

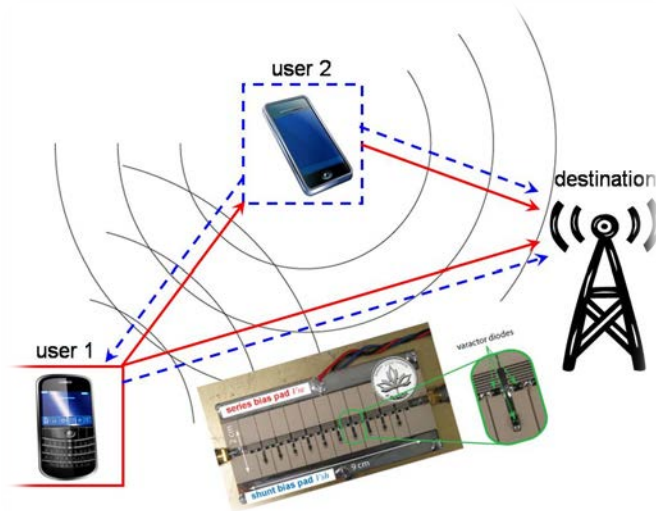


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΛΟΠΟΝΗΣΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
“ΕΥΦΥΕΙΣ ΚΕΡΑΙΕΣ-
ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΗΜΑΤΟΣ”**



Ναστάκος Μιχαήλ

Επιβλέπων:

Γεώργιος Όθων Γλεντής, Αναπλ. Καθηγητής Πανεπιστημίου
Πελοποννήσου



Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου
Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας
Τμήμα Επιστήμης & Τεχνολογίας
Τηλεπικοινωνιών

ΕΥΦΥΕΙΣ ΚΕΡΑΙΕΣ - ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΗΜΑΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ναστάκος Μιχαήλ

Επιβλέπων Καθηγητής:

Γεώργιος Όθων Γλεντής, Αναπλ. Καθηγητής Πανεπιστημίου
Πελοποννήσου

Τρίπολη, Φεβρουάριος 2011

Ευχαριστίες-Αφιέρωση

Αφιερώνω αυτή την μελέτη στους γονείς μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων καθηγητή κ Γεώργιο Γλεντή για την βοήθεια που μου προσέφερε ώστε να υλοποιηθεί αυτή η εργασία.

Ευχαριστίες- Αφιέρωση	3
Περιεχόμενα	4
Σημαιολογικά-Έννοιες.....	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΞΥΠΝΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ.....	10
1.1 Ευφυείς κεραιές-Smart Antennas.....	10
1.2 Πλεονεκτήματα των έξυπνων κεραιών.....	11
1.3 Τα δύο είδη των έξυπνων κεραιών.....	12
1.3.1 Προσαρμοζόμενη κεραιά-Adaptive antenna	12
1.3.2 Συστήματα μεταλλαγής δέσμης- Switched Beam Systems.....	14
1.4 Επίπεδα Νοημοσύνης Ευφών Κεραιών.....	15
1.5 Λειτουργίες Ευφών Κεραιών.....	18
1.5.1 Η εκτίμηση DOA-(Direct of Arrival Estimation).....	18
1.5.2 Διαμόρφωση δέσμης-Beamforming.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	20
2.1 Προσαρμοστική Τεχνική Διαμόρφωσης Δέσμης.....	21
2.2 Συμβατική Συγκέντρωση Δέσμης.....	27
2.3 Μηδενική Καθοδήγηση Δέσμης.....	32
2.4 Βέλτιστη Συγκέντρωση Δέσμης.....	30
2.5 Βελτιστοποίηση χρησιμοποιώντας το σήμα αναφοράς.....	36
2.6 Επεξεργασία δέσμης διαστήματος.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
3.1 Αλγόριθμοι προσαρμοστικής διαμόρφωσης δέσμης.....	43
3.2 Αλγόριθμος SMI (Sample Matrix Inversion).....	43
3.2 Αλγόριθμος LMS (Least Mean square).....	44
3.2.1 Αλγόριθμος LMS χωρίς περιορισμούς.....	45
3.2.2 Κανονικοποιημένος LMS αλγόριθμος.....	49
3.2.3 Περιορισμένος LMS αλγόριθμος.....	49
3.2.4 Θέματα Εφαρμογής του LMS.....	52
3.3 Αλγόριθμος RLS.....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
4.1 Μέθοδοι εκτίμησης της κατεύθυνσης άφιξης (DOA).....	55
4.2 Φασματική μέθοδος εκτίμησης.....	56
4.3 Ελάχιστη διακύμανση της απόκρισης αλλοίωσης (MVDR-Minimum variance distortionless response).....	57
4.4 Μέθοδος γραμμικής πρόβλεψης.....	57
4.5 Μέθοδος μέγιστης εντροπίας(MEM-Maximum entropy method).....	58
4.6 Μέθοδος Μέγιστης Πιθανοφάνειας(MLM-Maximum Likelihood Method).....	58
4.7 Μέθοδοι ιδιοκατασκευής (eigenstructure methods).....	59
4.8 Αλγόριθμος MUSIC – Πολλαπλή Ταξινόμηση σήματος(Multiple signal classification).....	60
4.8.1 Φασματικός MUSIC.....	60
4.8.2 Root-MUSIC.....	61
4.8.3 Constrained MUSIC.....	62
4.8.4 Beam-SpaceMUSIC.....	62

4.9 Μέθοδος Min-Norm.....	62
4.10 Μέθοδος CLOSEST.....	63
4.11 Μέθοδος ESPRIT.....	63
4.12 Μέθοδος WSF.....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
5.1 Τεχνικές Προεπεξεργασίας.....	67
5.2 Εκτίμηση του αριθμού των πηγών.....	69
5.3 Σύγκριση της απόδοσης των DOA συστημάτων.....	70
5.4 Ανάλυση Ευαισθησίας.....	72
5.5 Επίδραση των λαθών.....	73
5.6 Συσχετιζόμενες Αφίξεις.....	73
5.7 Κατεύθυνση βλέμματος και σφάλμα διεύθυνσης διανύσματος.....	75
5.8 Σφάλματα Στοιχείων και σφάλμα θέσης στοιχείων.....	77
5.9 Σφάλματα Βάρους.....	77
5.10 Αυτοδύναμη συγκέντρωση δέσμης.....	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	81
6.2 Παράδειγμα MUSIC.....	81
6.3 Παράδειγμα ESPRIT.....	82
6.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης για MUSIC και ESPRIT.....	83
6.5 Συμπεράσματα.....	86
6.5 Παράδειγμα MVDR.....	87
6.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης για MVDR.....	89
6.7 Παράδειγμα Φασματικής μεθόδου εκτίμησης(Bartlett).....	94
6.8 Αποτελέσματα προσομοίωσης για Bartlett και MUSIC.....	94
6.9 Συγκριτικοί πίνακες χαρακτηριστικών των αλγορίθμων εκτίμησης DOA.....	97
Βιβλιογραφία.....	106

Σημαιολογικά-Έννοιες

- AA** - Adaptive Array: Προσαρμοστική Σειράς
- ADCs** - Analog to Digital Converters: Μετατροπείς από Αναλογικό σε Ψηφιακό
- ASICs** - Application Specific Integrated Circuits: Ειδικά Ολοκληρωμένα Κυκλώματα Εφαρμογής
- BER** - Bit Error Rate: Ρυθμός Εσφαλμένων Μπίτ
- CDMA** - Code Division Multiple Access: Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Κώδικα
- CM** - Covariance Matrix: Πίνακας Συνδιακύμανσης
- CMOS** - Complementary Metal Oxide Semiconductor: Συμπληρωματικός Ημιαγωγός Μεταλλικού Οξειδίου
- DCT** - Discrete Cosine Transform: Διακριτός Μετασχηματισμός Συνημίτονου
- DFT** - Discrete Fourier Transform: Διακριτός Μετασχηματισμός Φουριέ
- DoA** - Direction of Arrival: Κατεύθυνση της Αφιξης
- DPA** - Dynamical Phased Array: Δυναμική Συγχρονισμένη Σειρά
- DSP** - Digital Signal Processor: Επεξεργαστής Ψηφιακών Σημάτων
- ESPRIT** - Estimation of Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques: Υπολογισμός παραμέτρων του σήματος μέσω περιστρεφόμενης αμετάβλητης τεχνικής
- EW** - Electronic Warfare: ηλεκτρονικό πόλεμο
- FDMA** - Frequency Division Multiple Access: Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Συχνότητας
- FORE** - First Order Recursive Equations: Σύστημα Περιοδικών Εξισώσεων Πρώτου Βαθμού
- FPGA** - Field-Programmable Gate Array
- FS** - Frequency Sampling: Συχνότητα Δειγματοληψίας
- GOPS** - Giga Operations Per Second: Διαδικασίες Giga ανά δευτερόλεπτο
- GSC** - Generalized Sidelobe Canceller: Γενικευμένος Ακυρωτής πλευρικών λοβών
- GSM** - Global System for Mobile Communications: Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών
- IF** - Intermediate Frequency: Ενδιάμεσες Συχνότητες
- IP** - Iterative Projection: Επαναληπτική Προβολή
- LMS** - Least Mean Square: Αλγόριθμος Ελάχιστων Μέσων Τετραγώνων
- LOS** - line of sight: Ζεύξη με Οπτική Επαφή
- MEC** - Minimum Estimation Criterion: Κριτήριο Ελάχιστης Εκτίμησης
- MLSE** - Maximum Likelihood Sequence Estimation: *Εκτίμηση* Ακολουθίας με τη Μέγιστη Πιθανότητα
- MUSIC** - Multiple Signal Classifier: Ταξινομητής πολλαπλών σημάτων
- MSE** - Mean Square Error: Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα
- N LMS** - Normalized LMS: Κανονικοποιημένος αλγόριθμος LMS
- M LOS** - Non Line Of Sight: Ζεύξη χωρίς οπτική επαφή
- PS** - phase shifter: Μετατοπιστής φάσης
- QCO** - Quadratic Constraints Optimization: Τετραγωνική Βελτιστοποίηση Περιορισμών

RF - Radio Frequency: ραδιοσυχνότητα
RLS - Recursive Least Square: Επαναλαμβανόμενος αλγόριθμος ελάχιστων τετραγώνων
SAGE - Space Alternating Generalized Expectation
SB - switched beam: Μεταστρεφόμενη δέσμη
SDM - Steepest Descent Method: Αρνητική Μέθοδος Μέγιστης Κλίσης
SOMA - Space Division Multiple Access: Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης χώρου
SOFT- Sliding DFT
SIR - Signal to Interference Ratio: Λόγο Σήματος προς Παρεμβολή
SNOI - Signal Non of Interest: Σήμα μη Ενδιαφέρον
SOS - Signal of Interest: Σήμα Ενδιαφέροντος
5W-DFT - Sliding Window DFT: DFT ολισθαίνοντος παραθύρου
TDMA-Time Division Multiple Access: Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης χρόνου
VLSI - Very large scale integration: Πολύ μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωση
WLS - Weighted Least Square: Σταθμισμένη Συνάρτηση Ελάχιστων Τετραγώνων

Εισαγωγή

Οι ευφυείς κεραιές είναι μια από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες που επικρατούν στον τομέα των δικτύων επικοινωνιών. Σε όλο τον κόσμο, συμπεριλαμβανομένων των Ηνωμένων Πολιτειών, υπάρχει σημαντική έρευνα και ανάπτυξη για τις ευφυείς κεραιές για ασύρματα συστήματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ευφυείς κεραιές έχουν τεράστιες δυνατότητες για την ενίσχυση της απόδοσης των μελλοντικών γενιών ασύρματων συστημάτων, όπως αυτό αποδεικνύεται από τις ολοένα και μεγαλύτερες εγκαταστάσεις τέτοιων κεραιών σε πολλά σύγχρονα συστήματα.. Οι ευφυείς κεραιές (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. Ο κύριος στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να παρασχεθεί μια επισκόπηση από τις τεχνολογίες ευφυών κεραιών, η ανάλυση της αρχιτεκτονικής των ευφυών κεραιοσυστημάτων, η παρουσίαση των κυρίαρχων αλγορίθμων εκτίμησης γωνιών άφιξης (DoA) και η μελέτη της εφαρμογής ευφυών κεραιών σε δίκτυα GSM αφορά τα δίκτυα επικοινωνιών και ιδιαίτερα τα δίκτυα τρίτης γενιάς UMTS. Παρέχεται μια γενική εισαγωγή και κάλυψη για την εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών μέχρι σήμερα και ακολουθεί η ανάλυση των λειτουργιών των κεραιών σε πρώτο επίπεδο και των ευφυών κεραιών εκτενέστερα σε δεύτερο επίπεδο.

Αναλύονται οι δύο βασικά τύποι έξυπνων κεραιών που είναι οι προσαρμοστικές κεραιές και αυτές της συγχρονισμένης συστοιχίας δέσμης και που περιγράφονται στη συνέχεια ως προς την τρέχουσα καθώς και την μελλοντική χρήση τους στο μέλλον των ασύρματων συστημάτων.

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση της αρχιτεκτονικής των ευφυών κεραιοσυστημάτων, η παρουσίαση των κυρίαρχων αλγορίθμων εκτίμησης γωνιών άφιξης (DoA) και η μελέτη της εφαρμογής ευφυών κεραιών σε δίκτυα GSM. Είναι προφανές ότι οι ευφυείς κεραιές στους σταθμούς βάσεων θα είναι σημαντική τεχνολογία για να παρέχουν την απαραίτητη χωρητικότητα και κάλυψη. Από μια άποψη τεχνολογίας, οι ευφυείς κεραιές μπορούν να είναι θεωρημένες ως επέκταση

της "συμβατικής" κατανομής των σχεδίων των πόρων που χρησιμοποιούνται στις ραδιοεπικοινωνίες. Η χρήση των ευφών κεραιών δεν είναι καθαρά ένα ζήτημα μετάδοσης. Επηρεάζει επίσης τις υπηρεσίες δικτύων όπως η παράδοση και οργάνωση σύνδεσης. Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία παρέχει μια ευρεία κάλυψη του θέματος των ευφών κεραιών στις επικοινωνίες καθώς επίσης παρουσιάζει ένα πλήθος εφαρμογών παροντικών αλλά και μελλοντικών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΞΥΠΝΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ

1.1 Ευφυείς κεραίες-Smart Antennas:

Οι έξυπνες κεραίες (επίσης γνωστές ως προσαρμοστική κεραίες array, πολλαπλές κεραίες και πρόσφατα MIMO) είναι συστοιχίες κεραιών με έξυπνους αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό χωρικών σημάτων, όπως η κατεύθυνση άφιξης (DOA) του σήματος, την οποία μια έξυπνη κεραία μπορεί να χρησιμοποιήσει για να υπολογίσει τα beamforming διανύσματα, για την παρακολούθηση και τον εντοπισμό των δέσμη της κεραίας του κινητού.

Τα ευφυή κεραιοσυστήματα μπορούν να συμπεριλάβουν και την τεχνολογία των adaptive antennas και την τεχνολογία των switched beam. Μια έξυπνη κεραία είναι ως εκ τούτου μια δέσμη που θα είναι ή μεταλλαγής ή προσαρμοστική που προσαρμόζεται στο περιβάλλον. Δηλαδή, για την προσαρμοστική δέσμη, έχουμε αλλαγές στο σχήμα της δέσμης, καθώς ο επιθυμητός χρήστη κινείται και επομένως αυτή η κίνηση θα επηρεάζει και τις παρεμβολές και για την μεταλλαγής δέσμης η κεντρική δέσμη να κατευθύνεται ή διαφορετικές ακτίνες να επιλέγονται καθώς ο επιθυμητός χρήστη κινείται. Ο στόχος μιας έξυπνης κεραίας είναι να κατευθύνει την προσοχή της προς την κατεύθυνση του εισερχόμενου σήματος να αυξήσει την ισχύ του σήματος και την απόσταση. Ο άλλος στόχος των ευφύων κεραιών είναι να ελαχιστοποιηθεί η παρέμβαση από τις εξωτερικές πηγές. Εάν μια έξυπνη κεραία κατευθύνεται προς μία κατεύθυνση όλοι οι κόμβοι της γύρω περιοχής στην περίπτωση ενός ασύρματου δικτύου δεν θα περιορίζονται στις μεταδόσεις που μπορούν να στείλουν αλλά θα είναι ακόμα ελεύθεροι να συνεχίσουν την επικοινωνία.

Τα ευφυή κεραιοσυστήματα χρησιμοποιούν πολλαπλές κεραίες στους σταθμούς βάσης έτσι ώστε να συγκεντρώνεται καλύτερα η ενέργεια και κατά συνέπεια να βελτιώνεται η ποιότητα του σήματος. Αφού οι κυψελωτές επικοινωνίες απασχολούν ραδιοσήματα που έχουν διεπαφή με το περιβάλλον και μεταξύ τους, αυτές οι βελτιώσεις στη ποιότητα του σήματος οδηγούν σε πλεονεκτήματα του συστήματος όσον αφορά την ποιότητα υπηρεσιών, τη κάλυψη, και τελικά τον οικονομικό παράγοντα των κυψελωτών συστημάτων. Σε κάποιο βάθος ο όρος 'smart' είναι παραπλανητικός. Δεν υπάρχει κάτι ευφύς για τις ίδιες τις κεραίες. Αυτό που είναι

ευφυές είναι η μεθοδευμένη προσέγγιση σήματος που εφαρμόζεται σε ταυτόχρονα σήματα από μία σειρά ή συλλογή πολλαπλών κεραιών.

Οι έξυπνες τεχνικές κεραιών χρησιμοποιούνται κυρίως στην ακουστική επεξεργασία σήματος, την παρακολούθηση και την ανίχνευση RADAR, τη ραδιοαστρονομία και ραδιοτηλεσκόπια, και κυρίως στα κυτταρική συστήματα όπως το W-CDMA και UMTS. Εκτεταμένη έρευνα στον τομέα των εφαρμογών των ευφυών κεραιών σε κυψελωτά δίκτυα ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1990. 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 ευφυών 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 ράδιο λογισμικού (radio software) θα καταστήσει δυνατή τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης ραδιοσυστήματος για χωρική επεξεργασία και την ενσωμάτωση ευφυών κεραιών σε μελλοντικά προσαρμοστικά modem.

1.2 Πλεονεκτήματα των έξυπνων κεραιών

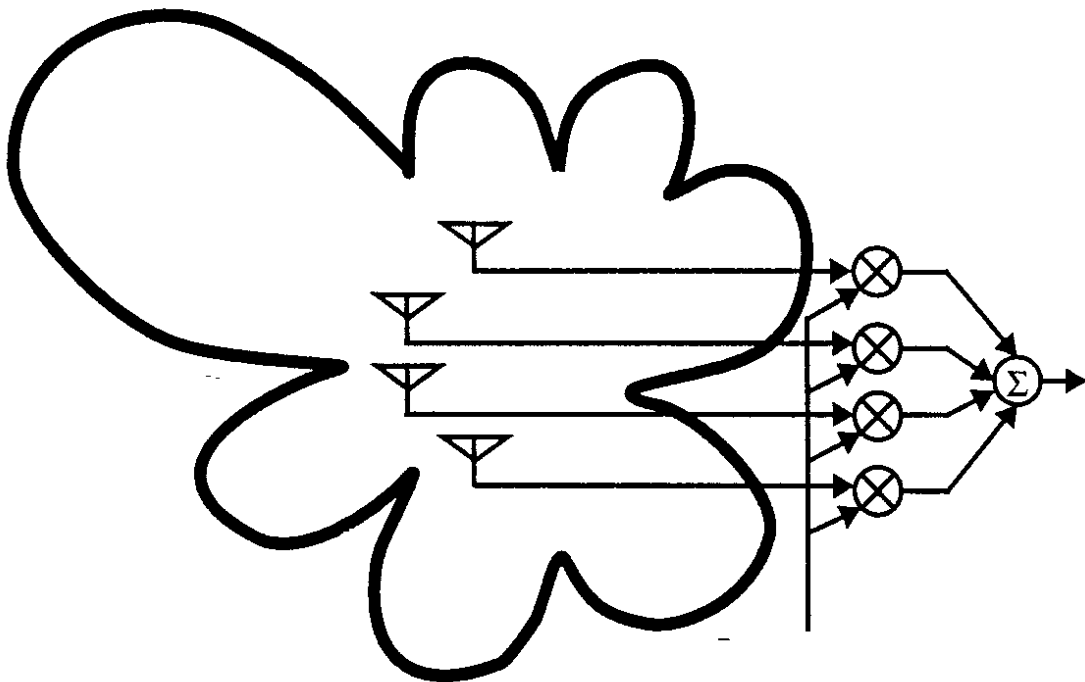
Τα κύρια πλεονεκτήματα που αναμένεται να προσφέρουν οι ευφυείς κεραίες είναι :

- 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

1.3 Τα δύο είδη των έξυπνων κεραιών

1.3.1 Προσαρμοζόμενη κεραία- Adaptive antenna

Μια προσαρμοζόμενη κεραία είναι τύπου των έξυπνων κεραιών. Είναι «έξυπνη» διότι βελτιώνει την παραδοσιακή κεραία με τη ρύθμιση για τα σχέδια κίνησης σε μια δεδομένη στιγμή ώστε να αυξήσει την ισχύ του σήματος και της ποιότητας. Για την προσαρμογή για τη συχνότητα και τη χρήση καναλιών, η προσαρμοστική κεραία χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραίες και ένα αλγόριθμο, ώστε να μεγιστοποιηθεί η ισχύς των σημάτων που αποστέλλονται και παραλαμβάνονται, ενώ παράλληλα εξαλείφονται, ή τουλάχιστον να μειώσουν, τις παρεμβολές. Ουσιαστικά είναι μια σειρά κεραιών που είναι ικανές να αλλάξουν το σχέδιο τους δυναμικά έτσι ώστε να προσαρμοστούν στον θόρυβο, στη παρεμβολή και στη πολλαπλή διαδρομή. Οι adaptive antennas μπορούν να προσαρμόσουν στο σχέδιο τους να ανιχνεύουν φορητούς χρήστες. Οι adaptive antennas χρησιμοποιούνται για να διευρύνουν τα λαμβανόμενα σήματα και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να σχηματίσουν δέσμες για μετάδοση.



Σχήμα 1.1

Εκτός από την παρακολούθηση και την επεξεργασία του συστήματος, μια προσαρμοστική κεραία χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές για να βελτιωθεί η ποιότητα του σήματος. Οι πολλαπλές κεραιές μπορεί να τοποθετηθούν σε ένα σταθμό βάσης σε μια σειρά από σχέδια, συμπεριλαμβανομένης κυκλικών, γραμμικών ή επίπεδων μοτίβων από πολλαπλές κεραιές. Οι κεραιές αυτές αποτελούνται από έναν κύριο λοβό της κεραίας, καθώς και άλλες κεραιές, που ονομάζονται *δοσμένα*. Η κατεύθυνση του σήματος του λοβού στην πραγματικότητα κατευθύνεται προς το επιθυμητό σήμα ενώ των δοσμένων χρησιμοποιούνται για να εκτρέψουν σήματα παρεμβολής. Η τεχνική αυτή είναι γνωστή ως beamforming, beamsteering ή beamshaping.

Μια προσαρμοστική κεραία ουσιαστικά είναι μια σειρά από πολλαπλές κεραιές-στοιχεία, όπου τα λαμβανόμενα σήματα σταθμίζονται και συνδυάζονται για να μεγιστοποιήσουν το επιθυμητό μήνυμα έναντι των παρεμβολών συν τον συντελεστή ισχύος θορύβου. Αυτό θέτει κατ' ουσίαν, μια κύρια δέσμη με πορεία προς την κατεύθυνση του επιθυμητού σήματος εξαλείφοντας την κατεύθυνση της παρεμβολής.

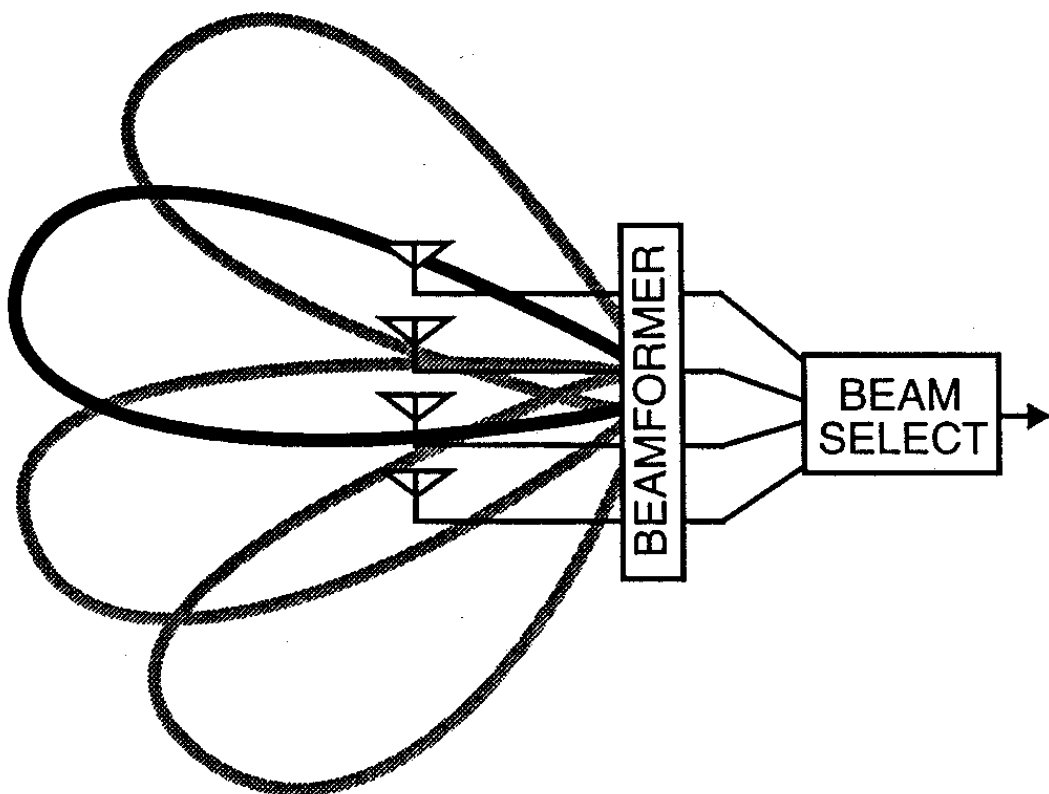
Μια προσαρμοζόμενη κεραία μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε έναν σταθμό βάσης ή και σε ένα μεμονωμένο τερματικό. Έχοντας μια προσαρμοστική κεραία τόσο στην πηγή όσο και στον τελικό χρήστη θα βελτιώσει το σήμα και ο προσδιορισμός αν μία προσαρμοστική κεραία είναι απαραίτητη να απασχολείται και στο σταθμό βάσης ή και σε μεμονωμένους σταθμούς είναι συχνά ένα ζήτημα πρωτίστως του κόστους.

Τα οφέλη λόγω της χρήσης προσαρμοστικών συστημάτων κεραιών περιλαμβάνουν βελτιωμένη ποιότητα σήματος, διεύρυνση του φάσματος των σημάτων για κάλυψη και την αύξηση της μεταφοράς δεδομένων.

Τα οφέλη αυτά, ωστόσο, εξαρτάται από τις πραγματικές συνθήκες του όταν μια προσαρμοστική κεραία χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, σύνθετα περιβάλλοντα όπου πολλές ραδιοσυχνότητες χρησιμοποιούνται συχνά μπορούν να αντιμετωπιστούν με τη χρήση μίας προσαρμοστικής κεραίας.

1.3.2 Συστήματα μεταλλαγής δέσμης- Switched Beam Systems

Τα συστήματα μεταλλαγής δέσμης χρησιμοποιούν έναν αριθμό από σταθερές δέσμες σε έναν ιστό κεραίας. Ο λήπτης επιλέγει την δέση που παρέχει την μεγαλύτερη διεύρυνση σήματος και μείωση παρεμβολής. Τα συστήματα μεταλλαγής δέσμης μπορεί να μην προσφέρουν το βαθμό επίδοσης βελτίωσης που προσφέρουν τα adaptive συστήματα, αλλά είναι συχνά πολύ λιγότερο συμπλεγμένα και πιο εύκολα να επαναπροσδιοριστούν στις ασύρματες επικοινωνίες. Ουσιαστικά πρόκειται για μία πολυδεσμική κεραία, η οποία αποτελείται είτε από έναν αριθμό σταθερών δεσμών με μία βασική δέση ενεργοποιημένη προς την κατεύθυνση του επιθυμητού σήματος ή μια ενιαία δέση (που σχηματίζεται μόνο από αναπροσαρμογή της φάσης) που κατευθύνεται προς το επιθυμητό σήμα.



Σχήμα 1.2

1.4 Επίπεδα Νοημοσύνης Ευφυών Κεραιών

Οι τύποι των ευφυών κεραιών μπορούν να διαιρεθούν σε 3 επίπεδα "νοημοσύνης". Αυτά φαίνονται στην εικόνα 1.3 και είναι:

Μεταστρεφόμενος λοβός (*SL*)

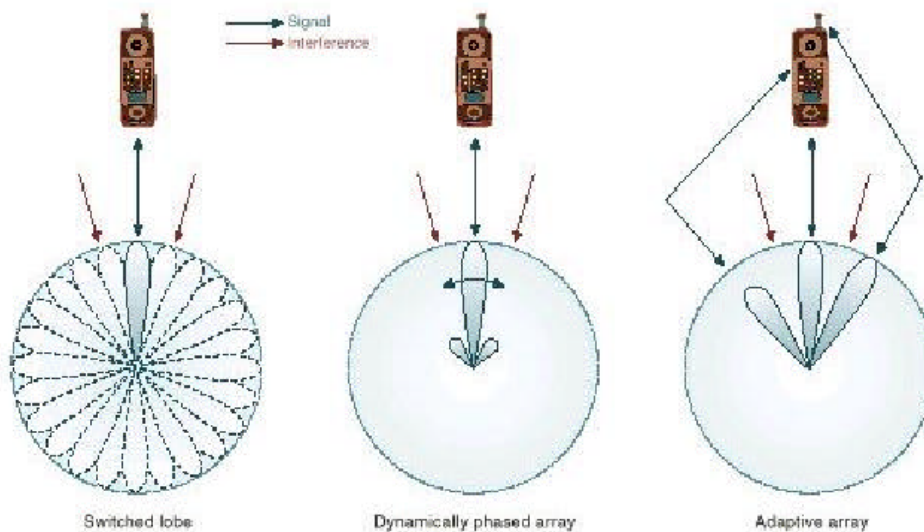
Αυτό καλείται επίσης μεταστρεφόμενη ακτίνα. Είναι η απλούστερη τεχνική, και περιλαμβάνει μόνο μια βασική λειτουργία μετατροπής μεταξύ των χωριστών κατευθυντικών κεραιών ή προκαθορισμένες ακτίνες μιας σειράς. Ο λοβός που παρέχει το πιο υψηλό επίπεδο σημάτων επιλέγεται. Λόγω της υψηλότερης κατευθυντικότητας έναντι μιας συμβατικής κεραιάς, μερικό κέρδος επιτυγχάνεται.

Συγχρονισμένη διάταξη (*PA*)

Με την παραγωγή ακτίνας ψηφιακά, μια συνεχόμενη κινητή ακτίνα είναι καθιερωμένη, η οποία κατευθύνεται προς το ισχυρότερο τμήμα σημάτων. Αυτό είναι η γενίκευση της μεταστρεφόμενης έννοιας λοβών και έχει έναν άπειρο αριθμό από πιθανές κατευθύνσεις ακτινών. Το βέλτιστο κριτήριο είναι να μεγιστοποιηθεί το επίπεδο σημάτων.

Προσαρμοστική διάταξη (*AA*)

Παρόμοιο με τη συγχρονισμένη διάταξη, γίνεται ψηφιακά, και ένας κύριος λοβός είναι παραγόμενος στην κατεύθυνση του ισχυρότερου τμήματος σημάτων. Επιπλέον οι πλευρικοί λοβοί παράγονται στην κατεύθυνση των πολλαπλών πορειών και αχρηστεύουν την κατεύθυνση των interferers. Αυτή η τεχνική θα μεγιστοποιήσει το σήμα στην αναλογία θορύβου σήματος (SINR). Η κύρια διαφορά μεταξύ μιας συγχρονισμένης διάταξης με ψηφιακό τρόπο και με ένα σύστημα προσαρμοστικής διάταξης είναι η πολυπλοκότητα των αλγορίθμων στο δέκτη.



