό χρήστη όσο και από όλες τις πηγές παρεμβολών, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η εκπαιδευτική αλληλουχία πρέπει να είναι μοναδική για κάθε χρήστη (Agius 2010).

3.3.3 Μονάδα Σχηματισμού Λοβών

Ο πραγματικός υπολογισμός του βάρους του λαμβανόμενου, από τα καθένα από τα στοιχεία της συστοιχίας, σήματος πραγματοποιείται στη μονάδα σχηματισμού λοβών. Στην πιο προηγμένη περίπτωση αυτή η μονάδα είναι μία ενσωμάτωση του ισοσταθμιστή καναλιού/δέκτη RAKE και της ευφυούς κεραίας. Σ' αυτή την περίπτωση χρειάζονται $N \times D$ βάρη, όπου D είναι ο αριθμός των περιόδων συμβόλων (βάθος) στον ισοσταθμιστή ή ο αριθμός των άκρων (fingers) στον δέκτη RAKE. Αυτό ονομάζεται spatio-temporal filter, επειδή αφαιρεί τα μη επιθυμητά συστατικά του σήματος και διατηρεί τα επιθυμητά τόσο στην περιοχή του χώρου όσο και σ' αυτή του χρόνου. Τέτοια μονάδα φαίνεται σχηματικά στην εικόνα.



Εικόνα 3.4 Ενσωμάτωση RAKE και ευφυούς κεραίας

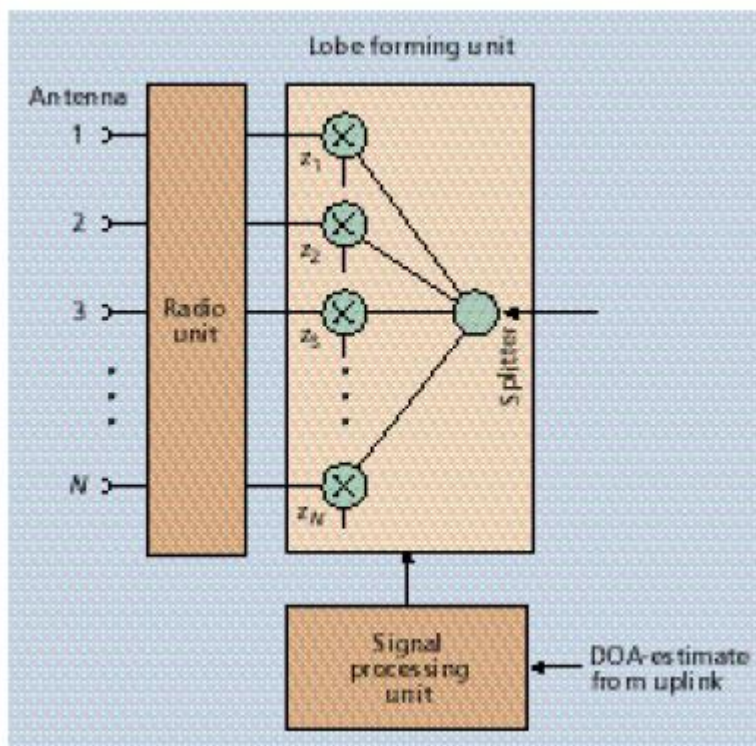
Σε αυτό το παράδειγμα ο αριθμός των βαρών είναι $N \times 3$ πράγμα το οποίο δείχνει ότι το βάθος του ισοσταθμιστή είναι 3. Ο χρόνος μεταξύ των λήψεων κάθε στοιχείου κεραίας είναι T . Σε έναν δέκτη RAKE η χρονική καθυστέρηση μεταξύ των λήψεων δεν είναι ομοιόμορφη.

Όταν ο σχηματισμός λοβού γίνεται ψηφιακά (μετά από A/D) τότε οι μονάδες σχηματισμού λοβών και επεξεργασίες σήματος είναι συνήθως ενσωματωμένες στην ίδια μονάδα, που τότε ονομάζεται DSP. Ο διαχωρισμός στο σχήμα έγινε για να διευκρινιστεί αυτή η λειτουργία. Είναι επίσης πιθανή η πραγματοποίηση της λειτουργίας σχηματισμού λοβών στο υλικό σε ραδιοσυχνότητα (RF) ή σε μεσαία συχνότητα (IF).

Οι τρεις προαναφερθείσες μέθοδοι (SL, PA και AA) διαφέρουν σε πολυπλοκότητα και υπολογιστικό φορτίο. Σε γενικές γραμμές η SL είναι λιγότερο πολύπλοκη από την PA, η οποία με τη σειρά της είναι λιγότερο πολύπλοκη από την AA. Οι συνθήκες που επηρεάζουν είναι, για παράδειγμα, η απαραίτητη ακρίβεια και η επίδοση σε όρους ισχύος ή C/I κέρδους. Επίσης υπάρχει διαφορά και ανάλογα με τη μέθοδο πρόσβασης στον ραδιοδιάλογο (TDMA ή CDMA) (Liberti 2009).

3.4 Ο Πομπός

Το τμήμα εκπομπής μιας ευφυούς κεραίας είναι σχηματικά παρόμοιο με το τμήμα λήψεως. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα. Το σήμα χωρίζεται σε N παρακλάδια τα οποία στη συνέχεια βαρύνονται από τα μιγαδικά βάρη z_1 - z_N στη μονάδα σχηματισμού λοβών. Τα βάρη που καθορίζουν το διάγραμμα ακτινοβολίας στην κατεύθυνση της κάτω ζεύξης, υπολογίζονται από τη μονάδα επεξεργασίας σήματος. Η ράδιο-μονάδα αποτελείται από ψηφιακό-αναλογικούς μετατροπείς (D/A converters) και αλυσίδες μετατροπών προς τα άνω. Πρακτικά, κάποια συστατικά, όπως οι κεραίες αυτές καθ' αυτές και η μονάδα DSP, θα είναι φυσικά τα ίδια όπως και στη λήψη.



Εικόνα 3.5 Ο Πομπός μιας ευφυούς στοιχειοκεραίας

Η πρωτεύουσα διαφορά μεταξύ της άνω και της κάτω ζεύξης είναι ότι, εφόσον δεν υπάρχουν ευφυείς κεραίες στο τερματικό (κινητός σταθμός), δεν είναι διαθέσιμη στην κάτω ζεύξη η χωρική απόκριση διαύλου (spatial channel response). Σε ένα σύστημα αμφίδρομης διαίρεσης χρόνου (Time Division Duplex TDD) ο κινητός σταθμός και ο σταθμός βάσης χρησιμοποιούν την ίδια φέρουσα

συχνότητα που χωρίζεται μόνο στο χρόνο. Σε αυτή την περίπτωση τα βάρη που υπολογίζονται στην άνω ζεύξη θα είναι βέλτιστα και στην κάτω ζεύξη μόνο αν το κανάλι δεν αλλάξει μεταξύ της μετάδοσης άνω ζεύξης και της μετάδοσης κάτω ζεύξης. Η μη αλλαγή καναλιού δεν μπορεί να θεωρηθεί σαν η γενική περίπτωση, τουλάχιστον σε συστήματα όπου οι χρήστες αναμένεται να κινούνται σε υψηλές ταχύτητες. Αν χρησιμοποιείται αμφίδρομη διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Duplex FDD), τότε η άνω και η κάτω ζεύξη χωρίζονται σε συχνότητα. Σε αυτή την περίπτωση τα βέλτιστα βάρη δεν θα είναι γενικά τα ίδια λόγω της εξάρτησης της απόκρισης του διαύλου από την συχνότητα.

Επομένως το βέλτιστο beamforming (πχ AA) στην κάτω ζεύξη είναι δύσκολο και η τεχνική που προτείνεται συχνότερα είναι η χρήση της γεωμετρική προσεγγίσεως της εκτίμησης της διεύθυνσης άφιξης (DoA). Η υπόθεση είναι κατευθυντική αμοιβαιότητα, δηλαδή, η διεύθυνση από την οποία καταφθάνει το σήμα κατά την άνω ζεύξη, είναι η διεύθυνση προς την οποία το σήμα θα πρέπει να εκπεμφθεί κατά την κάτω ζεύξη, για να φτάσει στον χρήστη. Η υπόθεση αυτή έχει ενδυναμωθεί από πρόσφατα πειραματικά αποτελέσματα. Η στρατηγική που χρησιμοποιείται από τον σταθμό βάσης είναι η εκτίμηση του DoA της κατευθύνσεως (ή των κατευθύνσεων από τις οποίες λαμβάνεται το κυρίως μέρος του σήματος χρήστη. Αυτή η κατεύθυνση χρησιμοποιείται στην κάτω ζεύξη επιλέγοντας τα βάρη $z1-zN$ έτσι ώστε το διάγραμμα ακτινοβολίας να είναι ένας λοβός (ή λοβοί) κατευθυνόμενος προς τον επιθυμητό χρήστη. Αυτή η μέθοδος είναι παρόμοια με την PA. Επιπροσθέτως είναι δυνατή η τοποθέτηση μηδενικών στην κατεύθυνση άλλων χρηστών έτσι ώστε η παρεμβολή από αυτούς να ελαχιστοποιηθεί. Λόγω εξασθένισης στα διαφορετικά μονοπάτια σήματος έχει προταθεί να γίνεται η επιλογή της διεύθυνσεως κάτω ζεύξης βασιζόμενη στην εύρεση μιας μέσης τιμής του διαύλου άνω ζεύξης κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι για τα πιο πάνω έχει υποτεθεί ότι οι παρεμβολές που παρατηρούνται από τον σταθμό βάσης είναι κινητοί σταθμοί, και ότι οι παρεμβολές που παρατηρούνται από τους κινητούς σταθμούς είναι σταθμοί βάσης. Αυτό σημαίνει ότι όταν ο σταθμός βάσης κατά την εκπομπή τοποθετεί μηδενικά στην διεύθυνση προς άλλους κινητούς σταθμούς εκτός του επιθυμητού, θα ελαττώσει την παρεμβολή από αυτά τα κινητά. Αν παρ' όλα αυτά οι παρεμβολές που παρατηρούνται από τα κινητά είναι άλλα κινητά, όπως για παράδειγμα συμβαίνει στο UTRA TDD θα υπάρχει ένας πιο θεμελιώδης περιορισμός στην πιθανότητα μείωσης της παρεμβολής στο κινητό.

3.5 Τεχνικές Προκλήσεις Ευφυών Κεραιών

Για να φτάσουν οι ευφυείς κεραιές το πλήρες δυναμικό τους μένει να λυθεί ένας αριθμός τεχνικών προκλήσεων. Αυτές αφορούν τόσο την υλοποίηση modem όσο και τους αλγορίθμους για beamforming.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το beamforming στην κάτω ζεύξη γίνεται δυσκολότερο λόγω της έλλειψης γνώσης σχετικά με την άμεση απόκριση καναλιού. Συχνά χρησιμοποιείται η στρατηγική της κατευθύνσεως του(των) λοβού(λοβών) στην διεύθυνση της DoA του σήματος. Όμως η στρατηγική αυτή καθιστά την απόδοση της κάτω ζεύξης εξαρτημένη κατά πολύ από τον ράδιο-διάλογο και τον ρυθμό εναλλαγής αυτού. Αν το κανάλι υποφέρει από πολύ γωνιακή διασπορά, δηλαδή το σήμα λαμβάνεται από πολλές διευθύνσεις, το να κατευθυνθεί ένας λοβός στη διεύθυνση της μέγιστης λήψης είναι μακράν του βέλτιστου σε όρους μεγιστοποίησης μεταφοράς ισχύος στον χρήστη. Η κατεύθυνση μηδενικών προς άλλους χρήστες για την ελαχιστοποίηση της παρεμβολής από αυτούς είναι δύσκολη για τον ίδιο λόγο. Όταν το κανάλι αλλάζει ραγδαία, όπως συμβαίνει σε ταχέως κινούμενα κινητά και σε πολύ πυκνά, πολύπλοκα περιβάλλοντα, τότε οι δυσκολίες στην κάτω ζεύξη επιδεινώνονται.

