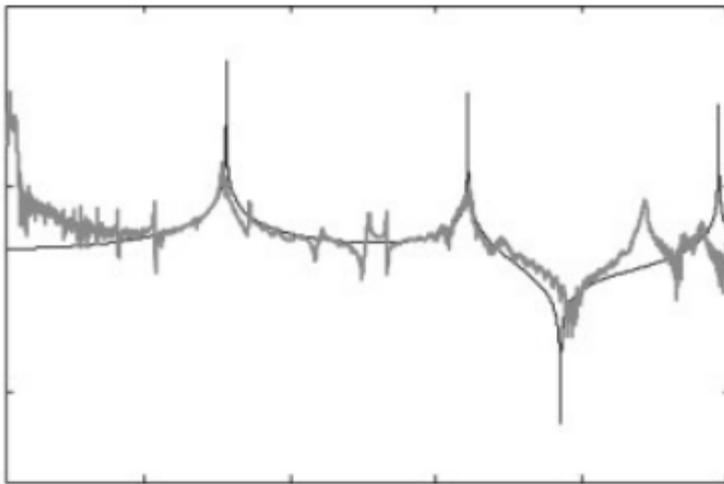




ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«Χρήση του αλγορίθμου Matrix Pencil και έλεγχος της απόδοσής του σε συστοιχίες κεραιών»

Φουρλίγκα Μαρία



Επιβλέπων Καθηγητής

Κ.Βότης

Άρτα 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ταχύτητα εξέλιξης των ασύρματων επικοινωνιών επιτρέπει την επικοινωνία του ανθρώπου που μετακινείται με οποιοδήποτε συνδρομητή του ίδιου ή διαφορετικού συστήματος οποιαδήποτε στιγμή όπου και αν βρίσκεται παρέχοντας υπηρεσίες πολυμέσων. Στις υπάρχουσες μεθόδους πολλαπλής πρόσβασης σε ένα τέτοιο δίκτυο οι οποίες επιτρέπουν την ταυτόχρονη σύνδεση πολλών χρηστών χωρίς την αλληλοπαρεμβολή των σημάτων τους, έχει προστεθεί μια μέθοδος που βρίσκεται σε εξέλιξη και η οποία πέρα από τις παραμέτρους της συχνότητας του χρόνου και της κωδικοποίησης, στις οποίες βασίζονται οι άλλες μέθοδοι αξιοποιεί και την παράμετρο του χώρου. Η μεθοδολογία συνίσταται στη χρήση διατάξεων ευφυών κεραιών στους σταθμούς βάσης των δικτύων που έχουν σαν στόχο την παραγωγή διαγραμμάτων ακτινοβολίας που δεν καθορίζονται εξαρχής αλλά προσαρμόζονται στις τρέχουσες απαιτήσεις προσφέροντας περισσότερη ευελιξία στον τρόπο επικοινωνίας και σύνδεσης ανάμεσα στο σταθμό βάσης και το χρήστη. Οι έξυπνες κεραιές θα οδηγήσουν σε μια αποδοτικότερη χρήση του φάσματος και θα μειώσουν τις παρεμβολές παρέχοντας καλύτερη ποιότητα και παράλληλα δημιουργώντας νέες και οικονομικές υπηρεσίες για το χρήστη καλύπτοντας μια από τις βασικότερες ανάγκες του, αυτή της επικοινωνίας.

Η λειτουργία ενός προσαρμοστικού συστήματος έξυπνης κεραιάς (Adaptive Smart Antennas System) προϋποθέτει την γνώση διευθύνσεων άφιξης των προσπιπτόντων σημάτων του χρήστη που εξυπηρετείται καθώς και των παρεμβολών. Για το λόγο αυτό η εφαρμογή ειδικών αλγορίθμων εκτίμησης DoA (Direction of Arrival) των σημάτων προηγείται της διεργασίας προσαρμογής της δέσμης η οποία έχει σαν στόχο να ενισχύει το σήμα του χρήστη και ταυτόχρονα να αποκλείσει τους παρεμβολείς.

Ο αλγόριθμος Matrix Pencil εφαρμόστηκε σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις: Σε επίπεδες στοιχειοκεραίες 2×10 , 5×5 , 10×5 , 10×10 στοιχείων. Αρχικά έγινε η εφαρμογή θεωρώντας πως οι κεραιές αποτελούνται από ισοτροπικές πηγές (ιδανική συστοιχία κεραιών), στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή σε κεραιές που αποτελούνται από πραγματικά στοιχεία (δίπολα) και τέλος με μετασχηματισμένες ισοδύναμες στοιχειοκεραίες Uniform Linear Virtual Array (ULVA). Η τεχνική της μετασχηματισμένης ισοδύναμης συστοιχίας κεραιών έγινε με στόχο τη βελτίωση των αποτελεσμάτων εξαιτίας της μειωμένης απόδοσης του αλγορίθμου λόγω των φαινομένων αμοιβαίας σύζευξης που εμφανίζονται μεταξύ των στοιχείων της κεραιάς και λόγω της ύπαρξης του ανακλαστήρα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</u>	<u>2</u>
<u>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</u>	<u>3</u>
<u>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....</u>	<u>6</u>
<u>Κεφάλαιο 2: Αλγόριθμοι προσαρμογής έξυπνων κεραιών...6</u>	
<u>2.1 Λειτουργία.....</u>	<u>6</u>
<u>2.2 Εισαγωγή στην τεχνολογία των συστοιχίων κεραιών..</u>	<u>9</u>
<u>2.3 Η τεχνολογία των Ευφυών Κεραιών.....</u>	<u>10</u>
<u>2.3.1 Επίπεδα ευφυΐας.....</u>	<u>11</u>
<u>2.4 Η εξέλιξη των έξυπνων κεραιών.....</u>	<u>13</u>
<u>2.5 Ακυρωτές πλευρικών λοβών.....</u>	<u>13</u>
<u>2.5.1 Προσαρμοσμένες κεραιές.....</u>	<u>14</u>
<u>2.5.2 Ψηφιακή διαμόρφωση δέσμης (beamforming)..</u>	<u>14</u>
<u>2.5.3 Έξυπνες κεραιές.....</u>	<u>15</u>
<u>2.6 Συστήματα έξυπνων κεραιών.....</u>	<u>15</u>
<u>2.6.1 Συστήματα μεταγωγής δέσμης (switched-beam systams)..</u>	<u>16</u>
<u>2.6.2 Συστήματα προσαρμοσμένης συστοιχίας κεραιών (Adaptive-Array Systems).....</u>	<u>17</u>
<u>2.6.3 Αναλογία έξυπνης κεραιάς.....</u>	<u>18</u>
<u>2.7 Πλεονεκτήματα ευφυών κεραιών.....</u>	<u>19</u>
<u>2.8 Μειονεκτήματα των ευφυών κεραιών.....</u>	<u>22</u>
<u>Κεφάλαιο 3: Μέθοδοι Matrix-pencil.....</u>	<u>23</u>
<u>3.1 Αλγόριθμος Matrix-pencil.....</u>	<u>23</u>

<u>3.1.1 Θεωρητική ανάλυση.....</u>	<u>23</u>
<u>3.2 Νευρωνικά δίκτυα και άλλες προσεγγίσεις.....</u>	<u>27</u>
<u>Κεφάλαιο 4: Πειραματικοί μέθοδοι εκτίμησης.....</u>	<u>28</u>
<u>4.1 Εισαγωγή.....</u>	<u>28</u>
<u>4.2 Μέθοδος Matrix Pencil.....</u>	<u>30</u>
<u>4.3 Εκτίμηση DoA σημάτων σε χώρο τριών διαστάσεων για συστήματα ευφυών κεραιών.....</u>	<u>33</u>
<u>4.4 Αλγόριθμος μετατροπής από μήτρα συστήματος σε εξισώσεις κατάστασης (MATRIX PENCILS).....</u>	<u>34</u>
<u>Κεφάλαιο 5: Εφαρμογή αλγορίθμων σε σύστημα επίπεδης συστοιχίας κεραιών 2x10 διπόλων.....</u>	<u>35</u>
<u>5.1 Γεωμετρία της επίπεδης συστοιχίας κεραιών 2x10 διπόλων.....</u>	<u>35</u>
<u>5.2 Προσδιορισμός διεύθυνσης άφιξης των σημάτων (DOA).....</u>	<u>37</u>
<u>5.2.1 Έλεγχος λειτουργίας του αλγορίθμου Matrix Pencil σε ιδανική συστοιχία κεραιών</u>	<u>38</u>
<u>5.2.2 Πραγματική συστοιχία κεραιών 20 στοιχείων χωρίς μετασχηματισμό.....</u>	<u>38</u>
<u>5.2.3 Πραγματική επίπεδη συστοιχία κεραιών 2x10 στοιχείων μετασχηματισμένη σε ULVA.....</u>	<u>39</u>
<u>5.3 Εφαρμογή αλγορίθμου Matrix Pencil σε επίπεδη συστοιχία κεραιών 5x5 διπόλων.....</u>	<u>39</u>
<u>5.3.1 Γεωμετρία της επίπεδης συστοιχίας κεραιών 5x5 δίπολων..</u>	<u>39</u>
<u>5.3.2 Προσδιορισμός διεύθυνσης άφιξης των σημάτων (DOA).....</u>	<u>42</u>
<u>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</u>	<u>43</u>
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</u>	<u>44</u>

ΔΗΛΩΣΗ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΗΣ ΙΔΙΟΚΤΗΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί προϊόν αποκλειστικά δικής μου προσπάθειας. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία και γίνεται ρητή αναφορά σε αυτές μέσα στο κείμενο όπου έχουν χρησιμοποιηθεί.

ΥΠΟΓΡΑΦΗ
ΦΟΥΡΛΙΓΚΑ ΜΑΡΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ιστορία των πινάκων υπήρχε από στην αρχαιότητα. Όμως ο όρος <<μήτρα>> δεν εφαρμόζεται στην έννοια μέχρι το 1850.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 & 3 \\ 0 & 2 & 3 & 1 \\ -1 & 0 & 2 & -3 \end{pmatrix}.$$

“MATRIX” είναι η λατινική λέξη για τη μήτρα και διατηρεί την αίσθηση στα αγγλικά. Μπορεί επίσης να σημαίνει γενικότερα κάθε τόπος στον οποίο κάτι σχηματίζεται ή παράγονται.