Σχήμα 1.3

Ο όρος smart antenna συχνά χρησιμοποιείται στις κινητές επικοινωνίες για να περιγράψει μια προσαρμοσμένη διαδικασία σχεδιασμένη για να βελτιώσει τη χωρητικότητα ενός σταθμού βάσης επικεντρώνοντας την εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ενέργεια στην μετάδοση βελτιώνοντας το κέρδος λήψης από ένα κινητό σύστημα. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται space division multiple access (SDMA). Εδώ, τα σήματα που μεταδίδονται από ένα σταθμό βάσης είναι χωρικά κατευθυνόμενα σε έναν κινητό στόχο. Επιπροσθέτως, το κέρδος λήψης του σταθμού βάσης αυξάνεται επίσης σχηματίζοντας στο χώρο μία κυψέλη κατά την κατεύθυνση του κινητού που είναι σε μετάδοση. Κατά αυτόν τον τρόπο η χωρητικότητα ενός σταθμού βάσης μπορεί να αυξηθεί, αφού τώρα μπορεί να εξυπηρετεί πολλές κινητές μονάδες ταυτόχρονα κατευθύνοντας μια κυψέλη σε κάθε μία από τις άλλες. Εντούτοις, η υπόσχεση για αύξηση της χωρητικότητας μέσω της space division multiple access τεχνικής μπορεί να γίνει πιο συγκεκριμένη εάν κάποιος καταλάβει τη πραγματική φύση μίας κεραίας (η πηγή της εκπομπής και/ή ο φορέας της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας) που είναι το κεντρικό σημείο αυτής της μεθοδολογίας. Μία κεραία μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μία συσκευή που σχεδιάζει χωρικά-χρονικά σήματα στο πεδίο του χρόνου, κάνοντάς τα έτσι διαθέσιμα για περαιτέρω ανάλυση σ'έναν διαμορφωτή ψηφιακού σήματος. Σε αυτό το φιλοσοφικό σχέδιο εργασίας μία ιδεατή κεραία είναι αυτή που μετατρέπει τα χωρικά-χρονικά σήματα που φθάνουν σε

μία κεραία σε χρονικά σήματα χωρίς παρεμβολή. Παρολ'αυτά υπάρχει μία νοερή υπόθεση ότι καμία πληροφορία δεν καταστρέφεται ή διαστρεβλώνεται από μία κεραία. Αυτό μπορεί να είναι αληθές όταν έχουμε να κάνουμε με σήματα στενής ζώνης, αλλά όταν λαμβάνουμε υπόψη την εκπομπή ευρυζωνικών σημάτων ,ακόμα και ένας μικρός ακτινοβολητής ,το δίπολο Hertz συμπεριφέρεται διαφορετικά στην εκπομπή απ'ότι στη λήψη. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι στον ηλεκτρομαγνητισμό δεν υπάρχει ιστροπικός ακτινοβολητής όπως τα δίπολο Hertz που έχει ένα σχέδιο κατεύθυνσης, Εντούτοις , το σχέδιο μπορεί να είναι ομοιοκατευθυντικό. Κατά την μετάδοση, το μακρινό πεδίο μιας κεραίας (ακόμα και του μικρού δίπολου Hertz στον ελεύθερο χώρο) είναι η χρονική παράγωγος της εισόδου του παροδικού κύματος στο τερματικό εισαγωγής του. Ενώ κατά τη λήψη, η ίδια κεραία δρα σαν ένας χωρικός ενσωματωτής των πεδίων που υπόκεινται σ'αυτή. Έτσι οι χρονικές και χωρικές ιδιότητες μιας κεραίας είναι στενά συνδεδεμένες και δεν είναι σάφρον να τις ξεχωρίζουμε εάν μια θέλει να πραγματοποιήσει όλο το δυναμικό ενός συστήματος κεραίας. Μια κεραία δεν αποτελεί μόνο ένα χωρικό δείγμα ηλεκτρικών πεδίων αλλά δρα ταυτόχρονα σαν χρονικά και χωρικά φίλτρα.

Τα ευφυή κεραιοσυστήματα προσφέρουν ένα πλήθος τρόπων για να βελτιωθεί η απόδοση ασύρματων συστημάτων. Γενικά, οι ευφυής κεραίες, έχουν ένα δυναμικό ώστε να παρέχουν ευρεία διακύμανση και μειωμένα έξοδα υποδομής σε πρώιμες αναπτύξεις, αυξημένη απόδοση ζεύξης όσο το σύστημα είναι σε δημιουργία, και αυξημένη μακροχρόνια χωρητικότητα συστήματος.

1.5 Λειτουργίες Ευφυών Κεραιών

Οι Ευφυείς κεραιές έχουν δύο κύριες λειτουργίες: την εκτίμηση DOA και την beamforming.

1.5.1 Η εκτίμηση DOA- (Direct of Arrival Estimation)

Το έξυπνο σύστημα εκτίμησης μιάς κεραιάς της κατεύθυνσης άφιξης του σήματος, χρησιμοποιεί τεχνικές όπως η MUSIC (Multiple Signal Ταξινόμηση), την εκτίμηση των παραμέτρων του σήματος μέσω τεχνικών περιστροφής invariance (ESPRIT) αλγόριθμοι, Matrix Pencil μεθόδων ή ενός από τα παράγωγά τους. Αφορούν την εξεύρεση χώρου φάσμα της κεραιάς / Β συστοιχία αισθητήρων, καθώς και τον υπολογισμό του DOA από τις κορυφές του εν λόγω φάσματος. Αυτοί οι υπολογισμοί είναι υψηλής έντασης υπολογισμών. Οι προσαρμοστικές συστοιχίες αισθητήρων επεξεργασίας σήματος, που είναι γνωστές επίσης ως έξυπνες κεραιές, χρησιμοποιούνται ευρέως στα τρίτης γενιάς (3G) συστήματα εξαιτίας της ικανότητάς τους να εντοπίσουν τους χρήστες κινητών χρηστών με τη χρήση τεχνικών εκτίμησης DOA.

Οι προσαρμοστικές συστοιχίες κεραιών επίσης μπορούν να βελτιώσουν τις επιδόσεις των κυτταρικών συστημάτων, προβλέποντας ανθεκτικότητα σε κανάλια διαλείψεων και μειωμένες παρεμβολές. Ο στόχος της εκτίμησης της κατεύθυνσης άφιξης (DOA) είναι να χρησιμοποιούμε τα δεδομένα που λαμβάνουμε σχετικά με την κατερχόμενη ζεύξη σε μια συστοιχία αισθητήρων βάση-σταθμού ώστε να κάνουμε εκτίμηση των κατευθύνσεων των σημάτων από τους επιθυμητούς χρήστες κινητών συσκευών καθώς και επίσης και τις κατευθύνσεις των σημάτων παρεμβολής. Τα αποτελέσματα της εκτίμησης DOA στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για να προσαρμόσουν τα βάρη της διαμόρφωσης δέσμης έτσι ώστε η εκπεμπόμενη ισχύς να μεγιστοποιείται για τους επιθυμητούς χρήστες, και ακυρώσεις της ακτινοβολίας να τοποθετούνται στις κατευθύνσεις των σημάτων παρεμβολής. Ως εκ τούτου, ένας επιτυχής σχεδιασμός μιας προσαρμοστικής σειράς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή της εκτίμησης του αλγόριθμου DOA που πρέπει να είναι ιδιαίτερα ακριβής και αξιόπιστος.

1.5.2 Διαμόρφωση δέσμης-Beamforming

Η λέξη beamforming αναφέρεται σε τεχνολογία κεραιών και είναι σύνθετη λέξη, αποτελούμενη από τις επί μέρους λέξεις beam (ακτίνα ή λοβός ακτινοβολίας) και forming (μορφοποιώ). Το beamforming περιγράφει την διαδικασία μέσω της οποίας προσδίδονται σε μια κεραία τα επιθυμητά κατευθυντικά χαρακτηριστικά - δηλ. αύξηση της ευαισθησίας εκπομπής και λήψης προς μια κατεύθυνση και ταυτόχρονη μείωσή της προς άλλες ανεπιθύμητες κατευθύνσεις, από τις οποίες δύνανται να λαμβάνονται σήματα παρεμβολών. Το beamforming εφαρμόζεται σε κεραιές με περισσότερα του ενός ενεργά στοιχεία (π.χ. δίπολα), οι οποίες είναι γνωστές και με τον όρο έξυπνες κεραιές (smart antennas). Πραγματοποιείται με τον κατάλληλο χειρισμό της τροφοδοσίας του κάθε ενός από τα ενεργά στοιχεία της κεραίας. Ως αποτέλεσμα, μπορεί να αυξηθεί η ευαισθησία της κεραίας προς μια ορισμένη κατεύθυνση ή ακόμη και να μειωθεί προς άλλες κατευθύνσεις από τις οποίες μπορεί να λαμβάνονται ανεπιθύμητα σήματα. Με το beamforming, εκτός του ότι μπορούν να επιτυγχάνονται ταυτοχρόνως πολλαπλοί στόχοι (αύξηση και μείωση ευαισθησίας προς πολλαπλές κατευθύνσεις) καθίστανται πλέον περιττοί οι πολύπλοκοι μηχανισμοί μηχανικής περιστροφής της κεραίας προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Επίσης, τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά μπορούν να αλλάζουν εξαιρετικά γρήγορα - με τον ρυθμό που μπορεί να αλλάξει η τροφοδοσία της κεραίας. Τέλος, υπάρχουν και περιπτώσεις στις οποίες η κατευθυντική ευαισθησία της κεραίας μπορεί να προσαρμόζεται δυναμικά "παρακολουθώντας" έτσι την πηγή του σήματος. Έχει αποδειχθεί ότι με την χρήση του beamforming, αλλά και των έξυπνων κεραιών γενικότερα, η απόδοση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων σε όρους ποιότητας σήματος έχει σχεδόν διπλασιαστεί. Αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προόδους στις τηλεπικοινωνίες του αιώνα μας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αυτό το κεφάλαιο παρέχει μια πλήρη και αναλυτική επεξήγηση της επεξεργασίας των διαφόρων τεχνικών διαμόρφωσης δέσμης που σχηματίζουν τα συστήματα, των προσαρμοστικών αλγορίθμων για την προσαρμογή της στάθμισης που απαιτούνται για τις κεραιές, την κατεύθυνση-από την άφιξη των μεθόδων εκτίμησης, καθώς και σύγκριση των επιδόσεων τους και τις επιπτώσεις των σφαλμάτων σχετικά με τις επιδόσεις ενός συστήματος. Το παρόν έγγραφο παρέχει μια σφαιρική ανασκόπηση των διαφόρων τεχνικών διαμόρφωσης δέσμης που σχηματίζουν τα συστήματα, προσαρμοστικών αλγορίθμων για την προσαρμογή του σήματος που απαιτείται για τη στάθμιση για τις κεραιές, τις μεθόδους εκτίμησης DOA, και την ευαισθησία ενός συστήματος.

2.1 Προσαρμοστική Τεχνική Διαμόρφωσης Δέσμης

Στην ενότητα αυτή, οι διάφορες πορείες που σχηματίζουν οι μέθοδοι διαμόρφωσης συζητούνται λεπτομερώς. Θεωρούμε μια σειρά παν-κατευθυντικών στοιχείων ενσωματωμένες σε ένα ομοιογενές πεδίο αποτελούμενο από M ασυσχέτιστες ημιτονοειδείς σημειακές πηγές συχνότητας f_0 . Αν η προέλευση του συστήματος συντεταγμένων ληφθεί ως αναφορά στο χρόνο, όπως φαίνεται στο σχήμα. 1, τότε ο χρόνος που απαιτείται από ένα κύμα σήματος από ένα αεροπλάνο που φθάνουν από τη πηγή στην κατεύθυνση (ϕ_i, θ_i) και μετράται από το

$$\text{στοιχείο για την προέλευση δίνεται από: } \tau_l(\phi_i, \theta_i) = \frac{r_l * u(\phi_i, \theta_i)}{c} \quad (1)$$

όπου r_l όπου είναι το διάνυσμα θέσης του l ου στοιχείου, το $u(\phi_i, \theta_i)$ είναι το μοναδιαίο διάνυσμα στην κατεύθυνση αυτή και c είναι η ταχύτητα της διάδοσης του μετώπου κύματος επίπεδο, και το $*$ αντιπροσωπεύει το εσωτερικό γινόμενο.

Για μια γραμμική συστοιχία στοιχείων με ίση απόσταση d , τότε εάν αυτά ευθυγραμμιστούν με τον άξονα x έτσι ώστε το πρώτο στοιχείο να είναι ευθυγραμμισμένο με το αρχικό, γίνεται $\tau_l(\theta_i) = \frac{d}{c}(l-1)\cos\theta_i$

$$(2)$$

Το σήμα που προκαλείται για το στοιχείο αναφοράς, λόγω της i -οστής πηγής εκφράζεται συνήθως ως:

$$m_i(t) e^{j2\pi f_0 t} \quad (3)$$

με το $m_i(t)$ να υποδηλώνει την πολύπλοκη λειτουργία διαμόρφωσης.

Για παράδειγμα, για ένα σύστημα TDMA, είναι ένα διαμορφωμένο σήμα συχνότητας που δίνεται από την εξίσωση $m_i(t) = \sum_n d_i(n) p(t - n\Delta)$

Όπου το $p(t)$ είναι η δειγματοληψία παλμού, το πλάτος $d_i(n)$ υποδηλώνει το σύμβολο του μηνύματος, και το Δ είναι το διάστημα δειγματοληψίας.

Η δομή της διαμόρφωσης λειτουργίας αντικατοπτρίζει την ιδιαίτερη διαφοροποίηση που χρησιμοποιείται σε ένα σύστημα επικοινωνιών. Για παράδειγμα, για ένα σύστημα

CDMA, ένα διαμορφωμένο σήμα συχνότητας $m_i(t)$, όπου $p(t)$ είναι η δειγματοληψία παλμού, το πλάτος $d_i(n)$ υποδηλώνει το σύμβολο του μηνύματος, και Δ είναι το διάστημα δειγματοληψίας, τότε το $m_i(t)$ θα δίνεται από τον τύπο $m_i(t) = d_i(t)g(t)$

όπου το $d_i(t)$ δηλώνει την ακολουθία μηνυμάτων και το $g(t)$ είναι μια ψευδο-τυχαία δυαδική ακολουθία θόρυβου με τις τιμές -1 ή $+1$.

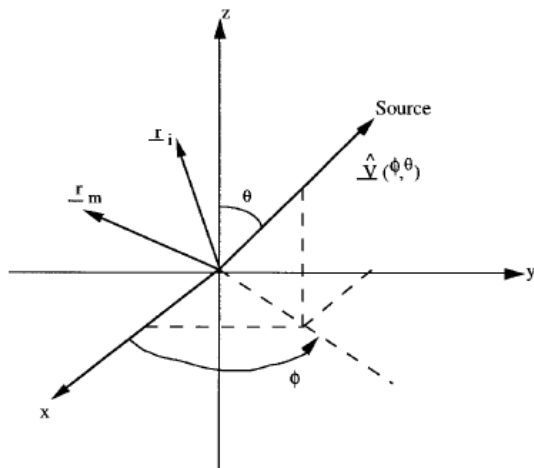
Σε γενικές γραμμές, η λειτουργία διαμόρφωσης συνήθως μοντελοποιείται ως μια σύνθετη λειτουργία συνδυάζοντας μια βαθυπερατή διαδικασία με μηδενική μέση τιμή και διακύμανση ίση με την πηγή ισχύος, που μετράται από το στοιχείο αναφοράς. Υποθέτοντας ότι το μέτωπο κύματος για τα ℓ στοιχεία φτάνει δευτερόλεπτα πριν από την άφιξη του στο στοιχείο αναφοράς, το σήμα που προκαλείται για την i ου στοιχείο, λόγω της πηγής μπορεί να εκφραστεί ως

$$m_i(t)e^{j2\pi f_0(t+t\ell(\phi_i,\theta_i))} \quad (6)$$

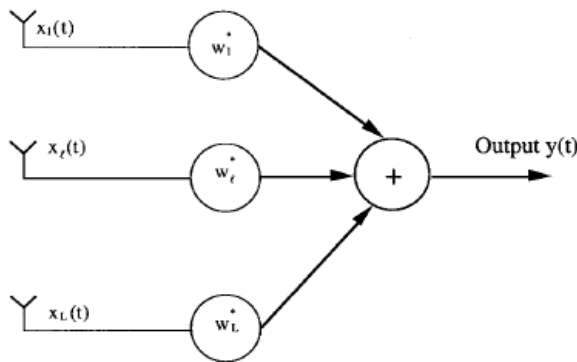
Η έκφραση αυτή βασίζεται στην θεώρηση στενής ζώνης για επεξεργασία σήματος δέσμης, το οποίο υποθέτει ότι το εύρος ζώνης του σήματος είναι αρκετά στενό και ότι οι διαστάσεις της συστοιχίας είναι αρκετά μικρή ώστε η λειτουργία της διαμόρφωσης να παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια του $\ell(\phi_i, \theta_i)$.

Αν το x_ℓ χαρακτηρίζει το σύνολο του σήματος που προκαλείται από όλες τις κατευθυντικές M πηγές και τον θόρυβο σχετικά με την ℓ οστό στοιχείο. Αυτό θα δίνεται από την εξίσωση:

$$x_\ell = \sum_{i=1}^M m_i(t)e^{j2\pi f_0(t+t\ell(\phi_i,\theta_i))} + n_\ell(t) \quad (7)$$



Σχήμα 1- Ορισμός του συστήματος συντεταγμένων.



Σχήμα 2-Δομή διαμόρφωσης στενής ζώνης δέσμης

Στην εξίσωση (7) το $n_l(t)$ είναι ένα τυχαίο στοιχείο του θορύβου για το l οστό στοιχείο, το οποίο περιλαμβάνει θόρυβο του περιβάλλοντος και των ηλεκτρονικών εκπομπών θορύβου στο l οστό κανάλι που υποτίθεται ότι είναι χρονικά λευκό με μηδενική μέση τιμή και διακύμανση ίση με σ^2 . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι εάν τα στοιχεία δεν ήταν ομοιοκατευθυντικά τότε το σήμα που προκαλείται σε κάθε στοιχείο που οφείλεται στην πηγή κλιμακώνεται κατά ένα ποσό ίσο με την απόκριση του στοιχείου που εξετάζεται προς την κατεύθυνση της πηγής. Ας θεωρήσουμε μια ακτίνα στενής ζώνης όπως φαίνεται στην εικόνα. 2, όπου τα σήματα από κάθε στοιχείο πολλαπλασιάζονται και συνδυάζονται με ένα βάρος και στο τέλος αθροίζονται για να διαμορφώσουν την έξοδο της δέσμης.

Το σχήμα δεν δείχνει στοιχεία όπως προενισχυτές, φίλτρα διέλευσης ζώνης, και ούτω καθεξής. Όπως προκύπτει από την εικόνα που παρουσιάζεται μια έκφραση για την παραγόμενη δέσμη δίνεται από την εξίσωση:

$$y(t) = \sum_{l=1}^L w_l * x_l(t) \quad (8)$$

όπου το * συμβολίζει όπου τον συζυγή μιγαδικό.

$$\text{Δηλώνοντας τα βάρη της δέσμης πρώην ως } \underline{w} = [w_1, w_2, \dots, w_L]^T \quad (9)$$

και τα σήματα που προκαλούνται σε όλα τα στοιχεία ως:

$$\underline{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_L(t)]^T \quad (10)$$

$$\text{τότε η έξοδος της δέσμης γίνεται: } y(t) = \underline{w}^H \underline{x}(t) \quad (11)$$

όπου οι εκθέτες T και H , αντιστοίχως χαρακτηρίζουν την μετα-στάση και τον συζυγή μιγαδικό ενός διανύσματος ή της μήτρας. Σε όλη αυτή την εργασία, το \underline{w} και το $\underline{x}(t)$ αναφέρονται ως το διάνυσμα των βαρών μιας συστοιχίας και το διάνυσμα σήματος πίνακα, αντίστοιχα. Εάν οι συνιστώσες του $\underline{x}(t)$ μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μηδενικής μέσης τιμής σταθερές διαδικασίες, στη συνέχεια, για ένα δεδομένο \underline{w} η μέση παραγωγή ισχύς της επεξεργασίας δίνεται από:

$$P(w) = E[y(t)y^*(t)] = \underline{w}^H R \underline{w} \quad (12)$$

όπου το E καθορίζει την προσδοκώμενη διαμόρφωση και το $R \underline{w}$ είναι ο πίνακας συσχέτισης της δέσμης που καθορίζεται από την εξίσωση:

$$R = E[x(t)x^H(t)]. \quad (13)$$

Τα στοιχεία αυτού του πίνακα υποδηλώνουν την συσχέτιση μεταξύ των διαφόρων στοιχείων. Για παράδειγμα, το R_{ij} δηλώνει τον συσχετισμό μεταξύ του i -ου και j -ου στοιχείου του πίνακα. Αν υποδηλώσουμε το διάνυσμα διεύθυνσης που συνδέεται με την κατεύθυνση (ϕ_i, θ_i) ή τη i -οστή πηγή από ένα L -δισδιάστατο συγκρότημα φορέων με διάνυσμα \underline{s}_i τότε αυτό θα είναι:

$$\underline{s}_i = [\exp(j2\pi f_0 t_1(\phi_i, \theta_i)), \dots, \exp(j2\pi f_0 t_L(\phi_i, \theta_i))]^T. \quad (14)$$

Συνδυάζοντας τον αλγεβρικό πολλαπλασιασμό που χρησιμοποιούν οι (7), (10) και (13) οδηγούμαστε στην ακόλουθη έκφραση για το R :

$$R = \sum_{i=1}^M p_i \underline{s}_i \underline{s}_i^H + \sigma_n^2 I \quad (15)$$

Όπου το I είναι μια ταυτότητα μήτρας και το p_i υποδηλώνει τη δύναμη της i -ους πηγής που μετράται σε ένα από τα στοιχεία του πίνακα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το p_i είναι η διακύμανση του συνδυασμού διαμόρφωσης $m_i(t)$ που λειτουργεί όταν έχει μοντελοποιηθεί ως μία χαμηλοπερατή τυχαία διαδικασία, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

Η αντίστοιχη μήτρα μπορεί να εκφραστεί ως εξής σε συμπυκνωμένη μορφή:

$$R = A S A^H + \sigma_n^2 I \quad (16)$$

όπου οι στήλες από τον πίνακα L έως M αποτελούνται από τους φορείς του συστήματος διεύθυνσης, δηλαδή $A = [s_1, s_2, \dots, s_M]$ (17)

και με την μήτρα να δείχνει την αντιστοιχία πηγής. Για ασύνδετες πηγές, πρόκειται για ένα διαγώνιο πίνακα με $S_{ij}=f(x) = \begin{cases} p_i, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$ (18)

Μερικές φορές, είναι χρήσιμο να εκφράζουμε τις ιδιοτιμές της μήτρας R και των συναφών ιδιοδιανύσματος της. Οι ιδιοτιμές μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες, όταν το περιβάλλον αποτελείται από ασυσχέτιστες πηγές κατεύθυνσης και ασυσχέτιστο λευκό θόρυβο. Οι ιδιοτιμές που περιέχονται σε ένα σύνολο είναι ίσης τιμής. Η αξία τους δεν εξαρτάται από τις κατευθυντικές πηγές και είναι ίση με τη διακύμανση του λευκού θορύβου. Οι ιδιοτιμές που περιέχονται στο δεύτερο σετ είναι συνάρτηση με τις παραμέτρους της κατεύθυνσης των πηγών και ο αριθμός τους είναι ίσος με τον αριθμό αυτών των πηγών. Κάθε ιδιοτιμή σχετίζεται με μια κατευθυντική πηγή, και η τιμή αυτή αλλάζει με την αλλαγή της ενέργειας αυτής της πηγής.

Οι ιδιοτιμές αυτού του συνόλου είναι μεγαλύτερες από εκείνες που συνδέονται με λευκό θόρυβο. Μερικές φορές, αυτές οι ιδιοτιμές αναφέρονται ως ιδιοτιμές σήματος, και οι άλλες που ανήκουν στο πρώτο σετ αναφέρονται ως ιδιοτιμές θορύβου. Έτσι το R σε μια δέσμη με μια σειρά από στοιχεία L καταλήγουν σε M πηγές κατευθύνσεων και ο λευκός θόρυβος του σήματος έχει ιδιοτιμές έχει M ιδιοτιμές σήματος και L-M ιδιοτιμές θορύβου.

Δηλώνοντας τις L ιδιοτιμές κατά φθίνουσα σειρά από την μήτρα R με $\lambda_l, l=1, L$ και την αντίστοιχη νόρμα με τα διανύσματα ως $\underline{U}_l, l=1, L$ η μήτρα παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$R = \Sigma \Lambda \Sigma^H \quad (19)$$

Και τα διαγώνια διανύσματα ως εξής:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & 0 \\ & \lambda_l & \\ 0 & & \lambda_L \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\text{Και } \Sigma = [\underline{U}_1, \dots, \underline{U}_L] \quad (21)$$

Η παράσταση αυτή μερικές φορές αναφέρεται ως η φασματική αποσύνθεση του R . Χρησιμοποιώντας το γεγονός ότι τα ιδιοδιανύσματα αποτελούν ένα ορθοκανονικό σετ, αυτό οδηγεί στην ακόλουθη έκφραση:

$$R = \sum_{l=1}^M \lambda_l * U_l * U_l^H + \sigma^2 I \quad (22)$$

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να επιλέξουμε τα βάρη της δέσμης που απεικονίζονται στο σχήμα 2, το καθένα με τα δικά της χαρακτηριστικά και περιορισμούς. Μερικά από αυτά συζητούνται στη συνέχεια.

2.2 Συμβατική Συγκέντρωση Δέσμης

Μία συμβατική συγκέντρωση δέσμης είναι μια απλή δέσμη μερικές φορές γνωστή και ως δέσμη καθυστέρησης-και-αθροίσματος, με όλα τα βάρη της ίσως μεγεθών. Οι φάσεις επιλέγονται ώστε να οδηγηθεί η δέσμη σε μια γνωστή συγκεκριμένη κατεύθυνση(φο,θo)γνωστή και ως διεύθυνση βλέμματος. Αν με s_o δηλώνουμε το διάνυσμα διεύθυνσης προς την κατεύθυνση βλέμματος, τα βάρη της δέσμης θα δίνονται από την εξίσωση:

$$\underline{w}_e = \frac{1}{L} s_o \quad (23)$$

Ο πίνακας με τα βάρη αυτά έχει ανταπόκριση στην διεύθυνση βλέμματος δηλαδή, η μέση ισχύς εξόδου του επεξεργαστή λόγω μιας πηγής στη διεύθυνση βλέμματος είναι η ίδια με την πηγή ενέργειας.

Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως ακολούθως. Ας υποθέσουμε ότι υπάρχει μια πηγή δύναμης p_s στην διεύθυνση βλέμματος κατεύθυνσης, που στο εξής θα αναφέρεται ως πηγή σήματος, με το $m_s(t)$ να δηλώνει τη λειτουργία διαμόρφωσης του. Το προκύπτον σήμα σχετικά με τη 1 – οστή συνιστώσα που οφείλεται σε αυτή την πηγή θα δίνεται από την εξίσωση:

$$x_{1s}(t) = m_s(t) e^{j2\pi f_o(t + t_l(\phi_0, \theta_0))} \quad (24)$$

Έτσι, λοιπόν για το συμβολισμό διανύσματος, χρησιμοποιώντας ένα διάνυσμα διεύθυνσης για να υποδηλώσει τις κρίσιμες φάσεις, το διάνυσμα σήματος πίνακα, λόγω της εμφάνισης του σήματος στην κατεύθυνση βλέμματος θα γίνει:

$$\underline{x}_s(t) = m_s(t) e^{j2\pi f_o t} \underline{s}_o \quad (25)$$

και η παραγωγή της σειράς με το διάνυσμα βάρους \underline{w}_e γίνεται

$$y(t) = \underline{w}_e^H \underline{x}_s(t) = m_s(t) e^{j2\pi f_o t} \quad (26)$$

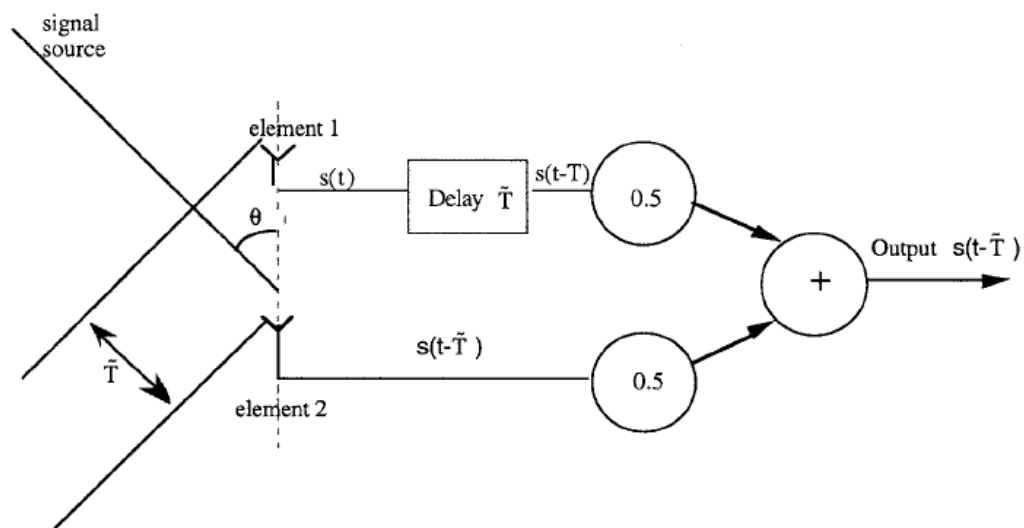
και η μέση ισχύς εξόδου του επεξεργαστή θα είναι:

$$P(\underline{w}_e) = E[y(t)y^*(t)] = p_s \quad (27)$$

Έτσι, η μέση ισχύς εξόδου μίας συμβατικής συγκέντρωσης δέσμης που στρέφεται προς την κατεύθυνση βλέμματος είναι ίση με την ισχύ της πηγής στην κατεύθυνση βλέμματος. Η διαδικασία είναι παρόμοια με το να στρέψουμε τη διεύθυνση της δέσμης μηχανικά προς την κατεύθυνση βλέμματος, εκτός του ότι αυτό γίνεται ηλεκτρονικά από την προσαρμογή των φάσεων. Αυτό είναι που αναφέρεται επίσης ως ηλεκτρονικό σύστημα διεύθυνσης, καθώς μεταλλαγείς συντελεστή ισχύος χρησιμοποιούνται για να προσαρμόσουν τις απαιτούμενες φάσεις. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το άνοιγμα μίας ηλεκτρονικά κατευθυνόμενης δέσμης είναι διαφορετικό από εκείνο μίας που γίνεται μηχανικά. Η έννοια της καθυστέρησης-και-άθροιματος πορείας μπορεί να κατανοηθεί περαιτέρω από την εικόνα 3, η οποία παρουσιάζει μια δέσμη σήματος και δύο στοιχεία που χωρίζονται από μια απόσταση d . Ας υποθέσουμε ότι ένα κύμα σήματος από ένα αεροπλάνο που φθάνει από την κατεύθυνση με γωνία θ επάγει τάση $s(t)$ σχετικά με το 1ο στοιχείο. Καθώς το κύμα φθάνει στο δεύτερο στοιχείο T δευτερόλεπτα αργότερα τότε η επαγόμενη τάση στο δεύτερο στοιχείο θα ισούται με:

$$\hat{T} = \frac{d}{c} \cos \theta \quad (28)$$

ισοδύναμα δηλαδή με $s(t - \hat{T})$.



Σχήμα 3 – Δομή συγκέντρωσης δέσμης με τη μέθοδο καθυστέρησης-και-αθροίσματος 2 στοιχείων.