Άλλος ένας κρίσιμος παράγοντας είναι η γραμμικότητα στις αλυσίδες λήψεως και εκπομπής. Οι συναρτήσεις μεταφοράς για όλες τις προς άνω και προς κάτω αλυσίδες μετατροπής πρέπει να είναι απολύτως γνωστές, έτσι ώστε το beamforming να είναι απολύτως ακριβές. Παρ' όλα αυτά οι αποκρίσεις

μεταβάλλονται ανάλογα με το χρόνο και τη θερμοκρασία, καθώς αναμιγνύονται ενεργά στοιχεία. Αυτό σημαίνει ότι για να λειτουργήσει κανονικά μια ευφυής κεραία θα πρέπει να γίνεται συχνή online ρύθμιση των παραμέτρων της.

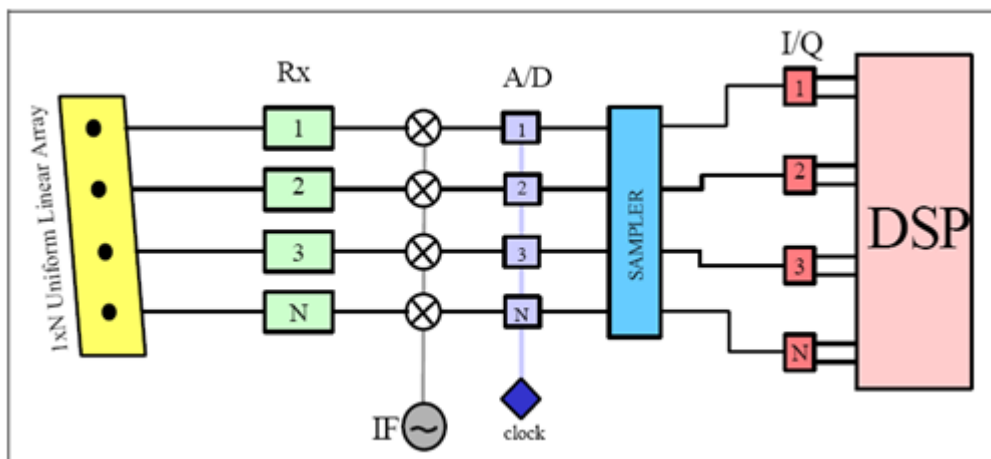
Για να πραγματοποιηθεί η παρακολούθηση του κέρδους και της εναλλαγής φάσης κάθε καναλιού μεταξύ επί-γραμμής ρυθμίσεων μετρήσεων, είναι χρήσιμος ο εξοπλισμός της κεραίας με ένα calibration injection σύστημα. Αν οι μετρήσεις είναι συχνές, μπορεί να παρακολουθηθεί η αλλαγή στην απόκριση διαύλου, επιμηκύνοντας με αυτό τον τρόπο την εγκυρότητα των επί-γραμμής ρυθμίσεων μετρήσεων (Marius 2010).

Οι απαιτήσεις για γραμμικότητα στις αλυσίδες του πομποδέκτη μπορούν να χαλαρώσουν αν πραγματοποιηθεί η A/D (και D/A) μετατροπή όσο πιο κοντά στο στοιχείο της συστοιχίας γίνεται, δηλαδή με δειγματοληψία στην RF ή στην IF. Αυτό απαιτεί πολύ γρήγορο και εξειδικευμένο υλικό.

Η πολυπλοκότητα της ευφυούς κεραίας είναι μια μεγάλη πρόκληση καθώς οι πιο προηγμένες υλοποιήσεις περιλαμβάνουν ταυτόχρονη μεγιστοποίηση του χρήσιμου σήματος και μηδενισμό των πηγών παρεμβολής. Επιπροσθέτως αυτό το beamforming πρέπει να επιτελείται για κάθε χρήστη που επικοινωνεί μέσω του σταθμού βάσης. Ακόμα και με τις πανίσχυρες μονάδες επεξεργασίας σήματος, που είναι διαθέσιμες σήμερα, η πραγματοποίηση αυτού σε πραγματικό χρόνο είναι μια μεγάλη πρόκληση.

4. Ο Αλγόριθμος Angle of Arrival (Γωνία Άφιξης-AoA)

Η κατεύθυνση του επιθυμητού στόχου σε δύο διαστάσεις (2D) μπορεί να βρεθεί από την τομή δύο γραμμών βάσης, όπου η κάθε μία σχηματίζεται ακτινωτά από έναν OP (δέκτη) προς το στόχο (συνεπώς απαιτούνται τουλάχιστον δύο OP's). Για να δοθεί μία πολύ ακριβής τοποθεσία απαιτούνται πολλά ζευγάρια σταθμών βάσης και πολύ κατευθυντικές ακτίνες. Το σχηματικό διάγραμμα ενός σταθμού παρατήρησης AoA φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί. Αποτελείται από τρία κύρια μέρη : τη στοιχειοκεραία φάσης, το RF/IF μέρος και την DSP όπου εκεί βρίσκεται ο αλγόριθμος εκτίμησης κατεύθυνσης.



Εικόνα 4.1 Σχηματικό Διάγραμμα ενός Σταθμού Παρατήρησης AoA

Η πιο ευθύς προσέγγιση για την εκτίμηση AoA είναι η παρεμβολομετρία φάσης (phase interferometry). Ένα παρεμβολόμετρο φάσης μετράει ευθέως τη διαφορά φάσης μεταξύ των σημάτων που λαμβάνονται σε πολλαπλά ζευγάρια στοιχείων της κεραίας και τη μετατρέπει σε μία εκτίμηση AoA. Αυτή η προσέγγιση λειτουργεί αρκετά καλά για υψηλό SNR, αλλά θα αποτύχει για δυνατή διασυμβολική παρεμβολή και/ή για διάδοση πολλαπλών διαδρομών.

Η δεύτερη μέθοδος εκτίμησης AoA είναι ο σχηματισμός ακτινών. Για σήματα ραδιοσυχνότητας, η AoA υλοποιείται με ηλεκτρονική (ή μηχανική) στρέψη του κυρίως λοβού μιας προσαρμόσιμης στοιχειοκεραίας φάσης προς την κατεύθυνση του εισερχόμενου κινητού σήματος. Τυπικά, δύο στοιχειοκεραίες τοποθετημένες κοντά η μία με την άλλη χρησιμοποιούνται για να προσεγγιστεί η ακριβής κατεύθυνση της κορυφής της εισερχόμενης ενέργειας ώστε να αποδοθεί υψηλότερης ανάλυσης μέτρηση. Η ισχύς εξόδου του σχηματιστή ακτινών μετράται ενώ στρέφεται η κύρια ακτίνα της στοιχειοκεραίας πάνω στο γωνιακό πεδίο που ενδιαφερόμαστε. Αυτό παράγει μία ισχύ διανομής ενάντια στην AoA. Αυτή η μέθοδος υποφέρει σημαντικά από διάδοση πολλαπλών διαδρομών.

Μέθοδοι που δουλεύουν καλά σε διάδοση πολλαπλών διαδρομών μπορούν να προέλθουν χρησιμοποιώντας το ML (maximum likelihood) πλαίσιο. Σε περιβάλλοντα πολλαπλών διαδρομών η ML θα εκτιμήσει την AoA της κάθε διαδρομής. Ωστόσο, η εφαρμογή τέτοιων μεθόδων απαιτεί σύνθετη και πολυδιάστατη αναζήτηση. Ο βαθμός της πολυδιάστατης αυτής αναζήτησης είναι ίσος με τον συνολικό αριθμό των διαδρομών που ακολουθούν όλα τα εισερχόμενα σήματα. Αυτή η αναζήτηση είναι ακόμα πιο πολύπλοκη διότι ο αριθμός των διαδρομών δεν είναι γνωστός από πριν αλλά πρέπει να εκτιμηθεί.

Άλλη κλάση μεθόδων που δουλεύει καλά σε διάδοση πολλαπλών διαδρομών μπορεί να προκύψει συνθέτοντας χωρική εξομάλυνση με αλγόριθμους υποδιαστήματος (π.χ. MUSIC, ESPRIT). Γενικά αυτές οι μέθοδοι αποτυγχάνουν σε διάδοση πολλαπλών διαδρομών αλλά η χρησιμοποίηση ενός χωρικά εξομαλυσμένου πίνακα συνδιασποράς στη θέση του αντίστοιχου συμβατικού τους επιτρέπει να εφαρμοστούν με επιτυχία. Οι διαφορετικοί αλγόριθμοι επιδεικνύουν διαφορετικούς συνδυασμούς μεταξύ ανάλυσης, σταθερότητας και υπολογιστικής πολυπλοκότητας (JianHua 2009).

4.1 Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου AoA

Το πλεονέκτημα της μεθόδου AoA είναι ότι χρειάζονται μόλις μόνο δύο δέκτες για να εντοπισθεί ένας στόχος (εκτός και αν οι δύο δέκτες και ο στόχος βρίσκονται σε μια ευθεία) και ότι δεν χρειάζεται να υπάρξει συγχρονισμός μεταξύ των δεκτών.

Τα μειονεκτήματα είναι ότι απαιτεί σχετικά μεγάλο και πολύπλοκο υλικό και ότι η εκτίμηση θέσης υποβαθμίζεται καθώς η απόσταση μεταξύ του στόχου και του δέκτη αυξάνεται.

Παρακάτω παρατίθενται μερικές ακόμα παρατηρήσεις :

- Ο Rx χρειάζεται ρύθμιση για θερμοκρασία και mismatches
- Οι AoA μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συστήματα ευρείας ζώνης για την ανοσία στη διάδοση πολλαπλών διαδρομών
- Δύο κοντινά τοποθετημένες στοιχειοκεραίες χρησιμοποιούνται για να προσεγγιστεί η ακριβής κατεύθυνση της κορυφής της ισχύος του εισερχόμενου σήματος δίνοντας υψηλότερη ανάλυση
- Τα AoA στοιχεία της στοιχειοκεραίας θα πρέπει να τοποθετούνται σε απόσταση $\lambda/2$ το ένα με το άλλο σε μοναδική συχνότητα
- Η γωνιακή ανάλυση είναι ανάλογη του $1/L$ όπου L είναι το άνοιγμα της στοιχειοκεραίας
- Η ακρίβεια εξαρτάται από τον SNR, το χρόνο ολοκλήρωσης, τον αριθμό των κεραιών, τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται, το υλικό και τη ρύθμιση της στοιχειοκεραίας

- Τα AoA στενής ζώνης εξαρτώνται από το εύρος ζώνης σήματος, τα στοιχεία της κεραίας και το υλικό του Rx

4.2 Οι Αλγόριθμοι Εύρεσης Διεύθυνσης

Πολλοί τύποι αλγορίθμων έχουν προταθεί και μελετηθεί ώστε να βρεθεί η DoA σε ένα AoA σύστημα. Οι πλέον γνωστοί περιγράφονται παρακάτω (Satayarak 2018).