Οι απαρχές των μαθηματικών πινάκων βρίσκονται στη μελέτη των συστημάτων των ταυτόχρονων γραμμικών εξισώσεων. Ένα σημαντικό κινέζικο κείμενο μεταξύ 300 π.Χ. και 200 μ.Χ. της Μαθηματικής Τέχνης (Chiu Chang Suan Shu) δίνει το πρώτο γνωστό παράδειγμα της χρήσης των μεθόδων μήτρας για την επίλυση των εξισώσεων.

Ο όρος <<μήτρα>> εισήχθη το 1850 από τον James Joseph Sylvester. Από την πρώτη εμφάνισή τους στην αρχαία Κίνα οι πίνακες παραμένουν σημαντικά μαθηματικά εργαλεία. Στις μέρες μας δεν χρησιμοποιούνται μόνο για την επίλυση των ταυτόχρονων συστημάτων γραμμικών εξισώσεων αλλά και για την περιγραφή των κβαντικών μηχανών δομή του ατόμου, το σχεδιασμό ηλεκτρονικών υπολογιστών ακόμα και την ανάλυση των σχέσεων.

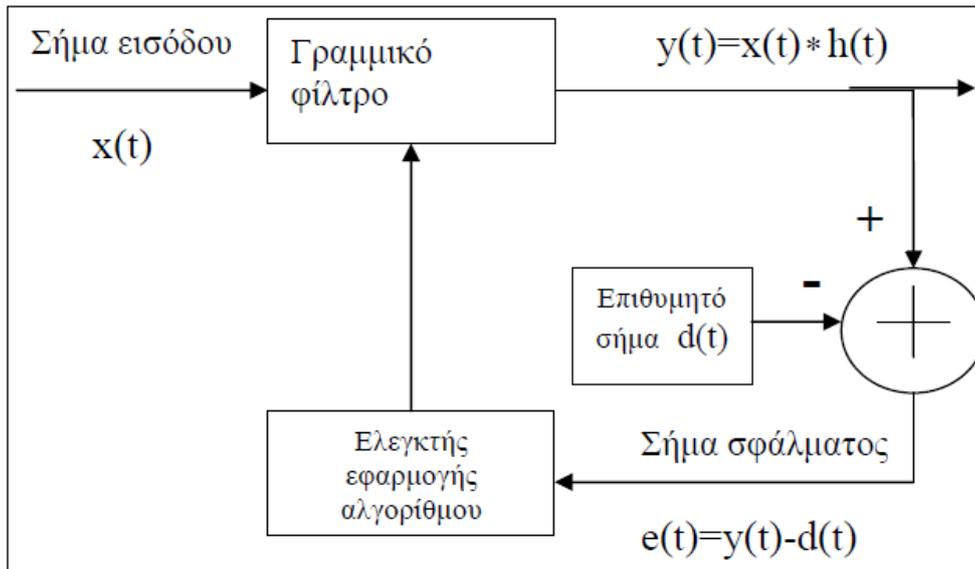
Η ανύψωση της μήτρας από απλό εργαλείο σε μία σημαντική μαθηματική θεωρία οφείλει πολλά στο έργο της μαθηματικός Όλγας Taussky Todd (1906-1995), η οποία ξεκίνησε την χρήση πινάκων για την ανάλυση δονήσεων στα αεροπλάνα κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου και έγινε λαμπαδηδρόμος για τη μήτρα θεωρία.^[1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΕΞΥΠΝΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ

2.1 Λειτουργία

Ο αλγόριθμος προσαρμογής υπολογίζει την απόκριση ενός φίλτρου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιεί μια πρότυπη συνάρτηση μεταφοράς. Αυτή του η ικανότητα βασίζεται στο ότι μπορεί να προσαρμόζεται η απόδοση του φίλτρου βάσει του σήματος εισόδου. Η τεχνική προσαρμογής απεικονίζεται αναλυτικά στο παρακάτω σχεδιάγραμμα:.



Σχήμα 2.1.1 : Διάταξη τεχνικής προσαρμογής

Το σήμα εισόδου είναι το $x(t)$, το επιθυμητό σήμα είναι το $d(t)$ και το γραμμικό φίλτρο έχει κρουστική απόκριση $h(t)$. Τα χαρακτηριστικά του φίλτρου μεταβάλλονται από έναν ελεγκτή με βάση ένα σήμα σφάλματος $e(t)=y(t)-d(t)$, το οποίο παράγεται στιγμιαία. Ως $y(t)$ είναι η έξοδος του φίλτρου.

Το σήμα σφάλματος $e(t)$ υπολογίζεται ως εξής:

$$e(t) = d(t) - y(t) = d(t) - x(t) * h(t) \quad (2.1)$$

με $\ll * \gg$ συμβολίζεται η συνέλιξη δηλαδή:

$$e(t) = d(t) - \int_{-\infty}^{\infty} x(t - \tau) h(\tau) d\tau \quad (2.2)$$

Έπειτα υπολογίζεται το μέγεθος:

$$E = E[|e(t)|^2] = E[e(t)e^*(t)] \quad (2.3)$$

με $\ll E[] \gg$ συμβολίζεται ο τελεστής της αναμενόμενης τιμής, και το $e^*(t)$ είναι ο συζυγής μιγαδικός του $e(t)$.

Η αναμενόμενη τιμή ορίζεται ως ο στατιστικός μέσος, όλων των τιμών που μπορεί να λάβει μια συνεχής τυχαία μεταβλητή, όπως θεωρείται το σήμα

σφάλματος $e(t)$ σε αυτήν την περίπτωση. Ο ορισμός φαίνεται παρακάτω με την προϋπόθεση ότι το ολοκλήρωμα συγκλίνει απολύτως αλλιώς δεν ορίζεται:

$$E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} xf_X(x)dx \quad (2.4)$$

όπου $f_X(x)$ = η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της μεταβλητής x .

Η βέλτιστη λύση για την απόκριση $h(t)$ του φίλτρου, με μικρότερο δυνατό σφάλμα το $d(t)$, για ένα δεδομένο σήμα εισόδου παρέχεται από την ολοκληρωτική εξίσωση (2.6) και με βάση την συνθήκη ορθογωνικότητας του σήματος σφάλματος με το σήμα εισόδου $x(t)$ που ορίζεται από τη σχέση (2.5):

$$E[x(t)e^*(t)] = 0 \quad (2.5)$$

$$R_{xd} = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(t - \tau)h(\tau)d\tau \quad (2.6)$$

όπου

$$R_{xd}(t) = E [x(t)d^*(t)] \quad (2.7)$$

$$R_{xx}(t) = E [x(t)x^*(t)] \quad (2.8)$$

Για τον υπολογισμό της βέλτιστης απόκρισης χρειάζεται να γνωρίζουμε τα $R_{xd}(t)$ και $R_{xx}(t)$. Αυτό προϋποθέτει, δηλαδή, ότι πρέπει κάποια πληροφορία να είναι γνωστή για το επιθυμητό σήμα ώστε να καθοριστεί η διαδικασία προσαρμογής. Για παράδειγμα, το σταθερό πλάτος σε ένα ψηφιακό σήμα.

Επομένως, μια διαδικασία προσαρμογής δεν είναι δυνατόν να καθοριστεί χωρίς να παρέχεται κάποια πληροφορία για το επιθυμητό σήμα. Η πληροφορία μπορεί να αλλάζει από πρόβλημα σε πρόβλημα αλλά είναι αναγκαία η ύπαρξή της.

Σε προβλήματα αλγορίθμων προσαρμογής όπου συμπεριλαμβάνονται κεραίες, οι απαραίτητες πληροφορίες αφορούν κυρίως τη γωνία άφιξης του επιθυμητού σήματος. Άλλο παράδειγμα είναι τα συστήματα radar στα οποία οι πληροφορίες που είναι γνωστές είναι η μετατόπιση Doppler και η διεύθυνση

άφιξης του σήματος. Στόχος είναι να υπολογιστεί η ισχύς του, παρουσία παρεμβολών, σημάτων λόγω πολλαπλών διαδρομών και θερμικού θορύβου. [2]

2.2 Εισαγωγή στην τεχνολογία των συστοιχίων κεραιών

Ορισμένα προβλήματα που παρουσιάζουν τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών οφείλονται κυρίως στα διαφορετικά χωρικά χαρακτηριστικά των σημάτων. Οπότε η αξιοπιστία των συστημάτων μπορεί να εξασφαλιστεί αν εφαρμόσουμε κατάλληλες τεχνικές χωρικής λήψης (Spatial Diversity). Τέτοιες τεχνικές μπορούν όμως να υλοποιηθούν με κεραιές υψηλής κατευθυντικότητας.

Οι ομοιοκατευθυντικές κεραιές (Omnidirectional Antennas) παρουσιάζουν σχετικά χαμηλή κατευθυντικότητα. Η βελτίωση της κατευθυντικότητας των κεραιών μπορεί θεωρητικά να επιτευχθεί με την αύξηση των ηλεκτρικών διαστάσεων του ακτινοβολητή. Παρόλα αυτά, αυτού του είδους η προσέγγιση παρουσιάζει όρια και μειονεκτήματα όπως την εμφάνιση δευτερευόντων λοβών ή την υπερβολική αύξηση των διαστάσεων της κεραιάς. (σχήμα 2.3.1)

Η χρήση ενός αριθμού κεραιών-στοιχείων (Elements) με κατάλληλα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και σε συγκεκριμένη διάταξη είναι ένας ιδιαίτερα αποδοτικός τρόπος για την κατασκευή κατευθυντικών συστημάτων ακτινοβολίας. Η τοποθέτηση των στοιχείων πρέπει να γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε τα επιμέρους πεδία κάθε κεραιάς να παρουσιάζουν ενισχυτική υπέρθεση σε μια επιθυμητή κατεύθυνση και να αναιρούνται μεταξύ τους στον υπόλοιπο χώρο. Το σύστημα αυτό των στοιχείων ονομάζεται συστοιχία κεραιών (Antenna Array) και η εξέλιξη της τεχνολογίας της μπορεί να βελτιώσει ουσιαστικά την επίδοση των ασύρματων επικοινωνιακών συστημάτων.