Εάν η τάση που προκαλείται κατά το πρώτο στοιχείο έχει καθυστέρηση κατά ένα ποσό ίσο με \hat{T} , παράγοντας τάση $s(t - \hat{T})$ και δεν έχουμε καθόλου καθυστέρηση στο δεύτερο στοιχείο, τότε και οι δύο κυματομορφές τάσης που εμφανίζονται στη φάση και την έξοδο της δέσμης παράγουν μία από το άθροισμα αυτών των κυματομορφών. Μια κλιμάκωση κάθε κυματομορφής κατά 0,5 ορίζει το κέρδος ως προς την κατεύθυνση θίσο με την μονάδα.

Σε ένα περιβάλλον που αποτελείται από μόνο ασυσχέτιστες πηγές θορύβου και δεν υπάρχουν παρεμβολές κατευθύνσεων, αυτή η συγκέντρωση δέσμης προβλέπει μέγιστο SNR. Για ασυσχέτιστες πηγές θορύβου, τότε το R_N δίνεται από την εξίσωση:

$$R_N = \sigma_n^2 I \quad (29)$$

και η ισχύς εξόδου του θορύβου της δέσμης:

$$P_N = w_c^H R_{Nwc} = \frac{\sigma_n^2}{L} \quad (30)$$

Η προηγούμενη εξίσωση δείχνει ότι η ισχύς του θορύβου στην έξοδο της συστοιχίας είναι L φορές μικρότερη από εκείνη που υπάρχει σε κάθε στοιχείο. Έτσι, ο επεξεργαστής με μοναδιαίο κέρδος στην κατεύθυνση του σήματος έχει μειώσει τον ασυσχέτιστο θορύβου κατά L αποδίδοντας στην έξοδο SNR ίσο με $p_s L / \sigma_n^2$.

Δεδομένου ότι η είσοδος SNR είναι p_s / σ_n^2 , αυτό προβλέπει ένα κέρδος συστοιχίας δέσμης, η οποία ορίζεται ως ο λόγος του παραγόμενου SNR στο SNR εισόδου, ίσο με τον αριθμό των στοιχείων L στη συστοιχία. Αν και αυτός ο τρόπος συγκέντρωσης δέσμης προσφέρει μέγιστη απόδοση SNR όταν δεν υπάρχει κατευθυντικός παρεμβολέας που να λειτουργεί στην ίδια συχνότητα, δεν είναι το ίδιο αποτελεσματικός παρουσία κατευθυντικών παρεμβολέων εκούσια ή ακούσια.

Η ανταπόκριση του επεξεργαστή προς μια πηγή στην κατεύθυνση (ϕ_i, θ_i) θα δίνεται από την εξίσωση:

$$w_c^H S_I = \frac{1}{L} S_0^H S_I \quad (31)$$

όπου το S_I δηλώνει το διάνυσμα διεύθυνσης προς την κατεύθυνση (ϕ_i, θ_i) .

2.3 Μηδενική Καθοδήγηση Δέσμης

Σε αυτήν την ενότητα περιγράφεται μια ακτίνα που βάζει μηδενικά στην κατευθύνσεις των παρεμβολών.

Μια ακτίνα μηδενικής κατευθυντικότητας χρησιμοποιείται για να ακυρώσουμε ένα σήμα κυμάτων που φθάνουν από μια γνωστή κατεύθυνση και έτσι παράγει ένα κενό πρότυπο απάντησης στην DOA του επίπεδου κύματος. Ένα από τα πρώτα συστήματα, που αναφέρεται ως DICANNE το επιτυγχάνει αυτό με την εκτίμηση του σήματος που φθάνει από μια γνωστή διεύθυνση με το να στρέφει μια συμβατική δέσμη προς την διεύθυνση της πηγής και αφαιρώντας στη συνέχεια τις παρεμβολές από κάθε στοιχείο.

Μια εκτίμηση του σήματος γίνεται με την μέθοδο καθυστέρησης-και-άθροισματος δέσμης χρησιμοποιώντας μεταλλαγείς φάσεις παρέχουν την απαιτούμενη καθυστέρηση σε κάθε στοιχείο έτσι ώστε το σήμα που έρχεται από την κατεύθυνση πορείας-διεύθυνσης να εμφανίζεται στη φάση μετά από την καθυστέρηση. Στη συνέχεια, αυτές οι κυματομορφές προσθέτονται με την ίδια βαρύτητα.

Το σήμα τελικά αφαιρείται στη συνέχεια από κάθε στοιχείο, μετά την καθυστέρηση. Αυτή η διαδικασία είναι πολύ αποτελεσματική για την ακύρωση ισχυρών παρεμβολών και θα μπορούσε να επαναληφθεί για πολλαπλές ακυρώσεις παρεμβολών.

Αν και στη διαδικασία της αφαίρεσης των εκτιμώμενων παρεμβολών χρησιμοποιώντας την μέθοδο καθυστέρησης-και-άθροισματος πορείας είναι εύκολο να εφαρμοστεί για μία παρεμβολή, εντούτοις γίνεται δυσκίνητο καθώς ο αριθμός των παρεμβολών μεγαλώνει. Μια ακτίνα με μοναδιαία απόκριση προς την επιθυμητή κατεύθυνση και μηδενισμούς στις κατευθύνσεις παρεμβολών μπορεί να συσταθεί εκτιμώντας τα βάρη της δέσμης, όπως φαίνεται στην Εικ. 2, με χρήση κατάλληλων περιορισμών.

Ας υποθέσουμε ότι το s_o είναι το διάνυσμα διεύθυνσης προς την κατεύθυνση όπου η μοναδιαία απόκριση απαιτείται και ότι τα s_1, \dots, s_k είναι k φορείς διανυσμάτων που συνδέονται με k κατευθύνσεις όπου απαιτούνται μηδενισμοί. Το επιθυμητό διάνυσμα βάρους είναι η λύση των παρακάτω ταυτόχρονων εξισώσεων:

$$w^H S_o = 1 \tag{32}$$

$$w^H S_i = 0, \quad i=1,\dots,k. \quad (33)$$

Χρησιμοποιώντας συμβολισμό πίνακα αυτό γίνεται:

$$w^H A = e_1^T \quad (34)$$

όπου A είναι ένας πίνακας με τις στήλες του να είναι οι φορείς διεύθυνσης που σχετίζονται με όλες τις κατευθυντικές πηγές και το e_1 να είναι ένα διάνυσμα από όλα τα μηδενικά, εκτός από το πρώτο στοιχείο, που είναι $e_1 = [1, 0, \dots, 0]^T$.

Έτσι μια κατάλληλη εκτίμηση του βάρους μπορεί να δοθεί από την εξίσωση:

$$w^H = e_1^T A^H (A A^H)^{-1}. \quad (35)$$

Αν και το σχήμα της δέσμης που παράγεται από την παρούσα δέσμη έχει μηδενισμούς στις κατευθύνσεις των παρεμβολών, δεν είναι σχεδιασμένο για την ελαχιστοποίηση των ασυσχέτιστων πηγών θορύβου στην έξοδο του πίνακα. Αυτό είναι δυνατόν να επιτευχθεί ,επιλέγοντας τα βάρη που ελαχιστοποιούν την μέση ισχύς εξόδου με την επιφύλαξη των ανωτέρω περιορισμών.

2.4 Βέλτιστη Συγκέντρωση Δέσμης

Ο αλγόριθμος μηδενικής κατευθύνσεως που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα απαιτεί γνώση των κατευθύνσεων των παρεμβαλλόμενων πηγών, και η κύρια δέσμη που χρησιμοποιεί τα εκτιμώμενα βάρη δεν μεγιστοποιεί το SNR της εξόδου. Η μέθοδος βέλτιστης συγκέντρωσης δέσμης που περιγράφεται στο παρόν τμήμα ξεπερνά τους περιορισμούς αυτούς.

Ας υποθέσουμε ένα L -διαστάσεων διάνυσμα \hat{w} που αντιπροσωπεύει τα βάρη της δέσμης που βλέπουμε στο σχήμα 2 το οποίο μεγιστοποιεί το SNR εξόδου. Για μια ακτίνα που δεν περιορίζεται, μια έκφραση για το \hat{w} θα δίνεται από την εξίσωση:

$$\hat{w} = \mu_0 R_N^{-1} S_0 \quad (36)$$

όπου το R_N είναι η συσχετισμένη μήτρα του θορύβου και δεν περιέχει κανένα σήμα που να εισέρχεται από την κατεύθυνση βλέμματος (ϕ_0, θ_0) και το μ_0 είναι μια σταθερά. Για μια δέσμη που έχει μοναδιαία απόκριση στην κατεύθυνση βλέμματος, αυτή η σταθερά γίνεται:

$$\mu_0 = \frac{1}{S_0^H R_N^{-1} S_0} \quad (37)$$

που οδηγεί στην ακόλουθη έκφραση για το διάνυσμα βάρους:

$$\hat{w} = \frac{R_N^{-1} S_0}{S_0^H R_N^{-1} S_0} \quad (38)$$

Στην πράξη, όταν η εκτίμηση του θορύβου της μήτρας δεν είναι διαθέσιμη, το συνολικό σήμα (σήμα συν θόρυβος) χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των βαρών και ο επεξεργαστής αναφέρεται ως SPNMI επεξεργαστής. Μια έκφραση για τα βάρη για αυτή την περίπτωση θα είναι:

$$\hat{w} = \frac{R^{-1} S_0}{S_0^H R^{-1} S_0} \quad (39)$$

Συνεπώς αυτά τα βάρη είναι η λύση των ακόλουθων προβλημάτων βελτιστοποίησης:

Ελαχιστοποίηση του $w^H R w$

$$\text{που υπόκειται σε } w^H S_0 = 1. \quad (40)$$

Έτσι, λοιπόν τα βάρη του επεξεργαστή που επιλέγονται ελαχιστοποιώντας την μέση ισχύ εξόδου του επεξεργαστή, διατηρώντας παράλληλα την μοναδιαία απόκριση στην κατεύθυνση βλέμματος. Ο περιορισμός αυτός διασφαλίζει ότι το σήμα περνά μέσα από τον επεξεργαστή αναλλοίωτο. Ως εκ τούτου, η δύναμη του σήματος εξόδου είναι η ίδια με αυτή της πηγής ενέργειας. Η διαδικασία της ελαχιστοποίησης στη συνέχεια, ελαχιστοποιεί το συνολικό θόρυβο, συμπεριλαμβανομένων των παρεμβολών και των ασυσχέτιστων μορφών θορύβου. Ελαχιστοποιώντας το συνολικό θόρυβο εξόδου διατηρώντας το σήμα εξόδου σταθερό είναι το ίδιο με την μεγιστοποίηση του SNR εξόδου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα βάρη του επεξεργαστή NAMI και του SPNAMI είναι ταυτόσημα, και εφόσον έχουμε έλλειψη σφαλμάτων, ο επεξεργαστής εκτελεί τη διαδικασία πανομοιότυπα και στις δύο περιπτώσεις. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδειχθεί ως εξής.

Ο επεξεργαστής με αυτά τα βάρη αναφέρεται ως ο βέλτιστη επεξεργαστής. Το SNR στην έξοδο του βέλτιστου επεξεργαστή είναι ίσο με :

$$\hat{a} = p_s s_0^H R_N^{-1} s_o \quad (41)$$

Για μια ειδική περίπτωση του περιβάλλοντος θορύβου όταν δεν υπάρχουν παρεμβολές κατευθύνσεων, ένας απλός υπολογισμός οδηγεί στην εξίσωση:

$$\hat{w} = \frac{s_o}{L} \quad (42)$$

Έτσι, τα βάρη του βέλτιστου επεξεργαστή σε περίπτωση απουσίας των λαθών είναι τα ίδια με εκείνα ενός συμβατικού επεξεργαστή, υπονοώντας ότι ο συμβατικός επεξεργαστής είναι ο βέλτιστος επεξεργαστής για την περίπτωση αυτή. Το SNR εξόδου και το κέρδος G της δέσμης για το βέλτιστο επεξεργαστή για αυτή την περίπτωση είναι αντίστοιχα:

$$\hat{a} = \frac{p_s L}{\sigma_n^2} \quad (43)$$

και $\hat{G} = L. \quad (44)$

Μια ενδιαφέρουσα ειδική περίπτωση είναι εκείνη όπου η παρεμβολή είναι πολύ ισχυρότερη σε σύγκριση με το θόρυβο του περιβάλλοντος, $P_i \gg \sigma_n^2$. Για αυτήν την περίπτωση, αυτές οι εκφράσεις μπορούν να προσεγγιστούν ως:

$$\hat{a} = \frac{p_s L \rho}{\sigma_n^2} \quad (45)$$

και
$$\hat{G} = \frac{p_l L \rho}{\sigma_n^2} \quad (46)$$

Όταν η παρεμβολή είναι μακριά από τον κεντρικό λοβό του συμβατικού επεξεργαστή, $\rho \approx 1$ προκύπτει ότι το παραγόμενο SNR του βέλτιστου επεξεργαστή με την παρουσία μιας ισχυρής παρεμβολής είναι το ίδιο με εκείνο ενός συμβατικού επεξεργαστή με απουσία παρεμβολής πράγμα που σημαίνει ότι ο επεξεργαστής έχει σχεδόν ακυρώσει την παρεμβολή, παράγοντας ένα πολύ μεγάλο κέρδος. Οι επιδόσεις του επεξεργαστή όσον αφορά την παραγωγή του SNR και το κέρδος της δέσμης δεν επηρεάζεται από την σταθερά της κατεύθυνσης βλέμματος καθώς υπολογίζονται μόνο τα βάρη. Ως εκ τούτου, η διαδικασία που παρουσιάζεται παραπάνω ισχύει αποκλειστικά για τον συμβατικό επεξεργαστή.

Για να λειτουργεί η βέλτιστη συγκέντρωση δέσμης όπως περιγράφεται ανωτέρω και ώστε να μεγιστοποιείται το SNR ακυρώνοντας τις παρεμβολές, ο αριθμός των παρεμβολών πρέπει να είναι μικρότερος ή ίσος με $L-2$, όπως π.χ ένας πίνακας με L στοιχεία που έχει $L-1$ πεδία ελευθερίας και το ένα έχει δεσμευτεί από τον περιορισμό προς την κατεύθυνση βλέμματος.

Αυτό δεν μπορεί να αληθεύει σε ένα κινητό περιβάλλον επικοινωνιών, λόγω της ύπαρξης πολλαπλών αφίξεων, καθώς και η συγκέντρωση δέσμης μπορεί να μην είναι σε θέση να επιτύχει τη μεγιστοποίηση του SNR στην έξοδο με την καταστολή κάθε παρεμβολής.

Ωστόσο, η συγκέντρωση δέσμης δεν χρειάζεται να καταστείλει παρεμβολές σε μεγάλη έκταση και να προκαλέσει μια τεράστια αύξηση του SNR στην έξοδο για να βελτιώσει τις επιδόσεις ενός κινητού συστήματος σημάτων. Μια αύξηση λίγων

ντεσιμπέλ στο SNR της εξόδου μπορεί να κάνει μια μεγάλη αύξηση στην αύξηση της χωρητικότητας για τα κανάλια του συστήματος.

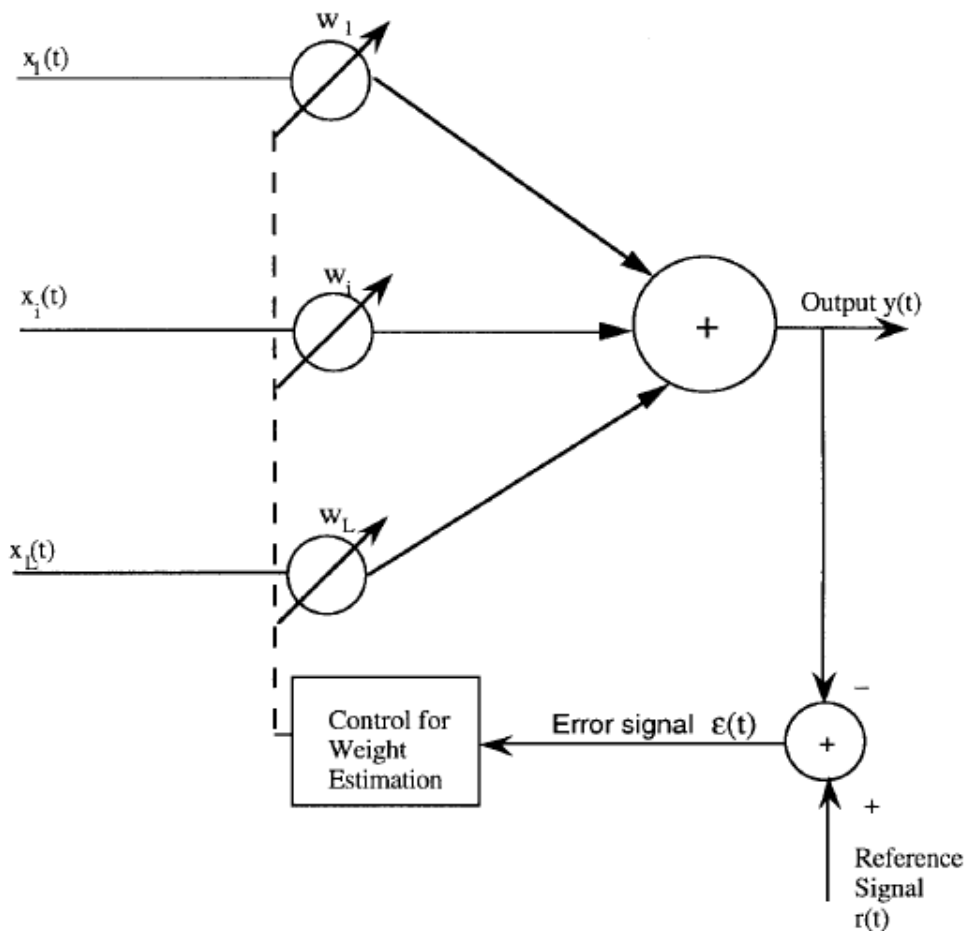
Όσον αφορά το γλωσσολόγιο στις κινητές επικοινωνίες, η βέλτιστη ακτίνα συχνά αναφέρεται και ως βέλτιστου συνδυασμού. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η βέλτιστη συγκέντρωση δέσμης που περιγράφεται στο τμήμα αυτό, είναι γνωστή και ως MVDR και δεν απαιτεί την γνώση των κατευθύνσεων και των επιπέδων ισχύος των παρεμβολών, καθώς ούτε και το επίπεδο του υπόβαθρου ισχύος θορύβου για τη μεγιστοποίηση του SNR εξόδου. Απαιτεί μόνο την κατεύθυνση του επιθυμητού σήματος.

2.5 Βελτιστοποίηση χρησιμοποιώντας το σήμα αναφοράς

Μια στενής ζώνης δομή συγκέντρωση δέσμης που περιέχει το σήμα αναφοράς για την εκτίμηση των βαρών της δέσμης πρώην φαίνεται στο σχήμα 4. Το σήμα εξόδου της δέσμης αφαιρείται από ένα διαθέσιμο σήμα αναφοράς $r(t)$ για να παράγει ένα σήμα σφάλματος, $\varepsilon(t)=r(t)-w^H \underline{x}(t)$ το οποίο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των βαρών. Τα βάρη προσαρμόζονται έτσι ώστε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE-mean squared error) μεταξύ του σήματος της εξόδου και του σήματος αναφοράς να ελαχιστοποιείται. Το MSE δίνεται από την εξίσωση:

$$\begin{aligned} \text{MSE} &= E[|\varepsilon(t)|^2] \\ &= E[|r(t)|^2] + w^H R w - 2w^H z \end{aligned} \quad (47)$$

όπου $z = E[x(t) r(t)]$ (48)
είναι ο συσχετισμός μεταξύ του σήματος αναφοράς και του διανύσματος του σήματος της δέσμης $x(t)$.



Σχήμα 4- Δομή δέσμης στενής ζώνης που περιέχει το σήμα αναφοράς.

Το βέλτιστο διάνυσμα βάρους παρέχεται απο τη γνωστή εξίσωση Wiener-Hoff όπου

$$\widehat{W}_{MSE} = R^{-1} \underline{z} \quad (49)$$

Το MSE (μέσο τετραγωνικό σφάλμα του επεξεργαστή), επίσης γνωστό και ως Wiener φίλτρο δίνεται απο την σχέση:

$$MMSE = E[|r(t)|^2] - \underline{z}^H R^{-1} \underline{z} \quad (50)$$

Το σύστημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποκτήσουμε ένα ασθενές σήμα με την παρουσία μιας ισχυρής παρεμβολής, θέτοντας το σήμα αναφοράς στο μηδέν και αρχικοποιώντας τα βάρη για την παροχή πανκατευθυντικής λειτουργίας. Η διαδικασία ξεκινά ώστε να ακυρώνουμε τις ισχυρές παρεμβολές πρώτα και το ασθενές σήμα αργότερα. Έτσι, διαισθητικά, αναμένεται να υπάρχει μια χρονική περίοδος όπου το σήμα εξόδου θα αποτελείται από το σήμα που δεν έχει ακυρωθεί, αλλά οι ισχυρές παρεμβολές θα έχουν μειωθεί. Όταν ένα τέτοιο προσαρμοσμένο σύστημα χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του βέλτιστου διανύσματος βάρους \widehat{W}_{MSE} , η ισχυρή παρεμβολή ακυρώνεται πρώτα και τα βάρη προσαρμόζονται ώστε να αφήσουν το λόγο σήματος-προς-παρεμβολή σε επαρκές επίπεδο για την απόκτηση του σήματος.

Οι δέσμες που χρησιμοποιούν σήματα αναφοράς ίσα με το μηδέν για να ρυθμίσουν τα βάρη αναφέρονται ως προσαρμοστικές δέσμες αναστροφής ισχύος.

Το MSE (mean squared error για σύστημα ελαχιστοποίησης) με το Wiener φίλτρο είναι μια μέθοδος κλειστού βρόχου σε σχέση με το σύστημα ανοιχτού βρόχου του MVDR ή ML φίλτρου που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα. Σε γενικές γραμμές, το Wiener φίλτρο προσφέρει υψηλότερη απόδοση SNR σε σύγκριση με το ML φίλτρο όταν έχουμε την παρουσία ενός ασθενούς σήματος πηγής. Δεδομένου ότι η ισχύς σήματος εισόδου γίνεται μεγάλη σε σύγκριση με τον περιβάλλοντα θόρυβο, οι δύο επεξεργαστές δίνουν σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα. Το αποτέλεσμα αυτό υποστηρίζεται από μια προσομοίωση μελέτης για δύο οχήματα κινητών επικοινωνιών όπως φαίνονται απο την σχέση

$$\widehat{\alpha} = \frac{p_s L \rho}{\sigma_n^2} \quad (45)$$

Το αυξημένο SNR με τό Wiener φίλτρο επιτυγχάνεται έχοντας όμως ως κόστος την παραμόρφωση του σήματος που προκαλείται από το φίλτρο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η βέλτιστη συγκέντρωση δέσμης δεν παραμορφώνει το σήμα.

Το απαιτούμενο σήμα αναφοράς για το Wiener φίλτρο μπορεί να παραχθεί με διάφορους τρόπους, ανάλογα με την εφαρμογή. Στις ψηφιακές κινητές επικοινωνίες, ένα σήμα συγχρονισμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αρχική εκτίμηση του βάρους, ακολουθούμενη από τη χρήση του εντοπισμένου σήματος σαν ένα σήμα αναφοράς.

Σε συστήματα που χρησιμοποιούν TDMA, μια ακολουθία που είναι ειδική για κάθε χρήστη μπορεί να είναι ένα μέρος κάθε πλαισίου για το σκοπό αυτό όπως φαίνεται

$$\hat{G} = \frac{pL\rho}{\sigma_n^2} \quad (46)$$

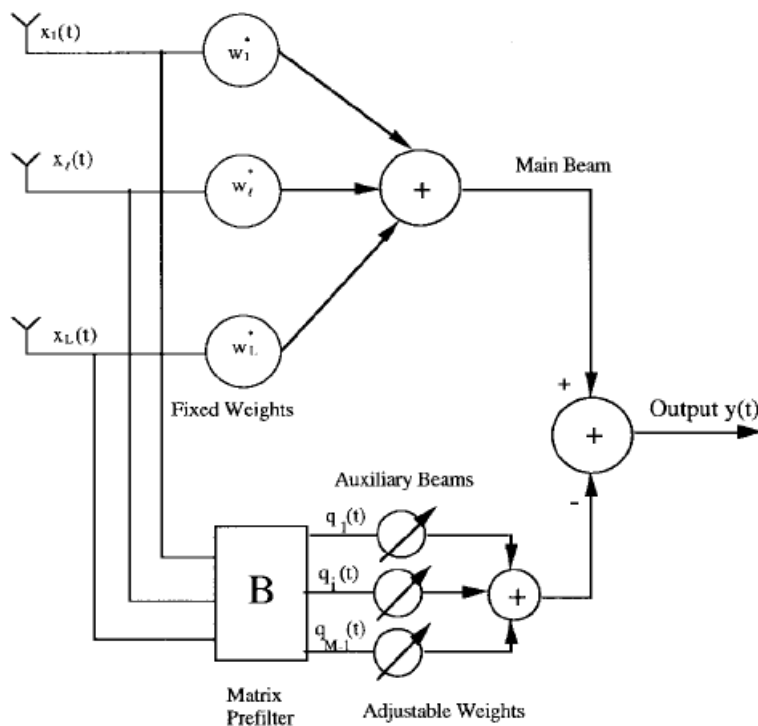
Η χρήση ενός γνωστού συμβόλου σε κάθε πλαίσιο έχει επίσης αναφερθεί στην σχέση (47) όπου η χρήση μιας κεραίας για το σκοπό αυτό δείχνει την καταλληλότητα της να παρέχει ένα σήμα αναφοράς. Μελέτες των συστημάτων κινητών επικοινωνιών που χρησιμοποιούν σήματα αναφοράς για την εκτίμηση για τα βάρη της δέσμης αναφέρονται στις σχέσεις (48)-(50).

2.6 Επεξεργασία δέσμης διαστήματος

Σε αντίθεση με την επεξεργασία στοιχείων διαστήματος, όπου τα σήματα που προέρχονται από κάθε στοιχείο σταθμίζονται και αθροίζονται ώστε να παράγουν την έξοδο της δέσμης, εδώ έχουμε μια διαδικασία 2 φάσεων όπου η πρώτη φάση παίρνει τα σήματα της δέσμης ως είσοδο και παράγει μια σειρά από πολλές εξόδους, οι οποίες στη συνέχεια σταθμίζονται και συνδυάζονται για την παραγωγή της εξόδου της δέσμης. Αυτοί οι πολλαπλοί εξόδοι μπορούν να θεωρηθούν ως παραγωγή πολλαπλών δεσμών. Η επεξεργασία που πραγματοποιείται κατά το πρώτο στάδιο γίνεται σταθμίζοντας τα σήματα σημάτων και τα ποσά τους για την παραγωγή πολλαπλών δεσμών, οι οποίες στρέφονται προς διάφορες κατευθύνσεις. Αυτά τα βάρη κανονικά δεν προσαρμόζονται κατά τη διάρκεια του κύκλου προσαρμογής. Τα βάρη εφαρμόζονται σε διαφορετικές εξόδους της δέσμης ώστε η παραγωγή των αποτελεσμάτων να βελτιστοποιηθεί για να ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένα κριτήρια βελτιστοποίησης και τα βάρη να προσαρμόζονται κατά τη διάρκεια του κύκλου προσαρμογής.

Σε γενικές γραμμές, για μια L-στοιχείων δέσμη, ένας επεξεργαστής δέσμης διαστήματος αποτελείται από μια κύρια δέσμη στραμμένη προς την κατεύθυνση του σήματος και ένα σύνολο από όχι περισσότερα από L-1 δευτερεύοντων δεσμών. Η

σταθμισμένη έξοδος των δευτερεύοντων δεσμών αφαιρείται από αυτή της κύριας δέσμης. Τα βάρη προσαρμόζονται για να παράγουν μια εκτίμηση της παρεμβολής που υπάρχει στην κύρια δέση και κατά την διαδικασία αφαίρεσης αφαιρείται στη συνέχεια η παρεμβολή. Οι δευτερεύοντες δέσμες έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να μην περιέχουν το επιθυμητό σήμα από την κατεύθυνση βλέμματος ώστε να αποφευχθεί η ακύρωση του σήματος στη διαδικασία της αφαίρεσης. Μια γενική δομή του εν λόγω επεξεργαστή φαίνεται στο σχήμα 5.



Σχήμα 5 - Δομή ενός επεξεργαστή δέσμης-διαστήματος

Το πρότυπο της κύριας δέσμης συνήθως είναι τέτοιο ώστε να έχει ένα επιθυμητό σχήμα. Για μια γραμμική συστοιχία δέσμης ισαπέχοντων στοιχείων με την ίδια στάθμιση βάρους, το πρότυπο θα έχει το σχήμα του $\sin \frac{Lx}{\sin x}$ με το L να είναι ο αριθμός των στοιχείων στη δέση, ενώ για τη στάθμιση βάρους Chebyshev (η στάθμιση βάρους εξαρτάται από τους συντελεστές του πολωνύμου Chebyshev), το μοτίβο έχει ίσα επίπεδα πλευρικών λοβών. Η κύρια δέση μπορεί να αναπροσαρμόζεται με διάφορες μορφές περιορισμών και τεχνικών σύνθεσης, τα οποία συζητούνται στη συνέχεια.

Υπάρχουν πολλά σενάρια για τη δημιουργία των αποτελεσμάτων των δευτερεύοντων δεσμών τέτοια ώστε κανένα σήμα από την κατεύθυνση βλέμματος να περιέχεται σε αυτά, δηλαδή, οι ακτίνες να έχουν μηδενικά στο κατεύθυνση βλέμματος.

Στην απλούστερη μορφή του, αυτό μπορεί να επιτευχθεί αφαιρώντας τα σήματα της δέσμης από προ-κατευθυνόμενα προσαρμοσμένα ζεύγη βαρών. Αυτό στηρίζεται στο γεγονός ότι η συνιστώσα των σημάτων της δέσμης που προκαλείται από μια πηγή προς την κατεύθυνση βλέμματος είναι πανομοιότυπη μετά την προσαρμογή, και στη συνέχεια ακυρώνεται κατά την διαδικασία αφαίρεσης από τα παρακείμενα βάρη. Η διαδικασία μπορεί να γενικευθεί για την παραγωγή M-1 δεσμών από L-στοιχείων συστοιχία σημάτων δέσμης χρησιμοποιώντας μια μήτρα B έτσι ώστε: $\underline{q} = \mathbf{x}^H(t)B$ (47)

όπου το M-1 διαστάσεων διάνυσμα $\underline{q}(t)$ χαρακτηρίζει τις εξόδους των M-1 δεσμών και τη μήτρα B, που αναφέρεται ως προφίλτρο μήτρας. Αυτό το φίλτρο έχει την ιδιότητα οι στήλες του να είναι γραμμικά ανεξάρτητες και το άθροισμα των στοιχείων της κάθε στήλης να ισούται με μηδέν, πράγμα που συνεπάγεται ότι οι M-1 δέσμες είναι ανεξάρτητες και έχουν μηδενικά στην κατεύθυνση βλέμματος. Για μια ακτίνα που δεν είναι προκατευθυνόμενη, η μήτρα θα πρέπει να ικανοποιεί την εξίσωση: $s_0^H B = 0$ (48)

όπου s_0 είναι το διάνυσμα διεύθυνσης που συνδέεται με την κατεύθυνση βλέμματος. Υποτίθεται στην παραπάνω συζήτηση ότι έχουμε ως δεδομένο $M \leq L$ γεγονός που συνεπάγεται ότι ο αριθμός των δεσμών είναι μικρότερος ή ίσος με τον αριθμό των στοιχείων στη συστοιχία. Όταν ο αριθμός των δεσμών είναι ίσος με τον αριθμό των στοιχείων στη συστοιχία, η επεξεργασία στη δέσμη χώρου δεν έχει μειώσει τον βαθμό της ελευθερίας της ακτίνας. Υπό την έννοια αυτή, οι εν λόγω συστοιχίες είναι πλήρως προσαρμοστικές και έχουν τις ίδιες δυνατότητες με αυτές τις συστοιχίες που χρησιμοποιούν στοιχεία επεξεργασίας χώρου. Στην πραγματικότητα, στη απουσία λαθών, και τα δύο συστήματα επεξεργασίας παράγουν τα ίδια αποτελέσματα.