4.2.1 Φασματική Εκτίμηση

Αυτές οι μέθοδοι εκτιμούν την AoA υπολογίζοντας το χωρικό φάσμα και καθορίζοντας έπειτα τα τοπικά μέγιστα. Μία από τις πρώιμες μεθόδους φασματικής ανάλυσης είναι η μέθοδος Bartlett όπου ένα ορθογώνιο παράθυρο ομοιόμορφου βάρους εφαρμόζεται στα με χρονική σειρά δεδομένα για να αναλυθεί. Η διαδικασία είναι παρόμοια με αυτή της μηχανικής στρέψης της στοιχειοκεραίας προς μια κατεύθυνση και τη μέτρηση της ισχύος εξόδου. Λόγω των πλευρικών λοβών που προκύπτουν, η ισχύς εξόδου δεν εξαρτάται μόνο από την κατεύθυνση προς την οποία η στοιχειοκεραία στρέφεται αλλά και από τις κατευθύνσεις που δείχνουν οι πλευρικοί λοβοί. Γίνεται φανερό ότι η μέθοδος αυτή υποφέρει έντονα από διάδοση πολλαπλών διαδρομών.

4.2.2 Ο MVDR εκτιμητής

Αυτή είναι η ML μέθοδος της εκτίμησης του φάσματος η οποία βρίσκει την ML εκτίμηση της εισερχόμενης ισχύος από μία σημειακή πηγή σε κατεύθυνση u υποθέτοντας όλες τις άλλες πηγές ως παρεμβολή. Στην beamforming βιβλιογραφία είναι γνωστή ως MVDR όπως επίσης και ως ο βέλτιστος beamformer αφού, ελλείψει λαθών, μεγιστοποιεί το εξερχόμενο SNR. Για ένα πρόβλημα εκτίμησης της εύρεσης κατεύθυνσης η μέθοδος βρίσκει την εκτίμηση ML της κατεύθυνσης αντί της ισχύος.

Η μέθοδος χρησιμοποιεί τα βάρη των στοιχειοκεραίων, τα οποία αποκτούνται ελαχιστοποιώντας τη μέση ισχύ εξόδου η οποία περιορίζεται στην κατεύθυνση που κοιτάμε προς τη μονάδα. Αυτή η μέθοδος έχει καλύτερες ιδιότητες ανάλυσης από τη μέθοδο Bartlett (Verhaevert 2014).

4.2.3 Μέθοδος γραμμικής πρόβλεψης

Αυτή η μέθοδος εκτιμά την έξοδο ενός αισθητήρα χρησιμοποιώντας γραμμικούς συνδυασμούς των εναπομεινάντων αισθητήρων εξόδων και ελαχιστοποιεί το προβλεπόμενο μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ της εκτιμώμενης και της πραγματικής εξόδου. Έτσι λοιπόν, αποκτά τα βάρη των στοιχειοκεραίων ελαχιστοποιώντας την ισχύ εξόδου της υπαγόμενης στοιχειοκεραίας με τον περιορισμό ότι τα βάρη στον επιλεγμένο αισθητήρα είναι μοναδιαία. Δεν υπάρχει παρά ταύτα ένα κριτήριο για την σωστή επιλογή αυτού του στοιχείου. Η επιλογή αυτή επηρεάζει την ικανότητα ανάλυσης και την πόλωση στην εκτίμηση και αυτά τα αποτελέσματα εξαρτώνται από τον SNR και τον διαχωρισμό των κατευθυντικών πηγών. Η μέθοδος γραμμικής πρόβλεψης δουλεύει καλά σε ένα σχετικά χαμηλού SNR περιβάλλον και είναι ένας καλός συμβιβασμός σε περιπτώσεις που οι πηγές είναι περίπου ίσης δύναμης και είναι σχετικά σύμφωνες.

4.2.4 Μέθοδοι ιδιοκατασκευής (eigenstructure)

Αυτές οι μέθοδοι στηρίζονται στις ακόλουθες ιδιότητες του πίνακα συσχετισμού (R) στοιχειοκεραίας. Πρώτον, το διάστημα που εκτείνεται από τα ιδιοδιανύσματα του μπορεί να διαχωριστεί σε δύο υποδιαστήματα, το υποδιάστημα σήματος και το υποδιάστημα θορύβου. Δεύτερον, τα διανύσματα στρέψης που αντιστοιχούν στις κατευθυντικές πηγές είναι ορθογώνια προς το υποδιάστημα θορύβου. Καθώς το υποδιάστημα θορύβου είναι ορθογώνιο προς αυτό του σήματος, αυτά τα διανύσματα περιέχονται στο υποδιάστημα σήματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι η έκταση του υποδιαστήματος θορύβου εξαρτάται από τα ιδιοδιανύσματα που σχετίζονται με τις μικρότερες ιδιοτιμές του πίνακα συσχετισμού και η έκταση του υποδιαστήματος σήματος εξαρτάται από τα ιδιοδιανύσματα που σχετίζονται με τις μεγαλύτερες τιμές.

Κατά κύριο λόγο αυτές οι μέθοδοι εύρεσης διευθύνσεων, όπως αυτή των διανυσμάτων στρέψης που σχετίζονται με αυτές τις διευθύνσεις, είναι ορθογώνιες προς το υποδιάστημα θορύβου και περιέχονται στο υποδιάστημα σήματος. Η εύρεση συνήθως υλοποιείται σε δύο βήματα. Αρχικά βρίσκεται το διάνυσμα βάρους που περιέχεται στον θόρυβο. Έπειτα αναζητούνται διευθύνσεις έτσι ώστε τα διανύσματα στρέψης που σχετίζονται με αυτές να είναι ορθογώνια προς αυτά τα διανύσματα βάρους. Οι διευθύνσεις των πηγών που αντιστοιχούν στα τοπικά ελάχιστα της συνάρτησης $|wH sv|$ όπου w είναι τα βάρη και sv το διάνυσμα στρέψης. Όταν αυτά τα διανύσματα στρέψης δεν είναι επιβεβαιωμένο ότι βρίσκονται στο υποδιάστημα σήματος μπορεί να υπάρχουν περισσότερα ελάχιστα από τον αριθμό των πηγών, και ο διαχωρισμός μεταξύ της πραγματικής διεύθυνσης πηγής και των παρασιτικών ελαχίστων στην $|wH sv|$ γίνεται με μέτρηση της ισχύος σε αυτές τις διευθύνσεις.

Πολλές μέθοδοι ιδιοκατασκευής έχουν προταθεί. Αυτή του Pisarenko έχει καλύτερες ιδιότητες ανάλυσης από τις μεθόδους ελάχιστης διασποράς, μέγιστης εντροπίας και γραμμικής πρόβλεψης. Κάποιες μέθοδοι εφαρμόζονται καλύτερα σε off-line υλοποιήσεις ενώ άλλες είναι πιο χρήσιμες για real-time. Αυτός ο τύπος των μεθόδων μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για θόρυβο βάθους που δεν είναι 'λευκός' αλλά έχει είτε γνωστή είτε άγνωστη διασπορά ή όταν οι πηγές είναι στο κοντινό πεδίο και/ή όταν οι αισθητήρες έχουν άγνωστα μοντέλα κέρδους (Strandell 2018).

4.3 Αλγόριθμοι MUSIC

Η MUSIC μέθοδος είναι μια σχετικά απλή και αποτελεσματική μέθοδος ιδιοκατασκευής DoA με πολλές παραλλαγές. Στη βασική της μορφή είναι επίσης γνωστή ως spectral MUSIC. Η μέθοδος αυτή εκτιμά το υποδιάστημα θορύβου από τα διαθέσιμα δείγματα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με διάσπαση των ιδιοτιμών του πίνακα δεδομένων είτε με διάσπαση των μοναδιαίων τιμών του πίνακα συσχέτισης, με τις στήλες M να είναι τα N στιγμιότυπα ή τα διανύσματα σήματος της στοιχειοκεραίας. Το τελευταίο προτιμάται για αριθμητικά αποτελέσματα.

Όταν το υποδιάστημα θορύβου έχει εκτιμηθεί, γίνεται μια αναζήτηση των M διευθύνσεων ψάχνοντας για διανύσματα στρέψης που είναι ορθογώνια στο υποδιάστημα θορύβου. Εναλλακτικά, μπορεί κάποιος να χρησιμοποιήσει το υποδιάστημα σήματος μόνο για να βρει διευθύνσεις με διανύσματα στρέψης να εμπεριέχονται σε αυτό το διάστημα.

Στην περίπτωση που έχουμε μία πηγή, καθώς ο αριθμός των στιγμιότυπων αυξάνεται απεριόριστα, η εκτίμηση DoA με τη MUSIC προσεγγίζει ασυμπτωτικά την CRLB (Cramer-Rao Lower Boundary) η οποία καθορίζει το θεωρητικά χαμηλότερο όριο της ακρίβειας εκτίμησης βασισμένη μόνο στο εύρος ζώνης του σήματος, στο χρόνο μετάδοσης και στο SNR του δέκτη σε ένα ζευγάρι κεραίων σε διαφορετικές τοποθεσίες. Για περισσότερες πηγές η CRLB προσεγγίζεται για μεγάλο SNR.

Για μια ομοιόμορφα τοποθετημένη γραμμική στοιχειοκεραία η αναζήτηση για το DoA μπορεί να γίνει βρίσκοντας τις ρίζες των πολυωνύμων. Ο Root MUSIC είναι εφαρμόσιμος όταν μια τέτοια στοιχειοκεραία χρησιμοποιείται. Λύνει ένα πρόβλημα εύρεσης ριζών πολυώνυμου σε αντίθεση με την αναγνώριση και τον εντοπισμό των φασματικών κορυφών χρησιμοποιώντας την spectral MUSIC. Η Root MUSIC έχει αναφερθεί ότι έχει καλύτερη επίδοση από την spectral MUSIC.

Ο Unitary root-MUSIC έχει πιο απλή εφαρμογή από τον root-MUSIC επειδή ο πρώτος εκμεταλλεύεται την ιδιοδιάσπαση ενός πίνακα πραγματικών τιμών. Σε περιπτώσεις με ασυσχέτιστες πηγές σήματος, η ασυμπτωτική απόδοση των Unitary και των συμβατικών root-MUSIC αλγορίθμων είναι παρόμοια. Παρ' όλα αυτά, σε σενάρια συσχετισμένων (ή σύμφωνων) πηγών, η ασυμπτωτική απόδοση του Unitary root-MUSIC δείχνει να είναι καλύτερη από αυτή του συμβατικού root-MUSIC. Η απόδοση αυτή οφείλεται στην χρήση μεθόδων μέσης τιμής. Μερικές φορές οι μέθοδοι μέσης τιμής

προκαλούν υποβάθμιση της ασυμπτωτικής απόδοσης των τεχνικών εύρεσης διεύθυνσης. Ο Unitary root-MUSIC δεν υποφέρει από τέτοια υποβάθμιση.

Η μέθοδος Constrained Music εκμεταλλεύεται τη γνώση μας για μια ήδη γνωστή πηγή, με σκοπό τη βελτίωση της εκτίμησης της διεύθυνσης μιας άγνωστης πηγής. Τα περιεχόμενα του επαγόμενου από τις γνωστές πηγές σήματος αφαιρούνται από τον πίνακα δεδομένων και ο πίνακας που προκύπτει χρησιμοποιείται για την εκτίμηση DoA. Αυτή η διαδικασία μειώνει τη διάσταση του υποδιαστήματος σήματος κατά έναν αριθμό ίσο με αυτό των γνωστών πηγών και βελτιώνει την ποιότητα της εκτίμησης, ειδικά όταν οι γνωστές πηγές είναι μεγάλης ισχύος ή συσχετιζόμενες με τις άγνωστες.