Η μορφή του διαγράμματος ακτινοβολίας (Beam Pattern) μιας συστοιχίας κεραιών το οποίο καθορίζει και την απόδοσή της εξαρτάται από τα εξής:

α) Τη συνολική γεωμετρική διάταξη των στοιχείων: Αν δηλαδή τα στοιχεία τοποθετούνται σε μια ευθεία (γραμμική), στην περιφέρεια ενός νοητού κύκλου (κυκλική), σφαίρας (σφαιρική) ή ορθογωνίου (ορθογωνική).

β) Τη σχετική θέση τοποθέτησης των στοιχείων: Οι στοιχειοκεραίες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες :

- στις χωρικά ομοιόμορφες (Uniform) και
- στις χωρικά ανομοιόμορφες (Non Uniform).

Στην πρώτη κατηγορία τα στοιχεία ισαπέχουν μεταξύ τους και το επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας ρυθμίζεται κυρίως μέσω του ρεύματος διέγερσης

(σχήμα 2.3.2). Στη δεύτερη κατηγορία οι κεραιές αποτελούνται από μικρότερο αριθμό στοιχείων απ' ό τι της πρώτης κατηγορίας και ονομάζονται αραιές.

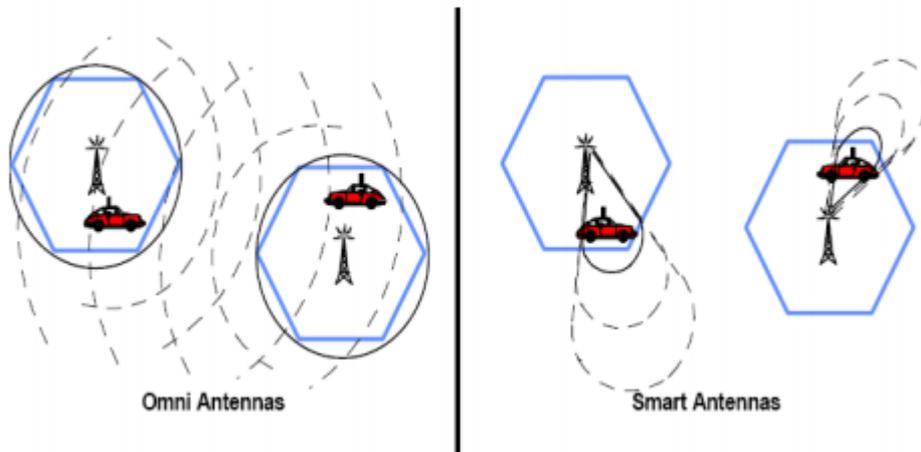
Γ) Το διάγραμμα ακτινοβολίας των επιμέρους στοιχείων: Συνήθως τα επιμέρους στοιχεία είναι οι κεραιές του ίδιου τύπου, προκειμένου να είναι πιο εύκολη η σχεδίαση και έχουν παρόμοια διαγράμματα ακτινοβολίας (εκπομπή/λήψη). Όσον αφορά το μήκος των στοιχείων, αυτό μπορεί είτε να είναι το ίδιο για όλα τα στοιχεία είτε να ακολουθεί κάποια γνωστή κατανομή όπως η λογαριθμική ή η Rayleigh. Χρησιμοποιώντας την κατάλληλη διέγερση επιτυγχάνονται λοβοί ακτινοβολίας και μηδενισμοί (Nulls) στις επιθυμητές κατευθύνσεις.

Δ) Το πλάτος και τη φάση της ρευματικής διέγερσης των επιμέρους στοιχείων: Ενώ η συχνότητα εκπομπής είναι πάντοτε η ίδια για όλα τα στοιχεία, το πλάτος (Amplitude) και η φάση (Phase) τροφοδοσίας μπορεί να είναι ίδια αλλά και να διαφέρουν. [3]

2.3 Η τεχνολογία των Ευφυών Κεραιών

Μια νέα τεχνολογία κεραιών που πρωτοεμφανίστηκε πήρε το όνομα τεχνολογία των ευφυών κεραιών (Smart Antennas). Οι ευφυείς κεραιές είναι στην ουσία στοιχειοκεραίες που έχουν την δυνατότητα με τη βοήθεια τεχνικών Beamforming (αναλογικών ή ψηφιακών) να προσαρμόζονται στο περιβάλλον διάδοσης και να μεταβάλλουν ισχυρά το συνολικό διάγραμμα ακτινοβολίας εκπομπής ή/και λήψης. Με αυτό τον τρόπο γίνεται μεγαλύτερη χωρο-χρονικά η ευαισθησία της συστοιχίας κεραιών προς την κατεύθυνση του επιθυμητού σήματος και παράλληλα ελαττώνεται προς τις κατευθύνσεις στις οποίες εισέρχονται ανεπιθύμητα σήματα.

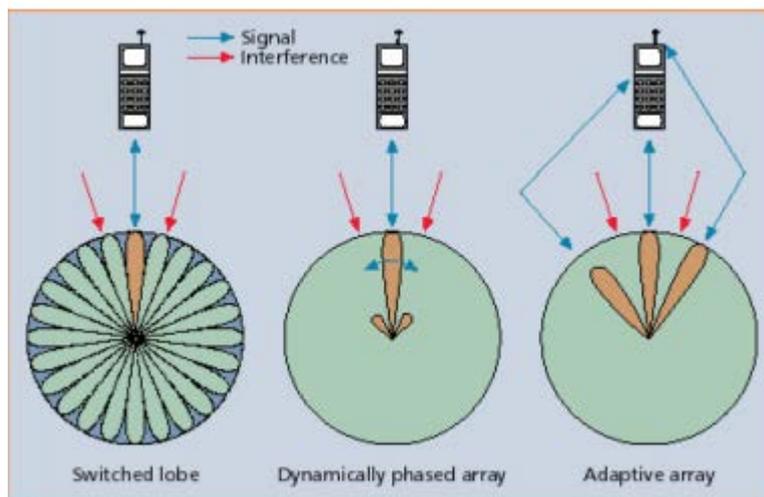
Όπως διαφαίνεται στο ακόλουθο σχήμα οι ομοιοκατευθυντικές κεραιές έχουν γωνιακό άνοιγμα 360° και ακτινοβολούν προς όλες τις κατευθύνσεις (ακόμα και σε κατευθύνσεις που δεν υπάρχουν κινητά τερματικά). Μέσω της τεχνολογία των ευφυών κεραιών είναι δυνατή η εστίαση του ακτινοβολούμενου σήματος σε συγκεκριμένη κατεύθυνση στο χώρο (μόνο εκεί που υπάρχουν κινητά τερματικά).



Σχήμα 2.3.1: Σύγκριση μεταξύ των ομοιοκατευθυντικών και των ευφύων κεραιών

2.3.1 Επίπεδα ευφύιας

Η επίδραση των ευφύων κεραιών στα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών εξαρτάται από τα επίπεδα ευφύιας των κεραιών (Level of Intelligence), τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.



Σχήμα: 2.3.2: Τα τρία επίπεδα ευφύιας των ευφύων κεραιών

- **Στοιχειοκεραίες μεταβαλλόμενου λοβού**

Οι στοιχειοκεραίες μεταβαλλόμενου λοβού (Switched Lobe-SL) είναι η πιο απλή τεχνική και πραγματοποιείται με ένα πλέγμα από πολλαπλούς κατευθυντικούς λοβούς σε προδιαγεγραμμένες κατευθύνσεις. Το σύστημα ανιχνεύει το λόγο του σήματος προς το θόρυβο (Signal to Noise Ratio-SNR) ή προς τη παρεμβολή (Signal to Interference Ratio-SIR) και επιλέγει να «κλειδώσει» σε έναν από τους προκαθορισμένους λοβούς. Ακόμα, έχει τη

δυνατότητα να μεταφέρεται από τον ένα λοβό στον άλλο καθώς ο χρήστης κινείται στο χώρο κάλυψης.

Η βελτίωση της επίδοσης των στοιχειοκεραίων μεταβαλλόμενου λοβού σε αντίθεση με τις απλές στοιχειοκεραίες είναι προφανής. Αντί για τη δημιουργία ενός παγιωμένου διαγράμματος ακτινοβολίας, τα συστήματα μεταβαλλόμενου λοβού συνδυάζουν τα σήματα που λαμβάνουν τα επιμέρους στοιχεία χρησιμοποιώντας απλά τις μεταλλικές ιδιότητες και τη φυσική διάταξη της συστοιχίας κεραιών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργείτε ένα προσαρμοζόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας με μεγαλύτερη χωρική επιλεκτικότητα και αυξημένη κατευθυντικότητα.

Τέτοιας τεχνολογίας συστοιχία κεραιών χρησιμοποιεί αναλογικές τεχνικές Beamforming και είναι εύκολο να ενσωματωθεί στα υπάρχοντα κυψελωτά δίκτυα. Ωστόσο, όταν παρουσιάζονται διαδόσεις πολλαπλών δρόμων και ισχυρές παρεμβολές στην ίδια κατεύθυνση με το επιθυμητό σήμα χαρακτηρίζεται από μη ομοιόμορφο κέρδος (Scalloping) και μέτρια απόδοση. Έτσι η βελτίωση σε σχέση με τις πιο πολύπλοκες προσαρμοζόμενες κεραίες που περιγράφονται στη συνέχεια είναι περιορισμένη.

- **Στοιχειοκεραίες δυναμικής μεταβολής φάσης**

Στις στοιχειοκεραίες δυναμικής μεταβολής φάσης (Dynamically Phased Arrays-DPA) χρησιμοποιούμε έναν αλγόριθμο εκτίμησης DoA για το λαμβανόμενο σήμα από το κινητό τερματικό και έτσι είναι δυνατός ο συνεχής εντοπισμός του χρήστη. Η συγκεκριμένη τεχνική μπορεί να θεωρηθεί ως μια εξέλιξη της τεχνικής του μεταβαλλόμενου λοβού και εφαρμόζει ψηφιακό Beamforming. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της λαμβανόμενης ισχύος αφού όλα τα στοιχεία είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν για συνδυασμό διαφορεικής λήψης (Diversity Combine). Παρ' όλα αυτά δεν είναι εφικτή η αντιμετώπιση των παρεμβολών.