Από την άλλη πλευρά, όταν ο αριθμός των ακτίνων είναι μικρότερος από τον αριθμό των στοιχείων, οι δέσμες αναφέρονται ως μερικώς προσαρμοστικές. Όταν τα προσαρμοστικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των βαρών, η σύγκλιση είναι γενικά πιο γρήγορη για τις εν λόγω συστοιχίες.

Το MSE για αυτές τις σειρές, ωστόσο, είναι επίσης υψηλό σε σύγκριση με εκείνο της πλήρους προσαρμογής συστοιχίας. Αυτές οι δέσμες είναι χρήσιμες σε καταστάσεις όπου ο αριθμός των παρεμβολών είναι πολύ μικρότερος από τον αριθμό των στοιχείων. Προσφέρουν ένα υπολογιστικό πλεονέκτημα σε σχέση με την επεξεργασία

στοιχείων-διαστήματος καθώς το ένα πρέπει μόνο να προσαρμόσει τα M-1 βάρη σε σύγκριση με τα L βάρη για την υπόθεση στοιχείων χώρου με $M < L$.

Επιπλέον, η επεξεργασία δέσμης χώρου απαιτεί λιγότερο υπολογισμό από ό, τι στην περίπτωση στοιχείων χώρου για τον υπολογισμό των βαρών, δεδομένου ότι λύνει την χωρίς περιορισμούς βελτιστοποίηση σε σχέση με το πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για την περίπτωση επεξεργασίας στοιχείων χώρου, οι περιορισμοί σχετικά με την βάρη που επιβάλλονται για την πρόληψη του σήματος που εισέρχεται από την κατεύθυνση βλέμματος γίνονται για να αποφεύγονται οι στρεβλώσεις του σήματος και να γίνει η συστοιχία πιο ισχυρή από σφάλματα. Για την περίπτωση δέσμης- χώρου, αυτά τα βάρη μεταφέρονται στην κύρια δέσμη, αφήνοντας το ρυθμιζόμενα βάρη ελεύθερα από περιορισμούς.

Η σύγκριση των επιδόσεων ενός επεξεργαστή στοιχείων χώρου και ενός επεξεργαστή δέσμης-χώρου για την περίπτωση μίας και μόνης περίπτωσης παρέμβαση παρουσιάζεται μετέπειτα.

Η μελέτη δείχνει ότι στην απουσία λαθών, και οι δύο επεξεργαστές παράγουν όμοια αποτελέσματα, ενώ με την εμφάνιση λαθών στην κατεύθυνση βλέμματος ο επεξεργαστής δέσμης διαστήματος παράγει ανώτερη απόδοση. Η περίπτωση αυτή προκύπτει όταν η γνωστή κατεύθυνση του σήματος είναι διαφορετική από την πραγματική διεύθυνση.

Οι συντελεστές στάθμισης βάρους του επεξεργαστή περιορίζονται με την γνώση της κατεύθυνσης βλέμματος. Όταν το πραγματικό σήμα κατεύθυνσης είναι διαφορετικό από εκείνο που χρησιμοποιείται για να περιορίσει τα βάρη, ο επεξεργαστής στοιχείων χώρου ακυρώνει αυτό το σήμα, σαν να υπήρχε μια παρεμβολή κοντά στην κατεύθυνση βλέμματος. Ο επεξεργαστής δέσμης χώρου, από την άλλη πλευρά, έχει σχεδιαστεί για να έχει την κύρια δέσμη στραμμένη προς την γνωστή κατεύθυνση βλέμματος και οι βοηθητικές δέσμες σχηματίζονται ώστε να έχουν μηδενικά σε αυτή κατεύθυνση. Η απόκριση της κύριας δέσμης δεν αλλάζει πολύ από την κατεύθυνση που κοιτάζει και συνεπώς, το επίπεδο σήματος της κύριας δέσμης δεν επηρεάζεται. Συνεπώς, η διαδικασία αφαίρεσης δεν επηρεάζει την στάθμη του σήματος της κύριας δέσμης, παράγοντας μια πολύ μικρή ακύρωση του σήματος στην επεξεργασία δέσμης χώρου σε σύγκριση με την επεξεργασία στοιχείων χώρου.

Οι βοηθητικές έξοδοι πορείας της δέσμης σταθμίζονται και αθροίζονται και το αποτέλεσμα αφαιρείται από την κύρια έξοδο της δέσμης για να ακυρώσει την ανεπιθύμητη παρεμβολή στην κύρια δέσμη. Οι συντελεστές στάθμισης-βάρη προσαρμόζονται για να ακυρώσουν τη μέγιστη δυνατή παρεμβολή. Αυτό συμβαίνει με το να ελαχιστοποιούμε την συνολική μέση ισχύ εξόδου(SNR) μετά την αφαίρεση λύνοντας έτσι το πρόβλημα βελτιστοποίησης, και οδηγώντας σε μεγιστοποίηση του SNR στην έξοδο και χωρίς το επιθυμητό σήμα στα βοηθητικά κανάλια. Η παρουσία του σήματος σε αυτά τα κανάλια προκαλεί ακύρωση του σήματος από την κύρια δέσμη μαζί με την ακύρωση παρεμβολών.

Χρήση πολλαπλών τεχνικών επεξεργασίας δέσμης για κινητές επικοινωνίες έχει αναφερθεί σε διάφορες μελέτες περιλαμβανομένης της ανάπτυξης ενός συστήματος συστοιχίας 16 στοιχείων που χρησιμοποιεί ψηφιακά εξαρτήματα για την μελέτη του παραπάνω σεναρίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 Αλγόριθμοι προσαρμοστικής διαμόρφωσης δέσμης

Η προσαρμοστική διαμόρφωση δέσμης είναι μια τεχνική κατά την οποία μια σειρά κεραιών εκμεταλλεύεται επιτυχώς την μέγιστη υποδοχή της επιθυμητής κατεύθυνσης και απορρίπτει τα σήματα της ίδιας συχνότητας που βρίσκονται σε άλλες κατευθύνσεις. Αυτό κατορθώνεται με την ρύθμιση των βαρών κάθε μιάς από τις κεραιές που χρησιμοποιούνται στη σειρά χρησιμοποιώντας την ιδέα ότι τα σήματα από τους διαφορετικούς πομπούς καταλαμβάνουν το ίδιο κανάλι συχνότητας, φθάνοντας από διαφορετικές κατευθύνσεις.

Στην πράξη, ούτε το R ούτε το R_N μπορούν να υπολογίσουν τα βέλτιστα βάρη της δέσμης και έτσι τα βάρη προσαρμόζονται με κάποιο τρόπο χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες πληροφορίες που προέρχονται από τα σήματα εξόδου της συστοιχίας της δέσμης, ώστε να προβούν σε εκτίμηση των βέλτιστων βαρών. Υπάρχουν πολλές τέτοιες υλοποιήσεις, οι οποίες συνήθως αναφέρονται ως προσαρμοστικοί αλγόριθμοι. Μερικοί από αυτούς τους αλγορίθμους περιγράφονται εδώ καθώς και τα χαρακτηριστικά τους, όπως είναι η ταχύτητα της προσαρμογής, ο μέσος όρος και η διακύμανση του εκτιμώμενου βάρους και τις παραμέτρους που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά αυτά.

3.2 Αλγόριθμος SMI (Sample Matrix Inversion)

Αυτός ο αλγόριθμος υπολογίζει τα βάρη της συστοιχίας αντικαθιστώντας το R με μια εκτίμηση του. Μια αμερόληπτη εκτίμηση του R χρησιμοποιώντας N δείγματα $\underline{x}(n), n=0,1,2,\dots,N-1$ της σειράς σημάτων της ακτίνας μπορεί να λαμβάνεται με την χρήση ενός απλού συστήματος μέσου όρου:

$$R_{(n)} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) x^H(n) \quad (49)$$

όπου το $R_{(n)}$ δηλώνει την εκτίμηση κατά την n -ιοστή στιγμή του χρόνου και το $x(n)$ εκφράζει το δείγμα του σήματος της δέσμης επίσης γνωστό ως στιγμιότυπο δέσμης, κατά την n -ιοστή στιγμή του χρόνου, με το t να αντικαθίσταται από το nT και το χρόνο δειγματοληψίας T να παραλείπεται για την ευκολία της σημειογραφίας.

Τότε μια εκτίμηση του R μπορεί να αναβαθμιστεί όταν νέα δείγματα καταφθάνουν χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$R(n+1) = \frac{nR(n) + x(n+1)x^H(n+1)}{n+1} \quad (50)$$

και μια νέα εκτίμηση του βάρους $\underline{w}(n+1)$ κατά τη στιγμή $n+1$ μπορεί να γίνει.

Η έκφραση τού βέλτιστου βάρους απαιτεί το αντίστροφο του R και αυτή η διαδικασία εκτίμησης του R μπορεί να συνδυαστεί για να ενημερώσει το αντίστροφο του σήματος από τα δείγματα σημάτων χρησιμοποιώντας το λήμμα αντιστροφής μήτρας όπως παρακάτω:

$$R^{-1}(n) = R^{-1}(n-1) - \frac{R^{-1}(n-1)x(n)x^H(n)R^{-1}(n-1)}{1+x^H(n)R^{-1}(n-1)x(n)} \quad (51)$$

$$\text{με } R^{-1}(0) = \frac{1}{\varepsilon_0} I, \quad \varepsilon_0 > 0. \quad (52)$$

Αυτό το σύστημα εκτίμησης βαρών χρησιμοποιώντας το αντίστροφο του σήματος ενημέρωσης αναφέρεται ως ο αλγόριθμος RLS, που περιγράφεται περαιτέρω παρακάτω.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι καθώς ο αριθμός των δειγμάτων μεγαλώνει, η μήτρα ενημέρωσης πλησιάζει την πραγματική της αξία, και έτσι τα εκτιμώμενα βάρη προσεγγίζουν τα βέλτιστα βάρη.

3.2 Αλγόριθμος LMS (Least Mean square)

Η εφαρμογή του αλγορίθμου LMS για τον υπολογισμό του βέλτιστου βάρους ενός πίνακα είναι ευρέως διαδεδομένη, και η μελέτη του έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον εδώ και αρκετό καιρό. Ο αλγόριθμος αναφέρεται και ως περιορισμένος αλγόριθμος LMS όταν τα βάρη υπόκεινται σε περιορισμούς σε κάθε επανάληψη ενώ αναφέρεται ως χωρίς περιορισμούς αλγόριθμος LMS όταν οι συντελεστές στάθμισης δεν περιορίζονται σε κάθε επανάληψη. Ο τελευταίος συνήθως εφαρμόζεται όταν τα βάρη ανανεώνονται, σύμφωνα με ένα σήμα αναφοράς και δεν γνωρίζουμε την κατεύθυνση του σήματος που χρησιμοποιείται, όπως συμβαίνει και με την περιορισμένη περίπτωση του αλγόριθμου.

Ο αλγόριθμος ενημερώνει τα βάρη σε κάθε επανάληψη εκτιμώντας την κλίση της τετραγωνικής επιφάνειας και στη συνέχεια, μετακινώντας τα βάρη στην αρνητική κατεύθυνση της κλίσης κατά ένα μικρό ποσό. Η σταθερά που καθορίζει αυτό το ποσό συνήθως αναφέρεται ως μέγεθος βήματος. Όταν αυτό το μέγεθος του βήματος είναι πολύ μικρό, η διαδικασία αυτή οδηγεί αυτά τα εκτιμώμενα βάρη στα βέλτιστα

βάρη. Η σύγκλιση και η συμπεριφορά αυτών των βαρών, μαζί με την συνδιακύμανση, τους χαρακτηρίζει τον αλγόριθμος LMS και τελικά ο τρόπος που το μέγεθος του βήματος και η διαδικασία εκτίμησης κλίσης επηρεάζουν τις παραμέτρους αυτές έχει μεγάλη πρακτική σημασία. Αυτά και άλλα θέματα συζητούνται λεπτομερώς παρακάτω.

3.2.1 Αλγόριθμος LMS χωρίς περιορισμούς

Ένας πραγματικού χρόνου αβίαστος LMS αλγόριθμος για τον καθορισμό του βέλτιστου βάρους w_{MSE} του συστήματος που χρησιμοποιεί το σήμα αναφοράς είναι ο παρακάτω:

$$\underline{w}(n+1) = \underline{w}(n) - \mu \underline{g}(\underline{w}(n)) \quad (53)$$

όπου το $\underline{w}(n+1)$ δηλώνει τα νέα βάρη που υπολογίζονται με βάση την (n+1)οστή επανάληψη, το μ είναι ένα θετικό βαθμωτό μέγεθος που ελέγχει το χαρακτηριστικό της σύγκλισης του αλγόριθμου, δηλαδή, πόσο γρήγορα και πόσο κοντά το εκτιμώμενο βάρος προσεγγίζει το βέλτιστο βάρος και το $\underline{g}(\underline{w}(n))$ είναι μια αμερόληπτη εκτίμηση της κλίσης του MSE.

Το MSE θα δίνεται από την εξίσωση:

$$MSE(\underline{w}(n)) = E[|r(n+1) - \underline{w}^H(n)R_w(n) - 2\underline{w}^H(n)z|^2] \quad (54)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την (n+1)-οστή επανάληψη, η συστοιχία λειτουργεί με τα βάρη $\underline{w}(n)$ υπολογίζονται με βάση την προηγούμενη επανάληψη. Το διάνυσμα σήματος πίνακα, θα είναι το $\underline{x}(n+1)$, το δείγμα του σήματος αναφοράς είναι $r(n+1)$ και η έξοδος της συστοιχίας θα δίνεται από την εξίσωση:

$$y(n) = \underline{w}^H(n)\underline{x}(n+1). \quad (55)$$

Στην τυπική του μορφή, ο αλγόριθμος LMS χρησιμοποιεί μια εκτίμηση της κλίσης αντικαθιστώντας το R και το \underline{z} με τις θορυβώδεις εκτιμήσεις τους που είναι διαθέσιμα στην (n+1)-οστή επανάληψη οδηγώντας στην εξίσωση:

$$\underline{g}(\underline{w}(n)) = 2\underline{x}(n+1)\varepsilon^*(\underline{w}(n)) \quad (56)$$

όπου το $\varepsilon^*(\underline{w}(n))$ εκφράζει το λάθος μεταξύ της εξόδου της συστοιχίας και του σήματος αναφοράς που εκφράζεται από την εξίσωση:

$$\varepsilon^*(\underline{w}(n)) = \underline{w}^H(n)\underline{x}(n+1) - r(n+1). \quad (57)$$

Έτσι η εκτιμώμενη κλίση είναι ένα προϊόν του σφάλματος μεταξύ της εξόδου συστοιχίας και του σήματος αναφοράς καθώς και όπως επίσης των σημάτων της δέσμης μετά την n -ιοστή επανάληψη.

Η ταχύτητα της σύγκλισης του αλγορίθμου αναφέρεται στην ταχύτητα με την οποία ο μέσος όρος των κατ'εκτίμηση βαρών προσεγγίζει το βέλτιστο βάρος. Αυτή συνήθως χαρακτηρίζεται από L προβλέψεις κατά μήκος R -ιδιοδιανυσμάτων με τη σταθερά χρόνου της l -οστής πρόβλεψης να δίνεται από την $\tau_l = \frac{1}{2\mu\lambda_l}$ (58)

με το λ_l να δηλώνει την l ιδιοτιμή. Έτσι λοιπόν μια μικρή ιδιοτιμή λ_{max} κανονικά αντιστοιχεί για την ισχυρότερη πηγή, και η μικρότερη ιδιοτιμή αντιστοιχεί στην ασθενέστερη πηγή ή θόρυβο του περιβάλλοντος. Επομένως, όσο μεγαλύτερη είναι η ιδιοτιμή εξάπλωσης, τόσο περισσότερος χρόνος χρειάζεται για τον αλγόριθμο για να συγκλίνει. Όσον αφορά τη δυνατότητα απόρριψης παρεμβολών, αυτό σημαίνει ότι ακυρώνουμε την ισχυρότερη πηγή πρώτα και την πιο αδύναμη πηγή τελευταία.

Η ταχύτητα σύγκλισης ενός αλγορίθμου είναι ένα σημαντικό ζήτημα και η σημασία της για τις κινητές επικοινωνίες τονίζεται μετέπειτα συζητώντας το πώς ο αλγόριθμος LMS δεν αποδίδει ικανοποιητικά όπως άλλους αλγόριθμους λόγω της αργής ταχύτητα σύγκλισης σε καταστάσεις ταχέων μεταβαλλόμενων χαρακτηριστικών σημάτων. Η διαθεσιμότητα του χρόνου για έναν αλγόριθμο να συγκλίνει σε συστήματα κινητών επικοινωνιών δεν εξαρτάται μόνο από το σχεδιασμό του συστήματος, το οποίο υπαγορεύει τη διάρκεια του σήματος του χρήστη (όπως η διάρκεια υποδοχής χρήστη σε ένα TDMA σύστημα), αλλά και την ταχύτητα των κινητών τηλεφώνων, τα οποία αλλάζουν το ρυθμό με τον οποίο ένα σήμα εξασθενεί. Για παράδειγμα, ένας κινητός χρήστης με τα πόδια θα μπορούσε να προκαλέσει το σήμα να εξασθενήσει σε ποσοστό περίπου 5 Hz, ενώ το ποσοστό θα είναι της τάξης από περίπου 50 Hz για ένα κινητό συνδρομητή με όχημα, πράγμα που σημαίνει ότι ένας αλγόριθμος θα πρέπει να συγκλίνει ταχύτερα σε ένα σύστημα που χρησιμοποιείται από κινητά τερματικά οχημάτων σε σχέση με αυτή που χρησιμοποιείται από φορητές συσκευές με μικρές ταχύτητες κίνησης. Μερικά από αυτά τα ζητήματα για ένα IS-54 σύστημα αποτελούν αντικείμενο συζητήσεων όπου συγκρίνεται η σύγκλιση των αλγορίθμων LMS και SMI σε καταστάσεις κινητών επικοινωνιών.

Ακόμα και όταν ο μέσος όρος του κατ'εκτίμηση βάρους συγκλίνει προς στο βέλτιστο βάρος, αυτό θα έχει πεπερασμένη συνδιακύμανση, δηλαδή η συνδιακύμανση της μήτρας δεν είναι ταυτόσημη με μια μήτρα που όλα τις τα στοιχεία ισούνται με μηδέν. Η συνδιακύμανση της μήτρας του βάρους ορίζεται ως:

$$k_{ww}(n) = E\underline{w}(n) - \underline{\bar{w}} \quad (59)$$

όπου το $\underline{\bar{w}} = E[\underline{w}(n)]$ δηλώνει το μέσο όρο των κατ'εκτίμηση βαρών στην ι-οστή επανάληψη.

Η παροδική και σταθερή κατάσταση συμπεριφοράς της συνδιακύμανσης βάρους της μήτρα και το μέσο πλεόνασμα MSE είναι σημαντικοί παράμετροι του αλγορίθμου LMS και αναλύονται λεπτομερώς παρακάτω.

Η διαφορά ανάμεσα στα βάρη που εκτιμώνται από ένα προσαρμοστικό αλγόριθμο και στα αντίστοιχα από τον αλγόριθμο MSE χαρακτηρίζεται επίσης ακόμη από το λόγο του MSE και του MMSE. Εδώ αναφέρεται ως μη προσαρμοστικότητα και είναι είναι μια αδιάστατη παράμετρος που μετρά την απόδοση του αλγορίθμου. Η μη προσαρμοστικότητα είναι ένα είδος θορύβου και προκαλείται από τη χρήση των εκτιμήσεων της κλίσης του θορύβου. Για την προκειμένη περίπτωση, όταν η κλίση υπολογίζεται από τον πολλαπλασιασμό των σημάτων συστοιχίας με το σφάλμα μεταξύ της εξόδου συστοιχίας και του σήματος αναφοράς τότε η κλίση του μεγέθους βήματος είναι επιλεγμένη τέτοια ώστε:

$$0 < \mu < \frac{1}{4\lambda_{max}} \quad (60)$$

και η μη προσαρμοστικότητα θα δίνεται από την εξίσωση:

$$M = \frac{\eta(\mu)}{1 - \eta(\mu)} \quad (61)$$

Από αυτή την έκφραση βλέπουμε ότι η αύξηση του μ οδηγεί σε αύξηση του θορύβου μη προσαρμοστικότητας. Από την άλλη πλευρά, η αύξηση του μ οδηγεί τον αλγόριθμο στο να συγκλίνει πιο γρήγορα, όπως συζητήθηκε νωρίτερα. Έτσι, η επιλογή της κλίσης του μεγέθους βήματος απαιτεί να ικανοποιεί κάποιες αντικρουόμενες απαιτήσεις όπως:

1) φτάνοντας κοντά στο σημείο της λύσης πιο γρήγορα, αλλά με το να περιφέρεται γύρω μια ευρύτερη περιοχή περισσότερο και προκαλώντας μια μεγαλύτερη μη προσαρμοστικότητα και

2) φτάνοντας κοντά στο σημείο λύσης αργά με τη μικρότερη κίνηση ως προς τα βάρη στο τέλος. Η τελευταία προκαλεί ένα άλλο επιπλέον πρόβλημα, ιδιαίτερα σε ένα μη στατικό περιβάλλον, όταν η παρεμβολή και η βέλτιστη λύση κινούνται αργά, προκαλώντας τα εκτιμώμενα βάρη να υστερούν των βέλτιστων βαρών. Το φαινόμενο αυτό αποκαλείται βάρος υστέρηση φορέα.

Διάφοροι τρόποι συμπεριλαμβανομένων του μεταβλητού μεγέθους βήματος, έχουν προταθεί ώστε να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό. Ορισμένα από αυτά θα συζητηθούν τώρα.

Ο προσαρμοστικός αλγόριθμος υπολογίζει τα βάρη μέσω της ελαχιστοποίησης του MSE (Mean squared error). Έτσι, σε συστήματα όπου ένα μέγεθος μεταβλητής βήματος χρησιμοποιείται, τότε αντανάκλαται η αξία του MSE σε εκείνη την επανάληψη (ανεβοκατεβαίνοντας καθώς το MSE πηγαίνει πάνω-κάτω), έτσι ώστε να παραμένει μεταξύ της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής για τη σύγκλιση και την ελάχιστη τιμή με βάση την επιτρεπόμενη μη προσαρμοστικότητα. Το μέγεθος του βήματος μπορεί επίσης να προσαρμοστεί ώστε να αντικατοπτρίζει την αλλαγή στην κατεύθυνση της κλίσης της επιφάνειας σφάλματος σε κάθε επανάληψη. Η βέλτιστη τιμή του μεγέθους βήμα προτείνεται κατά τρόπο ώστε να ελαχιστοποιεί το MSE σε κάθε επανάληψη. Αυτή είναι μια συνάρτηση της αξίας της πραγματικής κλίσης σε κάθε επανάληψη. Στην πράξη, αυτά μπορούν να αντικατασταθούν από στιγμιαίες τιμές τους, γεγονός που οδηγεί σε ελαττωμένη τιμή. Αντί να έχουμε ένα ενιαίο μέγεθος βήματος για ένα ολόκληρο διάνυμα βάρους μπορεί κανείς να επιλέξει ένα μεταβλητό μέγεθος για κάθε βάρος χωριστά, με αποτέλεσμα την αυξημένη σύγκλιση του αλγόριθμου. Η ταχύτητα σύγκλισης του αλγόριθμου μπορεί επίσης να αυξηθεί με αναπροσαρμογή των σταθμίσεων ώστε οι παρεμβολές να ακυρώνονται κάθε φορά χρησιμοποιώντας ένα σύστημα γνωστό ως μπλοκ μεταποίησης επεξεργασίας. Για ευρείας ζώνης σήματα, μια υλοποίηση στην βασική συχνότητα μπορεί να βοηθήσει να αυξήσει την ταχύτητα της σύγκλισης.

Βελτιωμένη σύγκλιση προκύπτει συνήθως από τη χρήση διαφορετικών μεγεθών βήματος σε διάφορους κάδους. Για την περιορισμένη LMS περίπτωση, αυτό είναι πιθανό να προκαλέσει επιδείνωση της σταθερής κατάστασης απόδοσης του αλγόριθμου. Η επιδείνωση αυτή, ωστόσο, δεν επηρεάζει την απόδοση του αλγόριθμου χωρίς περιορισμού. Ένας αλγόριθμος όπου το σφάλμα μεταξύ της εξόδου πίνακα και του σήματος αναφοράς αντικαθίσταται από το πρόσημό του, είναι υπολογιστικά λιγότερο σύνθετος από τον αλγόριθμο LMS, όπως συζητήθηκε.

Εφαρμογές του χωρίς περιορισμούς αλγόριθμου LMS περιλαμβάνονται στα κινητά συστήματα επικοινωνιών, εσωτερικά-ραδιοφωνικά συστήματα, καθώς και στην δορυφορική μετάδοση μέσω δορυφορικών συστημάτων επικοινωνιών.

3.2.2 Κανονικοποιημένος LMS αλγόριθμος

Αυτός ο αλγόριθμος είναι μια παραλλαγή του αλγόριθμου LMS σταθερού βήματος και χρησιμοποιεί ένα μέγεθος βήματος που εξαρτάται από τα δεδομένα σε κάθε επανάληψη. Στην ν-ιοστή επανάληψη, το μέγεθος βήματος δίνεται από την εξίσωση

$$\mu(n) = \frac{\mu_0}{x^H(n)x(n)} \quad (62)$$

όπου μ_0 είναι μια σταθερά. Ο αλγόριθμος και η σύγκλιση της με τη χρήση διαφόρων τύπων δεδομένων έχουν μελετηθεί ευρέως. Επιπλέον, αποφεύγεται η ανάγκη για την εκτίμηση των ιδιοτιμών του πίνακα συσχέτισης ή της επιλογής του μέγιστου επιτρεπόμενου μεγέθους βήματος. Ο αλγόριθμος αυτός συνήθως έχει την καλύτερη απόδοση σύγκλισης και λιγότερη ευαισθησία σήματος σε σύγκριση με τον κανονικό αλγόριθμο LMS.

3.2.3 Περιορισμένος LMS αλγόριθμος

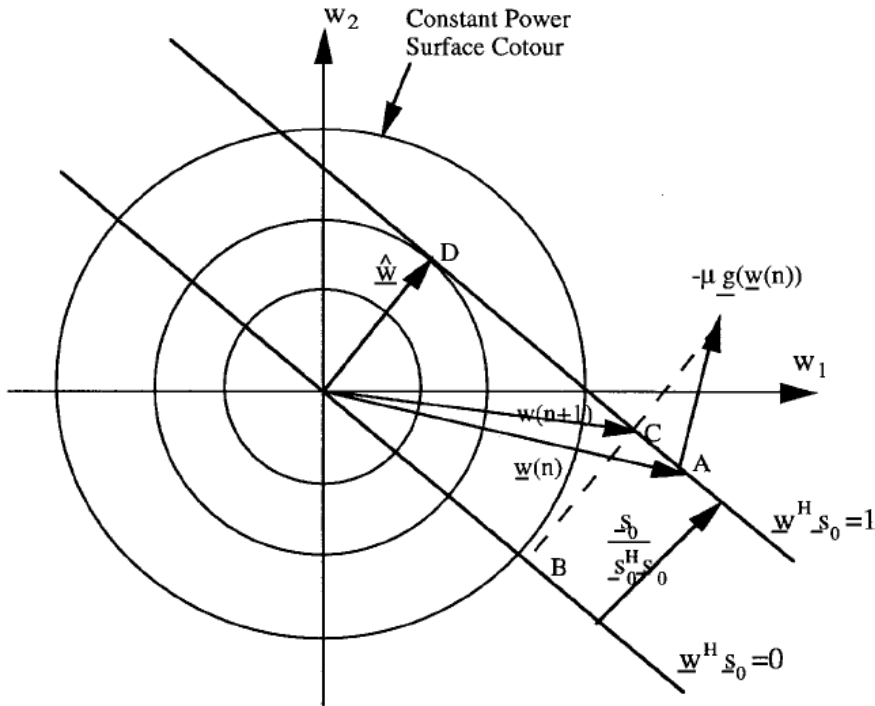
Ένας πραγματικού χρόνου περιορισμένος αλγόριθμος για τον καθορισμό του βέλτιστου διάνυσματος βάρους \bar{w} είναι:

$$\underline{w}(n+1) = P\{\underline{w}(n) - \mu \underline{g}(\underline{w}(n))\} + \frac{s_0}{s_0^H s_0} \quad (63)$$

$$\text{όπου το } P \triangleq I - \frac{s_0 s_0^H}{L} \quad (64)$$

είναι ένας φορέας προβολής, το $\underline{g}(\underline{w}(n))$ είναι μια αμερόληπτη εκτίμηση της κλίσης της δύναμης της επιφάνειας $\underline{w}^H(n)R\underline{w}(n)$ με αναφορά στο $\underline{w}(n)$ μετά την ι-οστή επανάληψη, μ να είναι το μέγεθος του βήματος, και \underline{s}_0 είναι το διάνυσμα του συστήματος διεύθυνσης στην κατεύθυνση βλέμματος.

Ο αλγόριθμος είναι "περιορισμένος", επειδή το διάνυσμα βάρους που ικανοποιεί τον περιορισμό σε κάθε επανάληψη, δηλαδή το $\underline{w}^H(n)s_0 = 1$. Η διαδικασία για την επιβολή περιορισμών, μπορεί να νοηθεί από την εικόνα. 12, η οποία δείχνει πως τα βάρη σταθμίζονται και πώς ένα σύστημα προβολής χρησιμοποιεί ένα διάγραμμα διανυσμάτων για ένα σύστημα 2 βαρών.



Σχήμα 7. Περιορισμένος LMS αλγόριθμος. Εικονογράφηση της διαδικασίας προβολής.

Το σημείο A στο διάγραμμα απεικονίζει τη θέση του βάρους μετά την ολοκλήρωση της ι-οστής επανάληψης.

Τα βάρη παρεμποδίζονται με την προσθήκη μιας μικρής ποσότητας $-\mu \underline{g}(\underline{w}(n))$ και στη συνέχεια προβάλλονται στο $\underline{w}^H \underline{s}_0 = 0$ χρησιμοποιώντας την προβολή του χειριστή P. Το σημείο αυτό υποδεικνύεται από το σημείο B του διαγράμματος.

Ο περιορισμός τώρα αποκαθίσταται με την προσθήκη του $\frac{\underline{s}_0}{\underline{s}_0^H \underline{s}_0}$ και τα ενημερωμένα βάρη κινούνται προς το σημείο C. Η διαδικασία συνεχίζεται με την κίνηση του εκτιμώμενο βάρους προς το σημείο D, που είναι και η βέλτιστη λύση.

Η συζήτηση μέχρι σήμερα έχει επικεντρωθεί στη σύγκλιση της μέσης τιμής των βαρών για τα βέλτιστα βάρη. Η διακύμανση αυτών των βαρών αποτελεί σημαντική παράμετρο, και η παροδική και σταθερής- κατάσταση συμπεριφορά της συνδιακύμανσης μήτρας βάρους $\kappa_{w,w}(n)$ είναι δείκτης της απόδοσης του αλγορίθμου, όπως συζητήθηκε προηγουμένως για τον χωρίς περιορισμούς αλγόριθμο LMS. Μια έκφραση για το $\kappa_{w,w}(n)$ δείχνει ότι είναι μια λειτουργία της διακύμανσης της εκτίμησης. Για τον πρότυπο αλγόριθμο, η έκφραση για τη διακύμανση της κλίσης δίνεται από την εξίσωση:

$$V_g(\underline{w}(n)) = 4\underline{w}^H(n)R_{W(n)}R. \quad (65)$$

α) Ευαισθησία σήματος: Η σύγκλιση των μέσων βαρών για τα βέλτιστη βάρη είναι συνάρτηση των ιδιοτιμών τους PR_N P και, επομένως, είναι ανεξάρτητη από αυτό του σήματος κατεύθυνση. Αυτό δεν συμβαίνει, ωστόσο, για την συνδιακύμανση βάρους μήτρας, η οποία εξαρτάται από την προβλεπόμενη συνδιακύμανση της κλίσης που χρησιμοποιείται για την ενημέρωση του βάρους του αλγόριθμου.