Όλοι οι προηγούμενοι αλγόριθμοι MUSIC επεξεργάζονται το λαμβανόμενο στιγμιότυπο από τα στοιχεία του αισθητήρα χωρίς καμία προεργασία, όπως τον σχηματισμό ακτινών, και θεωρούνται ως element-space αλγόριθμοι. Από την άλλη στη μέθοδο beam-space MUSIC τα δεδομένα της στοιχειοκεραίας «περνούν» μέσα από έναν επεξεργαστή σχηματισμού ακτινών, η έξοδος του οποίου μπορεί να θεωρηθεί ως μια ομάδα ακτινών.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η μείωση των απαιτούμενων υπολογισμών, η αυξημένη ανάλυση, η μείωση της ευαισθησίας στα λάθη του συστήματος, η μείωση του κατωφλίου ανάλυσης και η μειωμένη πόλωση κατά την εκτίμηση. Οι space-element αλγόριθμοι έχουν ίσους βαθμούς ελευθερίας με τον αριθμό των στοιχείων της στοιχειοκεραίας, ενώ οι βαθμοί ελευθερίας των beam-space μεθόδων είναι ίσοι με τον αριθμό των σχηματιζόμενων, από το beam-forming φίλτρο, ακτινών. Έτσι λοιπόν, η διαδικασία μειώνει τους βαθμούς ελευθερίας της στοιχειοκεραίας. Φυσιολογικά χρειάζονται $M+1$ βαθμοί ελευθερίας για την επίλυση M πηγών.

Επίσης ένας beam-space-root-MUSIC αλγόριθμος υλοποιήθηκε ο οποίος προσφέρει μειωμένη ανάγκη υπολογισμών συγκρινόμενη με αυτή των element-space αλγορίθμων (Kuchar 2010).

Υπάρχει σημαντική διαφορά ανάμεσα στον Unitary root-MUSIC αλγόριθμο (8.25) και στον δημοφιλή beamspace root-MUSIC αλγόριθμο. Ο τελευταίος αλγόριθμος βασίζεται εξ' ολοκλήρου στην υπόθεση της κεντρικής συστοιχίας (η οποία δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί σε κύριες πρακτικές εφαρμογές), ενώ ο unitary δεν απαιτεί τέτοιες υποθέσεις. Επιπρόσθετα, ο beamspace αλγόριθμος αγνοεί το μιγαδικό μέρος του beamspace πίνακα συνδιασποράς και έτσι αγνοεί κάποιες χρήσιμες πληροφορίες που περιλαμβάνονται στο μιγαδικό του κομμάτι. Τέλος, καθώς ο Unitary root-MUSIC αλγόριθμος είναι αντίστοιχος σε απόδοση με τον FB root-MUSIC, μπορεί να εφαρμοστεί σε σενάρια με πηγές που είναι σύμφωνες ανά ζευγάρια, ενώ ο beamspace root-MUSIC είναι ανεφάρμοστος σε τέτοια σενάρια. Ο Cyclic MUSIC είναι ένας αλγόριθμος εύρεσης κατεύθυνσης επιλεκτικού σήματος ο οποίος εκμεταλλεύεται τη φασματική και τη χωρική συμφωνία του λαμβανόμενου σήματος. Εκμεταλλευόμενος τη χωρική συσχέτιση σε συνεργασία με τον MUSIC, είναι πιθανό να αναλύσει σήματα, που η απόσταση μεταξύ τους είναι μικρότερη από το κατώφλι ανάλυσης, όταν μόνο ένα από αυτά μας ενδιαφέρει (Signal-of-Interest, SOI). Επίσης παρακάμπτει την απαίτηση πως ο συνολικός αριθμός των σημάτων που επενεργούν σε μια στοιχειοκεραία (συμπεριλαμβανοντας το SOI και την παρεμβολή) πρέπει να είναι μικρότερος από αυτόν των στοιχείων αισθητήρων.

4.4 Η Μέθοδος Min-Norm

Η min-norm μέθοδος εφαρμόζεται σε ομοιόμορφα κατανεμημένες γραμμικές στοιχειοκεραίες. Βρίσκει την εκτίμηση DoA αναζητώντας τη θέση των κορυφών στο φάσμα, υπολογίζοντας ένα διάνυσμα βάρους συστοιχίας το οποίο είναι ελαχίστης νόρμας, έχει το πρώτο του στοιχείο ίσο με τη μονάδα και περιέχεται στο υποδιάστημα θορύβου.

Εφόσον η μέθοδος αυτή είναι εφαρμόσιμη σε ομοιόμορφα κατανεμημένες γραμμικές στοιχειοκεραίες, το προς λύση πρόβλημα βελτιστοποίησης για το διάνυσμα βάρους συστοιχίας μπορεί να μετασχηματιστεί σε ένα πρόβλημα εύρεσης ριζών πολυωνύμου οδηγώντας σε μια root-min-norm μέθοδο παρόμοια της root-MUSIC η οποία όμως έχει μικρότερη ή ίση διασπορά στην εκτίμηση (Karlssoon 2014).

4.5 Η Μέθοδος CLOSEST

Αυτή η μέθοδος είναι χρήσιμη για τον εντοπισμό πηγών σε έναν επιλεγμένο τομέα. Σε αντίθεση με τις beam-space μεθόδους, οι οποίες λειτουργούν σχηματίζοντας πρώτα μια ακτίνα σε επιλεγμένες κατευθύνσεις, αυτή η μέθοδος λειτουργεί στο διάστημα των στοιχείων. Κατά μια έννοια είναι μια γενικοποίηση της min-norm μεθόδου. Αναζητά τα βάρη των συστοιχιών στο υποδιάστημα θορύβου που είναι κοντά στα διανύσματα στρέψης τα σχετικά με τις DoA στον υπό μελέτη τομέα. Μία μέθοδος - γνωστή ως FINE - επιλέγει ένα διάνυσμα βάρους συστοιχίας ελαχιστοποιώντας τη γωνία μεταξύ του επιλεγμένου διανύσματος και του εκτεινόμενου, από τα διανύσματα στρέψης που σχετίζονται με τις DoA, υποδιαστήματος στον επιλεγμένο τομέα (Kobayakawa 2012).

4.6 Μέθοδος ESPRIT

Η ESPRIT είναι μία υπολογιστικά αποδοτική και ισχυρή μέθοδος εκτίμησης DoA. Χρησιμοποιεί δύο πανομοιότυπες στοιχειοκεραίες με τη λογική ότι στοιχεία συστοιχιών χρειάζεται να σχηματίσουν ταιριαστά ζευγάρια με ένα πανομοιότυπο διάνυσμα μετατόπισης όπου το δεύτερο στοιχείο του κάθε ζευγαριού πρέπει να μετατοπιστεί κατά την ίδια απόσταση και κατά την ίδια κατεύθυνση σχετικά με το πρώτο στοιχείο. Αυτό δε σημαίνει απαραίτητα πως χρειάζονται δύο ξεχωριστές στοιχειοκεραίες. Η γεωμετρία της στοιχειοκεραίας μπορεί να επιλεγεί με τρόπο τέτοιο ώστε τα στοιχεία να έχουν αυτή την ιδιότητα.

Μερικές παραλλαγές της ESPRIT είναι οι ακόλουθες : TLS, beam-space, beam-space για ομοιόμορφη ορθογώνια στοιχειοκεραία, ενισχυμένης ανάλυσης, virtual interpolated στοιχειοκεραία, multiple invariance, higher order and procrustes rotation based ESPRIT (Mogensen 2016).

4.7 Ο Αλγόριθμος SAGE

Ο SAGE είναι ένας αλγόριθμος που βασίζεται στην αρχή της μέγιστης πιθανότητας (maximum likelihood – ML), η οποία οδηγεί σε υψηλής ανάλυσης ανίχνευση της καθυστέρησης διάδοσης, του πλάτους και της κατεύθυνσης της γωνίας άφιξης του σήματος. Άλλοι αλγόριθμοι, όπως ο αλγόριθμος EM (expectation maximisation) ενημερώνουν όλες τις παραμέτρους στιγμιαία, γεγονός που μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την αργή σύγκλιση και τη δύσκολη μεγιστοποίηση. Αντιθέτως, ο αλγόριθμος SAGE ενημερώνει τις παραμέτρους διαδοχικά τη μία μετά την άλλη, αντικαθιστώντας την πολυδιάστατη διαδικασία βελτιστοποίησης με πολλές χωριστές διαδικασίες μικρής πολυπλοκότητας οι οποίες εκτελούνται διαδοχικά. Αυτές οι χωριστές διαδικασίες συνδέονται εκ των υστέρων και υλοποιείται ο αλγόριθμος SAGE (Bull 2015).

5. Παρουσίαση Πειραματικών Μετρήσεων Ευφυών Κεραίων σε Δίκτυο Κινητής Τηλεφωνίας

Παρουσιάζονται και αναλύονται μετρήσεις μιας adaptive DCS-1800 κεραίας σταθμού βάσης, η οποία χρησιμοποιήθηκε μόνο στην άνω ζεύξη. Εκτελέστηκαν τόσο εργαστηριακές μετρήσεις όσο και δοκιμές εξωτερικού χώρου. Η κεραία βελτιώνει τον C/I λόγο περισσότερο από 30dB. Υπολογισμοί που χρησιμοποίησαν μετρήσεις δεδομένων και υπέθεσαν απόδοση κάτω ζεύξης παρόμοια με αυτή της πάνω ζεύξης έδειξαν κέρδος απόδοσης φάσματος της τάξεως του 6 σε σχέση με τωρινά συστήματα σταθμού βάσης.

Η αναφορά αυτή παρουσιάζει την adaptive κεραία σταθμού βάσης με δύο παράλληλα κανάλια λήψης και με χρήση του αλγορίθμου Αντιστροφής Πίνακα Δείγματος (Sample Matrix Inversion, SMI). Παρουσιάζονται αποτελέσματα δοκιμών με χρήση χωρικής πολυπλεξίας (spatial multiplexing). Χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά DCS-1800 δεδομένα κίνησης και η έξοδος της adaptive κεραίας μπορεί

να συνδεθεί σε έναν τυπικό RX σταθμού βάσης για σύγκριση των BER μετρήσεων με μία τυπική κεραία σταθμού βάσης.

Η adaptive κεραία είναι ένα δοκιμαστικό σύστημα το οποίο προορίζεται για λειτουργία μόνο στην άνω ζεύξη (Rostbakken 2009). Η κεραία είναι σχεδιασμένη για ενσωμάτωση με ένα ήδη υπάρχον σύστημα σταθμού βάσης (DCS-1800), στη συχνότητα των 1.8 GHz. Η adaptive κεραία έχει δύο παράλληλους διαύλους λήψης και έτσι είναι δυνατές οι δοκιμές με χωρική πολυπλεξία. Σύντομες προδιαγραφές του συστήματος adaptive κεραίας (AA system) παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1. Η adaptive κεραία φαίνεται στην εικόνα 5.1 και το σχηματικό διάγραμμα στην εικόνα 5.2. Ο υπολογισμός των βαρών και το άθροισμα των λαμβανόμενων σημάτων πραγματοποιούνται στο ληφθέν RF σήμα έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα της χρήσης ενός τυπικού σταθμού βάσης ως δέκτη. Η TRX του σταθμού βάσης μεταδίδει επίσης πραγματικές DCS-1800 ριπές δεδομένων έτσι ώστε να υπάρχει δυνατότητα υπολογισμού του BER και άλλων χαρακτηριστικών παραμέτρων της μετάδοσης. Επίσης, η TRX παρέχει σήματα συγχρονισμού για έναρξη δειγματοληψίας.