- **Προσαρμοστικές στοιχειοκεραίες**

Από τις ευφυείς κεραίες η πιο σύγχρονη είναι αυτή των προσαρμοστικών στοιχειοκεραίων (Adaptive Arrays-AA). Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιούνται προηγμένοι αλγόριθμοι εκτίμησης DoA και τεχνικές χωρικής διαφορικής λήψης για την εφεύρεση της κατεύθυνσης των πηγών των παρεμβολών και την προσαρμογή του διαγράμματος ακτινοβολίας, λαμβάνοντας υπόψιν το περιβάλλον διάδοσης. Οι προσαρμοστικές στοιχειοκεραίες με τον τρόπο αυτό έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν τις παρεμβολές και ταυτόχρονα να αυξήσουν το επιθυμητό λαμβανόμενο σήμα άρα και το SIR. Οι προσαρμοστικές στοιχειοκεραίες πραγματοποιούν προσαρμοστικό ψηφιακό Beamforming το οποίο στις μέρες μας μπορεί να υλοποιηθεί με επιτυχία λόγω της προόδου της τεχνολογίας των επεξεργαστών ψηφιακού σήματος.

2.4 Η εξέλιξη των έξυπνων κεραιών

Έξυπνη ή προσαρμοσμένη κεραία (smart or adaptive antenna) είναι αυτή που μετατρέπει τα λαμβανόμενα ή μεταδιδόμενα χαρακτηριστικά ώστε να αυξήσει την απόδοσή της.

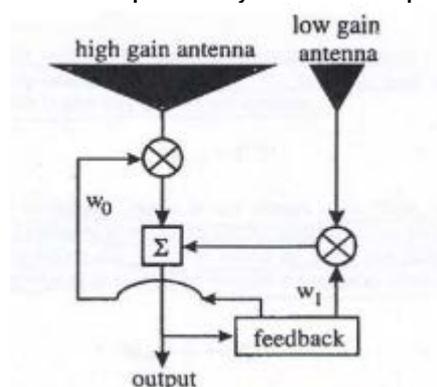
Τα συστήματα έξυπνων κεραιών απαρτίζονται από πολλαπλά στοιχεία κεραίας στη μεταδιδόμενη ή και την λαμβανόμενη πλευρά της γραμμικής επικοινωνίας. Το πλάτος ή και η φάση των λαμβανόμενων σημάτων όλων των κεραιών διαμορφώνονται κατάλληλα και έπειτα συνδυάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιωθεί η λήψη του επιθυμητού σήματος.

Ανάλογα με το αν η επεξεργασία πραγματοποιείται στον πομπό, το δέκτη ή και στα δύο άκρα της γραμμικής επικοινωνίας, η τεχνική έξυπνης κεραίας ορίζεται σαν πολλαπλής εισόδου-απλής εξόδου (MISO), απλής εισόδου-πολλαπλής εξόδου (SIMO), πολλαπλής εισόδου-πολλαπλής εξόδου (MIMO).

Οι έξυπνες κεραιές ήταν ευρέως διαδεδομένες ως ακυρωτές πλευρικών λοβών (sidelobe cancellers), μετά ως προσαρμοσμένες κεραιές (adaptive antennas) και πιο πρόσφατα ως έξυπνες κεραιές (smart antennas).

2.5 Ακυρωτές πλευρικών λοβών

Ο πρώτος τύπος έξυπνης κεραίας ήταν ο ακυρωτής πλευρικών λοβών, ο οποίος αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 50. Ένας ακυρωτής πλευρικών λοβών, διαθέτει μια κεραία υψηλού κέρδους για τη λήψη του επιθυμητού σήματος συνοδευόμενη από μια ή περισσότερες κεραιές ευρείας ζώνης και χαμηλού κέρδους για ακύρωση πλευρικών λοβών. Στην εικόνα 2.2.1 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ακυρωτή πλευρικών λοβών.



Εικόνα 2.2.1 Απλός βρόχος (loop) των Howells-Applebaum για ακυρωτές πλευρικών λοβών

Έως ότου το σήμα συνωστισμού εξαλειφθεί, οι έξοδοι των κεραιών μετρώνται και συνδυάζονται. Η ιδέα που επικρατεί είναι ότι η κεραία χαμηλού κέρδους ενισχύει το σήμα συνωστισμού περίπου το ίδιο με το επιθυμητό σήμα κοντά στην ενίσχυση του πλευρικού λοβού. Επιπρόσθετα όταν το σήμα της κεραίας χαμηλού κέρδους αφαιρείται από το σήμα της κεραίας υψηλού κέρδους, το επιθυμητό σήμα παραμένει σχεδόν το ίδιο, ενώ το σήμα

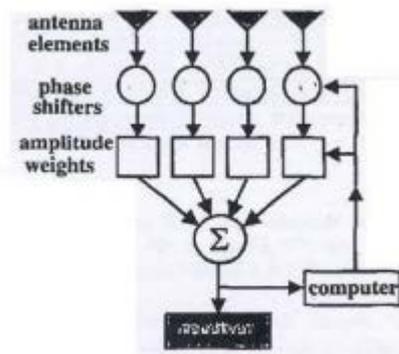
συνωστισμού ακυρώνεται. Η προσαρμοσμένη κεραία δημιουργήθηκε από το συνδυασμό αρκετών από αυτές τις επαναλήψεις (loops) σε μια συστοιχία κεραιών.

2.5.1 Προσαρμοσμένες κεραιές

Οι πρώτες προσαρμοσμένες κεραιές ήταν συστοιχίες κεραιών που χρησιμοποιούσαν την τεχνική ακύρωσης πλευρικών λοβών. Ένα λάθος προκύπτει όταν το λαμβανόμενο σήμα διαφέρει από το επιθυμητό σήμα:

$$\varepsilon_n = d_n - w^T \cdot s_n$$

όπου ε_n είναι η διαφορά μεταξύ του επιθυμητού σήματος (d) και του μετρούμενου (w) λαμβανόμενου σήματος (s).



Εικόνα 2.2.2 Το διάγραμμα μιας προσαρμοσμένης συστοιχίας κεραιών κάνοντας χρήση της συνολικής ισχύος εξόδου στον μηχανισμό ανάδρασης

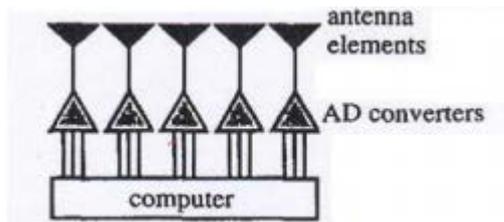
Στη συνέχεια υπολογίζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα και μετά τα βέλτιστα προσαρμοσμένα βάρη (weights). Τα βάρη ανανεώνονται επαναληπτικά και δίδονται από τη σχέση:

$$w_{n+1} = w_n + k \nabla_n$$

όπου η κλίση αναφέρεται στο μέσο τετραγωνικό σφάλμα.

2.5.2 Ψηφιακή διαμόρφωση δέσμης (beamforming)

Όταν κάθε στοιχείο στη συστοιχία κεραιών έχει ένα δέκτη τότε πίνακας συμμεταβλητότητας του σήματος σχηματίζεται εύκολα. Ιδανικά, τοποθετώντας έναν A/D μετατροπέα σε κάθε στοιχείο της συστοιχίας κεραιών τροφοδοτείται ο υπολογιστής όπου και πραγματοποιείται όλη η διαδικασία της διαμόρφωσης και οδήγησης της δέσμης, με ένα ψηφιακό σήμα (εικόνα 3.2.3). Οι πολλαπλές δέσμες είναι σημαντικές στη διάκριση στο χώρο των σημάτων σε ένα περιβάλλον πολλαπλών σημάτων. Η προσαρμοστική αλλαγή δεσμών (beams switching) καθώς και η τοποθέτηση μηδενικών στους πλευρικούς λοβούς γίνεται σχετικά εύκολα με έναν ψηφιακό διαμορφωτή δέσμης (digital beamformer). Δυστυχώς, η διακρίβωση και ανάπτυξη του hardware είναι ιδιαίτερα δύσκολη και ακριβή.



Εικόνα 2.2.3 Συστοιχία κεραιών ψηφιακής διαμόρφωσης δέσμης

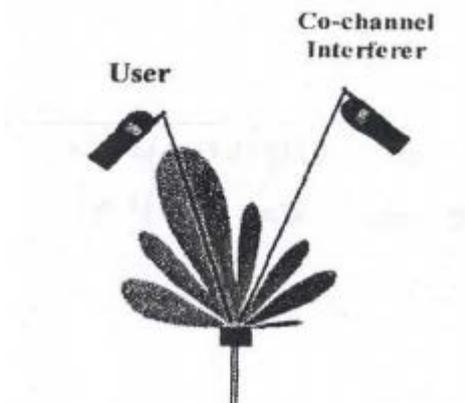
2.5.3 Έξυπνες κεραιές

Όλη η ιστορική εξέλιξη οδηγεί στις έξυπνες κεραιές. Η έκρηξη των εφαρμογών ασύρματων επικοινωνιών κάνει απαραίτητη καθιστά αναγκαία τη χρήση κεραιών που προσαρμόζουν βέλτιστα την απόδοσή τους, βασιζόμενες στο εκάστοτε περιβάλλον των σημάτων.

2.6 Συστήματα έξυπνων κεραιών

Παρόλο που θεωρείται ότι τα συστήματα έξυπνων κεραιών είναι σύγχρονη τεχνολογία, η θεμελιώδης θεωρία των έξυπνων κεραιών δεν είναι καινούργια. Είχαν χρησιμοποιηθεί στα συστήματα άμυνας κατά τον 2^ο παγκόσμιο πόλεμο. Τα τελευταία χρόνια, λόγω της ανάγκης ψηφιακών επεξεργασιών σήματος (DSPs) υψηλής ισχύος και χαμηλού κόστους καθώς και την ανάγκη καινοτόμων αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος, τα συστήματα έξυπνων κεραιών έγιναν πολύ πρακτικά για εμπορική-μαζική-χρήση.