β) Δομημένης κλίσης αλγόριθμος:

Για μια γραμμική συστοιχία ισαπέχοντων στοιχείων, ο συσχετισμός συστοιχίας μήτρας έχει την δομή Toeplitz που είναι:

$$R \equiv \begin{pmatrix} r_0 & r_1 & \cdots & r_{L-1} \\ r_H^* & \cdot & & \\ \cdot & & \cdot & \\ \cdot & & & \cdot \\ r_{L-1}^* & & & r_0 \end{pmatrix} \quad (66)$$

με το $r_i, i=0,1,\dots,L-1$ να είναι η συσχέτιση μεταξύ των χρονικών υστερήσεων. Το θορυβώδες δείγμα R που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της κλίσης για τον πρότυπο αλγόριθμο LMS δεν έχει αυτή τη δομή. Η δομημένη κλίση του αλγόριθμου εκμεταλλεύεται αυτήν την δομή του είναι τέτοια ώστε η εκτιμώμενη μήτρα να έχει αυτήν την δομή.

Ένας αλγόριθμος που χρησιμοποιεί την δομημένη μέθοδο έχει καλύτερες επιδόσεις σύγκλισης από εκείνη του αλγορίθμου με την παρουσία ενός ισχυρού σήματος κατεύθυνσης. Ο αλγόριθμος αυτός αναφέρεται ως βελτιωμένος LMS αλγόριθμος. Η συζήτηση του αλγορίθμου LMS σημαίνει ότι κάποιος έχει πρόσβαση σε όλα τα σήματα πίνακα. Σε περιπτώσεις όπου η πρόσβαση αυτή δεν είναι διαθέσιμη οικονομικά, κάποιος θα μπορούσε να εκτιμήσει την κλίση του συστήματος χρησιμοποιώντας αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται σε συστήματα που ανακατατάσσουν τα βάρη της συστοιχίας χρησιμοποιώντας κάποια ορθογώνιες ακολουθίες και χρησιμοποιήσουν την μετρούμενη ισχύ εξόδου για την εκτίμηση της κλίσης. Για παράδειγμα για έναν κύκλο ανακατανομής μήκους J ο αλγόριθμος απαιτεί J δείγματα σε κάθε επανάληψη για τον υπολογισμό της κλίσης. Έτσι, ο αριθμός επανάληψεων και ο αριθμός των δειγμάτων είναι διαφορετικός και ο

αλγόριθμος είναι πιο αργός από έναν παράγοντα που μετράται σε χρόνο και όχι από τον αριθμό της επανάληψης. Η κλίση της εκτίμησης προσθέτει, επίσης, επιπλέον θορύβο στο σύστημα, γνωστό ως διαταραχή θορύβου. Υπάρχει επίσης μια μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσαρμογή των βαρών πίνακα.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί έναν τρέχοντα μέσο όρο εκτιμήσεων των τελευταίων κλίσεων στην ι-οστή επανάληψη, αντί να χρησιμοποιούμε τις προηγούμενες μήτρες για την εκτίμηση, όπως παράδειγμα γίνεται με την αναδρομική περίπτωση LMS για τη μείωση του βάρους του θορύβου.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλες αυτές οι εκτιμήσεις των κλίσεων οδηγούν σε λιγότερες διακυμάνσεις στο βάρος πίνακα, και έτσι οδηγώντας σε αύξηση την ταχύτητα της σύγκλισης του αλγορίθμου, χωρίς να διακυβεύεται η σταθερότητα του αλγορίθμου.

3.2.4 Θέματα Εφαρμογής του LMS

Η ταχύτητα της σύγκλισης και των διακυμάνσεων σε βάρους της δέσμης κατά τη διάρκεια της προσαρμογής και θορύβου είναι τα μέτρα της σταθερής συμπεριφοράς του αλγορίθμου LMS. Η θεωρητική απόδοση του αλγορίθμου και της επίδρασης του στην κατεύθυνση βλέμματος συζητήθηκαν στο προηγούμενο τμήμα αν υποθέσουμε ότι η μεταβλητή επιτρέπεται να λάβει οποιαδήποτε τιμή.

Τώρα, οι επιπτώσεις αυτών των υλοποιήσεων συζητούνται εν συντομία.

α) αρίθμηση πεπερασμένης ακρίβειας:

Σε πραγματικά περιβάλλοντα, όταν ο αλγόριθμος υλοποιείται με χρήση ψηφιακού υλικού, όπου μια μεταβλητή μπορεί να πάρει μόνο διακριτές τιμές, υπάρχουν και άλλοι παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση του και άλλα ζητήματα που έχουν ανάγκη εξέτασης, συμπεριλαμβανομένου και του θορύβου κβαντισμού, καθώς όπως επίσης και ο θόρυβος αποκοπής. Πρώτον, όταν ένα bit χρησιμοποιείται για να μετατρέψει ένα αναλογικό σήμα της σειράς από $-r_{max}$ έως r_{max} σε ψηφιακό σήμα, προσθέτει ένα θόρυβο κβαντισμού με αναμενόμενη τιμή και διακύμανση:

$$\sigma_q^2 = \frac{2^{-2b}}{3} r_{max}^2 \quad (67)$$

στο σύστημα.

Δεύτερον, η επίδραση του πεπερασμένου μήκους λέξεων των συσκευών, όπου αποθηκεύονται οι αριθμοί είναι αίτια του θορύβου αποκοπής που πρέπει να προστεθεί

στο σύστημα. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι, όταν οι αριθμητικές πράξεις πραγματοποιούνται με τη χρήση αυτών των αριθμών, οι απαντήσεις είναι συνήθως μεγαλύτερες από το διαθέσιμο μήκος λέξης και, επομένως στρογγυλοποιούνται ή περικόπτονται για να χωρέσουν σε πεπερασμένη μνήμη λέξης. Τέλος, όλες οι μεταβλητές όπως η εκτιμώμενη κλίση, η κλίση μέγεθος του βήματος, και του κατ'επίκριση βάρους, επιτρέπεται να λαμβάνουν μόνο πεπερασμένες αξίες και μπορούν να αυξηθεί ή να μειωθούν με συντελεστή δύο. Το συνδυασμένο αποτέλεσμα όλων αυτών σχετικά με τον αλγόριθμο είναι μια μεγαλύτερη διακύμανση ως προς το βάρος.

Μια σημαντική επίδραση του πεπερασμένου μήκους λέξης για την ενημέρωση του βάρους είναι ότι, όταν μια μικρή συμβολή δεν προκαλεί τα βάρη να μετακινηθούν περισσότερο από το λιγότερο σημαντικό bit (η μικρότερη δυνατή αύξηση, η οποία εξαρτάται από τον αριθμό των bit που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση των βαρών), τότε ο αλγόριθμος και τα βάρη που δεν αλλάζουν πια απαιτώντας ένα μεγαλύτερο μέγεθος βήματος, με αποτέλεσμα την αύξηση του βάρους της διακύμανσης.

β) Πραγματική έναντι σύνθετης εφαρμογή: Υπάρχουν καταστάσεις όπου τα δεδομένα εισόδου στο σύστημα προσαρμογής βάρους είναι πραγματικά, και καταστάσεις όπου αυτές είναι σύνθετες (με πραγματικά και φανταστικά μέρη που υπάρχουν στην φάση και στον τετραγωνισμό).

Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, τα βάρη θα μπορούσαν να αναβαθμίζονται με βάση τον πραγματικό αλγόριθμο LMS ή τον κανονικοποιημένο LMS αλγόριθμο. Ο πρώτος χρησιμοποιεί πραγματικές μεταβλητές και ενημερώσεις σε πραγματικά βάρη, ενώ ο σύνθετος αλγόριθμος χρησιμοποιεί σύνθετη αριθμητική, σύνθετες μεταβλητές όπως και ενημερώσεις.

Για πραγματικά δεδομένα χρησιμοποιώντας έναν σύνθετο αλγόριθμο, κάποιος πρέπει να δημιουργήσει το τετραγωνισμό στοιχείου χρησιμοποιώντας το μετασχηματιστή Hilbert ή τον τετραγωνισμό φίλτρων η οποία έχει τις ακόλουθες λειτουργίες μεταφοράς:

$$H(f) = \begin{cases} -j, & f < 0 \\ j, & f > 0 \end{cases} \quad (68)$$

3.3 Αλγόριθμος RLS

Η σύγκλιση του αλγορίθμου LMS εξαρτάται από τις ιδιοτιμές του R. Σε ένα περιβάλλον με μεγάλη εξάπλωση ιδιοτιμής, ο αλγόριθμος συγκλίνει με αργή ταχύτητα. Αυτό το πρόβλημα επιλύεται με έναν αλγόριθμο RLS με την αντικατάσταση της κλίσης μέγεθους του βήματος μ με ένα κέρδος μήτρας $R^{-1}(n)$ κατά τη ν-ιοστή επανάληψη, παράγοντας την εξίσωση ενημέρωσης βάρους:

$$\underline{w}(n) = \underline{w}(n-1) - R^{-1}(n) \underline{x}(n) \varepsilon^* (\underline{w}(n-1)) \quad (69)$$

όπου το $R(n)$ δίνεται από την:

$$R(n) = \sum_{k=0}^n \delta_0^{n-k} \underline{x}(k) \underline{x}^H(k) \quad (70)$$

Όπου το δ_0 είναι μια πραγματική βαθμωτή τιμή μικρότερη από τη μονάδα αλλά κοντά σε αυτή και χρησιμοποιείται για την εκθετική στάθμιση των τελευταίων δεδομένων καθώς η εξίσωση ενημέρωσης τείνει να δίνει έμφαση στα παλιά δείγματα.

Η ποσότητα $\frac{1}{1-\delta_0}$ συνήθως αναφέρεται ως μνήμη του αλγορίθμου. Έτσι, για $\delta_0=0.99$, η μνήμη του αλγορίθμου είναι κοντά στα 100 δείγματα.

Ο αλγόριθμος RLS αναβαθμίζει το απαιτούμενο αντίστροφο της $R(n)$ χρησιμοποιώντας την προηγούμενη αντιστροφή και το παρόν δείγμα, όπως ακολούθως:

$$R^{-1}(n) = \frac{1}{\delta_0} [R^{-1}(n-1) - \frac{R^{-1}(n-1) \underline{x}(n) \underline{x}^H(n) R^{-1}(n-1)}{\delta_0 + \underline{x}^H(n) R^{-1}(n-1) \underline{x}(n)}] \quad (71)$$

Η μήτρα αρχικοποιείται ακολούθως:

$$R^{-1}(0) = \frac{1}{\varepsilon_0} I, \quad \varepsilon_0 > 0. \quad (72)$$

Ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται εδώ είναι ο ακριβής αλγόριθμος RLS. Μια σύγκριση της ταχύτητας σύγκλισης του LMS και του RLS και μερικών άλλων αλγορίθμων με βάση την κλίση που χρησιμοποιούν δείχνουν ότι ο RLS είναι πιο αποτελεσματικός και ο LMS είναι ο πιο αργός. Μια μελέτη από προσομοίωση μέσω υπολογιστή του RLS, LMS, και SMI αλγορίθμων σε ένα κινητό σύστημα επικοινωνιών δείχνει ότι ο RLS ξεπερνά τους δύο τελευταίους σε κανάλια ισχυρής εξασθένησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 Μέθοδοι εκτίμησης της κατεύθυνσης άφιξης (DOA)

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται οι μέθοδοι εκτίμησης της κατεύθυνσης άφιξης ενός σήματος συμπεριλαμβανομένου και των επιδόσεων τους, την ευαισθησία και τους περιορισμούς τους. Η κατεύθυνση της πηγής χαρακτηρίζεται από τη μεταβλητή θ . Ο στόχος της εκτίμησης της κατεύθυνσης άφιξης (DOA) είναι να χρησιμοποιούμε τα δεδομένα που λαμβάνουμε σχετικά με την κατερχόμενη ζεύξη σε μια συστοιχία αισθητήρων βάση-σταθμού ώστε να κάνουμε εκτίμηση των κατευθύνσεων των σημάτων από τους επιθυμητούς χρήστες κινητών συσκευών καθώς και επίσης και τις κατευθύνσεις των σημάτων παρεμβολής. Τα αποτελέσματα της εκτίμησης DOA στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για να προσαρμόσουν τα βάρη της διαμόρφωσης δέσμης έτσι ώστε η εκπεμπόμενη ισχύς να μεγιστοποιείται για τους επιθυμητούς χρήστες, και ακυρώσεις της ακτινοβολίας να τοποθετούνται στις κατευθύνσεις των σημάτων παρεμβολής. Ως εκ τούτου, ένας επιτυχής σχεδιασμός μιας προσαρμοστικής σειράς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή της εκτίμησης του αλγόριθμου DOA που πρέπει να είναι ιδιαίτερα ακριβής και αξιόπιστος. Κατά τον σχεδιασμό μίας προσαρμοστικής σειράς έξυπνων κεραιών κινητής επικοινωνίας οι επιδόσεις των εκτιμήσεων ενός αλγόριθμου DOA εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως ο αριθμός των χρηστών κινητής τηλεφωνίας και του χώρου δράσης τους, ο αριθμός των στοιχείων του πίνακα και η απόσταση μεταξύ τους, ο αριθμός των δειγμάτων του σήματος και του SNR. Για αυτό διάφοροι αλγόριθμοι υπολογισμού DOA έχουν αναπτυχθεί και κατηγοριοποιούνται σε δύο μεθόδους α) τους συμβατικούς και β) υποδιαστήματος. Οι συμβατικοί μέθοδοι που ονομάζεται επίσης κλασικοί μέθοδοι υπολογίζουν πρώτα το χωρικό φάσμα και στη συνέχεια κάνουν εκτίμηση του DOA από τα τοπικά μέγιστα του φάσματος. Μέθοδοι που εμπίπτουν σε αυτή την κατηγορία είναι οι Bartlett, και Capon ή MVDR. Ωστόσο αυτές οι μέθοδοι υποφέρουν από την έλλειψη γωνιακή ανάλυσης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται μέθοδοι υψηλής γωνιακής ανάλυσης όπως ο MUSIC και ο ESPRIT, οι οποίοι ωστόσο, έχουν κακή απόδοση σε καταστάσεις η οποία είναι πολύ συχνές σε σύστημα επικοινωνίας (π.χ. σε φαινόμενα πολυδιαδρομής).

4.2 Φασματική μέθοδος εκτίμησης

Αυτές οι μέθοδοι εκτιμούν την κατεύθυνση άφιξης με υπολογισμό του χωρικού φάσματος και τον καθορισμό, στη συνέχεια, των μέγιστων και ελάχιστων ορίων. Οι περισσότερες από αυτές τις τεχνικές έχουν τις ρίζες τους σε αναλύσεις που είναι σε σειρά χρονολογικά. Μία από τις πρώτες μεθόδους φασματικής ανάλυσης είναι η μέθοδος Bartlett όπου ένα ορθογώνιο παράθυρο ενιαίας στάθμισης εφαρμόζεται στα δεδομένα χρονοσειρών που αναλύονται. Για προβλήματα εκτίμησης μιας δέσμης χρησιμοποιώντας έναν πίνακα σημάτων αυτό γίνεται κάνοντας ίση στάθμιση για κάθε στοιχείο. Έτσι, για την καθοδήγηση της δέσμης στην κατεύθυνση θ , αυτή η μέθοδος εκτιμά την μέση ισχύ, μια έκφραση της οποίας δίνεται από την $P_B(\theta) = \frac{s_{\theta}^H R s_{\theta}}{L^2}$ (73)

όπου το s_{θ} δηλώνει το διάνυσμα διεύθυνσης που συνδέεται με την κατεύθυνση θ . Ένα σύνολο διανυσμάτων $\{s_{\theta}\}$ του συστήματος διεύθυνσης που συνδέονται με μια διαφορετική γωνία θ αναφέρεται συχνά ως συστοιχία εκτίμησης DOA. Στην πράξη, μπορεί να μετράται κατά το χρόνο της βαθμονόμησης του πίνακα. Η διαδικασία είναι παρόμοια με εκείνη όπου κατευθύνουμε μηχανικά την δέσμη προς τη διεύθυνση που θέλουμε και μετράμε την ισχύ εξόδου. Λόγω των απορρέοντων πλαϊνών λοβών, η ισχύς εξόδου δεν ενισχύεται μόνο από την κατεύθυνση στην οποία η δέσμη είναι κατευθυντική αλλά και από τις κατευθύνσεις όπου οι πλαϊνοί λοβοί κατάδεικνύουν. Στην περίπτωση αυτή η αναλυτική ικανότητα του επεξεργαστή εξαρτάται από το άνοιγμα του πίνακα ή το εύρος δέσμης του κύριου λοβού.

4.3 Ελάχιστη διακύμανση της απόκρισης αλλοίωσης (MVDR-Minimum variance distortionless response).

Αυτή είναι η μέθοδος μέγιστη πιθανοφάνειας (ML-Maximum Likelihood) εκτίμησης του ραδιοφάσματος η οποία βρίσκει την μέγιστη πιθανοφάνεια της εκτίμησης της ισχύος που φθάνει από μια σημειακή πηγή σε μια κατεύθυνση θ υποθέτοντας όλες τις άλλες πηγές, σαν παρεμβολές. Στη βιβλιογραφία της διαμόρφωσης δέσμης, αναφέρεται ως MVDR διαμορφωτής δέσμης δεδομένου ότι ελλείψει των λαθών, μεγιστοποιεί την απόδοση του SNR και περνάει το σήμα της κατεύθυνσης ανόθευτο. Για ένα πρόβλημα εκτίμησης της εύρεσης κατεύθυνσης η μέθοδος βρίσκει την εκτίμηση ML της κατεύθυνσης αντί της ισχύος.

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί τα βάρη πίνακα, τα οποία λαμβάνονται με την ελαχιστοποίηση της μέσης ισχύος εξόδου προς την κατεύθυνση βλέμματος. Μια έκφραση για την ισχύ του φάσματος δίνεται από την εξίσωση:

$$P_{MV}(\theta) = \frac{1}{s_{\theta}^H R^{-1} s_{\theta}} \quad (74)$$

Η μέθοδος αυτή έχει καλύτερες ιδιότητες ανάλυσης από την μέθοδο Bartlett.

4.4 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.

Η έκφραση για τα βάρη του πίνακα και την ισχύ του φάσματος δίνεται από τις εξισώσεις:

$$W = \frac{R^{-1} u_1}{u_1^H R^{-1} u_1} \quad (75)$$

$$P_{LP}(\theta) = \frac{u_1^H R^{-1} u_1}{[u_1^H R^{-1} s_{\theta}]^2} \quad (76)$$

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.

4.5 Μέθοδος μέγιστης εντροπίας(MEM-Maximum entropy method)

Αυτή η μέθοδος βρίσκει ένα φάσμα ισχύος, ώστε ο μετασχηματισμός Fourier αυτού να ισοδυναμεί με τη μετρούμενη συσχέτιση, όταν η εντροπία του μεγιστοποιείται. Η εντροπία μιάς Γκαουσιανής ζώνης περιορισμένης χρονικής σειράς με φάσμα ισχύος $S(f)$ χαρακτηρίζεται ως εξής:

$$H(S) = \int_{-fN}^{fN} \ln S(f) df \quad (77)$$

όπου fN είναι η συχνότητα Nyquist. Για την εκτίμηση των DOA από τις μετρήσεις χρησιμοποιώντας μια σειρά αισθητήρων, η μέθοδος βρίσκει μια συνεχής συνάρτηση $P_{ME(\theta)}$ τέτοια ώστε να μεγιστοποιεί την εντροπία:

$$H(P) = \int_0^{2\pi} \ln P_{ME(\theta)} d\theta \quad (78)$$

4.6. Μέθοδος Μέγιστης Πιθανοφάνειας(MLM-Maximum Likelihood Method)

Αυτή η μέθοδος εκτιμά την AoA από μία δοσμένη σειρά δειγμάτων στοιχειοκεραιών μεγιστοποιώντας την συνάρτηση πιθανότητας. Η συνάρτηση πιθανότητας είναι η δεσμευμένη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των δειγματοληπτούμενων δεδομένων, δοσμένης της AoA και θεωρείται ως μία συνάρτηση των επιθυμητών μεταβλητών. Η μέθοδος αναζητά αυτές τις κατευθύνσεις που μεγιστοποιούν το λογάριθμο της συνάρτησης, καθώς και την συνάρτηση καθεαυτή. Το ML κριτήριο υποδηλώνει ότι τα επίπεδα κύματα από αυτές τις κατευθύνσεις είναι το πιο πιθανό να προκαλέσουν εμφάνιση των δοσμένων δειγμάτων. Η μεγιστοποίηση συνάρτησης είναι ένα πρόβλημα μη-γραμμικής βελτιστοποίησης. Στην απουσία μιας κλειστής-φόρμας λύσης, απαιτεί επαναλαμβανόμενα πλάνα για λύσεις.

Η ML έχει ανώτερες επιδόσεις συγκρινόμενη με άλλες μεθόδους, ειδικότερα όταν ο SNR είναι μικρός, ο αριθμός των δειγμάτων είναι μικρός ή οι πηγές είναι συσχετισμένες. Για μία μόνο πηγή οι αναμενόμενες τιμές των εκτιμήσεων είναι ίσες με τις πραγματικές τιμές. Με αυτή τη λογική μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση

σύγκρισης για την επίδοση των άλλων μεθόδων. Η μέθοδος προϋποθέτει ότι ο αριθμός των πηγών είναι γνωστός. Όταν διατίθεται ένας μεγάλος αριθμός δειγμάτων, άλλα πλάνα που είναι πιο αποδοτικά υπολογιστικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επίδοση εξίσου καλή με αυτή αυτής της μεθόδου.

4.7. Μέθοδοι ιδιοκατασκευής (eigenstructure methods)

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 $|w^H s_0|$ όπου w είναι τα βάρη και s_0 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 $|w^H s_0|$ 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 (πραγματικού χρόνου). 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.

4.8 Αλγόριθμος MUSIC – Πολλαπλή Ταξινόμηση σήματος(Multiple signal classification)

4.8.1 Φασματικός MUSIC

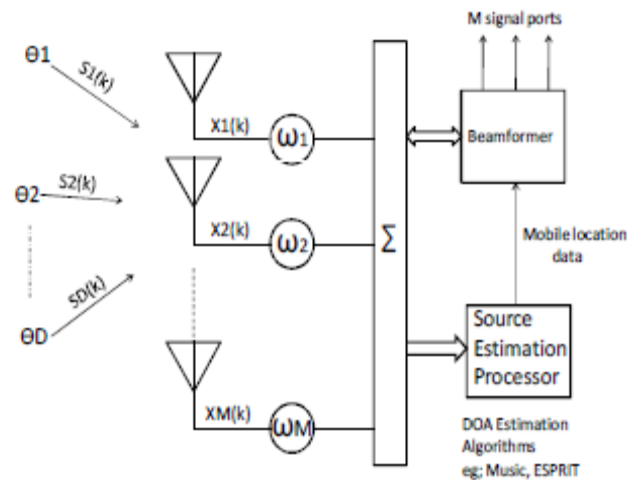
Η MUSIC μέθοδος είναι μια σχετικά απλή και αποτελεσματική μέθοδος ιδιοκατασκευής DoA με πολλές παραλλαγές. Στη βασική της μορφή είναι επίσης γνωστή ως φασματική MUSIC. Η μέθοδος αυτή εκτιμά το υποδιάστημα θορύβου από τα διαθέσιμα δείγματα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με διάσπαση των ιδιοτιμών του 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. Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται με την αναζήτηση για τις αιχμές του φάσματος MUSIC που δίνεται από την εξίσωση:

$$P_{MU}(\theta) = \frac{1}{s_{\theta}^H U_N^2} \quad (79)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μπορούμε αντί να χρησιμοποιήσουμε το υποδιάστημα θορύβου και την αναζήτηση με διανύσματα διεύθυνσης κάθετα μεταξύ τους, 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 κεραιών σε διαφορετικές τοποθεσίες. Για περισσότερες πηγές η CRLB προσεγγίζεται για μεγάλο SNR.



Σχήμα 8: M συστοιχία κεραιών με D σήματα να φθάνουν.

Η λέξη MUSIC είναι ένα ακρωνύμιο που χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση πολλών σημάτων. Είναι υψηλής ευκρίνειας τεχνική που βασίζεται στην εκμετάλλευση της συνδιακύμανσης εισόδου μήτρας. Ο MUSIC κάνει παραδοχή ότι ο θόρυβος σε κάθε κανάλι είναι ασυσχέτιστος κάνοντας τον πίνακα συσχέτισης διαγώνια.

Τα σήματα έτσι είναι κάπως συσχετισμένα δημιουργώντας μια μη διαγώνια συσχέτιση μήτρα σήματος. Εάν ο αριθμός των σημάτων που προσπίπτει σε μια M-στοιχείων συστοιχία είναι D, ο αριθμός των ιδιοτιμών σήματος και των ιδιοδιανυσμάτων είναι D τότε ο αριθμός των ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων θορύβου είναι M-D.

4.8.2 Root-MUSIC

Για μια ομοιόμορφα τοποθετημένη γραμμική στοιχειοκεραία η αναζήτηση για το DoA μπορεί να γίνει βρίσκοντας τις ρίζες των πολυωνύμων. Η μέθοδος Root MUSIC είναι εφαρμόσιμη 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.

4.8.3 Constrained MUSIC

Αυτή η μέθοδος 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.

4.8.4 Beam-Space MUSIC

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.

4.9 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.

$$P_{MN}(\theta) = \frac{1}{[w^H S \theta]} \quad (80)$$

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 μέθοδο παρόμοια της root-MUSIC η οποία όμως έχει μικρότερη ή ίση διασπορά στην εκτίμηση.

4.10 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 (First Principal Vector)- 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.

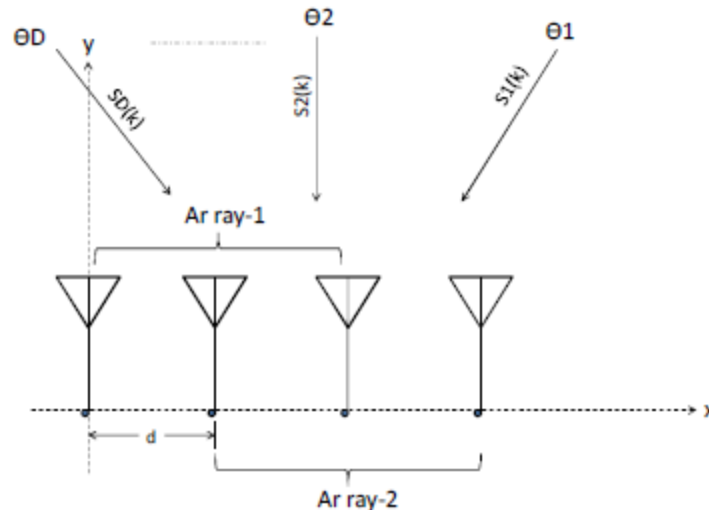
4.11 Μέθοδος ESPRIT

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 επιλεγθεί με τρόπο τέτοιο ώστε τα στοιχεία να έχουν αυτή την ιδιότητα.

Ο αλγόριθμος ESPRIT χρησιμοποιείται επειδή είναι συμπαγής και υπολογιστικά αποτελεσματικός. Ειδικότερα η χρήση του unitary – ESPRIT μπορεί να ελαττώσει την υπολογιστική πολυπλοκότητα του standard – ESPRIT αλγόριθμου, εισάγοντας υπολογισμούς πραγματικής τιμής. Επιπλέον ο unitary – ESPRIT χρησιμοποιεί μεθόδους “forward – backward averaging”, παρακάμπτοντας το πρόβλημα σημάτων

από πηγές με παρεμφερείς συχνότητες. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εύρεση του αριθμού των πηγών που επιδρούν στην κεραία.

Ο ESPRIT υποθέτει ότι υπάρχουν $D < M$ πηγές στενής ζώνης με επίκεντρο την κεντρική συχνότητα f_0 . Το σχήμα 2 δείχνει τέσσερα στοιχεία μιάς γραμμικής συστοιχίας η οποία αποτελείται από δύο ζεύγη. Τα δύο ζεύγη ακτίνων που ονομάζονται array-1 και array-2 διαχωρίζονται από μια απόσταση «d».



Σχήμα 9:Γραμμική συστοιχία 4 στοιχείων με 2 ζεύγη

Στη συνέχεια θα αναλύσουμε τον αλγόριθμο ESPRIT. Ο ESPRIT είναι μια υπολογιστικά ευέλικτη και συμπαγής μέθοδος για την εκτίμηση DoA. Σε αυτήν τη μέθοδο, L στοιχεία του δέκτη χωρίζονται σε δύο ομοιόμορφες υποσυστοιχίες, όπου κάθε μια αποτελείται από L-1 στοιχεία αισθητήρων διπόλων, μετατοπισμένα κατά ένα γνωστό σταθερό διάνυσμα μετατόπισης Δ , το οποίο ορίζει την κατεύθυνση αναφοράς, και όλες οι γωνίες μετρώνται με αναφορά σε αυτό το διάνυσμα. Το πλάτος του Δ δίνεται από το Δ_0 το οποίο μετράται σε μήκη κύματος. Η έξοδος της κάθε υποσυστοιχίας δηλώνεται με $x(t)$ και $y(t)$. Αυτές οι εξοδοι μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$x(t) = As(t) + n_x(t)$$

$$y(t) = A\Phi s(t) + n_y(t)$$

όπου η $s(t)$ δηλώνει τα M σήματα πηγής που παρατηρούνται σε ένα στοιχείο αναφοράς, οι $n_x(t)$ και $n_y(t)$ δηλώνουν το θόρυβο που επάγεται στα στοιχεία των δύο υποσυστοιχιών και A είναι μια $(L-1) \times M$ μήτρα, οι στήλες της οποίας είναι τα M

διανύσματα στρέψης που αντιστοιχούν στις M κατευθυντικές πηγές της πρώτης υποσυστοιχίας. Τα διανύσματα στρέψης, που αντιστοιχούν στις M κατευθυντικές πηγές της δεύτερης υποσυστοιχίας, δίνονται από το $A\Phi$, όπου Φ είναι ένας $M \times M$ διαγώνιος πίνακας με τα m -οστά διαγώνια στοιχεία του να είναι ίσα με $\exp(j2\pi\Delta_0\cos\theta_m)$, $m = 1, 2, \dots, M$.