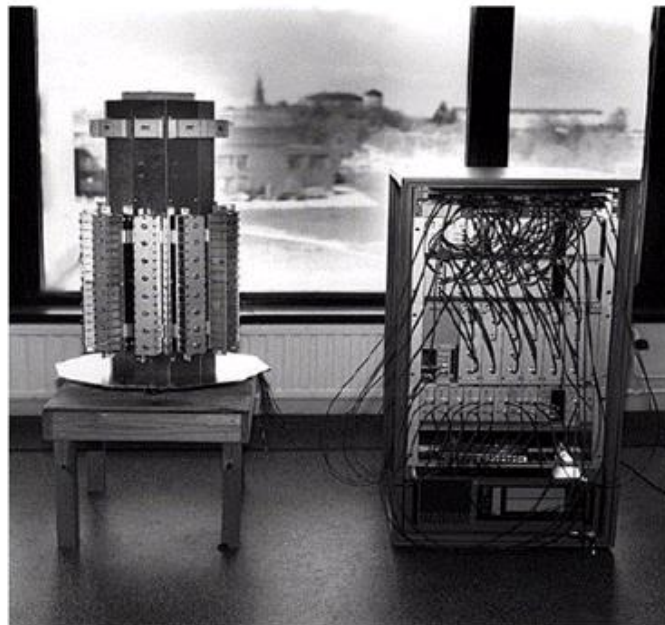
Το RF σήμα διασπάται και μετατρέπεται προς τα κάτω, στη βασική ζώνη, και χωρίζεται στους I και Q διαύλους όπου πραγματοποιείται δειγματοληψία σε ρυθμό bit. Ο SMI αλγόριθμος χρησιμοποιεί τρεις από τους επτά TMS320C40 επεξεργαστές σήματος. Επίσης, σε κάθε DCS-1800 κανάλι κίνησης, ως σήμα αναφοράς, χρησιμοποιείται η εκπαιδευτική ακολουθία των 26 bits.

Για τη ρύθμιση του συστήματος τοποθετείται ένας δέκτης ανατροφοδότησης μετά την άθροιση. Η ρύθμιση πραγματοποιείται εκτός γραμμής (off-line), δηλαδή, πριν από την ενεργοποίηση του συστήματος κεραίας, με έγχυση ενός CW σήματος μέσω κατευθυντικών συζευκτών μετά τα στοιχεία της κεραίας (βλέπε εικόνα 2). Με την πραγματοποίηση της ρύθμισης off-line μειώνονται οι ασυμβατότητες στα κανάλια λήψης και συνεπώς βελτιώνεται η επίδοση της κεραίας. Τα δεδομένα από τη ρύθμιση αποθηκεύονται ως look-up πίνακες στη DSP.

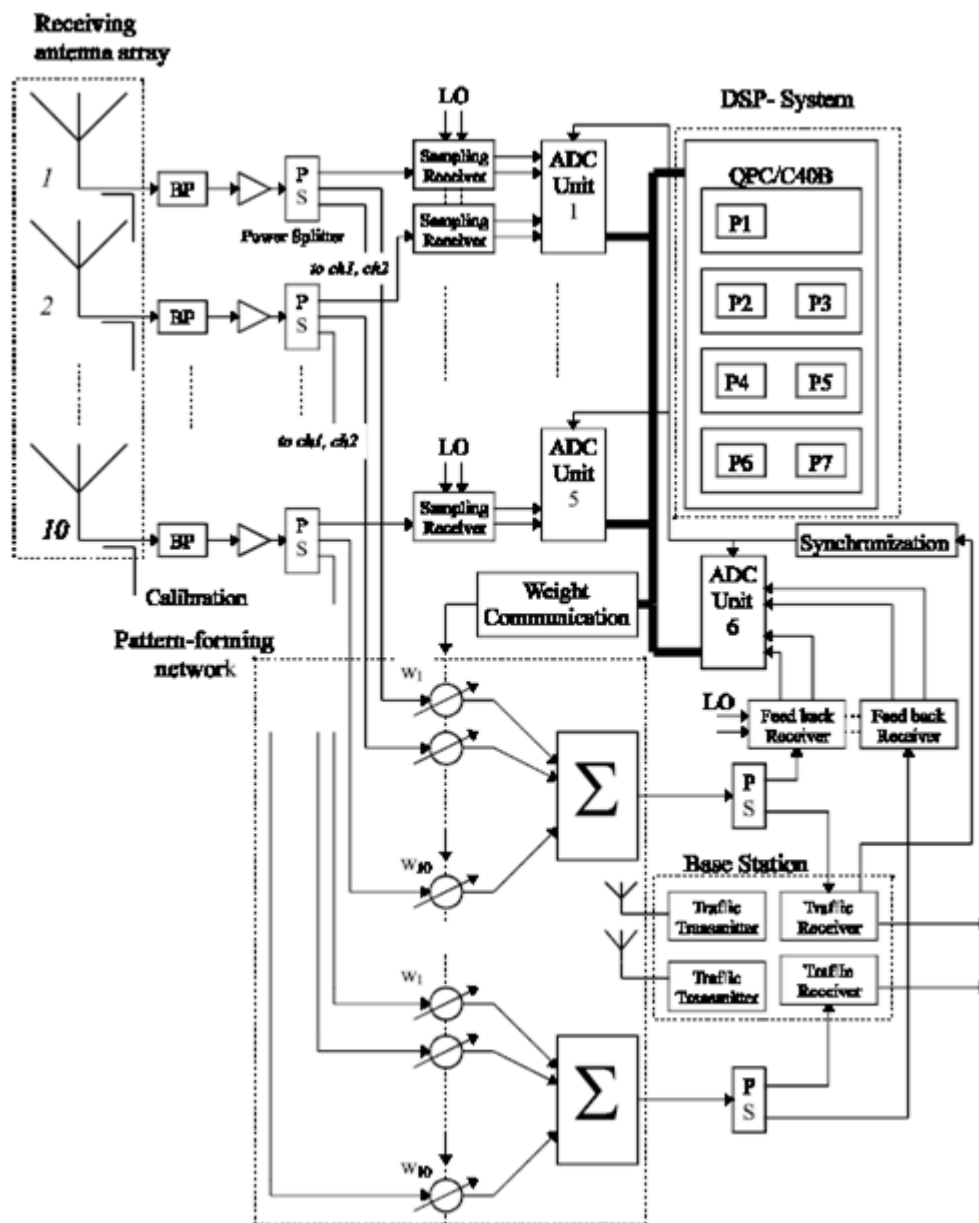
Ο υπολογισμός του βάρους στο RF σήμα πραγματοποιείται με τη χρήση ενός ολισθητή φάσης και ενός εξασθενητή. Η ακρίβεια του ολισθητή φάσης είναι 1ο και ο εξασθενητής είναι ρυθμίσιμος μέχρι τα -50dB σε βήματα του 1dB.

Item	Specification
Radio channel	
Center Frequency	1721 MHz
Modulation	GMSK ($BT=0.3$)
Adaptive array	
Number of elements	10
Configuration	Circular
Element spacing	0.56λ @ 1721 MHz
Polarisation	Vertical
Element beamwidth	80 degrees
Digital system	
DSP Processors	Seven TMS320C40
Sampling frequency per I- and Q-channel	270 kHz
ADC resolution	8 bit
ADC dynamic range	-32 dBm to -80 dBm
Algorithm for weight calculation	SMI
Weights	
Class	Analog
Phase shift resolution	1 degree
Amplitude attenuation resolution	1 dB

Πίνακας 5-1 Προδιαγραφές συστήματος adaptive κεραίας



Εικόνα 5.1 Το σύστημα της adaptive κεραίας



Εικόνα 5.2 Σχηματικό διάγραμμα της adaptive κεραίας

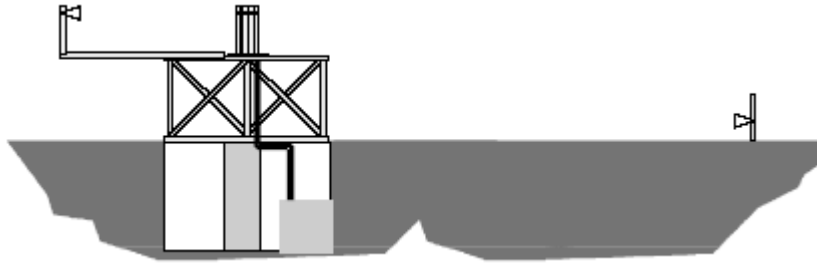
Για την πραγματοποίηση μιας μέτρησης που να επιβεβαιώνει την επίδοση της adaptive κεραίας στο εργαστήριο, χωρίς να εισάγονται οι δυσκολίες του προβλήματος της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών και της μη ελεγχόμενης σκεδάσεως, το μπροστινό μέρος αντικαθίσταται με έναν 8x8 πίνακα Butler ο οποίος τροφοδοτείται από δύο γεννήτριες σήματος, που ελέγχονται από την TRX του σταθμού βάσης. Αυτό ανταποκρίνεται σε ένα σενάριο στο οποίο χρησιμοποιείται μία 8-στοιχείων γραμμική συστοιχία με ισοτροπικά στοιχεία τα οποία απέχουν $\lambda/2$ μεταξύ τους και με DoAs -14.5° και 14.5° . Οι έξοδοι του πίνακα Butler τροφοδοτούν τους δέκτες της adaptive κεραίας.

Η απόδοση της adaptive κεραίας μπορεί να εξεταστεί με τη μέτρηση του BER εξόδου και της ισχύος εξόδου του φέροντος (C_{out}) και της παρεμβολής (I_{out}) για διαφορετικές ρυθμίσεις της ισχύος

εισόδου (C_{in} , I_{in}). Η παρεμβολή είναι ένα GMSK σήμα το οποίο είναι διαμορφωμένο με ψευδοτυχαία (pseudo random, PRBS) δεδομένα. Το φέρον C είναι GMSK, διαμορφωμένο με πραγματικά δεδομένα DSC-1800 καναλιών κίνησης τα οποία περιέχουν τα 26 bits της εκπαιδευτικής ακολουθίας.

- Αρχικά μετρήθηκε η καταπίεση της παρεμβολής μέσω του συστήματος adaptive κεραίας. Ο αλγόριθμος είναι ικανός να καταπιέσει το σήμα παρεμβολής όταν ο παρεμβολέας βρίσκεται μέσα στην δυναμική ακτίνα της ADC. Η ADC χρησιμοποιεί 8 bit δίνοντας μία δυναμική ακτίνα των 48dB, επομένως, κάτω από τα -80dBm η παρεμβολή χάνεται στο θόρυβο και δεν είναι δυνατή η καταπίεση. Η παρεμβολή καταπιέζεται στο επίπεδο θορύβου κβαντισμού αν η χωρική συσχέτιση είναι αρκετά χαμηλή, πράγμα το οποίο έχει υποθεθεί εδώ. Αυτό δίνει μία μεγαλύτερη καταπίεση των ισχυρών παρεμβολών σε σχέση με τις πιο αδύναμες.
- Στη συνέχεια μετρήθηκε η βελτίωση στον λόγο C/I. Η κυριότερη συνεισφορά στη βελτίωση του λόγου C/I προέρχεται από την καταπίεση της παρεμβολής. Η ενίσχυση του φέροντος ήταν μικρότερη και περίπου σταθερή κοντά στα -2-6dB για όλες τις ισχύεις φερόντων και παρεμβολών στη δυναμική ακτίνα της ADC. Με την ισχύ παρεμβολής στα -40dBm και την ισχύ του επιθυμητού σήματος εισόδου μεταξύ -70dBm και -40dBm, η adaptive κεραία βελτιώνει το λόγο C/I περισσότερο από 30dB. Όταν οποιοδήποτε από τα δύο επίπεδα σήματος ξεπεράσει τη δυναμική ακτίνα της ADC η βελτίωση του λόγου C/I, με τη χρήση της adaptive κεραίας, είναι πολύ μικρή, ακόμα και λιγότερο από 0dB, υποβαθμίζοντας το λόγο C/I.
- Τέλος μετρήθηκε η βελτίωση του BER για διαφορετικά C_{in} και I_{in} . Η βελτίωση μετριέται σχετικά με μία από τις εξόδους του πίνακα Butler, δηλαδή χωρίς τη χρήση της adaptive κεραίας. Η βελτίωση του BER είναι μηδέν για λόγο C/I > 9dB λόγω του ότι ο BER είναι μηδέν για έναν τυπικό δέκτη σταθμού βάσης σε αυτήν την περιοχή. Αυτό είναι το επίπεδο καταφλίου στο DCS-1800 για 0% BER. Για λόγους C/I πάνω από -20dB η βελτίωση του BER είναι έως και 50%. Έτσι έχουμε BER 0% σε αυτή την εγκατάσταση, με χρήση του πίνακα Butler. Αυτές οι μετρήσεις έγιναν με FEC (forward error correction) αποκωδικοποίηση της κλάσης Ib δεδομένων στο σταθμό βάσης.