Τα συστήματα έξυπνων κεραιών είναι ουσιαστικά μια επέκταση της τομεοποίησης κελιών, στην οποία η κάλυψη τομέα αποτελείται από πολλαπλές δέσμες. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας συστοιχίες κεραιών και τον αριθμός των δεσμών στον τομέα προσδιορίζεται συναρτήσει της γεωμετρίας της συστοιχίας κεραιών (για παράδειγμα ένας τομέας των 120°). οι έξυπνες κεραιές παρέχουν μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης για κάθε σταθμό βάσης, διότι μπορούν να εστιάσουν το μοντέλο ακτινοβολίας προς τους επιθυμητούς χρήστες ενώ ταυτόχρονα μπορούν να απορρίψουν την ανεπιθύμητη παρεμβολή (εικόνα 2.3)

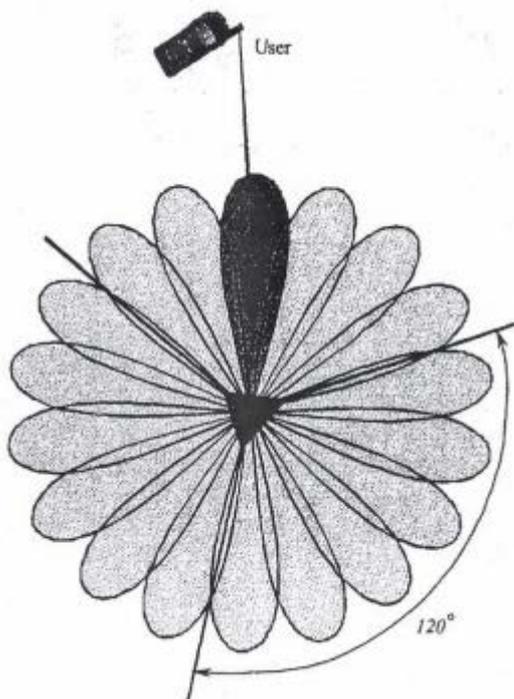


Εικόνα 2.3 Συγκαναλική παρεμβολή για ένα σύστημα έξυπνης κεραιάς

Επίσης, επειδή οι έξυπνες κεραιές έχουν μεγαλύτερη απόρριψη παρεμβολής και κατά συνέπεια χαμηλό BER (Bit Error Rate), παρέχουν μια ουσιαστική βελτίωση της χωρητικότητας. Τα συστήματα αυτά μπορούν γενικά να χωριστούν στα συστήματα μεταγωγής δέσμης (switched-beam) και στα συστήματα προσαρμοσμένης συστοιχίας κεραιών (adaptive-array).

2.6.1 Συστήματα μεταγωγής δέσμης (Switched-beam Systems)

Ένα σύστημα μεταγωγής δέσμης είναι ένα σύστημα το οποίο επιλέγει ένα από τα πολλά προκαθορισμένα μοντέλα, στοχεύοντας να αυξήσει το λαμβανόμενο σήμα (εικόνα 2.3.1). Είναι προφανώς μια προέκταση της τομεοποίησης κελιού (cell-sectoring), καθώς κάθε τομέας υποδιαιρείται σε μικρότερους τομείς. Όπως η κινητή μονάδα κινείται στο κελί, το σύστημα μεταγωγής δέσμης ανιχνεύει την ισχύ του σήματος, επιλέγει το κατάλληλο προκαθορισμένο μοντέλο δέσμης και συνεχίζει να μετακινεί τις δέσμες όσο χρειαστεί. Το συνολικό όφελος αυτού του συστήματος είναι η αύξηση κέρδους σύμφωνα με τη θέση χρήστη. Ωστόσο, εφόσον οι δέσμες είναι καθορισμένες, ο υποτιθέμενος χρήστης δεν χρειάζεται να είναι στο κέντρο του κυρίως λοβού. Σε περίπτωση παρεμβολής κοντά στο κέντρο του ενεργού λοβού ενδέχεται να αυξηθεί η παρεμβολή περισσότερο από τον επιθυμητό χρήστη.

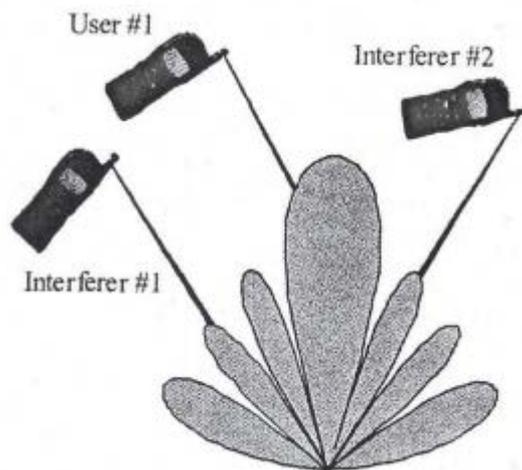


Εικόνα 2.3.1 Ένα σύστημα μεταγωγής δέσμης

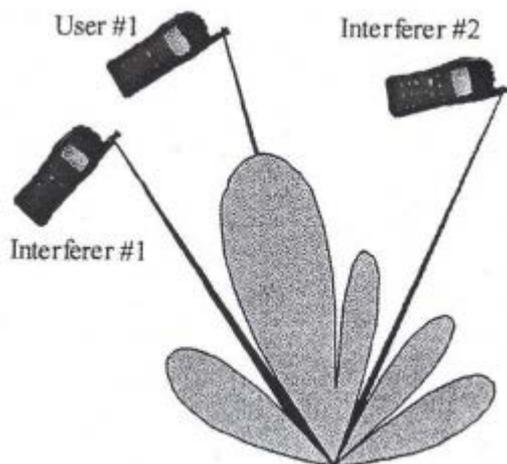
2.6.2 Συστήματα προσαρμοσμένης συστοιχίας κεραιών (Adaptive-Array Systems)

Τα συστήματα προσαρμοσμένης συστοιχίας κεραιών παρέχουν περισσότερους βαθμούς ελευθερίας καθώς έχουν τη ικανότητα να προσαρμόζουν το μοντέλο ακτινοβολίας στο RF περιβάλλον σήματος σε πραγματικό χρόνο. Επεξηγηματικά, μπορούν να κατευθύνουν την κύρια δέσμη προς το κύριο σήμα (pilot signal) ή σήμα ενδιαφέροντος (SOI) ενώ ταυτόχρονα να καταστέλλουν το μοντέλο κεραιάς στην κατεύθυνση των παρεμβολών ή των σημάτων που δεν ενδιαφέρουν. Απλούστερα τα συστήματα έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόσουν το κατάλληλο μοντέλο ακτινοβολίας για κάθε (ανεξάρτητο) μεμονωμένο χρήστη.

Η απόδοσή τους είναι πιο βελτιωμένη από την απόδοση του συστήματος μεταγωγής δέσμης. Οι εικόνες 2.3.2 και 2.3.2.1 δείχνουν ότι όχι μόνον το σύστημα μεταγωγής δέσμης δεν είναι ικανό να τοποθετήσει το επιθυμητό σήμα στο μέγιστο του κυρίως λοβού αλλά επίσης δείχνει την ανικανότητα του συστήματος να απορρίψει πλήρως τους παρεμβολείς.



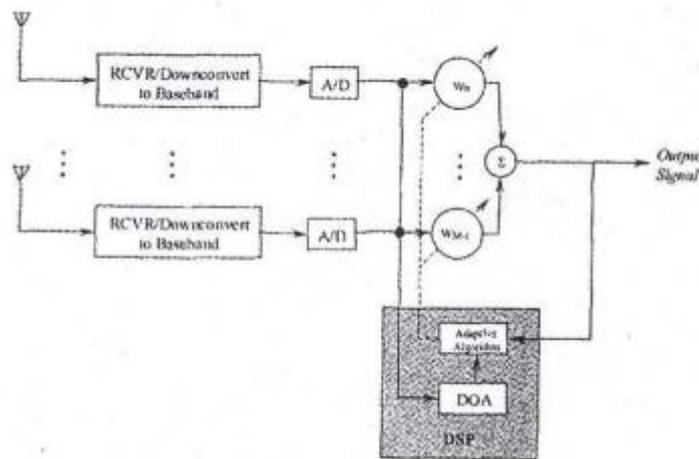
Εικόνα 2.3.2 Ένα σχήμα μεταγωγής δέσμης



Εικόνα 2.3.2.1 Ένα σχήμα προσαρμοσμένης συστοιχίας κεραιών

Τα συστήματα αυτά αυξάνουν σημαντικά τη χωρητικότητα, λόγω της ικανότητας των συστημάτων προσαρμοσμένης συστοιχίας κεραιών να ελέγχουν το συνολικό μοντέλο ακτινοβολίας σε μια μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης για κάθε κελί. Όταν παρουσιάζεται χαμηλού επιπέδου παρεμβολή και στα δυο συστήματα έξυπνων κεραιών τότε παρέχουν ικανοποιητικά κέρδη σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα. Σε περίπτωση παρουσίας παρεμβολής, που διαθέτουν τα συστήματα προσαρμοσμένης συστοιχίας κεραιών παρέχει ουσιαστικά μεγαλύτερη κάλυψη σε σχέση με τα συστήματα μεταγωγής δέσμης ή τα συμβατικά συστήματα.

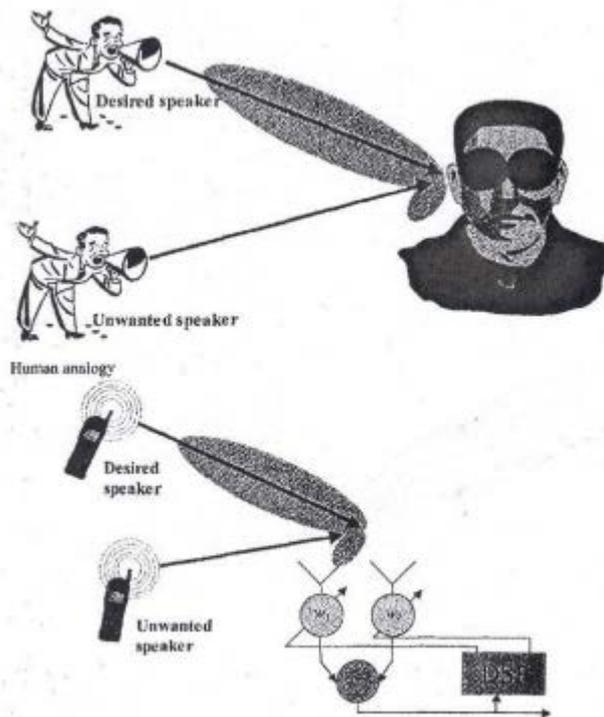
Τα συστήματα προσαρμοσμένης συστοιχίας κεραιών έχουν την ικανότητα να εντοπίσουν και να ανιχνεύσουν σήματα (χρήστες και παρεμβολή) όπως επίσης και να προσαρμόσουν το μοντέλο κεραιάς έτσι ώστε να αυξηθεί η λήψη ενώ ταυτόχρονα να μειωθεί η παρεμβολή χρησιμοποιώντας αλγορίθμους επεξεργασίας σήματος. Ένα μπλοκ διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος προσαρμοσμένης συστοιχίας κεραιών φαίνεται στην εικόνα 2.3.2.2



Εικόνα 2.3.2.2 Λειτουργικό μπλοκ διάγραμμα ενός συστήματος προσαρμοσμένης συστοιχίας κεραιών

2.6.3 Αναλογία έξυπνης κεραιάς

Η λειτουργία πολλών μηχανικών συστημάτων κατανοείται καλύτερα όταν συσχετίζεται με το σύστημα του ανθρώπινου σώματος μας. Προκειμένου να δώσουμε μια διαισθητική κατανόηση το πως λειτουργεί ένα σύστημα έξυπνης κεραιάς ας φανταστούμε δυο ανθρώπους που πραγματοποιούν μια συνομιλία μέσα σε ένα pitch-dark room (εικόνα 2.3.3).