Έστω U_x και U_y δύο $(L-1) \times M$ πίνακες, των οποίων οι στήλες είναι τα M ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στις μέγιστες ιδιοτιμές των πινάκων συσχέτισης R_{xx} και R_{yy} αντίστοιχα. Όταν αυτές οι δύο ομάδες ιδιοδιανυσμάτων εκτείνονται στο ίδιο M -διάστατο διάστημα σήματος, συνεπάγεται ότι οι πίνακες U_x και U_y συσχετίζονται με ένα μοναδικό, μη μοναδιαίο πίνακα μετασχηματισμού Ψ . Έτσι έχουμε:

$$U_y = U_x\Psi$$

Όμοια, αυτοί οι πίνακες συσχετίζονται με πίνακες διανυσμάτων στρέψης A και $A\Phi$ μέσω ενός μοναδικού, μη μοναδιαίου πίνακα μετασχηματισμού ως εξής:

$$U_x = AT$$

$$U_y = A\Phi T$$

Αντικαθιστώντας τα U_x και U_y , και δεδομένου ότι ο A είναι πλήρους βαθμού, έχουμε:

$$T\Psi T^{-1} = \Phi$$

το οποίο δηλώνει ότι οι ιδιοτιμές του Ψ ισούνται με τα στοιχεία της κυρίας διαγωνίου του Φ και ότι οι στήλες του T είναι ιδιοδιανύσματα του Ψ . Αυτή είναι η κύρια σχέση για τη δημιουργία του ESPRIT. Μια ιδιοδιάσπαση του Ψ δίνει τις ιδιοτιμές του. Η εξίσωση αυτών με τον Φ μας οδηγεί στην εκτίμηση DoA. Έτσι έχουμε:

$$\theta_m = \arccos\left\{ \frac{\arg(\lambda_m)}{2\pi\Delta_0} \right\}, m = 1, 2, \dots, M \quad (80)$$

4.12 Μέθοδος WSF

Η μέθοδος WSF είναι μία ενοποιημένη προσέγγιση των πλάνων MLM, MUSIC και ESPRIT. Απαιτεί γνώση του αριθμού των κατευθυντικών πηγών. Η μέθοδος βρίσκει τις DoA έτσι ώστε η εκδοχή βάρους ενός πίνακα του οποίου οι στήλες είναι τα διανύσματα στρέψης που σχετίζονται με αυτές τις κατευθύνσεις να είναι κοντά σε έναν πίνακα εξαρτημένο από τα δεδομένα. Τα δεδομένα που εξαρτώνται από την μήτρα μπορεί να είναι μια Ερμιτιανή τετραγωνική ρίζα του συσχετισμού του πίνακα μήτρας ή ενός πίνακα του οποίου οι στήλες είναι τα ιδιοδιανύσματα που σχετίζονται με τις μεγαλύτερες ιδιοτιμές του πίνακα συσχέτισης μήτρας. Τα πλαίσια που προτείνονται στη μέθοδο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποκρυπτογράφηση της κοινής αριθμητικής του αλγόριθμου για διάφορες μεθόδους eigenstructure καθώς και για τις επιδόσεις τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5.1 Τεχνικές Προεπεξεργασίας

Μια σειρά τεχνικών χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των δεδομένων πριν χρησιμοποιήσουν την κατεύθυνση εύρεσης μεθόδων εκτίμησης DOA, και ιδίως σε περιπτώσεις όπου κατευθυντικές πηγές συσχετίζονται ή είναι ασυσχέτιστες. Συσχέτιση της κατεύθυνσης πηγών μπορεί να υπάρχει λόγω της πολυδιαδρομικής διάδοσης και τείνει να μειώνει το βαθμό της συσχέτισης του πίνακα μήτρας.

Οι περισσότερες τεχνικές προεπεξεργασίας προσπαθούν είτε να αποκαταστήσουν αυτό το ελάττωμα στο πίνακα συσχέτισης ή να το τροποποιήσουν ώστε να είναι χρήσιμο για τις μεθόδους εκτίμησης DOA.

Ένα καθεστώς, που αναφέρεται ως μέθοδος χωρικής εξομάλυνσης, έχει μελετηθεί ευρέως στη βιβλιογραφία και ισχύει για μια γραμμική διάταξη. Στη βασική του μορφή, αποσυσχετίζει την άφιξη, κατανέμοντας τον πίνακα σε έναν αριθμό μικρότερων υπο-ακτίνων και στη συνέχεια υπολογίζει τον μέσο όρο της συσχέτισης της συστοιχίας του πίνακα ο οποίος λαμβάνεται από κάθε υπο-ακτίνα. Ο αριθμός των υπο-ακτίνων που προέρχονται από μια σειρά εξαρτάται από τον αριθμό των στοιχείων που χρησιμοποιούνται σε κάθε υπο-ακτίνα. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας K στοιχεία σε κάθε υπο-ακτίνα, κάποιος μπορεί να σχηματίσει $L-K+1$ υπο-ακτίνες από μια σειρά L στοιχείων με τη δημιουργία της πρώτης υπο-ακτίνας χρησιμοποιώντας στοιχεία από 1 έως K της δεύτερης χρησιμοποιώντας στοιχεία από 2 έως K και ούτω καθεξής. Ο αριθμός και το μέγεθος των υπο-ακτίνων καθορίζεται από τον αριθμό των κατευθυντήριων πηγών που είναι υπό εξέταση. Έτσι, για να εκτιμηθεί η κατεύθυνση των M πηγών, απαιτείται ένα μέγεθος σειράς, $L=2M$, η οποία θα μπορούσε να μειωθεί χρησιμοποιώντας μια βελτιωμένη μέθοδο χωρικής εξομάλυνσης γνωστή και ως εμπρός-πίσω χωρική εξομάλυνση. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιεί το μέσο όρο της συσχέτισης πίνακα ο οποίος λαμβάνεται από την μέθοδο που περιγράφεται παραπάνω, που υποδιαιρεί την σειρά ξεκινώντας από τη μία πλευρά του πίνακα, και το συγκρότημα σύζευγμα της μήτρας που λαμβάνεται από την παραπάνω μέθοδο, το οποίο αρχίζει να υποδιαιρεί από την άλλη πλευρά του πίνακα. Η m -ιοστή μήτρα \bar{R}_M της αναδρομικής μεθόδου σχετίζεται με την προς τα εμπρός με την εξίσωση: $\bar{R}_M = J_0 R_m J_0$ όπου J_0 είναι μια αντανάκλαση μήτρας, με όλα της τα στοιχεία κατά μήκος της δευτερογενούς διαγώνιου ίση με την μονάδα και αλλού ίση με μηδέν. Η διαδικασία είναι παρόμοια με αυτή που

χρησιμοποιείται από την εμπρός-πίσω χωρικής εξομάλυνσης πρόβλεψη για την εκτίμηση της δέσμης. Η μέθοδος που περιγράφεται καταργεί τις επιπτώσεις του θορύβου για την χωρική εξομάλυνση και την κάνει πιο αποτελεσματική και σε συνθήκες χαμηλού SNR. Αυτή η μέθοδος χωρικού φιλτράρισματος προσφέρει DOA εκτιμήσεις συνεκτικών πηγές με μειωμένα σφάλματα RMS.

Μια ανάλυση των χωρικών εξομάλυνσης δείχνει ότι υπάρχει ένα άνω όριο για τον αριθμό των υπο-ακτίνων και ότι η μέγιστη απόσταση μεταξύ αυτών εξαρτάται από το κλασματικό εύρος ζώνης των σημάτων. Μια πλήρης ανάλυση της χρήσης της χωρικής εξομάλυνσης ως τεχνικής προεπεξεργασίας με τις σταθμισμένες ESPRIT και MUSIC μεθόδους εκτίμησης DOA δείχνει πώς επηρεάζεται η απόδοση τους και πώς θα μπορούσε να βελτιωθεί με την ορθή επιλογή του αριθμού των υπο-ακτίνων και των μητρών στάθμισης.

Η εφαρμογή του ESPRIT για την εκτίμηση των κατευθύνσεων της πηγής και της πόλωσης δείχνει τη βελτίωση των επιδόσεων της στην παρουσία πολλαπλών αφίξεων όταν συνδυάζεται με την μέθοδο χωρικής εξομάλυνσης. Η χωρική εξομάλυνση των μεθόδων που χρησιμοποιούν τις υπο-ακτίνες μειώνουν την αποτελεσματικότητα του ανοίγματος της σειράς, καθώς και τον βαθμό της ελευθερίας και επομένως κάποιος χρειάζεται ένα υψηλότερο αριθμό στοιχείων για την επεξεργασία των συσχετιζόμενων αφίξεων από αυτά που ούτως η άλλως απαιτούνται. Τα συστήματα που δεν μειώνουν το μέγεθος της δέσμης περιλαμβάνουν εκείνα που αποκαθιστούν την δομή της συσχέτισης πίνακα μήτρας για μια γραμμική συστοιχία όταν δεν υπάρχει συσχέτιση. Τα προγράμματα αυτά αναφέρονται ως διαρθρωμένες μέθοδοι. Για έναν γραμμικό πίνακα, ισαπέχοντων στοιχείων ο πίνακας συσχετίσεων, ελλείψει συσχετιζόμενων αφίξεων έχει μια δομή Toeplitz, δηλαδή, τα στοιχεία της μήτρας κατά μήκος των διαγωνίων του είναι ίσες. Έτσι η συσχέτιση μεταξύ των πηγών καταστρέφει αυτή τη δομή. Στη συνέχεια αυτό αποκαθίσταται από τον μέσο όρο πίνακα ο οποίος λαμβάνεται με την παρουσία των συσχετιζόμενων αφίξεων υπολογίζοντας τον μέσο όρο κατά μήκος των διαγωνίων, της προεπεξεργασίας μήτρας κατά προσέγγιση, με χρήση της γνώσης μιας εκτίμησης DOA.

5.2 Εκτίμηση του αριθμού των πηγών

Σε πολλές από τις μεθόδους υψηλής ευκρίνειας εύρεσης κατεύθυνσης απαιτείται ο αριθμός των κατευθυντικών πηγών και οι επιδόσεις τους εξαρτιούνται από την άριστη γνώση των εν λόγω αριθμών. Μερικές μέθοδοι για την εκτίμηση του αριθμού αυτών των πηγών συζητούνται εδώ.

Εν συντομία, η μέθοδος λειτουργεί ως εξής:

- 1) Εκτίμηση του συσχετισμού συστοιχίας μήτρα από N ανεξάρτητα και ισόνομα δείγματα.
- 2) Βρείτε τις L ιδιοτιμές $\lambda_i, i = 1, L$ του συσχετισμού μήτρα έτσι ώστε $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_L$.
- 3) Εκτίμηση του αριθμού των πηγών από την επίλυση της εξίσωσης:

$$N(L-M)\log\left(\frac{f_1(M)}{f_2(M)}\right)+f_3(M, N) \quad (81)$$

$$\text{όπου: } f_1(M) \triangleq \frac{1}{L-M} \sum_{i=M+1}^L \lambda_i \quad (82)$$

$$f_2(M) \triangleq \prod_{i=M+1}^L \lambda_i \quad (83)$$

$$f_3(M, K) = \begin{cases} M(2L - M) & \text{για AIC} \\ \frac{1}{2M(2L-M)\log N} & \text{για MDL} \end{cases} \quad (84)$$

με το L να παριστάνει τον αριθμό των στοιχείων στη συστοιχία. Στην πράξη, ο αριθμός των πηγών ενός πίνακα που μπορεί να είναι σε θέση να επίλυθεί δεν εξαρτάται μόνον από τον αριθμό των στοιχείων στη συστοιχία, αλλά και από την γεωμετρία πίνακα, τον διαθέσιμο αριθμό από τα στιγμιότυπα, καθώς και την χωρική κατανομή των πηγών.

5.3 Σύγκριση της απόδοσης των DOA συστημάτων

Η ανάλυση της απόδοσης των συστημάτων εύρεσης κατεύθυνσης έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές. Τα μέτρα επίδοσης που λαμβάνονται υπόψη για την ανάλυση περιλαμβάνουν την διακύμανση, την ανάλυση, CRLB (Cramer-Rao κάτω φράγμα) και της πιθανότητας της ανάλυσης. Μεταξύ των πιο μελετημένων συστημάτων κατεύθυνσης εύρεσης είναι η MUSIC. Οι περισσότερες από τις μελέτες αυτές επικεντρώνονται στην επίδοση και στην σύγκριση των επιδόσεων με άλλες μεθόδους, όταν ένας πεπερασμένος αριθμός των δειγμάτων χρησιμοποιούνται για την εύρεση της κατεύθυνσης παρα από το μέσο όρο σύνολο τους. Μια ασυμπτωτική ανάλυση της MUSIC με την πρόβλεψη της εμπρός-πίσω χωρικής εξομάλυνσης δείχνει ότι για να εκτιμήσουμε δύο γωνίες άφιξης ίσης ισχύος υπό ιδανικές συνθήκες απαιτούνται περισσότερα στιγμιότυπα για συσχετισμένες πηγές από ότι για ασυσχέτιστες πηγές. Μια αυστηρή ανάλυση της MUSIC δείχνει ότι για μια γραμμική συστοιχία με την παρουσία μίας και μοναδικής πηγής, οι το σφάλμα αυξάνει επίσης και τον αριθμό των στοιχείων στον πίνακα, διατηρώντας σταθερό το άνοιγμα.

Η STD (τυπική απόκλιση) είναι περίπλοκη λειτουργία του πίνακα όπως και η γεωμετρία, το SNR και ο αριθμός και οι κατευθύνσεις των πηγών και κυμαίνονται κατά τρόπο αντιστρόφως ανάλογο προς τον αριθμό από τα στιγμιότυπα. Μια φτωχότερη εκτίμηση προκύπτει έτσι αν χρησιμοποιήσουμε ένα μικρότερο αριθμό των στιγμιότυπων και πηγές με χαμηλότερο SNR. Προκύπτει λοιπόν ότι η επίδοση της MUSIC είναι κακή παρουσία των συσχετισμένων αφίξεων και αδυνατεί να επιλύσει συνεκτικές πηγές.

Η σύγκριση των επιδόσεων της MUSIC με εκείνα της FINE-First principal vector (πρωτεύων κύριο διάνυσμα) δείχνει ότι στο χαμηλό SNR, οι εκτιμήσεις της FINE έχουν μεγαλύτερο STD-Standard deviation (τυπική απόκλιση) και οι εκτιμήσεις της MUSIC έχει την μεγαλύτερη μεροληψία. Οι εκτιμήσεις που λαμβάνονται από τη MUSIC και την ML μεθόδους συγκρίνονται με τη CRLB (Cramer-Rao κάτω φράγμα) για μια υπόθεση μεγάλου δείγματος. Η CRLB δίνει την θεωρητικά χαμηλότερη τιμή της συνδιακύμανσης του κατάλληλου αμερόληπτου εκτιμητή. Μειώνεται με τον αριθμό των δειγμάτων, τον αριθμό των αισθητήρων στη συστοιχία, και του SNR για τις πηγές. Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι οι εκτιμήσεις της MUSIC είναι ένα μεγάλο δείγμα των ML δειγμάτων εκτίμησης παρουσία

ασυσχέτιστων

αφίξεων.

Επιπλέον, δείχνει ότι η διακύμανση της MUSIC εκτίμησης είναι περισσότερο από ότι της εκτίμησης ML και η μία προσεγγίζει την άλλη καθώς ο αριθμός των στοιχείων και του αριθμού των στιγμιότυπων αυξάνεται. Έτσι, χρησιμοποιώντας μια συστοιχία με ένα μεγάλο αριθμό στοιχείων και ένα μεγάλο αριθμό δειγμάτων, κάποιος είναι σε θέση να κάνει εξαιρετική εκτίμηση των κατευθύνσεων των ασυσχέτιστες πηγών με μεγάλες SNR χρησιμοποιώντας τη μέθοδο MUSIC. Μια αμερόληπτη εκτίμηση αναφέρεται ως μια συνεκτική εκτίμηση.

Η βελτίωση της εκτίμησης της DOA MUSIC είναι δυνατόν να γίνει με τη χρήση δέσμης χώρου MUSIC (Beam space music) επιλέγοντας μια ακτίνα που σχηματίζει μήτρα και στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο MUSIC για την εκτίμηση DOA, τότε είμαστε σε θέση να μειώσουμε το όριο ύψους της απαιτούμενης SNR για την επίλυση των πηγών κοντινού χώρου.

Για δύο κοντινού χώρου πηγές, ωστόσο ο δέσμης χώρου MUSIC και ο ML παρέχουν ταυτόσημες επιδόσεις όταν έχουν επιλεγεί κατάλληλες δέσμες μήτρας.

Η ιδιότητα της MUSIC δείχνει πόσο εξαρτάται από την SNR, τον αριθμό των στιγμιότυπων, την γεωμετρία της συστοιχίας και της γωνίας διαχωρισμού των δύο πηγών. Κάποιες αναλυτικές εκφράσεις της πιθανότητας ανάλυσης και της διακύμανσής της ως συνάρτηση των διαφόρων παραμέτρων θα μπορούσε να επιτρέψει σε κάποιο άτομο να προβλέψει την συμπεριφορά της εκτίμησης MUSIC για ένα δεδομένο σενάριο. Έτσι για δύο στενού διαστήματος πηγές θεωρείται ότι έχουν επιλυθεί, όταν οι δύο κορυφές εμφανίζονται στο φάσμα στην περιοχή των κατευθύνσεων των πηγών.

Η σύγκριση των επιδόσεων της MUSIC και των άλλων μεθόδων ιδιοδιανυσμάτων, οι οποίες χρησιμοποιούν το ιδιοδιανύσματα θορύβου διαιρούμενα δια των αντίστοιχων ιδιοτιμών για την εκτίμηση DOA, δείχνει ότι η επίδοση της πρώτης είναι πιο ευαίσθητη εάν επιλέξουμε ένα υποθετικό αριθμό πηγών σε σύγκριση με τον πραγματικό αριθμό των πηγών.

Η συσχέτιση μεταξύ των πηγών επηρεάζει τις δυνατότητες των διαφόρων εκτιμήσεων αλγορίθμων DOA διαφορετικά. Μια μελέτη για την επίδραση της συσχέτισης μεταξύ δύο πηγών σε σχέση με την ακρίβεια εύρεσης των μεθόδων DOA δείχνει η ότι η συσχέτιση της φάσης είναι πιο σημαντική από την συσχέτιση μεγέθους. Στις περισσότερες περιπτώσεις που συζητήθηκαν παραπάνω από την ανάλυση των

επιδόσεων υποθέτουμε ότι ο θόρυβος είναι λευκός Γκαουσιανός. Όταν αυτό δεν συμβαίνει, οι μέθοδοι DOA εκτελούνται διαφορετικά. Παρουσία του έγχρωμου θορύβου, η απόδοση της MUSIC είναι καλύτερη από εκείνη του ESPRIT.

5.4 Ανάλυση Ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας του MUSIC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αξιολογήσει τις επιπτώσεις διαφόρων παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένων της αύξησης και του λάθους φάσης, των αμοιβαίων λαθών στο κανάλι σύζευξης, και της τυχαίας διαταραχής στους χώρους του αισθητήρα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εκτίμηση του DOA μέσω της MUSIC απαιτεί γνώση του αριθμού των πηγών παρόμοια με κάποια άλλες μεθόδους, καθώς η υποτίμηση από την πηγή του αριθμού μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβή εκτίμηση των DOA του.

Η ανάλυση της επίδρασης των σφαλμάτων για την μέθοδο MUSIC δείχνει ότι η πιθανότητα απόφασης μειώνεται με τη διακύμανση του σφάλματος και ότι η ευαισθησία σε σφάλματα φάσης εξαρτάται περισσότερο στη συστοιχία ανοίγματος από ότι από τον αριθμό των στοιχείων στη συστοιχία.

Η ανάλυση του ESPRIT δείχνει ότι οι εκτιμήσεις της MUSIC γενικά δίνουν χαμηλότερες τιμές από ότι η MSE ESPRIT. Η πρώτη είναι πιο ευαίσθητη στα λάθη αισθητήρα και φάσης, ενώ η δεύτερη εξαρτάται μόνο από τα σφάλματα φάσης.

Η επίδραση των διαφόρων μεθόδων διαταραχής στις φασματικές μεθόδους εκτίμησης τονίζει τη σημασία της ακριβούς γνώσης των διαφόρων παραμέτρων πίνακα.

5.5 Επίδραση των λαθών

Τα συστήματα επικοινωνιών που χρησιμοποιούν μια σειρά από κεραίο-στοιχεία που εξετάσαμε μέχρι τώρα υποτίθεται ότι είναι απαλλαγμένα από σφάλματα και διαταραχές, καθώς επίσης και ότι τα αποτελέσματα σε διάφορα συστήματα συγκέντρωσης δέσμης, προσαρμοστικών αλγόριθμων και μεθόδους DOA βασίζονται σε ιδανικές συνθήκες χωρίς λάθη. Σε πραγματικά συστήματα, αυτές οι ιδεατές καταστάσεις δύσκολα συναντιούνται και οι επιδόσεις των συστημάτων επηρεάζονται από το ποσό που οι διάφορες παράμετροι του συστήματος αποκλίνουν από την υποτιθέμενες συνθήκες. Ορισμένες από αυτές τις αποκλίσεις εξετάζονται σε αυτήν την ενότητα.

5.6 Συσχετιζόμενες Αφίξεις

Οι δυνατότητες ακύρωσης της παρέμβολής των βέλτιστων διαμορφωτών της πορείας της δέσμης που συζητήθηκαν νωρίτερα υποθέτουν ότι το σήμα και οι παρεμβολές είναι ασυσχέτιστες. Η συσχέτιση μεταξύ των επιθυμητών σημάτων και των ανεπιθύμητων παρεμβολών υπάρχει σε καταστάσεις πολλαπλών αφίξεων και σκόπιμου μπλοκαρίσματος. Επηρεάζει την απόδοση της δέσμης και περιορίζει τη δυνατότητα εφαρμογής των διαφόρων μεθόδων εκτίμησης βάρους. Για παράδειγμα, όταν το βάρος υπολογίζεται ελαχιστοποιώντας την μέση ισχύ η εκάστοτε συγκέντρωση δέσμης ακυρώνει το επιθυμητό σήμα, διατηρώντας παράλληλα τον περιορισμό.

Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι με παράλληλη ελαχιστοποίηση της μέσης ισχύς εξόδου, η δέσμη ρυθμίζει τη φάση της συσχετιζόμενης παρεμβολής που προκαλείται σε κάθε κεραία έτσι ώστε η δύναμη του αθροίσματος του σήματος και των παρεμβολών, οι οποίες συσχετίζονται με το σήμα, να έχουν ελαχιστοποιηθεί, προκαλώντας την ακύρωση του σήματος. Αυτό συναύδει με τον σχεδιασμό της δέσμης ώστε να ελαχιστοποιείται η ισχύς εξόδου. Η συσχέτιση $\delta_{xy}(f)$ μεταξύ δύο σημάτων ευρείας ζώνης $x(t)$ και $y(t)$ ορίζεται ως προς την ισχύ του ραδιοφάσματος τους ως εξής:

$$\delta_{xy}(f) = \frac{G_{xy}(f)}{\sqrt{G_{xx}(f) G_{yy}(f)}} \quad (85)$$

με το $G_{xy}(f)$ να υποδηλώνει την δύναμη του φάσματος και ορίζεται από το μετασχηματισμό Fourier:

$$G_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{xy}(\tau) e^{j2\pi f\tau} d\tau \quad (86)$$

Έτσι, ο συσχετισμός μεταξύ του σήματος και των παρεμβολών που εφεξής συμβολίζεται με δ , είναι ένα συγκρότημα με βαθμωτό μέγεθος $0 < \delta \leq 1$ και βρίσκεται εντός του κυκλώματος.

Όταν το μέγεθος είναι ίσο με το 1 οι δύο πηγές έχουν συμφωνία μεταξύ τους. Η συσχέτιση μεταξύ δύο πηγών επηρεάζει το βαθμό του πίνακα συσχέτισης, με αποτέλεσμα να θεωρούνται ως μία και μοναδική.

Σε ορισμένες παλαιότερες εργασίες προτάθηκε μια μηχανική κίνηση του πίνακα κάθετα προς την κατεύθυνση βλέμματος για τη μείωση των επιπτώσεων του σήματος ακύρωσης από τις συσχετιζόμενες παρεμβολές. Το σύστημα που γενικά είναι γνωστό ως χωρικός αλγόριθμος λειτουργεί βάσει της αρχής ότι αν η κίνηση είναι κάθετη ως προς την κατεύθυνση βλέμματος, το σήμα που εισέρχεται στην συστοιχία δεν επηρεάζεται, ενώ οι παρεμβολές που φτάνουν από διαφορετική κατεύθυνση από εκείνη του σήματος διαμορφώνονται με την παρούσα πρόταση. Αυτό προκαλεί μείωση των παρεμβολών, όταν ο χωρικός αλγόριθμος θα αναπτυχθεί περαιτέρω έτσι ώστε μια μηχανική κίνηση να μην είναι απαραίτητη.

Η μέθοδος χωρικής εξομάλυνσης χρησιμοποιεί ένα ενιαίο μέσο όρο από όλες τις μήτρες που έχουν προκύψει από διαφορετικές υπο-ακτίνες, έτσι ώστε κάθε μήτρα να έχει την ίδια βαρύτητα. Αυτό οδηγεί σε μια εκτίμηση του πίνακα που δεν είναι τόσο καλή όσο θα μπορούσε κανείς να λάβει από τις δεδομένες μήτρες των υπο-ακτίνων. Στην ιδανική περίπτωση, σε μια απουσία συσχέτισης, η συστοιχία της μήτρας είναι ομοιόμορφα κατανομημένη ώστε η γραμμική συστοιχία να έχει μια δομή Toeplitz, δηλαδή, τα στοιχεία του πίνακα κατά μήκος κάθε διαγωνίου είναι ίσα. Αυτό είναι γίνεται από μια χωρική τεχνική μέσου όρου η οποία ζυγίζει κάθε υπο-ακτίνα της μήτρας διαφορετικά και στη συνέχεια βελτιστοποιεί το βάρος έτσι ώστε να ελαχιστοποιεί το MSE μεταξύ της σταθμισμένης μήτρας και της Toeplitz μήτρας.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο αριθμός των γραμμών και των στηλών στην εκτιμώμενη μήτρα θα πρέπει να είναι ίση με τον αριθμό των στοιχείων στη υποακτίνα και να μην ισούται με τον αριθμό των στοιχείων στη πλήρη σειρά. Έτσι, το βάρος που υπολογίζεται από τη μήτρα αυτή θα μπορούσε να εφαρμοστεί μόνο σε μία από τις υπο-ακτίνες. Αυτό βέβαια μειώνει το άνοιγμα του πίνακα και το βαθμό της ελευθερίας

Για ένα περιβάλλον αποτελούμενο από M κατευθύνσεις παρεμβολών, το μέγεθος των υποακτίνων πρέπει να είναι τουλάχιστον $M+2$ και ο αριθμός των υποακτίνων πρέπει να είναι τουλάχιστον $M(M+1)+1$.

Μια δέσμη που βασίζεται στην ιδέα αφέντη και σκλάβου μπορεί επίσης να ακυρώσει την άφιξη μιας παρεμβολής με τη χρήση δύο καναλιών. Σε ένα κανάλι, το σήμα της κατεύθυνση βλέμματος είναι αποκλεισμένο, και στη συνέχεια τα βάρη υπολογίζονται από την επίλυση του προβλήματος διαμόρφωσης δέσμης. Αυτά τα βάρη στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για το δεύτερο κανάλι. Δεδομένου ότι το σήμα δεν είναι παρών κατά τη στιγμή της εκτίμησης βάρους, η διαμόρφωση δέσμης δεν ακυρώνει το σήμα. Ωστόσο, η διαδικασία λειτουργεί μόνο για μία συσχετισμένη παρεμβολή.

Ωστόσο υπάρχουν μέθοδοι που δεν χρησιμοποιούν τα συσχετιζόμενα στοιχεία, όπως γίνεται στις προηγούμενες (συζητήθηκε προηγουμένως), όπου τα διάφορα στοιχεία προστίθενται με κάποιο τρόπο ώστε να βελτιωθεί το επίπεδο σήματος. Ένας δέκτης που είναι γνωστός ως δέκτης RAKE επιτυγχάνει αυτή την αύξηση των σημάτων για ένα δορυφορικό σύστημα CDMA, χρησιμοποιώντας μια σειρά από αποδιαμορφωτές που λειτουργούν παράλληλα χρησιμοποιώντας τον κωδικό χρήστη για το εν λόγω σήμα. Η καθυστέρηση στο σήμα προσδιορίζεται από μια συρόμενη ακολουθία κώδικα που απαιτείται για την απόκτηση της μέγιστης συσχέτισης σε σχέση με το λαμβανόμενο στοιχείο. Τα σήματα προστίθενται στο ευρείας ζώνης μετά από κατάλληλη καθυστέρηση και κλιμάκωση του πλάτους. Ο δέκτης ωστόσο δεν ακυρώνει ανεπιθύμητες παρεμβολές από τη συνολική διαμόρφωση του σχήματος της δέσμης.

5.7 Κατεύθυνση βλέμματος και σφάλμα διεύθυνσης διανύσματος

Η γνώση της κατεύθυνσης βλέμματος χρησιμοποιείται για να περιορίσει την απόκριση της δέσμης στην κατεύθυνση του σήματος έτσι ώστε το σήμα που έρχεται από την κατεύθυνση βλέμματος να διέρχεται από τον επεξεργαστή της δέσμης ανόθευτο. Τα βάρη σειράς της βέλτιστης διαμόρφωσης δέσμης υπολογίζονται με την ελαχιστοποίηση της μέσης ισχύς εξόδου υπό τον περιορισμό της εμφάνισης κατεύθυνσης. Ο επεξεργαστής μεγιστοποιεί το SNR εξόδου, ακυρώνοντας έτσι όλες τις παρεμβάσεις. Μια πηγή στην κατεύθυνση αυτή αντιμετωπίζεται ως παρεμβολή αν δεν είναι στην κατεύθυνση βλέμματος. Αυτό δείχνει τη σημασία της ακρίβειας των

5.8 Σφάλματα Στοιχείων και σφάλμα θέσης στοιχείων

Αβεβαιότητα πολλές φορές στη θέση ενός στοιχείου ενός πίνακα προκαλεί η υποβάθμιση της απόδοσης της συστοιχίας γενικά και πολύ περισσότερο όταν το σχήμα της δέσμης της συστοιχία καθορίζεται από τους περιορισμούς δεσμών. Όπως συζητήθηκε προηγουμένως, η αβεβαιότητα που προκαλεί η θέση ενός στοιχείου της διεύθυνσης του διανύσματος οδηγεί σε χαμηλότερο κέρδος πίνακα.

Η επίδραση της αβεβαιότητας της θέσης στο σχήμα της δέσμης είναι η δημιουργία μιάς κυματοειδούς πορείας παρόμοια με εκείνη ενός μόνο στοιχείου εκτός από το συνηθισμένο τύπο της συστοιχίας.

Η θέση των στοιχείων της κεραίας ενός πίνακα συνήθως καθορίζεται από μια διαδικασία που απαιτεί βαθμονόμηση των βοηθητικών πηγών σε γνωστές τοποθεσίες.

5.9 Σφάλματα Βάρους

Τα βάρη μιας δέσμης υπολογίζονται με ιδανικές συνθήκες, αποθηκεύονται στη μνήμη, και υλοποιούνται με ενισχυτές που χρησιμοποιούν την βελτίωση του συντελεστή ισχύος. Μια θεωρητική μελέτη της απόδοσης ενός συστήματος προϋποθέτει αυτό να είναι ιδανικό δηλαδή χωρίς λάθη στα βάρη, ενώ η πραγματική απόδοση του συστήματος εξαρτάται από το αν θα εφαρμόζονται τα βάρη. Το πλάτος, καθώς και η φάση αυτών των βαρών είναι διαφορετικά από τα ιδανικά και οι διαφορές αυτές οφείλονται σε πολλά είδη σφαλμάτων που προκαλούνται στα διάφορα σημεία του συστήματος, όπως:

- 1) Απόκλιση στην υπόθεση ότι ένα επίπεδο κύμα φθάνει στην συστοιχία.
- 2) Η αβεβαιότητα όσον αφορά τις θέσεις και τα χαρακτηριστικά των στοιχείων του πίνακα.
- 3) Σφάλμα στην γνώση της συσχέτισης του πίνακα της μήτρας που προκαλείται από την εκτίμηση της από ένα πεπερασμένο αριθμητικό δείγμα.
- 4) Σφάλματος στο σύστημα του φορέα διεύθυνσης ή του σήματος αναφοράς που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των βαρών.
- 5) Υπολογιστικό λάθος που προκαλείται από αριθμητική πεπερασμένης ακρίβειας.
- 6) Σφάλματος κβαντισμού κατά τη μετατροπή των αναλογικών σταθμών σε ψηφιακή μορφή για την αποθήκευση.
- 7) Σφάλμα εφαρμογής που προκαλείται από τη διακύμανση της συνιστώσας

Το κέρδος ενός πίνακα είναι ο λόγος του SNR στην έξοδο με το SNR στην είσοδο. Η επίδραση της τυχαίας διακύμανσης βάρους είναι η αιτία μείωση του κέρδους πίνακα. Το αποτέλεσμα είναι ευαισθησία στον αριθμό των στοιχείων στη συστοιχία και του κέρδους σε ένα ελεύθερο σύστημα από σφάλματα. Για έναν πίνακα με ένα μεγάλο αριθμό στοιχείων και με ένα μεγάλο σφάλμα χωρίς κέρδος, ένα μεγάλο βάρος διακύμανσης θα μπορούσε να μειώσει το κέρδος της σειράς στη μονάδα, γεγονός που συνεπάγεται ότι SNR στην έξοδο γίνεται ίσο με το SNR εισόδου και κανένα κέρδος πίνακα δε μπορεί να αποκτηθεί.