Ο σκοπός των δοκιμών εξωτερικού χώρου είναι ο χαρακτηρισμός του συστήματος και της απόδοσής του σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον με λίγες μεταβλητές παραμέτρους, καθώς στο επόμενο στάδιο η αστικές μετρήσεις εισάγουν προβλήματα όπως : διάδοση πολλαπλών διαδρομών, εξασθένηση, φαινόμενο Doppler και τα λοιπά. Επομένως η απόδοση της adaptive κεραίας ερευνήθηκε στο ελεγχόμενο κέντρο μετρήσεων κεραίας της FFV Aerotech στην Arboga της Σουηδίας. Το σύστημα μέτρησης εμβέλειας αυτής της κεραίας έχει τοποθετηθεί σε ανοιχτό χώρο. Το μπροστινό μέρος της adaptive κεραίας στηρίχθηκε σε μία περιστροφική βάση και έτσι η κυκλική συστοιχία τοποθετήθηκε περίπου τρία μέτρα πάνω από το έδαφος, έχοντας έτσι τη δυνατότητα για περιστροφή 360ο στο αζιμούθιο (βλέπε εικόνα 5.3). Μία οριζόντια μπάρα 5 μέτρων στηρίχθηκε επίσης πάνω στην περιστροφική βάση πάνω στην οποία τοποθετήθηκε μία χοανοειδής κεραία. Είκοσι μέτρα μακριά από την περιστροφική βάση και σε ύψος 30cm από το έδαφος, τοποθετήθηκε μία δεύτερη χοανοειδής κεραία έτσι ώστε να δημιουργηθεί μία παρεμβολή απευθείας κύματος και ανάκλασης εδάφους, στην τοποθεσία της στοιχειοκεραίας, αποφεύγοντας μία βύθιση εξασθένησης.

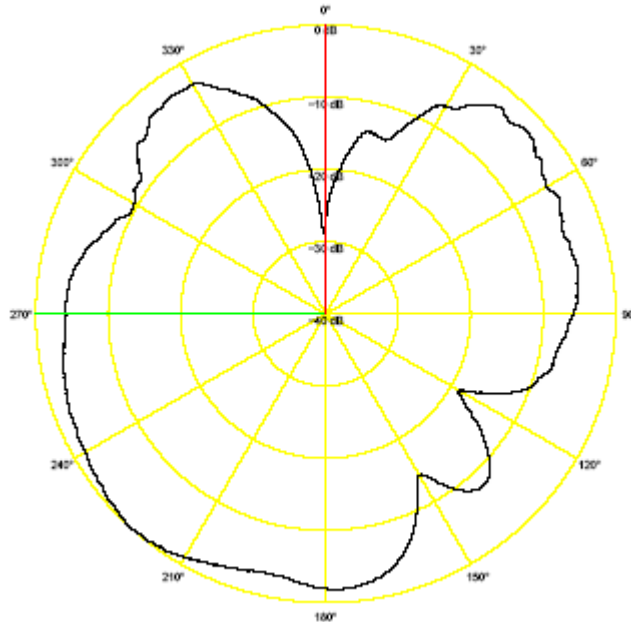


Εικόνα 5.3 Χωροταξικό Διάγραμμα

Η απόσταση των κοντινότερων εμποδίων (δένδρα) ήταν περίπου 500 μέτρα δημιουργώντας ένα σχεδόν ελεύθερο από ανακλάσεις περιβάλλον. Οι χοανοειδείς κεραίες τροφοδοτούνταν από διαφορετικές γεννήτριες σήματος, GMSK διαμορφωμένες με δεδομένα από διαφορετικούς σταθμούς βάσης, χρησιμοποιώντας διαφορετικές εκπαιδευτικές ακολουθίες. Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στη συχνότητα των 1721 GHz (Godara 2017).

Η γωνία μεταξύ του παρεμβάλλοντος και του επιθυμητού σήματος οριζόταν με περιστροφή της βάσης. Η κεραία τότε, πριν το «πάγωμα» των βαρών, αφηνόταν να προσαρμοστεί στο περιβάλλον σήματος. Κατά την περιστροφή η adaptive κεραία φωτιζόταν με ένα CW σήμα από την κεραία εδάφους. Η ισχύς εξόδου, της adaptive κεραίας, μετρήθηκε σε γωνίες από 0 έως 360 μοίρες σε βήματα μισής μοίρας. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για διαφορετικούς γωνιακούς διαχωρισμούς και επίπεδα ισχύος του επιθυμητού και του παρεμβάλλοντος σήματος.

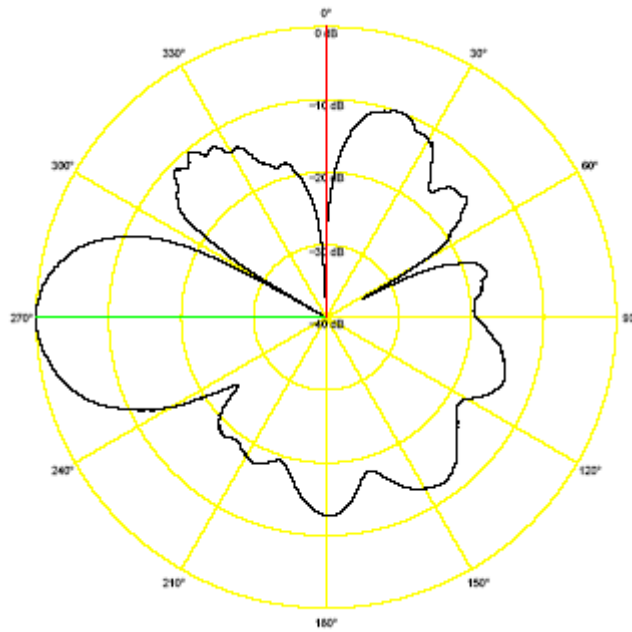
Η εικόνα 5.4 δείχνει το προσαρμοσμένο διάγραμμα ακτινοβολίας του δεύτερου beamformer όπου η γωνία μεταξύ του επιθυμητού και του παρεμβάλλοντος κινητού είναι 90ο και έχουν ίσες ισχύεις. Παρατηρούμε ότι προς το σήμα παρεμβολής κατευθύνεται ένα μηδενικό ενώ έχουμε ένα λάθος στόχευση της κύριας ακτίνας. Πάρ' όλα αυτά, το σήμα παρεμβολής καταπιέζεται κατά περίπου 25dB σε σχέση με το επιθυμητό σήμα. Η παραμόρφωση του διαγράμματος συστοιχίας, δηλαδή το λάθος στόχευση της κύριας ακτίνας, οφείλεται στην σύντομη εκπαιδευτική ακολουθία του DCS-1800. Η χρήση ενός σύντομου σήματος αναφοράς έχει σαν αποτέλεσμα έναν χαμηλής ακρίβειας πίνακα συνδιασποράς λόγω του αργού ρυθμού σύγκλισης δείγματος του SMI αλγορίθμου οπότε το επιθυμητό σήμα είναι παρών στον πίνακα.



Εικόνα 5.4 Προσαρμοσμένο διάγραμμα ακτινοβολίας του δεύτερου beamformer

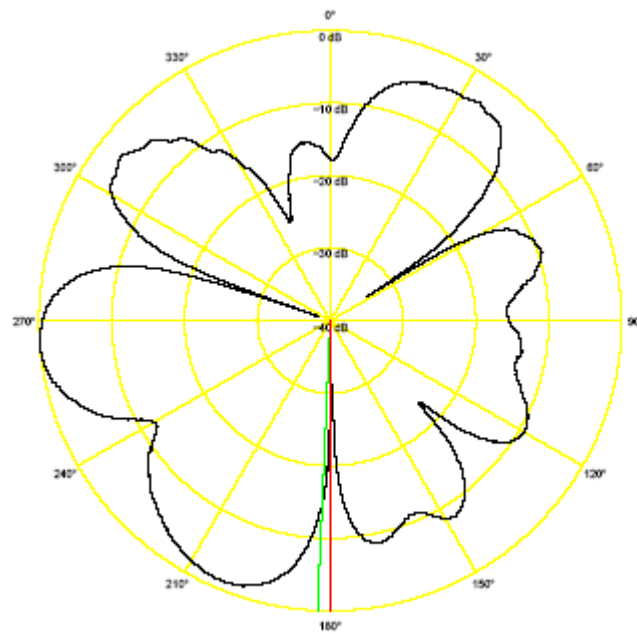
Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι η χρήση της τεχνικής διαγώνιας φόρτωσης (diagonal loading), δηλαδή η πρόσθεση μιας μικρής τιμής στα διαγώνια στοιχεία του πίνακα. Με έναν τέλεια εκτιμημένο πίνακα συνδιασποράς όλες οι ιδιοτιμές θορύβου θα είναι παρόμοιες και ίσες με τη διασπορά θορύβου. Μία κακή εκτίμηση έχει σαν αποτέλεσμα διαφορετικές ιδιοτιμές πράγμα το οποίο οδηγεί σε ένα παραμορφωμένο διάγραμμα. Επιλέγοντας τις τιμές φόρτωσης μεγαλύτερες από τις ιδιοτιμές θορύβου αλλά μικρότερες από τις ιδιοτιμές του επιθυμητού και του παρεμβάλλοντος σήματος, το συνολικό επίπεδο θορύβου ανεβαίνει, πράγμα το οποίο μας δίνει σχεδόν παρόμοιες ιδιοτιμές θορύβου. Έτσι η τιμή φόρτωσης L επιλέχθηκε ως $L/\sigma^2 \sim 10^2$.

Η διαγώνια φόρτωση θα ελαττώσει κάπως τον SIR αλλά αυτό αντισταθμίζεται με την αύξηση του SNR λόγω του χαμηλότερου επιπέδου πλευρικών λοβών, πράγμα το οποίο αφήνει αμετάβλητο τον SINR. Η εικόνα 5.5 δείχνει το μετρηθέν διάγραμμα ακτινοβολίας όπου το περιβάλλον σήματος είναι όμοιο με αυτό της εικόνας 5.4 αλλά ο πίνακας συνδιασποράς είναι διαγώνια φορτωμένος. Όπως μπορούμε να δούμε το διάγραμμα διατηρεί το μηδενικό στη διεύθυνση του σήματος παρεμβολής αλλά τώρα ο κύριος λοβός στοχεύει προς το επιθυμητό σήμα και το επίπεδο πλευρικών λοβών (SLL) καταπιέζεται κάτω από τα -10dB.