Εικόνα 2.3.3 Αναλογία έξυπνης κεραίας

Αυτός που ακούει μεταξύ των δυο ατόμων, είναι σε θέση να καθορίσει την τοποθεσία (θέση) του ομιλητή καθώς κινείται στο δωμάτιο, επειδή η φωνή του ομιλητή φθάνει σε κάθε ακουστικό αισθητήρα-το αυτί- σε διαφορετική χρονική στιγμή. Ο ανθρώπινος επεξεργαστής σήματος ο εγκέφαλος υπολογίζει την κατεύθυνση του ομιλητή από τις χρονικές διαφορές ή καθυστερήσεις που λαμβάνονται από τα δυο αυτιά. Στη συνέχεια ο εγκέφαλος προσθέτει την ισχύ των σημάτων από κάθε αυτί έτσι ώστε να επικεντρωθεί στον ήχο της υπολογιζόμενης κατεύθυνσης. Επιπλέον, εάν προστεθούν και άλλοι ομιλητές, ο εγκέφαλος μπορεί να απομακρύνει τους ανεπιθύμητους παρεμβολείς και να συγκεντρωθεί σε μια συνομιλία κάθε φορά. Αντίστροφα αυτός που ακούει, μπορεί να αποκριθεί στην ίδια κατεύθυνση όπως ο επιθυμητός ομιλητής με το να προσανατολίσει τον πομπό του – το στόμα του προς τον ομιλητή. [4]

2.7 Πλεονεκτήματα των ευφυών κεραιών

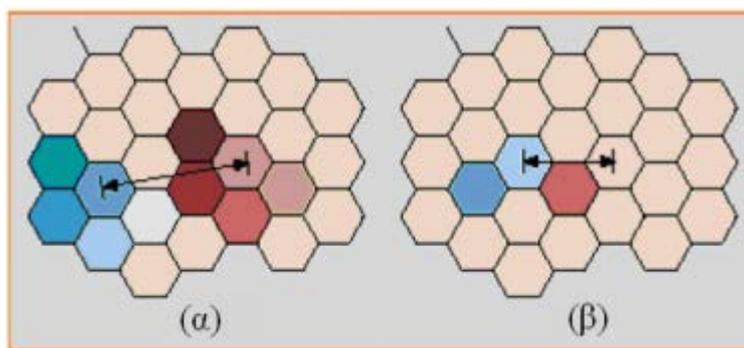
- **Καταστολή παρεμβολών και αύξηση χωρητικότητας**

Με την εφαρμογή των ευφυών κεραιών στους σταθμούς βάσης (Base Stations) εκμεταλλευόμαστε την δυνατότητα χωρικού περιορισμού της ισχύος εκπομπής προς το κάθε κινητό τερματικό. Η χωρική διαφορική λήψη μειώνει τις παρεμβολές μεταξύ των ομοδιαυλικών κινητών, πρόβλημα το οποίο ιδιαίτερα σε πυκνοκατοικημένες περιοχές είναι η κύρια πηγή παραμόρφωσης των σημάτων.

Παράλληλα η μείωση των παρεμβολών βελτιώνει το SIR, άρα και την ποιότητα του σήματος λόγω της μείωσης του Bit Error Rate (BER).

Ουσιαστικά, με τις ευφυείς κεραιές μπορούμε να εφαρμόσουμε αποτελεσματικά την τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση Χώρου (SDMA), η οποία επιτρέπει σε περισσότερα από ένα κινητά τερματικά να είναι καταναμημένα στο ίδιο φυσικό δίαυλο επικοινωνιών και να διαχωρίζονται από τη θέση και τη γωνία τους. Η τεχνική SDMA σε συνεργασία με άλλες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης βελτιστοποιεί τη χρήση του φάσματος των συχνοτήτων και αυξάνει σημαντικά τη χωρητικότητα του συστήματος.

Σε συστήματα που χρησιμοποιούν τις τεχνικές TDMA/FDMA (συστήματα GSM) η βελτίωση του SIR προσφέρει τη δυνατότητα μειωμένων αποστάσεων μεταξύ των κυψελών που χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα ή την ίδια χρονοσχισμή (Time Slot). Ένα παράδειγμα φαίνεται στο επόμενο σχήμα όπου η παραδοσιακή ομαδοποίηση των επτά κυψελών έχει μειωθεί σε ομαδοποίηση των τριών κυψελών. Αυτό οδηγεί σε βελτίωση της χωρητικότητας κατά 7/3.



Σχήμα: Απόσταση κυψελών με επαναχρησιμοποίηση συχνότητας (α) με χρήση συμβατικής κεραιάς και (β) με χρήση ευφυούς κεραιάς

Η μείωση των παρεμβολών με τη χρήση της τεχνικής SDMA μπορεί να βελτιώσει και τα συστήματα που βασίζονται σε τεχνικές CDMA (συστήματα UMTS). Σε αυτά τα συστήματα υπάρχει έντονο πρόβλημα παρεμβολών από άλλα κινητά τερματικά εξαιτίας του γεγονότος ότι οι κώδικες διασποράς (Spreading Codes) δεν είναι ιδανικά ορθογώνιοι. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται Παρεμβολή Πολλαπλής Πρόσβασης (Multiple Access Interference-MAI) και περιορίζει την χωρητικότητα του συστήματος.

- **Αύξηση κέρδους κεραιάς και περιοχής ραδιοκάλυψης**

Στις αγροτικές και αραιοκατοικημένες περιοχές όπου η πυκνότητα των κινητών τερματικών είναι χαμηλή η αύξηση της περιοχής ραδιοκάλυψης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο σε σχέση με την αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος. Με τις ομοιοκατευθυντικές κεραιές είχαμε σπατάλη ισχύος, αφού ακτινοβολούσαν ακόμα και σε κατευθύνσεις που δεν υπήρχαν κινητά τερματικά.

Η εφαρμογή των ευφυών κεραιών στους σταθμούς βάσης προσφέρει αύξηση της μέσης ισχύος του σήματος άρα και αυξημένο κέρδος κεραιάς (Array Gain). Το γεγονός αυτό επιτρέπει την αύξηση της περιοχής ραδιοκάλυψης (Radio-Coverage) του σταθμού βάσης και την μεγιστοποίηση του βεληνέκου. Οπότε οι σταθμοί βάσης θα μπορούν να τοποθετηθούν πιο μακριά ο ένας από τον άλλο και επιπλέον θα απαιτείται για κάποια συγκεκριμένη περιοχή μειωμένος αριθμός σταθμών βάσης άρα και μείωση του συνολικού κόστους του συστήματος χωρίς υποβάθμιση της ποιότητας υπηρεσίας.

Ωστόσο μερικές φορές υπάρχουν περιορισμοί στη μέγιστη τιμή του EIRP (Effective Isotropic Radiated Power), οι οποίοι δεν επιτρέπουν το επιπλέον κέρδος κεραιάς να χρησιμοποιείται για αύξηση της περιοχής ραδιοκάλυψης. Σε αυτήν την περίπτωση το επιπλέον κέρδος κεραιάς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να μειωθεί η ισχύς εκπομπής για το κινητό τερματικό. Έτσι απαιτούνται μπαταρίες μικρότερων δυνατοτήτων επιτρέποντας ελαφρύτερα και μικρότερα κινητά τερματικά και μεγαλύτερη διάρκεια-χρόνο ομιλίας με την ίδια μπαταρία.

- **Μείωση διαλείψεων και διάδοσης πολλαπλών δρόμων**

Το κέρδος κεραιάς μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την ενίσχυση του συστήματος ενάντια στις διαλείψεις (Fades) και στη διάδοση πολλαπλών δρόμων. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε στην πλευρά του δέκτη, είτε στην πλευρά του πομπού.

Στην πρώτη περίπτωση ο δέκτης συνδυάζει αντίγραφα του σήματος τα οποία έχουν διαδοθεί μέσω διαφορετικών ανεξάρτητων διαδρομών με αποτέλεσμα πιθανότητας όλα τα αντίγραφα να έχουν υποστεί συνθήκες ισχυρής διάλειψης (Deep Fade) να ελαχιστοποιείται. Το προκύπτον σήμα στο δέκτη είναι σαφώς πιο σταθερό με μειωμένες διακυμάνσεις.

Ο χωρικός διαφορισμός στην πλευρά του πομπού μπορεί να επιτευχθεί με ή χωρίς τη γνώση του καναλιού αρκεί να γίνει υιοθέτηση της χωρο-χρονικής κωδικοποίησης (Space-Time Coding) κατά τη διαδικασία της προεπεξεργασίας του εκπεμπόμενου σήματος.

Αποτέλεσμα της αντιμετώπισης των παραπάνω προβλημάτων είναι η μείωση της διασποράς χρόνου και κατ'επέκταση η αύξηση των επιτρεπόμενων ρυθμών μετάδοσης χωρίς την παρουσία ισοσταθμιστή (Equalizer), αλλά και ο αποτελεσματικότερος έλεγχος ισχύος.