Η φάση του βάρους του πίνακα είναι μια σημαντική επίσης παράμετρος και ένα λάθος στη φάση μπορεί να προκαλέσει μια εκτίμηση της πηγής να εμφανιστεί σε μια λάθος κατεύθυνση, όταν έχουμε για παράδειγμα ένα πίνακα που χρησιμοποιείται για την εύρεση DOA. Ο έλεγχος της φάσης των σημάτων χρησιμοποιείται για να κατευθύνει την δέσμη πορείας του πίνακα στην επιθυμητή θέση, όπως στο ηλεκτρονικό σύστημα διεύθυνσης. Μια συσκευή που χρησιμοποιείται συνήθως για το σκοπό αυτό είναι ένας μεταγωγέας φάσης. Οι εν λόγω που είναι ευρέως διαθέσιμοι είναι οι ferrite και αυτοί της διόδου.

Μία από τις προδιαγραφές την οποία κάθε σχεδιαστής συστοιχίας λαμβάνει υπόψη είναι το σφάλμα της φάσης RMS. Η ανάλυση του σφάλματος της φάσης RMS δείχνει ότι προκαλεί καταστολή στο SNR εξόδου του επιθυμητού σήματος, και η καταστολή είναι ανάλογη του γινόμενου της ισχύος σήματος και της διακύμανση του τυχαίου σφάλματος. Επιπλέον, η καταστολή γίνεται μέγιστη στην απουσία παρεμβολών στην κατεύθυνση. Ένα λάθος που συμβαίνει σε ψηφιακούς μετατοπιστές φάσης (digital phase shifters) είναι το σφάλμα κβαντισμού. Σε ένα p-bit ψηφιακό μεταγωγέα φάσης, η ελάχιστη τιμή της φάσης που μπορεί να αλλάξει είναι ίση με $2\pi/2^p$.

Υποθέτοντας ότι το σφάλμα είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο, η διακύμανση αυτού του σφάλματος ανέρχεται σε $\pi^2/(3 * 2^{2p})$.

5.10 Αυτοδύναμη συγκέντρωση δέσμης

Η διακύμανση πολλών παραμέτρων μιας συστοιχίας από τις ιδανικές συνθήκες υπό τις οποίες αναμένεται θεωρητική απόδοση του συστήματος προκαλεί υποβάθμιση στις επιδόσεις του συστήματος με τη μείωση του κέρδους της συστοιχίας και την αλλαγή του σχήματος της δέσμης. Διάφορα συστήματα έχουν προταθεί για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα και να ενισχυθεί η απόδοση της συστοιχίας του συστήματος υπό καθεστώς μη ιδανικών συνθηκών. Πολλά από αυτά τα καθεστώτα επιβάλλουν διάφορα είδη περιορισμών σχετικά με την δέσμη για την αντιμετώπιση του προβλήματος που προκαλείται από τις παραμέτρους διαταραχών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

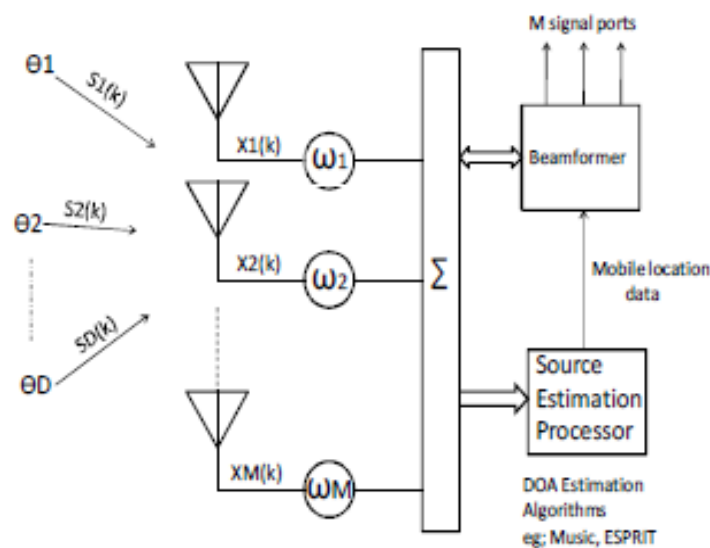
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι προσαρμοστικές συστοιχίες αισθητήρων επεξεργασίας σήματος, που είναι γνωστές επίσης ως έξυπνες κεραιές, χρησιμοποιούνται ευρέως στα τρίτης γενιάς (3G) συστήματα εξαιτίας της ικανότητάς τους να εντοπίσουν τους χρήστες κινητών χρηστών με τη χρήση τεχνικών εκτίμησης DOA. Οι προσαρμοστικές συστοιχίες κεραιών επίσης μπορούν να βελτιώσουν τις επιδόσεις των κυτταρικών συστημάτων, προβλέποντας ανθεκτικότητα σε κανάλια διαλείψεων και μειωμένες παρεμβολές. Ο στόχος της εκτίμησης της κατεύθυνσης άφιξης (DOA) είναι να χρησιμοποιούμε τα δεδομένα που λαμβάνουμε σχετικά με την κατερχόμενη ζεύξη σε μια συστοιχία αισθητήρων βάση-σταθμού ώστε να κάνουμε εκτίμηση των κατευθύνσεων των σημάτων από τους επιθυμητούς χρήστες κινητών συσκευών καθώς και επίσης και τις κατευθύνσεις των σημάτων παρεμβολής. Τα αποτελέσματα της εκτίμησης DOA στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για να προσαρμόσουν τα βάρη της διαμόρφωσης δέσμης έτσι ώστε η εκπεμπόμενη ισχύς να μεγιστοποιείται για τους επιθυμητούς χρήστες, και ακυρώσεις της ακτινοβολίας να τοποθετούνται στις κατευθύνσεις των σημάτων παρεμβολής. Ως εκ τούτου, ένας επιτυχής σχεδιασμός μιας προσαρμοστικής σειράς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή της εκτίμησης του αλγόριθμου DOA που πρέπει να είναι ιδιαίτερα ακριβής και αξιόπιστος. Κατά τον σχεδιασμό μίας προσαρμοστικής σειράς έξυπνων κεραιών κινητής επικοινωνίας οι επιδόσεις των εκτιμήσεων ενός αλγόριθμου DOA εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως ο αριθμός των χρηστών κινητής τηλεφωνίας και του χώρου δράσης τους, ο αριθμός των στοιχείων του πίνακα και η απόσταση μεταξύ τους, ο αριθμός των δειγμάτων του σήματος και του SNR. Για αυτό διάφοροι αλγόριθμοι υπολογισμού DOA έχουν αναπτυχθεί και κατηγοριοποιούνται σε δύο μεθόδους α)τους συμβατικούς και β) υποδιαστήματος. Οι συμβατικοί μέθοδοι που ονομάζεται επίσης κλασικοί μέθοδοι υπολογίζουν πρώτα το χωρικό φάσμα και στη συνέχεια κάνουν εκτίμηση του DOA από τα τοπικά μέγιστα του φάσματος. Μέθοδοι που εμπίπτουν σε αυτή την κατηγορία είναι οι Bartlett, και Capon ή MVDR. Ωστόσο αυτές οι μέθοδοι υποφέρουν από την έλλειψη γωνιακή ανάλυσης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται μέθοδοι υψηλής γωνιακής ανάλυσης όπως ο MUSIC και ο ESPRIT, οι οποίοι ωστόσο, έχουν κακή απόδοση σε καταστάσεις η οποία είναι πολύ συχνές σε σύστημα επικοινωνίας (π.χ σε φαινόμενα πολυδιαδρομής).

6.2 Παράδειγμα MUSIC

Η λέξη MUSIC είναι ένα ακρωνύμιο που χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση πολλών σημάτων. Είναι υψηλής ευκρίνειας τεχνική που βασίζεται στην εκμετάλλευση της συνδιακύμανσης εισόδου μήτρας. Ο MUSIC κάνει παραδοχή ότι ο θόρυβος σε κάθε κανάλι είναι ασυσχέτιστος κάνοντας τον πίνακα συσχέτισης διαγώνια.

Τα σήματα έτσι είναι κάπως συσχετισμένα δημιουργώντας μια μη διαγώνια συσχέτιση μήτρα σήματος. Εάν ο αριθμός των σημάτων που προσπίπτει σε μια M -στοιχείων συστοιχία είναι D , ο αριθμός των ιδιοτιμών σήματος και των ιδιοδιανυσμάτων είναι D τότε ο αριθμός των ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων θορύβου είναι $M-D$.

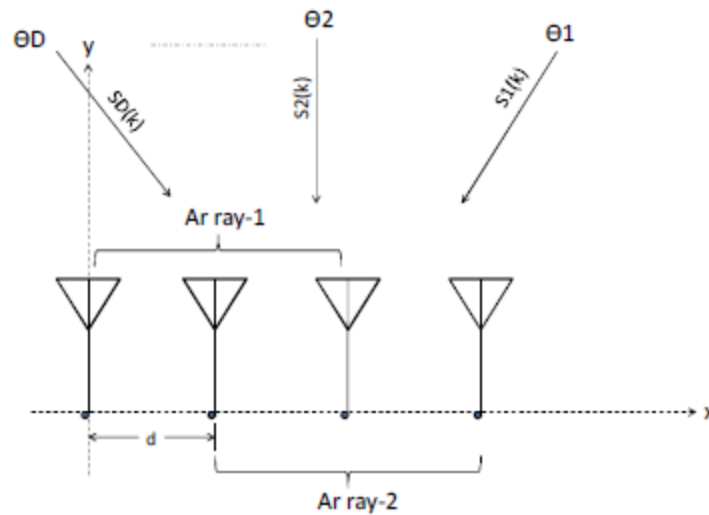


Σχήμα 8: M συστοιχία κεραιών με D σήματα να φθάνουν.

6.3 Παράδειγμα ESPRIT

Ο ESPRIT υποθέτει ότι υπάρχουν $D < M$ πηγές στενής ζώνης με επίκεντρο την κεντρική συχνότητα f_0 . Το σχήμα 2 δείχνει τέσσερα στοιχεία μιάς γραμμικής συστοιχίας

η οποία αποτελείται από δύο ζεύγη. Τα δύο ζεύγη ακτίνων που ονομάζονται array-1 και array-2 διαχωρίζονται από μια απόσταση «d».

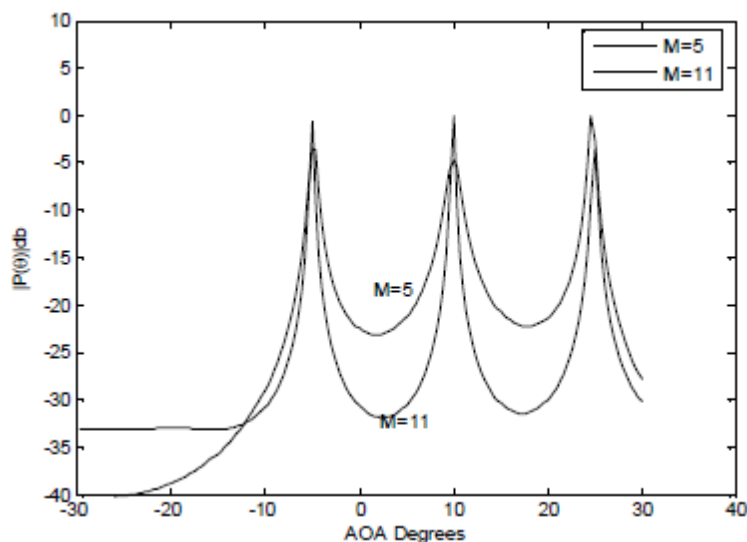


Σχήμα 9:Γραμμική συστοιχία 4 στοιχείων με 2 ζεύγη

6.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης για MUSIC και ESPRIT

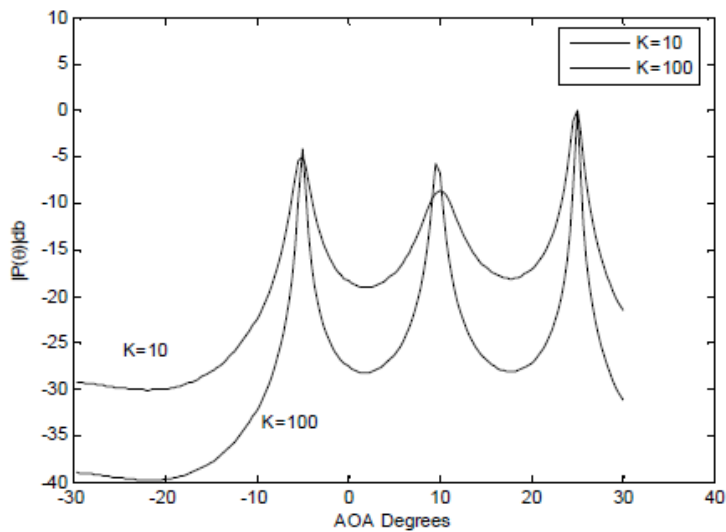
Οι μέθοδοι MUSIC & ESPRIT για την εκτίμησης DOA προσομοιώνονται χρησιμοποιώντας το MATLAB. Η υπόθεση μίας ενιαίας γραμμικής συστοιχίας με M στοιχεία έχει ληφθεί υπόψη εδώ.

3.1 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του αλγορίθμου MUSIC για την εκτίμηση DOA.



Σχήμα 3: Φάσμα του MUSIC για DOA για -5, 10, 25 μοίρες

Στο σχήμα 3 παρουσιάζεται το φάσμα του MUSIC για την ενιαία γραμμική συστοιχία με διαφορετικά στοιχεία και $SNR = 20\text{dB}$, $K = 100$ και για τις περιπτώσεις για την κατεύθυνση των αφίξεων -5, 10, 25 μοίρες. Η απόσταση μεταξύ των στοιχείων θεωρείται ότι είναι ο αριθμός 0.5λ. Όταν ο αριθμός των στοιχείων της συστοιχίας αυξάνεται σε 11 τότε το φάσμα του MUSIC λαμβάνει μια μορφή με ευκρινέστερες κορυφές στην οποία γωνιακή ανάλυση βελτιώνεται. Ο αριθμός των στιγμιότυπων σήματος που χρησιμοποιούνται για να παραχθεί ένα ρεαλιστικό μοντέλο του σήματος αποτελεί βασικό παράγοντα για την υλοποίηση πρακτικών κεραιών.



Σχήμα 4: Φάσμα του MUSIC για ποικίλο αριθμό στιγμιότυπων K=10, 100

Το σχήμα 4 δείχνει το φάσμα που λαμβάνεται για στιγμιότυπα ίσα με 10 και με 100 αντί-στοιχα. Αυξημένος αριθμός στιγμιότυπων μας οδηγεί σε ευκρινέστερες κορυφές του φάσματος και δείχνουν πιο ακριβή εντοπισμό και καλύτερη ευκρίνεια.

SNR (dB)	MUSIC (θ)	ESPRIT(θ)
-20	21.66	-39.08
-19	24.00	23.47
0	24.66	26.02
9	25.00	25.67
20	25.00	25.21
21	25.00	24.99

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Εκτίμηση DOA από MUSIC & ESPRIT για διάφορα SNR.
(Είσοδος $\theta = 25$ μοίρες, $M = 4$, $k = 100$)**

Ο πίνακας 1 δείχνει την DOA εκτίμηση και για τους δύο αλγόριθμους, τους MUSIC και ESPRIT σε σχέση με SNR. Ο πίνακας αυτός δείχνει σαφώς ότι ο MUSIC παρέχει υψηλότερη ανάλυση και ακριβέστερο εντοπισμό της γωνίας άφιξης από εκείνη του ESPRIT.

Η προσομοίωση του αλγορίθμου ESPRIT διεξάγεται για μια γραμμική στοιχειοκεραία αποτελούμενη από τέσσερα στοιχεία –αισθητήρες μεταβάλλοντας διάφορες παραμέτρους αυτής.

Sr,no,	θ Input (deg)	θ ESPRIT (deg)
1	10	9.43
	25	23.94
2	20	20.02
	80	80.27

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Εκτίμηση του DOA χρησιμοποιώντας τον ESPRIT για διάφορες γωνίες διαχωρισμού ($M = 4$, $SNR = 20$ dB, $K = 100$)

Στον πίνακα 2 φαίνεται ότι το ποσοστιαίο σφάλμα στην ανίχνευση DOA χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο ESPRIT μειώνεται όσο η γωνία διαχωρισμού μεταξύ των σημάτων που φθάνουν αυξάνεται.

K=10	
θ Input (deg)	θ ESPRIT (deg)
80	79.39
20	19.92
K=1000	
80	80.04
20	20.00

ΠΙΝΑΚΑΣ 3: Εκτίμηση του DOA χρησιμοποιώντας τον ESPRIT για διαφορετικό αριθμό στιγμιοτύπων K. ($M = 4$, $SNR = 20$ dB)

Ο πίνακας 3 δείχνει ότι, όταν ο αριθμός των δειγμάτων είναι αυξημένος το λάθος στον υπολογισμό της κατεύθυνσης γίνεται μικρότερο.

No. of signals	θ Input (deg)	θ ESPRIT (deg)
2	20	20.08
	40	39.96
4	10	24.46
	30	32.34
	50	-44.52
	70	-18.82

ΠΙΝΑΚΑΣ 4: Εκτίμηση του DOA χρησιμοποιώντας τον ESPRIT για ποικίλο αριθμό σημάτων ($M = 4$, $SNR = 20dB$, $K = 100$)

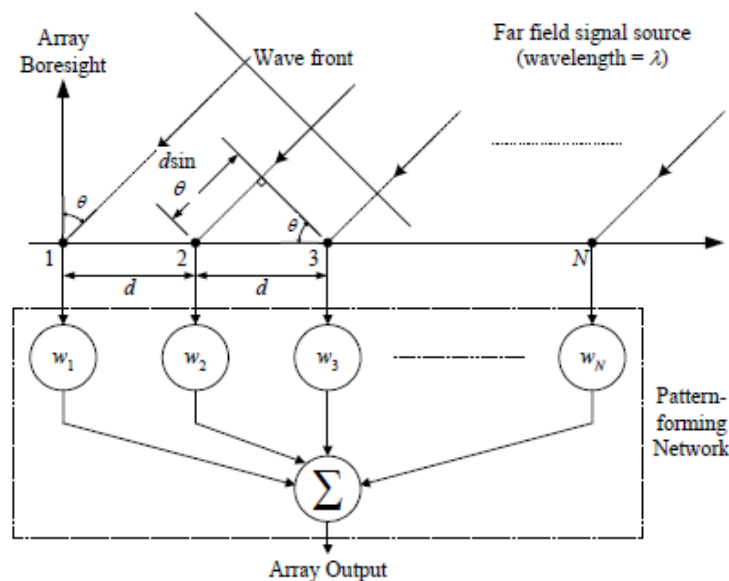
Ο πίνακας 4 απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο ο αλγόριθμος ESPRIT μπορεί να ανιχνεύει με επιτυχία 2 περιστατικά σημάτων στην συστοιχία των 4 στοιχείων και πώς αποτυγχάνει εντελώς, εάν ο αριθμός των σημάτων αυξηθεί στα 4.

6.5 Συμπεράσματα

Η προσομοίωση αυτή παρουσιάζει τα αποτελέσματα της διεύθυνσης άφιξης χρησιμοποιώντας τους αλγόριθμους MUSIC και ESPRIT. Αυτοί οι δύο μέθοδοι έχουν μεγαλύτερη ανάλυση και ακρίβεια και επομένως, αυτές διερευνώνται πιο πολύ λεπτομερώς. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και των δύο προκύπτει ότι οι επιδόσεις τους βελτιώνονται με περισσότερα στοιχεία στον πίνακα συστοιχίας, με τα περισσότερα στιγμιότυπα των σημάτων και με μεγαλύτερη γωνία διαχωρισμού μεταξύ των σημάτων. Αυτές οι βελτιώσεις διαπιστώνονται στην μορφή της MUSIC με τις πιο έντονες κορυφές και στον ESPRIT με μικρότερα λάθη στην γωνία ανίχνευσης. Ωστόσο στον πίνακα 1 φαίνεται ότι υπάρχουν περισσότερα σφάλματα κατά την εκτίμηση DOA, χρησιμοποιώντας τον ESPRIT σε σύγκριση με τον αλγόριθμο MUSIC. Σαφώς ο MUSIC είναι πιο σταθερός και ακριβής και παρέχει υψηλή ανάλυση και αυτό προσθέτει μια νέα δυνατότητα σε χρήστες που γίνεται διαχωρισμός μέσω SDMA και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρέως στο σχεδιασμό των έξυπνων συστημάτων κεραιών.

6.5 Παράδειγμα MVDR

Σε αυτό το κομμάτι διερευνάται ο αλγόριθμος MVDR για την εκτίμηση DOA. Ξεκινά από τη διεξαγωγή ανάλυσης του αλγορίθμου ξεκινώντας από ένα ρεαλιστικό μοντέλο σήματος και, στη συνέχεια, χρησιμοποιούμε ένα εργαλείο προσομοίωσης για να διενεργήσουμε τη μελέτη για την απόδοση του αλγορίθμου. Αυτό περιλαμβάνει διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων που σχετίζονται με το περιβάλλον του σήματος όπως ο αριθμός των σημάτων και η γωνία διαχωρισμού τους. Επίσης, διερευνάται η επίδραση των παραμέτρων που σχετίζονται με το σχεδιασμό της σειράς των αισθητήρων συμπεριλαμβανομένου του αριθμού των στοιχείων της συστοιχίας καθώς και της απόστασης μεταξύ τους. Ο αλγόριθμος MVDR κάνει την εκτίμηση του θορύβου από τον πίνακα συσχέτισης για τα M διανύσματα της διεύθυνσης της συστοιχίας. Αυτά τα διανύσματα κατεύθυνσης αντιπροσωπεύουν την από-κριση ενός ιδανικού πίνακα ως προς τις πηγές σήματος. Τά σήματα των πηγών μπορούν να προκύψουν από το διανύσματα κατεύθυνσης. Ο αλγόριθμος ξεκινά με την κατασκευή ενός μοντέλου σήματος σε κανονικές συνθήκες. Υποθέτουμε έναν αριθμό από επίπεδα κύματα από M πηγές στενής ζώνης προσπίπτουσες από διαφορετικές οπτικές γωνίες θ_i , $i = 1, 2, \dots, M$, να παρεμβαίνει σε μια ομοιόμορφη γραμμική συστοιχία από N ισαπέχοντες αισθητήρες όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.

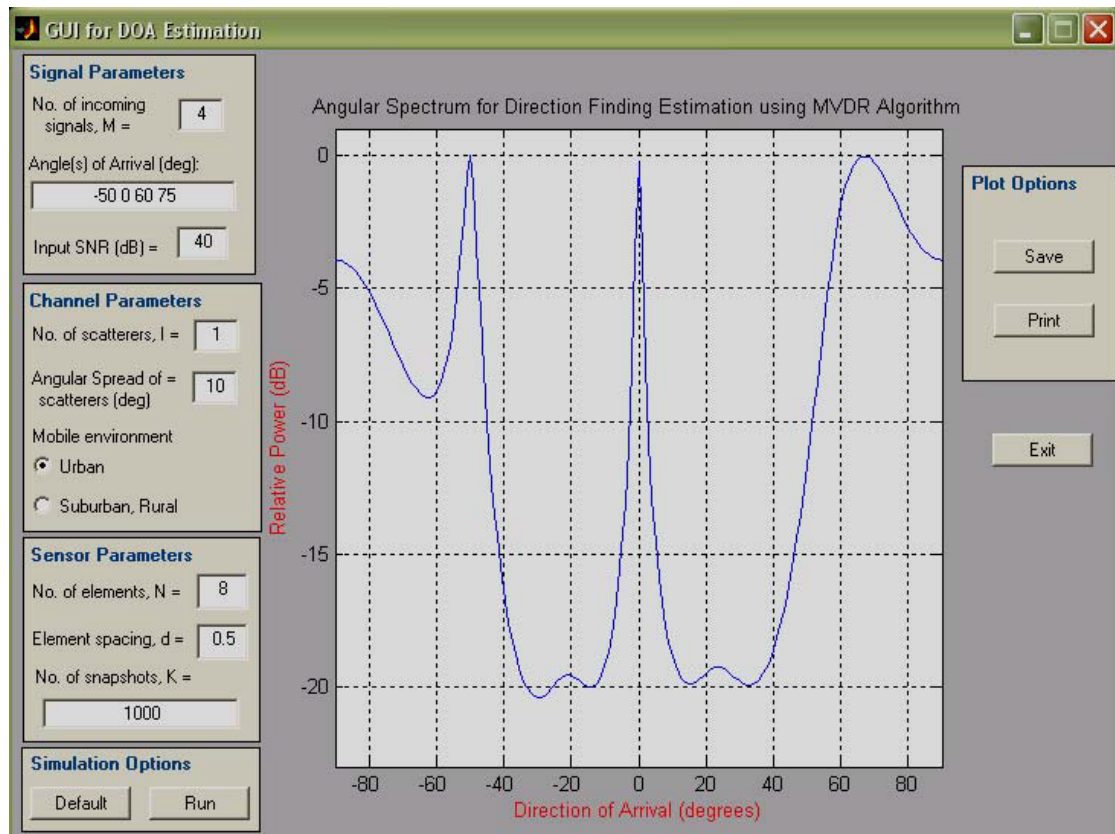


Σχήμα 1: Ένα παράδειγμα επίπεδου κύματος σε μια ενιαία γραμμική συστοιχία N ισαπέχοντων αισθητήρων

Σε μια δεδομένη στιγμή του χρόνου t , $t = 1, 2, \dots, K$, όπου K είναι ο συνολικός αριθμός των στιγμιότυπων που έχουν ληφθεί, η έξοδος της συστοιχίας θα αποτελείται από τα συστατικά του σήματος καθώς και του θορύβου. Όπου d συμβολίζεται η απόσταση των στοιχείων μεταξύ τους, λ είναι το μήκος κύματος του λαμβανόμενου σήματος και το $w(t)$ μοντελο-ποιείται ως μια χρονικά λευκή και μηδενική Gaussian διαδικασία.

Ο αλγόριθμος MVDR έχει υλοποιηθεί στην έκδοση MATLAB 6.5. Μια διάταξη διεπαφής χρήστη GUI (Graphic User Interface) έχει κατασκευαστεί για να διευκολύνει την προσομοίωση και απεικονίζεται στην Εικόνα 2. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει τους παραμέτρους του σήματος συμπεριλαμβανομένου του αριθμού των στιγμιότυπων K , του αριθμού των κινητών M χρηστών, καθώς και τις γωνίες άφιξης θ των σημάτων.

Οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός ρεαλιστικού μοντέλου σημάτων. Όσο για την συστοιχία αισθητήρων, ο χρήστης μπορεί να δηλώσει τον αριθμό της σειράς των στοιχείων N και την απόσταση μεταξύ τους με d . Προεπιλογή των τιμών των παραμέτρων αυτών μπορούν να ανακτηθούν ανά πάσα στιγμή πατώντας το κουμπί "Default". Η προσομοίωση μπορεί να ξεκινήσει κάνοντας κλικ στο κουμπί "Run". Αυτό θα δημιουργήσει ένα σενάριο του αλγόριθμου MVDR για την εκτίμηση του DOA.



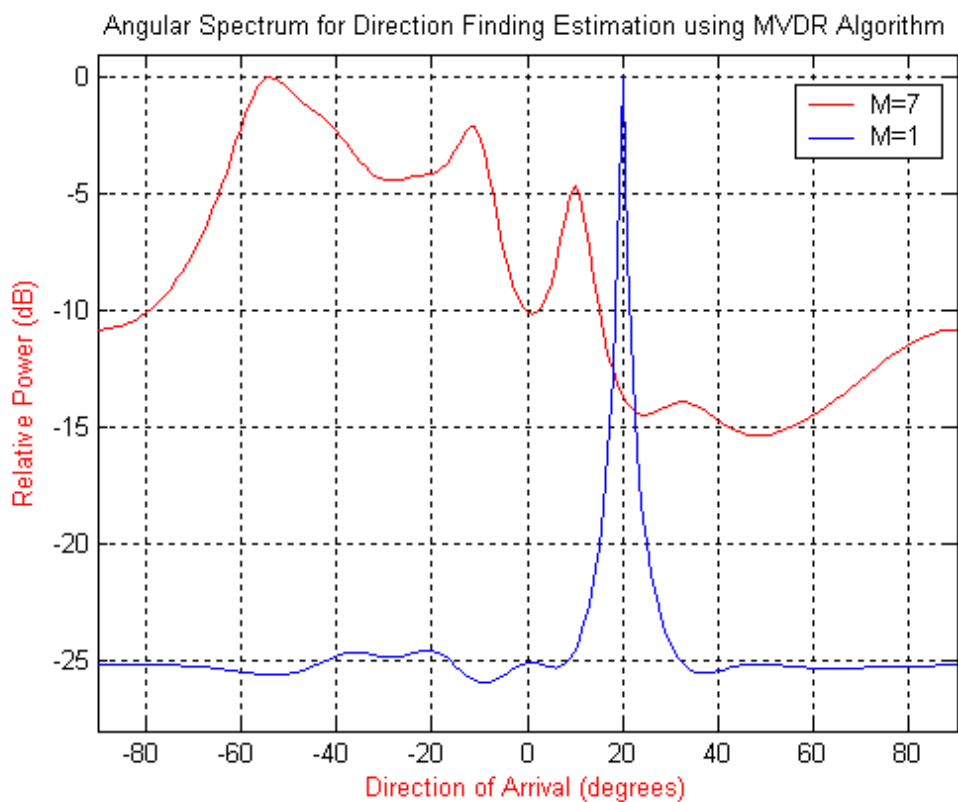
Σχήμα 2: Η διάταξη των της διεπαφής γραφικών χρήστη(GUI)

6.7 Αποτελέσματα προσομοίωσης για MVDR

Για να αποδειχτεί η ευελιξία και η ακρίβεια του αλγορίθμου μέσω του εργαλείου που χρησιμοποιείται για τη μελέτη του αλγορίθμου αλλάζουμε διάφορους παραμέτρους που σχετίζονται με το περιβάλλον του σήματος καθώς και τη διασύνδεση της συστοιχίας των αισθητήρων.

1) Αριθμός στιγμιότυπων των σημάτων από κινητούς χρήστες.

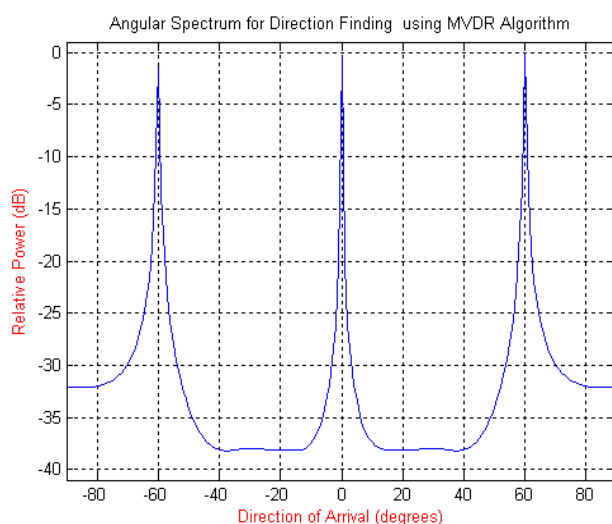
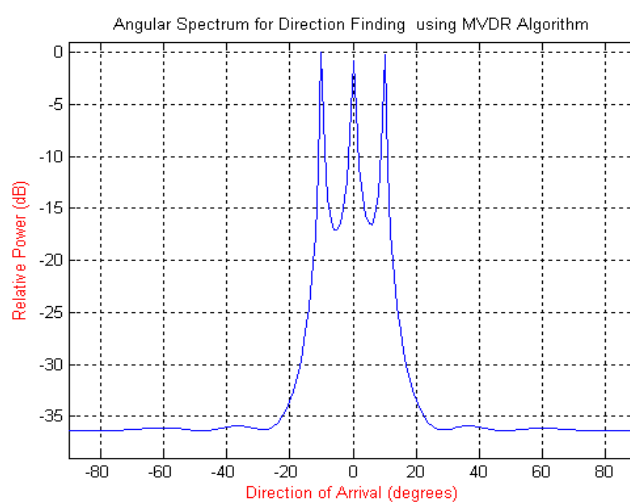
Το σχήμα 3 δείχνει το γωνιακό φάσμα του MVDR που δημιουργείται λόγω των σημάτων που φθάνουν από ένα $M = 1$ χρήστη και $M = 7$ χρήστες. Όταν υπάρχει μόνο ένας χρήστης κινητού ($M = 1$) στην περιοχή της βάσης σταθμού, ο αλγόριθμος MVDR έχει καλύτερη απόδοση, δεδομένου ότι δημιουργεί ένα γωνιακό φάσμα με απότομη αιχμή και ένα χαμηλότερο όριο θορύβου. Η απόδοση του αλγορίθμου υποβιβάζεται όταν υπάρχουν πολλοί χρήστες κινητής τηλεφωνίας ($M=7$), διότι η χωρική συσχέτιση μεταξύ των εισερχομένων σημάτων καθιστά δύσκολη την επίλυσή τους με επιτυχία.