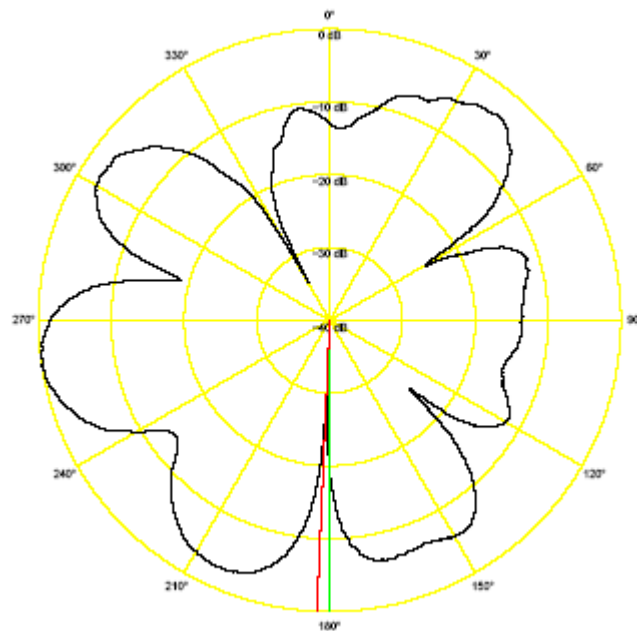


Εικόνα 5.5 Διάγραμμα ακτινοβολίας (με διαγώνια φορτωμένο πίνακα συνδιασποράς)

Οι εικόνες 5.6 και 5.7 δείχνουν τα διαγράμματα ακτινοβολίας των δύο beamformers όπου το επιθυμητό σήμα και το σήμα παρεμβολής χωρίζονται κατά 2.5° . Παρατηρούμε ότι τα δύο σήματα που προσκρούουν στη συστοιχία διαδραματίζουν αντίθετους ρόλους στους δύο beamformers. Παρά το μικρό γωνιακό διαχωρισμό το σήμα παρεμβολής καταπιέζεται κατά περισσότερο από 20dB σε σχέση με το επιθυμητό σήμα και στα δύο διαγράμματα. Παρατηρούμε την ομοιότητα των δύο διαγραμμάτων έξω από την περιοχή ενδιαφέροντος. Αυτό δείχνει ότι πέρα του αντίθετου χειρισμού των δύο σημάτων οι beamformers βλέπουν το ίδιο περιβάλλον θορύβου.



Εικόνα 5.6 Διάγραμμα ακτινοβολίας πρώτου beamformer



Εικόνα 5.7 Διάγραμμα Ακτινοβολίας δεύτερου beamformer

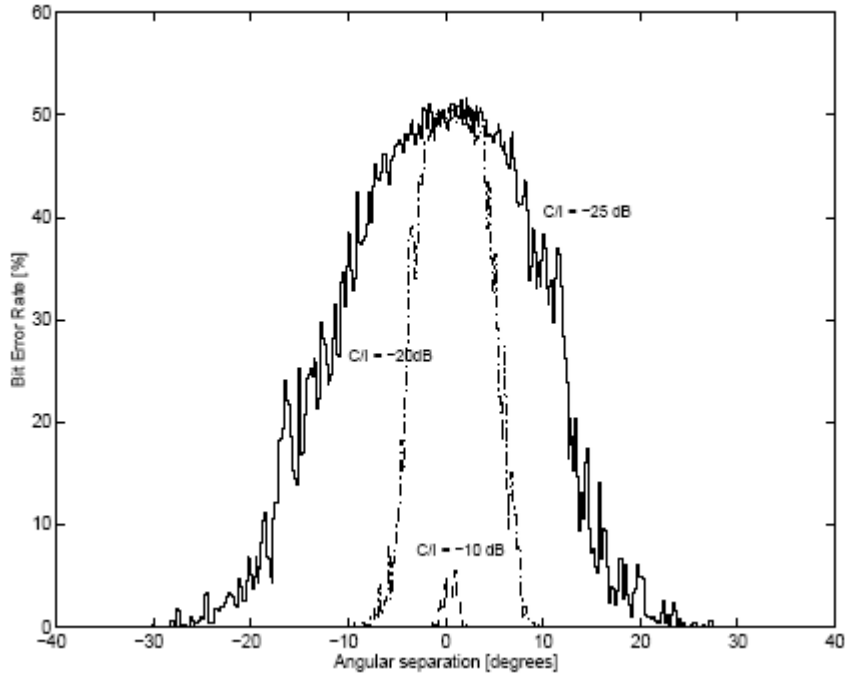
Για κάθε μετρηθέν διάγραμμα ακτινοβολίας μετρήθηκε επίσης η καταπίεση της παρεμβολής και η ενίσχυση του επιθυμητού σήματος. Τα αποτελέσματα για $(C/I)_{in} = -20\text{dB}$, όπου οι απόλυτες τιμές των C και I είναι οι ίδιες για κάθε γωνία, παρουσιάζονται στον πίνακα 5.2. Φαίνεται ότι η καταπίεση της παρεμβολής είναι σχετικά ανεξάρτητη από την απόσταση των DoA ενώ η ενίσχυση του επιθυμητού σήματος ελαττώνεται με την ελάττωση της απόστασης των DoA. Αυτό είναι ένα φυσικό επακόλουθο του περιορισμένου beamwidth της συστοιχίας, δηλαδή η πιο στενή ακτίνα δεν είναι αρκετή για να παρέχει την κορυφή προς το επιθυμητό σήμα όταν ένα μηδενικό κατευθύνεται προς τη γωνία της παρεμβολής.

C/I IMPROVEMENT IN dB FOR DIFFERENT DOA SEPARATION $C/I_{IN}=-20\text{ dB}$			
DOA separation	Interferer suppression	Carrier gain	Improvement in C/I
180°	31	2	32
135°	30	4	34
90°	30	4	34
45°	32	2	34
10°	29	2	31
5°	27	-10	17
2.5°	26	-8	18

Πίνακας 5.2 Βελτίωση C/I, καταπίεση παρεμβολής και ενίσχυση επιθυμητού σήματος σε σχέση με DoA

Ο BER καταχωρούταν από τον TRX του σταθμού βάσης κατά την περιστροφή της κεραίας και έτσι ο BER δινόταν σαν συνάρτηση της DoA απόστασης ανάμεσα στις πηγές επιθυμητού και παρεμβάλλοντος σήματος. Οι μετρήσεις έγιναν για διαφορετικούς λόγους C/I (βλέπε εικόνα 5.8). Η μετάβαση από BER 0% σε BER 50% είναι πολύ απότομη και χαρακτηριστική ενός συστήματος ψηφιακών τηλεπικοινωνιών. Για $C/I \geq -10\text{dB}$ η ελάχιστη γωνιακή απόσταση για 0% BER είναι μικρότερη από 4°. Καθώς ελαττώνονται οι C/I λόγοι η ελάχιστη αυτή γωνία αυξάνεται.

Ο BER εξόδου είναι αποτέλεσμα του C/I εξόδου και εξαρτάται από τις ιδιότητες ανίχνευσης της RX του σταθμού βάσης. Παρ' όλα αυτά, η ελάχιστη γωνιακή απόσταση είναι μία σημαντική παράμετρος κατά τον υπολογισμό του κέρδους απόδοσης φάσματος με τη χρήση adaptive κεραίων σε σταθμούς βάσης.



Εικόνα 5.8 BEP/DOA separation

Για $C/I \geq 0\text{dB}$ μετρήθηκε ένας BER 0% παρόλο που τα επίπεδα κύματα που προσέκρουαν στη συστοιχία διέφεραν μόνο στην κατακόρυφη γωνία (ίδια αζιμούθια γωνία). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το κατακόρυφο beamforming της κυκλικής συστοιχίας. Δηλαδή, επίπεδα κύματα με ίδια αζιμούθια αλλά διαφορετικές κατακόρυφες γωνίες έχουν σαν αποτέλεσμα διαφορετικές χωρικές υπογραφές (διανύσματα απόκρισης συστοιχίας) στη συστοιχία. Οι δύο τερματικές κεραιές τοποθετήθηκαν σε διαφορετικά ύψη (όπως φαίνεται στην εικόνα 5.3) για πρακτικούς λόγους, δίνοντας ένα διαχωρισμό της τάξεως των 8° στο κατακόρυφο επίπεδο. Διαφορετικές χωρικές υπογραφές και χαμηλή συσχέτιση μεταξύ των εκπαιδευτικών ακολουθιών των δύο πηγών σήματος είναι αρκετά για να μπορέσει ο αλγόριθμος προσαρμογής να διαχωρίσει τα σήματα.

Η εισαγωγή adaptive κεραιών σταθμού βάσης δίνει τη δυνατότητα για τη μετάδοση και τη λήψη ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από και προς χρήστες της ίδιας κυψέλης οι οποίοι μοιράζονται την ίδια συχνότητα και χρονική σχισμή. Αυτό είναι η πλήρης αναπτυγμένη μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση διαστήματος (spatial division multiple access, SDMA) η οποία λειτουργεί πάνω σε παραδοσιακό F/TDMA σχήμα. Ένας σημαντικός παράγοντας που προκύπτει με την εισαγωγή adaptive κεραιών είναι η απόδοση φάσματος γ που ορίζεται ως ο αριθμός χρηστών ανά MHz ανά εύρος ζώνης και ανά Km^2 (Okamoto 2017):

$$\gamma = \frac{T}{B \cdot S \cdot A}$$

Εδώ T είναι το μέσο φορτίο κίνησης σε Erlang, A είναι η επιφάνεια της κυψέλης σε Km^2 , S ο αριθμός των κυψελών σε μια ομάδα και B το εύρος ζώνης που απαιτείται για την εξυπηρέτηση των χρηστών σε μια ομάδα (συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης του συστήματος). Αν υποθέσουμε εξαγωνικές κυψέλες, πολυκατευθυντικές κεραιές και έναν τέταρτης δύναμης νόμο για τα επίπεδα σημάτων (ισχύεις σημάτων $\sim r^{-4}$, r είναι η απόσταση από το σταθμό βάσης) το μέγεθος της ομάδας S μπορεί να γραφεί ως

$$S = \frac{1}{3} \sqrt[3]{K \frac{C}{I}}$$

όπου C/I είναι ο λόγος φέροντος προς παρεμβολής που προκαλείται από K ενεργούς πρώτου διαζώματος παρεμβολείς στην ίδια κυψέλη.

Υποτίθεται η εισαγωγή adaptive κεραιάς με N χωρικά πολυπλεγμένα κανάλια (παράλληλες ακτίνες) σε ένα παραδοσιακό σύστημα (trad). Αυτό δίνει τη δυνατότητα να ελαττωθεί το μέγεθος της ομάδας S διατηρώντας αμετάβλητες τις απαιτήσεις του λόγου φέροντος προς παρεμβολή, το εύρος ζώνης ομάδας και την επιφάνεια κυψέλης. Το κέρδος απόδοσης φάσματος με την εισαγωγή των adaptive κεραιών μπορεί να οριστεί ως:

$$G = \frac{\gamma_{SDMA}}{\gamma_{trad}} = \frac{T_{SDMA} S_{trad}}{T_{trad} S_{SDMA}}$$

$$T_{SDMA} = NT_{trad}$$

$$K_{SDMA} = \frac{b}{\pi} NK_{trad}$$

Δηλαδή, αυξάνοντας το φορτίο κίνησης N φορές θα αυξηθεί ο αριθμός παρεμβολών κατά ένα παράγοντα N . Παρ' όλα αυτά, ο αριθμός των παρεμβολών θα ελαττωθεί κατά ένα παράγοντα $b\pi^{-1}$, όπου b είναι ο ελάχιστος επιτρεπόμενος διαχωρισμός. Η b είναι μία συνάρτηση του λόγου C/I εισόδου στο σταθμό βάσης (βλέπε εικόνα 5.8). Ο παράγοντας $b\pi^{-1}$ αναπαριστά το χωρικό φιλτράρισμα (spatial filtering) της στοιχειοκεραίας. Μόνο σήματα παρεμβολής κοντύτερα, σε γωνία, από b ακτίνια από το επιθυμητό κινητό λογαριάζονται ως παρεμβολές. Συμπερασματικά, το κέρδος απόδοσης φάσματος, σε αυτό το απλό μοντέλο, μπορεί να υπολογιστεί ως (Lineberger 2014):

$$G = \sqrt{\frac{N\pi}{b}}$$

Το SDMA απαιτεί έναν ελάχιστο C/I λόγο στην είσοδο της κεραίας σταθμού βάσης έτσι ώστε να γίνει δυνατή η ανίχνευση σήματος. Υποτίθεται ότι ένας ελάχιστος C/I λόγος των -20dB, ο οποίος παρέχει BER 0%, δίνει έναν ελάχιστο διαχωρισμό C/I των 10°, δηλαδή $b = \pi/18$ ακτίνια. Υποθέτοντας, επίσης, μία απόδοση κάτω ζεύξης παρόμοια με αυτή της άνω ζεύξης υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού ενός υποθετικού κέρδους απόδοσης φάσματος. Η χωρική πολυπλεξία του συστήματος αυτού είναι $N = 2$, επομένως έχουμε ένα κέρδος απόδοσης φάσματος $G = 6$, που αποτελεί σημαντική βελτίωση σε σχέση με ένα παραδοσιακό σύστημα.