- **Νέες υπηρεσίες και ασφάλεια**

Η εισαγωγή των ευφυών κεραιών θα ικανοποιήσει όπως αναφέραμε τις ανάγκες αύξησης χωρητικότητας ρυθμού μετάδοσης και γενικότερα ποιότητας υπηρεσίας. Τις βελτιώσεις αυτές αναμένεται να τις εκμεταλλευτούν τα δίκτυα 3^{ης} και 4^{ης} γενιάς για την παροχή προηγμένων υπηρεσιών πολυμέσων και Internet.

Επιπλέον η χρήση ευφυών κεραιών θα δώσει στα δίκτυα την δυνατότητα να έχουν πρόσβαση σε χωρικές πληροφορίες των χρηστών. Αυτές οι πληροφορίες θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της

θέσης των χρηστών ακριβέστερα από ότι στα υπάρχοντα δίκτυα και έτσι θα αυξηθεί η επίδοση των υπηρεσιών προσωπικών επικοινωνιών. Η υπηρεσία αυτή θα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε κλήσεις έκτακτης ανάγκης.

Όσο αναφορά την ασφάλεια η υποκλοπή συνδιάλεξης θα είναι πολύ δυσκολότερη όταν χρησιμοποιούνται ευφυείς κεραιές αφού ο υποκλοπέας πρέπει να βρίσκεται στην ίδια κατεύθυνση με το κινητό τερματικό για συγκεκριμένο σταθμό βάσης.

2.8 Μειονεκτήματα των ευφυών κεραιών

- **Πολυπλοκότητα πομποδέκτη**

Ένας πομποδέκτης που χρησιμοποιεί σύστημα ευφυούς κεραιάς είναι πολύ πιο πολύπλοκος από ένα παραδοσιακό πομποδέκτη σταθμού βάσης. Η κεραιά θα χρειάζεται ξεχωριστές συνδέσεις με τον πομποδέκτη για κάθε ένα από τα στοιχεία καθώς και ακριβή ρύθμιση σε πραγματικό χρόνο.

Επίσης η διαδικασία τροποποίησης των λοβών ακτινοβολίας της συστοιχίας κεραιών απαιτεί σημαντικό υπολογιστικό φόρτο, ειδικά για την περίπτωση των προσαρμοστικών κεραιών. Δηλαδή πρόκειται για ένα σταθμός βάσης που στηρίζεται στις ευφυείς κεραιές ο οποίος πρέπει να διαθέτει πολύ δυνατούς επεξεργαστές και αξιόπιστα συστήματα ελέγχου, άρα θα είναι πολύ πιο ακριβή η υλοποίησή του, σε σχέση με τους τωρινούς σταθμούς βάσης.

- **Διαχείριση εξοπλισμού και κινητικότητας**

Αν και οι ευφυείς κεραιές στηρίζονται κυρίως στην τεχνολογία RF, απαιτούν βελτιωμένες λειτουργίες δικτύων όπως η διαχείριση των πόρων (Resource Management) και της κινητικότητας (Mobility Management). Όταν μια νέα σύνδεση δημιουργείται ή μια υπάρχουσα σύνδεση ανατίθεται σε ένα νέο σταθμό βάσης καμία γωνιακή πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη. Επομένως προκειμένου να εντοπιστεί ο χρήστης, ο νέος σταθμός βάσης χρειάζεται κάποιο εναλλακτικό τρόπο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη συνεχή σάρωση της κυψέλης μέσω μιας δέσμης ανίχνευσης, η οποία θα μπορεί να εντοπίζει τις υποψήφιες νέες συνδέσεις ή αναθέσεις.

Μια άλλη δυνατότητα είναι η χρήση ενός εξωτερικού συστήματος για εντοπισμό θέσης όπως το GPS. Σε περίπτωση που δύο χρήστες έχουν την ίδια ακριβώς γωνία, ένας από αυτούς πρέπει γρήγορα να μετακινηθεί σε άλλο κανάλι ώστε η σύνδεση να μην διακοπεί. Αυτό σημαίνει ότι σε συστήματα που χρησιμοποιούν SDMA θα υπάρχουν πολύ περισσότερες μεταπομπές (μεταγωγές κυκλώματος) στην ίδια κυψέλη (Intracell Handovers) σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα TDMA ή CDMA.

- **Αύξηση φυσικού μεγέθους της συστοιχίας κεραιών**

Μια συστοιχία κεραιών με μεγάλο αριθμό στοιχείων είναι απαραίτητη για το μεγαλύτερο δυνατό κέρδος. Τυπικές στοιχειοκεραίες που αποτελούνται από 6-10 οριζόντια διαχωριζόμενα στοιχεία έχουν προταθεί για εξωτερικά περιβάλλοντα κινητών επικοινωνιών. Η αναγκαία απόσταση μεταξύ των

στοιχείων είναι 0.4-0.5 μήκη κύματος άρα μια συστοιχία κεραιών με οκτώ στοιχεία θα έχει μήκος περίπου 1.2m στα 900 MHz και 60cm στα 2GHz. [5]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.Μέθοδος Matrix-Pencil

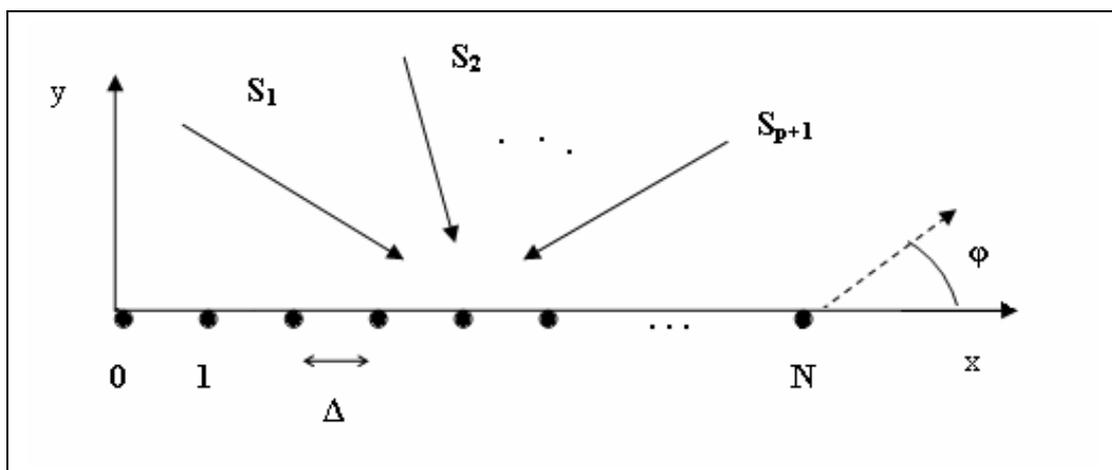
3.1 Αλγόριθμος Matrix-Pencil

Ο αλγόριθμος matrix-pencil έχει υλοποιηθεί και σε hardware συστήματα. Μια εκδοχή του matrix pencil υλοποιείται στο Chip WE-DSP32C-80 της εταιρίας AT&T η οποία όπως αναφέρεται λειτουργεί και σε πραγματικό χρόνο.

Η μέθοδος matrix-pencil είναι μια μέθοδος Direct Data Domain. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιείται μόνο ένα στιγμιότυπο από σύμφωνα σήματα. (π.χ. οι τάσεις που αναπτύσσονται στα στοιχεία της κεραιάς). Ως σύμφωνα θεωρούμε τα σήματα που χαρακτηρίζονται από τις ίδιες ακριβώς παραμέτρους όπως πλάτος φάση, πόλωση. Η κοινή παράμετρος καθορίζεται ανάλογα με την τεχνική πρόσβασης που χρησιμοποιείται.

3.1.1 Θεωρητική ανάλυση

Στο σχήμα που απεικονίζεται παρακάτω η διάταξη κεραιάς λήψης προσπίπτει σε ένα επίπεδο κύμα έχοντας ως άξονα αναφοράς τον άξονα που ορίζει η διάταξη των στοιχείων της κεραιάς (ευθύγραμμη διάταξη). Η θεωρητική ανάλυση γίνεται σε μια διάσταση.



Σχήμα: Ευθύγραμμη συστοιχία κεραιών με σημειακές πανκατευθυντικές και ισαπέχουσες πηγές- στοιχεία

Η διάταξη αυτή παρουσιάζει μια συστοιχία κεραιών που αποτελείται από πανκατευθυντικά ιστροπικά σημειακά στοιχεία κατά μήκος του άξονα x, τα οποία ισαπέχουν μεταξύ τους κατά απόσταση Δ.

Η τάση που επάγεται σε κάθε ένα από τα N+1 στοιχεία της κεραιάς, όταν προσπίπτουν πάνω της P+1 σήματα έχει την εξής μορφή:

$$x(n) = \sum_{p=0}^P A_p \exp(j\gamma_p + j2\pi\Delta n \cos \phi_p), \quad 0 \leq n \leq N$$

(3.9)

όπου A_p = το πλάτος, γ_p = η φάση και ϕ_p = η γωνία άφιξης για κάθε ένα από τα P+1 εισερχόμενα σήματα. Τα $x(n)$ αντιπροσωπεύουν τις μετρούμενες τάσεις σε κάθε ένα από τα στοιχεία. Σκοπός είναι να βρεθεί ο αριθμός των σημάτων P και τα χαρακτηριστικά κάθε προσπίπτοντος σήματος, δηλαδή τα μεγέθη A_p , γ_p , ϕ_p . Η σχέση (3.9) μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά με την παρακάτω μορφή:

$$x(n) = \sum_{p=0}^P c_p y_p^n$$

(3.10)

$$c_p = A_p \exp(j\gamma_p)$$

(3.11)

$$y_p = \exp(j2\pi\Delta \cos \phi_p)$$

(3.12)

Σύμφωνα με τη θεωρία πινάκων από τα μαθηματικά, μπορούμε να εκφράσουμε τις παρακάτω σχέσεις στην παρακάτω μορφή:

$$[G]=[Y][C]$$

(3.13)

$$\mu\epsilon \ [G]= \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ \vdots \\ x(N) \end{bmatrix}$$

(3.14)

$$[Y]= \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ y_0 & y_1 & \dots & y_P \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_0^N & y_1^N & \dots & y_P^N \end{bmatrix}$$

(3.15)

$$\kappa\alpha\iota \ [C]= \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_P \end{bmatrix}$$

(3.16)

Έπειτα κατασκευάζεται ο πίνακας $[X]$, $L \times (N-L+2)$ διαστάσεων:

$$[X]= \begin{bmatrix} x(0) & x(1) & \dots & x(N-L+1) \\ x(1) & x(2) & \dots & x(N-L+2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(L-1) & x(L) & \dots & x(N) \end{bmatrix}$$

(3.17)

του οποίου οι στήλες προκύπτουν από τον πίνακα $[G]$, με επιλογή L διαδοχικών στοιχείων. Η παράμετρος L , ονομάζεται και **pencil parameter**, ορίζεται έτσι ώστε να ικανοποιεί την ανίσωση:

$$N+1-P \geq L \geq P+2 \quad (3.18)$$

Η παράμετρος L προσδιορίζει το πλήθος των ιδιοτιμών που παράγονται από τον αλγόριθμο matrix-pencil και κατά συνέπεια επιλογή κατάλληλης τιμής της παραμέτρου που μπορούν να βελτιώσουν τα αποτελέσματα.