Σχήμα 3: Επίδραση του αριθμού των χρηστών κινητής τηλεφωνίας M στο γωνιακό φάσμα για τον MVDR.

2) Γωνία διαχωρισμού διάφορων συμβάντων σημάτων από κινητούς χρήστες.

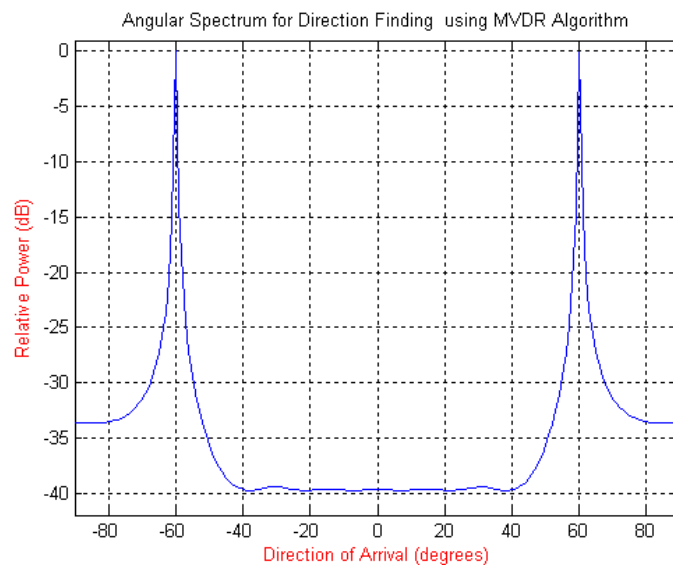
Όταν οι χρήστες κινητής τηλεφωνίας είναι κοντά ο ένας στον άλλον, θα υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των σημάτων. Στην περίπτωση αυτή, ο αλγόριθμος MVDR δυσκολεύεται να επιλύσει τους χρήστες. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 4(α) για 3 παρακείμενους χρήστες. Ωστόσο, η απόδοση βελτιώνεται σημαντικά, καθώς οι χρήστες απομακρύνονται ο ένας από τον άλλο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4(β) για τις οποίες το γωνιακό ραδιοφάσμα του MVDR έχει ευκρινέστερες κορυφές και χαμηλότερο όριο θορύβου.



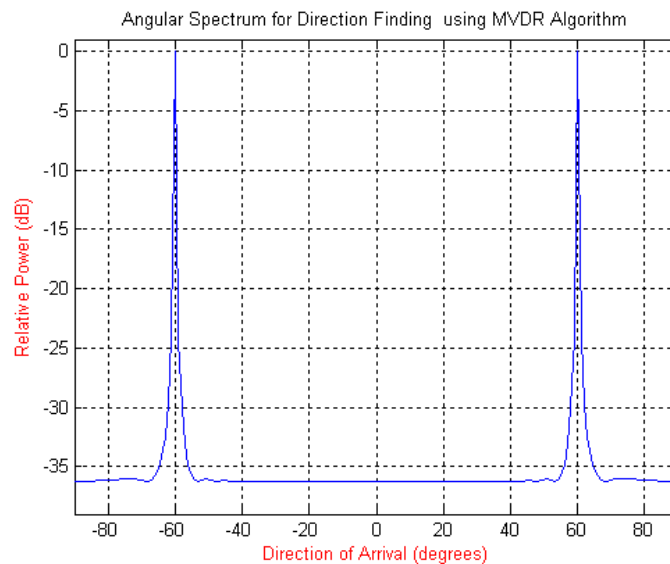
Σχήμα 4: Επίδραση του γωνιακού διαχωρισμού των χρηστών κινητής τηλεφωνίας σχετικά με το ραδιοφάσμα του MVDR όταν έχουμε: (α) γειτονικούς χρήστες, και (β) διαχωρισμένους χρήστες

3) Αριθμός στοιχείων στην συστοιχία αισθητήρων

Οι εικόνες 5(α) και 5(β) δείχνουν το γωνιακό φάσμα του MVDR χρησιμοποιώντας μια σειρά οκτώ στοιχείων ($N = 8$) και τριών στοιχείων του πίνακα ($N = 3$), αντίστοιχα. Είναι προφανές ότι η χρήση περισσότερων στοιχείων βελτιώνει την επίδοση του αλγορίθμου στην ανίχνευση των εισερχόμενων σημάτων. Αυτό επιτυγχάνεται, ωστόσο, εις βάρος της υπολογιστικής απόδοσης και της πολυπλοκότητας του υλικού της συστοιχίας αισθητήρων.



(α)

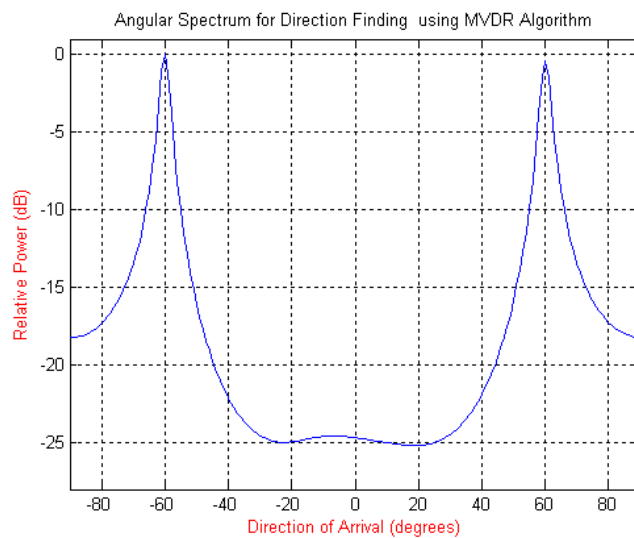


(β)

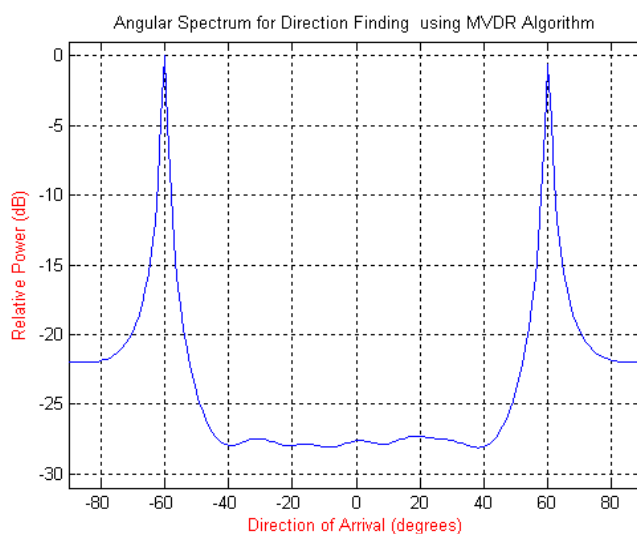
Σχήμα 5: Επίδραση του αριθμού N στοιχείων στη συστοιχία σχετικά με το γωνιακό ραδιοφάσμα του MVDR για : (α) $N = 8$ elements και (β) $N = 3$ στοιχεία.

4) Απόσταση των στοιχείων στην συστοιχία αισθητήρων

Οι εικόνες 6(α) και 6(β) δείχνουν το γωνιακό MVDR φάσμα για μια απόσταση στοιχείου $d = 0.25\lambda$ και $d = 0.5\lambda$ αντίστοιχα. Όταν τα στοιχεία του πίνακα αισθητήρων τοποθετούνται πολύ κοντά το ένα στο άλλο, τότε αμοιβαία φαινόμενα σύζευξης κυριαρχούν με αποτέλεσμα να έχουμε ανακρίβειες στις εκτιμώμενες γωνίες άφιξης, όπως φαίνεται στο σχήμα 6(α) για το οποίο $d = 0.25\lambda$. Επομένως επιβάλλεται να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό της συστοιχίας αισθητήρων. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, η απόσταση μεταξύ των στοιχείων του πίνακα αισθητήρων πρέπει να αυξηθεί με αποτέλεσμα την καλύτερη ανάλυση των εκτιμώμενων κορυφών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6 (β) για τις οποίες $d = 0.5\lambda$.



(α)



(β)

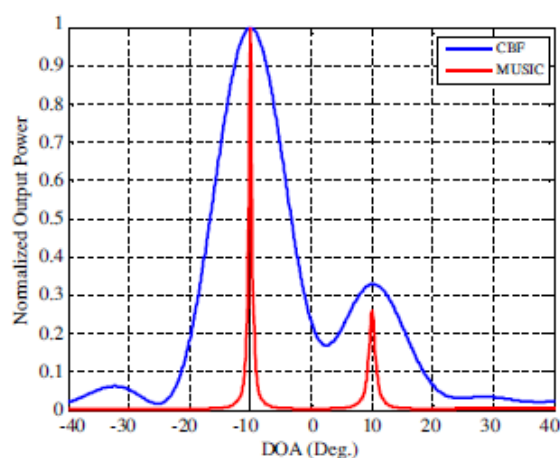
Σχήμα 6: Επίδραση της απόστασης d μεταξύ στοιχείων στο γωνιακό φάσμα του MVDR για: (α) $d = 0.25\lambda$, και (β) $d = 0.5\lambda$.

6.8 Παράδειγμα Φασματικής μεθόδου εκτίμησης(Bartlett)

Ένας από τούς πρώτους μεθόδους φασματικής ανάλυσης DOA είναι η μέθοδος Bartlett. Η ιδέα είναι να καθοδηγήσει τις δέσμης της κεραίας σε μία κατεύθυνση (χρησιμοποιώντας ένα διάνυσμα στάθμισης βάρους (w), το οποίο λειτουργεί σαν ένα χωρικό φίλτρο) υπολογίζοντας την ισχύ εξόδου. Οι κατευθύνσεις που έχουν ως αποτέλεσμα τη μέγιστη απόδοση παράγουν την εκτίμηση DOA.

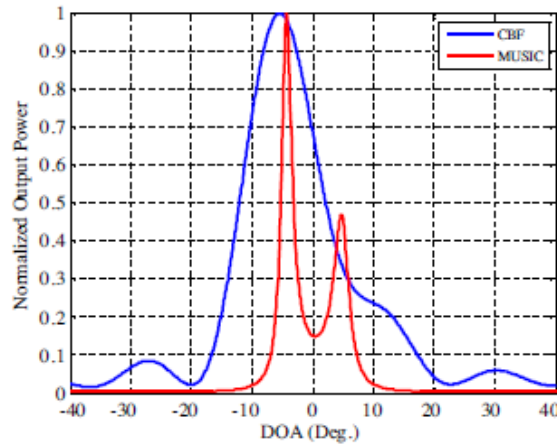
6.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης για Bartlett και MUSIC

Όπως προαναφέρθηκε, η μέθοδος Bartlett δεν μπορεί να επιλύσει πηγές πιο κοντά από το εύρος δέσμης της συστοιχίας ωστόσο, η Music έχει τη δυνατότητα να επιλύσει πολύ κοντινές πηγές. Τα σχήματα 2 και 3 δείχνουν το φάσμα ισχύος του Bartlett και Music για $\Delta\theta = 20^\circ$ και $\Delta\theta = 10^\circ$, όπου $\Delta\theta$ αντιπροσωπεύει τη γωνιακή διαφορά μεταξύ δύο περιπτώσεων πηγών. Πιο συγκεκριμένα η το σχήμα 3 δείχνει ότι η Bartlett δεν μπορεί να επιλύσει δύο παρεμφερείς πηγές, ενώ η Music μπορεί.



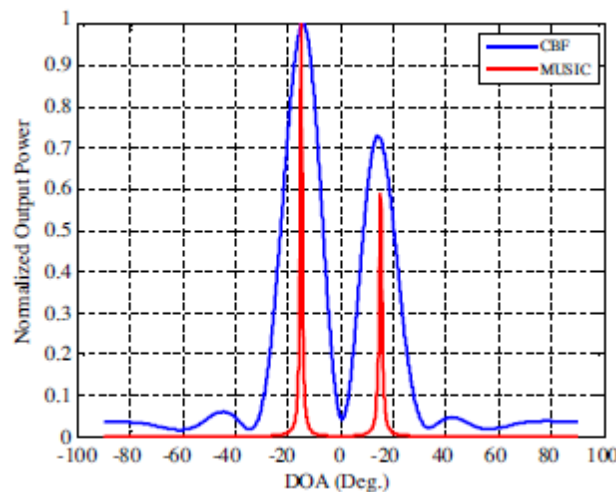
Σχήμα 7:Κανονικοποιημένο φάσμα του Bartlett, και της Music για τις παραμέτρους:

$$M = 8, D = 2, SNR = 10\text{dB}, \rho = 0, \theta_1 = 10^\circ, \theta_2 = -10^\circ.$$

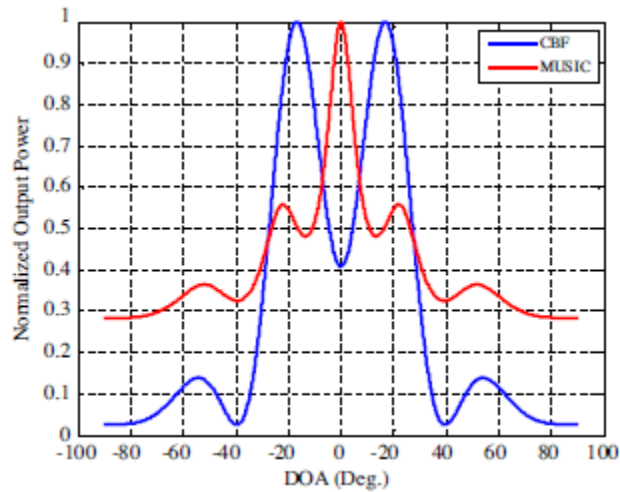


Σχήμα 8:Κανονικοποιημένο φάσμα του Bartlett, και της Music για τις παραμέτρους: $M = 8, D = 2, SNR = 10dB, \rho = 0, \theta_1 = 5^\circ, \theta_2 = -5^\circ$.

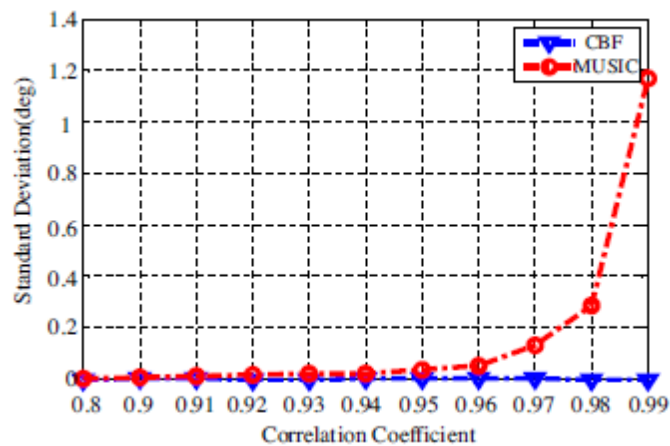
Παρά το ότι ο Bartlett έχει χαμηλή ανάλυση, αυτός ο αλγόριθμος δεν είναι ευαίσθητος σε κοντινές αποστάσεις πηγών σε αντίθεση με την υψηλή ευαισθησία του MUSIC. Τά σχήματα 4 και 5 εκφράζουν το φάσμα ισχύος του Bartlett και του MUSIC για δύο διαφορετικές συντελεστές συσχέτισης ($\rho = 0, \rho = 1$), και το σχήμα 6 συγκρίνει την απόκλιση του Bartlett και του MUSIC αλγόριθμου όσον αφορά τούς διαφορετικούς συντελεστές συσχέτισης. Τα αποτελέσματα δείχνουν την ευρωστία του Bartlett σε συνεκτικές πηγές, ενώ η ανάλυση του MUSIC μειώνεται με την αύξηση του συντελεστή συσχέτισης.



Σχήμα 9: Κανονικοποιημένο φάσμα του Bartlett, και της Music για τις παραμέτρους: $M = 8, D = 2, SNR = 10dB, \rho = 0, \theta_1 = 15^\circ, \theta_2 = -15^\circ$.



Σχήμα 10:Κανονικοποιημένο φάσμα του Bartlett, και της Music για τις παραμέτρους: $M = 8, D = 2, SNR = 10dB, \rho = 1, \theta_1 = 15^\circ, \theta_2 = -15^\circ$.



Σχήμα 11. Τοπική απόκλιση του Bartlett και του Music σε σχέση με τον συντελεστή συσχέτισης για τις παραμέτρους:
- $M = 8, D = 2, SNR = 10 \text{ dB}, \theta_1 = 10^\circ, \theta_2 = -10^\circ$.

6.10 Συγκριτικοί πίνακες χαρακτηριστικών των αλγορίθμων εκτίμησης DOA

Όνομα μεθόδου DOA	Ιδιότητες	Σχόλια, σύγκριση και αναφορές
Bartlett method	<p>Πολυπλοκότητα</p> <p>Ανάλυση</p> <p>Ευαισθησία</p> <p>Άνοιγμα</p>	<p>Bartlett > LP > MLM</p> <p>Εξαρτάται από το άνοιγμα της συστοιχίας</p> <p>Ανθεκτική σε σφάλματα της θέσης των στοιχείων της συστοιχίας</p> <p>Γενικό άνοιγμα</p>

Σχήμα 7. Σύνοψη της απόδοσης της μεθόδου Bartlett.

Όνομα μεθόδου DOA	Ιδιότητες	Σχόλια, σύγκριση και αναφορές
MVDR method	<p>Πολυπλοκότητα</p> <p>Διακύμανση</p> <p>Ανάλυση</p> <p>Άνοιγμα</p>	<p>Αμερόληπτη</p> <p>Ελάχιστη</p> <p>Μέθοδος MVDR > Bartlett Δεν έχει καλύτερη επίλυση από οποιαδήποτε μέθοδο</p> <p>Γενικό άνοιγμα</p>

Σχήμα 8. Σύνοψη της απόδοσης της μεθόδου MVDR.

Όνομα μεθόδου DOA	Ιδιότητες	Σχόλια, σύγκριση και αναφορές
MEM method	<p>Πολυπλοκότητα</p> <p>Ανάλυση</p> <p>Άνοιγμα</p>	<p>Αμερόληπτη</p> <p>Μέθοδος ME > MVDR > Bartlett Μπορεί να επιλυθεί με χαμηλότερο SNR από την Bartlett</p>

Σχήμα 8. Σύνοψη της απόδοσης της μεθόδου MEM.

Όνομα μεθόδου DOA	Ιδιότητες	Σχόλια, σύγκριση και αναφορές
Linear prediction method	<p>Πολυπλοκότητα</p> <p>Ανάλυση</p> <p>Απόδοση</p>	<p>Αμερόληπτη</p> <p>Μέθοδος LP > MVDR > Bartlett > ME Μπορεί να επιλυθεί με χαμηλότερο SNR από την Bartlett</p> <p>Καλή σε συνθήκες χαμηλού SNR</p>

Σχήμα 9. Σύνοψη της απόδοσης της μεθόδου Linear prediction.

Όνομα μεθόδου DOA	Ιδιότητες	Σχόλια, σύγκριση και αναφορές
MLM method	Πολυπλοκότητα	Αμερόληπτη MLM<LP ,Bartlett, MUSIC Λιγότερη από MUSIC για μικρά δείγματα. Ασυμπτωτικά αποτελεσματική για τυχαία σήματα.
	Διακύμανση	Μη παραγωγική για πεπερασμένα δείγματα. Λιγότερο αποδοτική για ντετερμινιστικά σήματα από τυχαία σήματα Ασυμπτωτικά αποτελεσματική για ντετερμινιστικό σήμα με τη χρήση μεγάλης σε απόσταση συστοιχίας.
	Υπολογισμός	Εντατικός με μεγάλα δείγματα Ίδιος για ντετερμινιστικά και τυχαία σήματα για μεγάλες συστοιχίες.
	Απόδοση	Ισχύει για συσχετισμένες αφίξεις. Λειτουργεί με ένα δείγμα.

Σχήμα 10.Σύνοψη της απόδοσης της μεθόδου MLM

Όνομα μεθόδου DOA	Ιδιότητες	Σχόλια, σύγκριση και αναφορές
Element - Space MUSIC method	<p>Πολυπλοκότητα</p> <p>Διακύμανση</p> <p>Ανάλυση</p> <p>Υπολογισμός</p> <p>Ευαισθησία</p>	<p>Προκατειλημμένη</p> <p>Λιγότερη από την ESPRIT για μεγάλα δείγματα Κοντά στην MLM CLOSEST και FINE Η διακύμανση της σταθμισμένης MUSIC είναι κάτι περισσότερο από την αστάθμιστη MUSIC. Αποτελεσματική για τυχαία σήματα.</p> <p>Εξαρτάται από την πολυπλοκότητα</p> <p>Εντατικός</p> <p>Η βαθμονόμηση της συστοιχίας είναι κρίσιμης σημασίας, η ευαισθησία στο σφάλμα φάσης εξαρτάται περισσότερο από το μήκος της συστοιχίας παρά από τον αριθμό των στοιχείων και η προεπεξεργασία μπορεί να βελτιώσει την ανάλυση. Η σωστή εκτίμηση του αριθμού των πηγών είναι σημαντική. Η MSE εξαρτάται από το κέρδος και τη φάση των σφαλμάτων και είναι κατώτερη από εκείνη του ESPRIT. Αύξηση του κέρδους και της φάσης των σφαλμάτων πέραν κάποιας αξίας προκαλεί μια απότομη επιδείνωση της διακύμανσης.</p>

Σχήμα 11. Σύνοψη της απόδοσης της μεθόδου **Element - Space MUSIC**.

Όνομα μεθόδου DOA	Ιδιότητες	Σχόλια, σύγκριση και αναφορές
Beam - Space MUSIC method	Πολυπλοκότητα	Μικρότερη από τον ES MUSIC
	Διακύμανση	Μεγαλύτερη από την ES MUSIC
	Σφάλμα RMS	Λιγότερο από τον ESPRIT, min-norm method
	Ανάλυση	Παρόμοια με την min-norm, CLOSEST Καλύτερη από τον ES MUSIC.
	Υπολογισμός	Το κατώτατο όριο SNR μειώνεται καθώς ο διαχωρισμός μεταξύ των πηγών αυξάνεται.
Ευαισθησία	Ανθεκτική σε σύγκριση με τον ES MUSIC	

Σχήμα 11. Σύνοψη της απόδοσης της μεθόδου Beam - Space MUSIC.

Όνομα μεθόδου DOA	Ιδιότητες	Σχόλια, σύγκριση και αναφορές
Root Music	<p>Διακύμανση</p> <p>Ανάλυση</p> <p>Σφάλμα RMS</p> <p>Συστοιχία</p> <p>Απόδοση</p>	<p>Μικρότερη από τον ESPRIT ,min-norm.</p> <p>Μεγαλύτερη από την BS MUSIC</p> <p>Μικρότερο από τον ESPRIT.</p> <p>Ισαπέχοντα στοιχεία</p> <p>Καλύτερη από τον φασματικό MUSIC.</p>

Σχήμα 12.Σύνοψη της απόδοσης της μεθόδου **Root MUSIC**.

Όνομα μεθόδου DOA	Ιδιότητες	Σχόλια, σύγκριση και αναφορές
Min-Norm method	<p>Πολυπλοκότητα</p> <p>Ανάλυση</p>	<p>Μικρότερη από τον MUSIC</p> <p>Μεγαλύτερη από τον CLOSEST,ES MUSIC</p>

Σχήμα 13.Σύνοψη της απόδοσης της μεθόδου **Min-Norm**.

Όνομα μεθόδου DOA	Ιδιότητες	Σχόλια, σύγκριση και αναφορές
CLOSEST method	<p>Διακύμανση</p> <p>Ανάλυση</p> <p>Απόδοση</p> <p>Ευαισθησία</p>	<p>Ίση με την ES MUSIC</p> <p>Ίση με την BS MUSIC</p> <p>Καλύτερη από την min-norm.</p> <p>Καλή σε καταστάσεις υψηλής συγκέντρωσης.</p> <p>Η αύξηση στο κέρδος αισθητήρα και στο σφάλμα φάσης μετά από μια ορισμένη τιμή προκαλεί μια απότομη επιδείνωση στην πολυπλοκότητα και στην διακύμανση.</p>

Σχήμα 14.Σύνοψη της απόδοσης της μεθόδου CLOSEST.

Όνομα μεθόδου DOA	Ιδιότητες	Σχόλια, σύγκριση και αναφορές
ESPRIT method	Πολυπλοκότητα	Προκατειλημμένη
	RMS σφάλμα	Μικρότερο από την min-norm
	Διακύμανση	Λιγότερη από την MUSIC για μεγάλα δείγματα και αυτή η διαφορά αυξάνει με αύξηση των στοιχείων αισθητήρων.
	Υπολογισμός	Μικρότερος από την MUSIC
	Συστοιχία	Χρειάζεται ζευγάρια αισθητήρων. Δέν χρειάζεται βαθμονόμηση.
	Απόδοση	Ο βέλτιστα σταθμισμένος ESPRIT είναι καλύτερος από τον αδιαβάθμιστο.
	Ευαισθησία	Ισχυρότερος από τον Music αλλά δεν μπορεί να διαχειριστεί συσχετισμένες πηγές. Το MSE είναι ανθεκτικό σε σφάλματα κέρδους αισθητήρων.

Σχήμα 14. Σύνοψη της απόδοσης της μεθόδου ESPRIT.

Όνομα μεθόδου DOA	Ιδιότητες	Σχόλια, σύγκριση και αναφορές
FINE method	<p>Πολυπλοκότητα</p> <p>Ανάλυση</p> <p>Διακύμανση</p> <p>Απόδοση</p>	<p>Μικρότερη από την MUSIC</p> <p>Καλύτερη από την min-norm και MUSIC.</p> <p>Μικρότερη από την min-norm.</p> <p>Καλή σε χαμηλό SNR.</p>

Βιβλιογραφία

1. 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 2000, pp 919-920.
2. Mohammed S. Elmusrati, “Radio resource scheduling and smart antennas in cellular cdma communication systems”, Espoo 2004, report 142, pp 2-5
3. Application of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part II: Beam-Forming and Direction-of-Arrival Considerations LAL C. GODARA, SENIOR MEMBER, IEEE
4. Per H. Lehne and Magne Pettersen, “An overview of smart antenna technology for mobile communications systems”, IEEE Communications Surveys, Fourth Quarter 1999, vol. 2 no. 4, pp1-12
5. R. A. Monzingo and T. W. Miller, Introduction to Adaptive Arrays. New York: Wiley, 1980.
6. H. Krim and M. Viberg, “Two decades of array signal processing: The parametric approach,” *IEEE Signal Processing Mag.*, pp. 67–94, July 1996.
7. S. Sivanand, “On adaptive arrays in mobile communication,” in *Proc. IEEE National Telesystems Conf.*, Atlanta, GA, 1993.
8. Joseph C. Liberti, Jr. and Theodore S. Rappaport, “Smart antennas for wireless communications : IS-95 and third generation CDMA applications”, 1999 chapter 9, pp 256-265
9. LIU JianHua et al, “DoA estimation Based on array manifold calibration and weighted subspace fitting”, Proceedings of ICSP '96, pp 489-491
10. Peangduen Satayarak et al, “The Achievable Performance of Unitary-ESPRIT Algorithm for DOA Estimation”, 1998, pp 1-4
11. 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 2004, pp 252-262

12. 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 '96, Taipei, Taiwan, Oct. 15-18, 1996, pp 540-544.
13. T. B. Lavate, V. K. Kokate & A. M. Sapkal International Journal of Computer Networks "Performance Analysis of MUSIC and ESPRIT DOA Estimation Algorithms for Adaptive Array Smart Antenna in Mobile Communication".
14. T. Bull et al, "Technology in Smart Antennas for Universal Advanced Mobile Infrastructure", (TSUNAMI R2108) Overview, RACE Mobile Telecommunications Summit 1995, Cascais, Portugal, Nov. 22–24, 1995,
15. Fakhrul Alam, "Space Time Processing for third Generation CDMA Systems", Nov. 2002, pp 44-53
16. 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, 1999
17. R. G. Pridham and R. A. Mucci, "A novel approach to digital beamforming," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 63, pp. 425–434,
18. R. A. Mucci, "A comparison of efficient beamforming algorithms," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-32, pp. 548–558, 1984.
19. R. G. Pridham and R. A. Mucci, "Digital interpolation beamforming for low-pass and bandpass signals," *Proc. IEEE*, vol. 67, pp. 904–919, 1979.
20. H. Fan, E. I. El-Masry, and W. K. Jenkins, "Resolution enhancement of digital beamforming," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-32, pp. 1041–1052, 1984.
21. B. Maranda, "Efficient digital beamforming in the frequency domain," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 86, pp. 1813–1819, 1989.
22. C. C. Ko, G. Balabshaskar, and R. Bachl, "Unbiased source estimation with an adaptive null steering algorithm," *Signal Process.*, vol. 31, pp. 283–300, 1993.
23. J. Benesty and P. Duhamel, "A fast exact least mean square adaptive algorithm," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 40, pp. 2904–2920, 1992.
24. A. Feuer and R. Cristi, "On the steady state performance of frequency domain LMS algorithms," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 41, pp. 419–423, 1993.

25. HIGH RESOLUTION DIRECTION OF ARRIVAL ESTIMATION ANALYSIS AND IMPLEMENTATION IN A SMART ANTENNA SYSTEM by Ahmed Khallaayoun, MONTANA STATE UNIVERSITY Bozeman, Montana, May, 2010
26. N. J. Bershad, "Analysis of the normalized LMS algorithm with Gaussian inputs," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. ASSP-34, pp. 793–806, 1986.
27. D. T. M. Slock, "On the convergence behavior of the LMS and the normalized LMS algorithms," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 41, pp. 2811–2825, 1993.
28. K. M. Wong, J. P. Reilly, Q. Wu, and S. Qiao, "Estimation of the direction of arrival of signals in unknown correlated noise, Part I: The MAP approach and its implementation," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 40, pp. 2007–2017, 1992.
29. J. P. Reilly and K. M. Won, "Estimation of the direction of arrival of signals in unknown correlated noise, Part II: Asymptotic behavior and performance of the MAP," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 40, pp. 2018–2028, 1992.
30. M. G. Amin, "Concurrent nulling and locations of multiple interferences in adaptive antenna arrays," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 40, pp. 2658–2668, 1992.
31. J. A. Cadzow, "A high resolution direction-of-arrival algorithm for narrow-band coherent and incoherent sources," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. ASSP-36, pp. 965–979.
32. "Bias analysis of the MUSIC location estimator," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 40, pp. 2559–2569, 1992.
33. "Bias and variance of direction-of-arrival estimate from MUSIC, MIN-NORM, and FINE," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 42, pp. 1812–1816, 1994.
34. Simulation Study on DOA Estimation using ESPRIT Algorithm Jose Bermudez, Ridwan C. Chin, Payam Davoodian, Alfred Tsz Yin Lok, Zekeriya Aliyazicioglu, H. K. Hwang
35. J. Proakis, D. K. Manolakis Digital Signal Processing, Prentice Hall, 2006, 4th Ed