Ο ελάχιστος C/I λόγος εξαρτάται από δύο κύριες παραμέτρους. Η πρώτη είναι η γωνιακή απόσταση των κινητών και η δεύτερη τα επίπεδα ισχύων από τα κινητά που λαμβάνονται στο σταθμό βάσης, πράγμα το οποίο εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των κινητών και του σταθμού βάσης και από τον έλεγχο ισχύος του μεμονωμένου κινητού. Τα επίπεδα ισχύος που λαμβάνονται από το σταθμό βάσης ποικίλλουν έως και 50dB λόγω της περιορισμένης δυναμικής εμβέλειας του DCS (GSM) ελέγχου ισχύος. Είναι βολικό για τους χρήστες που μοιράζονται το ίδιο κανάλι να έχουν παρόμοια επίπεδα ισχύος λόγω του ότι η SDMA υλοποίηση μετριάζει χρήστες που μοιράζονται το ίδιο κανάλι μέχρι ενός δεδομένου επιπέδου. Μία πρόταση είναι η ομαδοποίηση των κινητών χρηστών σε κατηγορίες ισχύος που περιορίζει τον λαμβανόμενο C/I λόγο. Η εισαγωγή των κατηγοριών ισχύος ελαττώνει το συνολικό SDMA κέρδος G , αλλά η μείωση είναι μικρή και διατηρείται ένα σημαντικό κέρδος σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα (Fakhrul 2012).

Τα εργαστηριακά πειράματα έδειξαν ότι η adaptive κεραία που παρουσιάστηκε έχει την ικανότητα να βελτιώσει τον C/I λόγο περισσότερο από 30dB όταν το επιθυμητό σήμα είναι αδύναμο και κατά την παρουσία μιας ισχυρής παρεμβολής. Όταν η γωνία μεταξύ του επιθυμητού σήματος και του σήματος παρεμβολής μικραίνει τότε η βελτίωση του C/I ελαττώνεται, κυρίως λόγω απωλειών στο κέρδος του φέροντος. Με C/I = -20dB ο ελάχιστος διαχωρισμός μεταξύ του επιθυμητού και του παρεμβάλλοντος κινητού, για μία μετάδοση χωρίς λάθη, είναι 10°. Έχει επιβεβαιωθεί ότι η διαγώνια φόρτωση είναι ένας τρόπος για να βελτιωθεί η εκτίμηση του πίνακα συνδιασποράς, πράγμα το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα χαμηλότερους πλευρικούς λοβούς και έναν διακριτό κυρίως λοβό προς το επιθυμητό σήμα. Με την υπόθεση μιας υπάρχουσας κάτω ζεύξης η σύγκριση με μια παραδοσιακή κεραία σταθμού βάσης δίνει ένα κέρδος απόδοσης φάσματος $G = 6$, επομένως, μία σημαντική βελτίωση σε σχέση με υπάρχοντα συστήματα σταθμών βάσης (Steyskal 2009).

Μετρήσεις σε ένα σενάριο στατικής οπτικής επαφής (line-of-sight, LOS) δείχνουν ότι υπάρχει δυναμική για καταπίεση της παρεμβολής κατά 25dB. Η ευφυής κεραία επιτυγχάνει BER της τάξεως του 1% για ένα λόγο φέροντος προς παρεμβολή (C/I) -14dB. Μία μέτρηση εξωτερικού χώρου σε ένα μικροκυβελοειδές περιβάλλον επιβεβαιώνει την ικανότητα παρακολούθησης ακόμα και σε περιπτώσεις όπου υπάρχει μεγάλο πρόβλημα διάδοσης πολλαπλών διαδρομών. Σε μία non-LOS (NLOS) κατάσταση επιτυγχάνεται ένα μέσο κέρδος σήματος προς θόρυβο των 7.4dB ενώ αυτό αυξάνεται μέχρι και τα 8.3dB σε ένα LOS περιβάλλον. Η έννοια της γωνιακής διαφορικότητας έχει σαν αποτέλεσμα ένα επιπλέον κέρδος διαφορικότητας των 5.8dB σε 1% επίπεδο BER σε NLOS περίπτωση όπου εφαρμόζεται ρύθμιση διπλής ακτίνιας.

Στη συνέχεια αξιολογήθηκε ολόκληρο το σύστημα. Ο MS και ο σταθμός βάσης (BS) ενώθηκαν μέσω ενός καναλιού κίνησης. Οι μετρήσεις του BER πραγματοποιήθηκαν σε μία περίοδο 10s ή 2000

ριτών. Για να προσδιοριστεί ποσοτικά η ικανότητα καταπίεσης παρεμβολής μετρήθηκε ο μη-επεξεργασμένος BER του MS παρουσία ενός συνεχούς σήματος παρεμβολής. Ο χρήστης τοποθετήθηκε στις 0° και είχε σταθερή ισχύ με έναν SNR εισόδου των 28dB. Ο παρεμβολέας, με μεταβλητή ισχύ, βρισκόταν στις -19ο. Ως αναφορά χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος σάρωσης ακτίνας (scanning beam algorithm) και μία μονή κεραία. Ο αλγόριθμος αυτός στρέφει 128 ίσης απόστασης προκαθορισμένες ακτίνες και επιλέγει το σήμα το οποίο αντιστοιχεί στην ακτίνα που λαμβάνει τη μεγαλύτερη ισχύ. Επομένως, παρέχει ικανοποιητικό BER μόνο εφόσον το σήμα χρήστη είναι ισχυρότερο από την παρεμβολή, δηλαδή για $C/I > 0dB$.

Βιβλιογραφία-Αναφορές

1. www.GSMfavorites.com, “Intoduction to GSM, the Global System for Mobile communications”
2. Adrian O. Boukalov and Sven-Gustav Häggman, “System Aspects of Smart-Antenna Technology in Cellular Wireless Communications-An Overview”, IEEE Transactions on Microwave Theory and techniques, vol. 48, no. 6, June 2018, pp 919-920
3. Tracy L. Mann, “A Network System Level Simulator for Investigating the Interworking of Wireless LAN and 3G Mobile Systems” , April 17 2013, pp 8-10
4. Mohammed S. Elmusrati, “Radio resource scheduling and smart antennas in cellular cdma communication systems”, Espoo 2014, report 142, pp 2-5
5. Inacon GmbH, “ The GSM air interface”, 2019 Version number 2.2 part3, pp1-16
6. Vocational Training Council - IVE (Tsing Yi), “CDMA air-interface Design”, Department of Information & Communications Technology, TN3431 Mobile networks 2016, pp 1-36
7. Per H. Lehne and Magne Pettersen, “An overview of smart antenna technology for mobile communications systems”, IEEE Communications Surveys, Fourth Quarter 2019, vol. 2 no. 4, pp1-12
8. A.A.Agius and S.R.Saunders, “Design and Development of a Methodology for Efficiently Tracing the Source of Intermittent Wideband EMC Disturbances to Radio Reception”, Final Report, May 2010, pp 14-20
9. Joseph C. Liberti, Jr. and Theodore S. Rappaport, “Smart antennas for wireless communications : IS-95 and third generation CDMA applications”, 2009 chapter 9, pp 256-265
10. Marius Pesavento, Alex B. Gershman, and Martin Haardt, “Unitary Root-MUSIC with a Real-Valued Eigendecomposition : A Theoretical and Experimental Performance Study”, IEEE Transactions on signal processing, vol. 48, no 5, May 2010, pp 1306-1308
11. LIU JianHua et al, “DoA estimation Based on array manifold calibration and weighted subspace fitting”, Proceedings of ICSP '09, pp 489-491
12. Peangduen Satayarak et al, “The Achievable Performance of Unitary-ESPRIT Algorithm for DOA Estimation”, 2018, pp 1-4
13. Jo Verhaevert et al, “ Direction of Arrival (DoA) parameter estimation with the SAGE algorithm”, signal processing 84 (2014) revised form, pp 622-628

14. Tommy Öberg, Jonas Strandell et al, “Experimental Evaluation of an Adaptive Antenna for a TDMA Mobile Telephony System”, Ericsson 2018, pp 1-6
15. Alexander Kuchar et al, “Field trial with a GSM/DCS1800 Smart Antenna Base Station”, Alcatel 2010, pp 1-5
16. Mark Beach, Ben Allen and Peter Karlsson, “Spatial Channel Characterization for Smart Antenna Solutions in FDD Wireless Networks”, IEEE transactions on Antennas and propagation, Vol. 52, No. 1, January 2014, pp 252-262
17. Yataka Yasui, Shuji Kobayakawa and Tadashi Nakamura, “Adaptive Array Antenna for W-CDMA Systems”, Fujitsu Sci. Tech. J. ,38,2, December 2012, pp 192-200
18. P. Mogensen et al, “A Hardware Testbed for Evaluation of Adaptive Antennas in GSM/UMTS”, 7th IEEE Int’l. Symp. Pers., Indoor and Mobile Radio Commun. – PIMRC ’16, Taipei, Taiwan, Oct. 15-18, 2016, pp 540-544
19. T. Bull et al, “Technology in Smart Antennas for Universal Advanced Mobile Infrastructure”, (TSUNAMI R2108) Overview, RACE Mobile Telecommunications Summit 2015, Cascais, Portugal, Nov. 22–24, 1995, pp 88–97
20. P. H. Lehne, O. Rostbakken, and M. Pettersen, “Estimating Smart Antenna Performance from Directional Radio Channel Measurements”, Proc. 50th IEEE Vehic. Tech. Conf. – VTC ’99 –Fall, Amsterdam, the Netherlands, Sept 19-22, 2009, pp.57–61.
21. L.C. Godara, “Application of Antenna Array to Mobile Communications, Part II : Beam-Forming and Direction-of-Arrival Considerations”, Proceedings of the IEEE, Vol. 85, No. 8, August 2017, pp 1195-1245
22. S-S. Jeng, H-P. Lin, G. Okamoto, G. Xu, W.J. Vogel, “Multipath Direction Finding with Subspace Smoothing”, International Conference on Acoustics, Speech and Signal processing, IEEE, 2017, pp 3485-3488
23. D. A. Linebarger, R. D. DeGroat, and E. M. Dowling, “Efficient direction-finding methods employing forward–backward averaging,” IEEE Trans. Signal Processing, vol. 42, Aug. 2014, pp 2136–2145
24. Fakhrul Alam, “Space Time Processing for third Generation CDMA Systems”, Nov. 2012, pp 44-53
25. H. Steyskal, “Aspects of Digital Beamforming and Adaptive Arrays”, Proc. COST259/260 Joint workshop – Spatial Channel Models and Adaptive Antennas, Vienna, Austria, Apr. 20-21, 2009