Ύστερα υπολογίζεται η SVD (singular Value Decomposition) του πίνακα $[X]$, η οποία εκφράζεται μαθηματικά με την παρακάτω σχέση:

$$[X] = [U][\Sigma][V]^H \quad (3.19)$$

όπου $[U]$ είναι ο ένας μοναδιαίος πίνακας διαστάσεων $(L \times L)$, όπου οι στήλες είναι τα ιδιοδιανύσματα του $[X][X]^H$, και $[\Sigma]$ είναι ένας διαγώνιος πίνακας $(L \times (N-L+2))$ διαστάσεων, στην κύρια διαγώνιο του οποίου είναι οι singular τιμές του $[X]$ (δηλαδή αυτές που δίνουν διακρίνουσα μηδέν) με φθίνουσα σειρά ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_{\min}$) και $[V]$ είναι ένας μοναδιαίος πίνακας διαστάσεων $((N-L+2) \times (N-L+2))$, του οποίου οι στήλες είναι τα ιδιοδιανύσματα του $[X]^H[X]$. Ο εκθέτης H εκφράζει τον συζυγή μιγαδικό του πίνακα X .

Εάν υποθέσουμε ότι δεν υπάρχει θόρυβος, τότε οι πρώτες $P+1$ τιμές των σ_i είναι μη μηδενικές. Επομένως έχουμε $\sigma_i > 0$ για $i=0, \dots, P$ και $\sigma_i = 0$ για $i=P+1, \dots, L$. Όταν όμως στα δεδομένα έχει προστεθεί θόρυβος καμία τιμή των σ δεν είναι απολύτως μηδέν. Έτσι για να βρούμε το P υπολογίζουμε για κάθε μια τιμή τον λόγο σ_c / σ_{\max} όπου η μεγαλύτερη τιμή των singular τιμών. Όταν ο λόγος αυτός είναι μικρότερος από μια τιμή κατωφλίου που έχουμε θέσει δεν συνυπολογίζονται για την εύρεση του P .

Έπειτα κατασκευάζονται τρεις πίνακες από τις $P+1$ μη μηδενικές singular τιμές:

$$\begin{aligned} [U]_s &: \text{οι πρώτες } P+1 \text{ στήλες του } [U] \\ [\Sigma]_s &: \text{οι πρώτες } P+1 \text{ στήλες του } [\Sigma] \\ [V]_s &: \text{οι πρώτες } P+1 \text{ στήλες του } [V] \end{aligned}$$

$$[U_1] = [U]_s: \text{χωρίς την τελευταία σειρά}$$

$$[U_2] = [U]_s: \text{χωρίς την πρώτη σειρά}$$

και σχηματίζονται οι εξισώσεις πινάκων:

$$[U_2] - \lambda [U_1] = 0 \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} ([U_2] - \lambda [U_1])[X] &= 0 \\ (3.21) \\ [U_1]^H [U_2][X] &= \lambda [U_1]^H [U_2][X] \end{aligned}$$

(3.22)

$$[U_1]^H [U_1]^{-1} [U_1] [U_2] [X] = \lambda [X]$$

(3.23)

$$[U_1]^+ [U_2] [X] = \lambda [X]$$

(3.24)

όπου ο $[U_1]^+$ είναι ο ψευδοαντίστροφος πίνακας των Moore-Penrose και ορίζεται ως:

$$[U_1]^+ = [U_1]^H [U_1]^{-1} [U_1]^H$$

(3.25)

$$\Phi_p = \arccos \left[\frac{\ln(y_p)}{j2\pi\Delta} \right]$$

(3.26)

Τα πλάτη και οι φάσεις των P+1 σημάτων υπολογίζονται από τη σχέση (3.10) χρησιμοποιώντας την αρχή των ελαχίστων τετραγώνων:

$$[C] = ([Y]^H [Y])^{-1} [Y]^H [G]$$

(3.27)

Χρειάζεται ένα διάνυσμα [C], το οποίο θα ελαχιστοποιεί την ποσότητα:

$$([Y][C]-[G])^H ([Y][C]-[G])$$

(3.28)

Εάν $\text{rank}([Y])=P+1$, τότε υπάρχει μοναδική λύση

$$[C] = ([Y]^H [Y])^{-1} [Y]^H [G] = [Y]^T [G]$$

(3.29)

3.2 Νευρωνικά δίκτυα και άλλες προσεγγίσεις

Μια άλλη δημοφιλής προσέγγιση βασίζεται στη μέθοδο Matrix Pencil (MP) όπου η εκτίμηση DoA μπορεί να είναι αποτελεσματική και με ένα μόνο στιγμιότυπο των λαμβανόμενων σημάτων, μειώνοντας έτσι τον υπολογιστικό χρόνο. Επίσης η μέθοδος matrix pencil δουλεύει και για συσχετισμένα σήματα. Το μειονέκτημα της είναι ότι για συστοιχία κεραιών με M στοιχεία μπορεί να γίνει ακριβής εκτίμηση για $N \leq (M+1)/2$ σήματα. [6]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. Πειραματικοί μέθοδοι εκτίμησης

4.1 Εισαγωγή

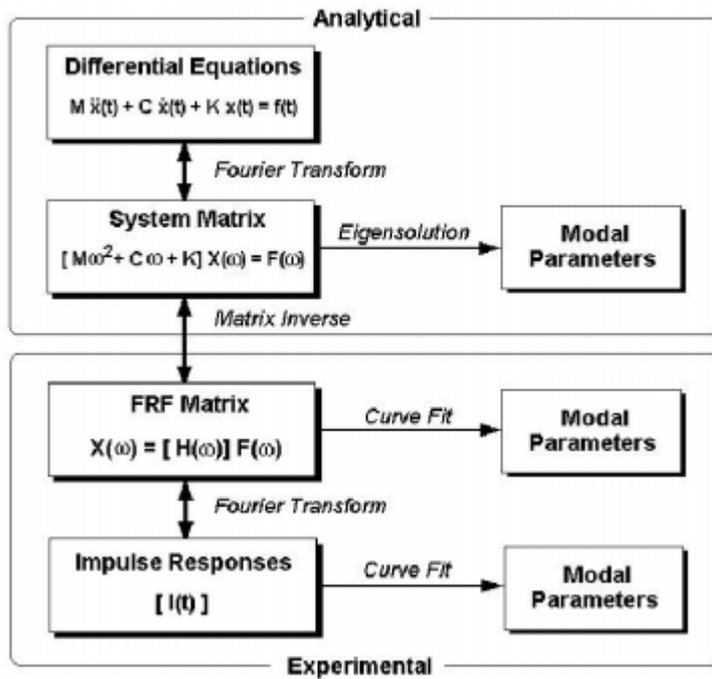
Αντίθετα με τις υπολογιστικές μεθόδους που εργάζονται στα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας, οι πειραματικοί αλγόριθμοι εκτίμησης ιδιοανυσματικών μεγεθών χρησιμοποιούν σαν είσοδο συνάρτηση μεταφοράς μιας κατασκευής όπως προκύπτει από το συσχετισμό της απόκρισής της (επιτάχυνση) με τη δύναμη που την διεγείρει στο εύρος των συχνοτήτων που εξετάζεται κάθε φορά.

Οι συσχετισμοί διέγερσης – απόκρισης συγκεντρώνονται σε έναν πίνακα δεδομένων την συνάρτηση μεταφοράς (**FRF**) και βασικός σκοπός των μεθόδων είναι να καταφέρουν να την προσδιορίσουν ή να την προσεγγίσουν (**curve fitting**) ώστε να εξάγουν αποτελέσματα για το ποιες ιδιοσυχνότητες έχει η κατασκευή, ποιος συντελεστής απόσβεσης αντιστοιχεί στην καθεμία καθώς και ποιο είναι το σχήμα της ταλάντωσης σε κάθε μια από αυτές τις ιδιοσυχνότητες (ιδιομορφή).

Τα πιο βασικά εργαλεία τέτοιων μεθόδων είναι η πολυωνυμική παρεμβολή, η παραμετροποίηση, η λύση ιδιοανυσματικών προβλημάτων και η χρήση μετασχηματισμών της γραμμικής άλγεβρας, όπως ο **singular value decomposition**.

Η συνάρτηση μεταφοράς **FRF** είναι ορισμένη στο πεδίο της συχνότητας. Στις πειραματικές μεθόδους υπάρχει ο εξής βασικός διαχωρισμός ανάλογα με το πεδίο που εργάζονται:

- **Frequency Domain:** είναι οι μέθοδοι που εργάζονται στο πεδίο των συχνοτήτων. Λαμβάνουν σαν είσοδο το φάσμα της **FRF**.
- **Time Domain:** είναι οι μέθοδοι που εργάζονται στο πεδίο του χρόνου. Λαμβάνουν σαν είσοδο το σήμα της **IRF** της παραμετροποιημένης συνάρτησης που προκύπτει από την εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού **Fourier** στην **FRF**.



Σχήμα 4.1: Διαφορές υπολογιστικής προσέγγισης από πειραματική

Στη συνέχεια της εργασίας παρουσιάζονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα της κάθε μεθόδου:

FDPI:

- εντοπίζει πολλές ιδιοσυχνότητες και όχι μια κάθε φορά
- ικανή να εντοπίζει ιδιοανύσματα με υψηλό συντελεστή απόσβεσης
- ικανή να εργάζεται με χαμηλό εύρος συχνοτήτων και με χαμηλούς συντελεστές απόσβεσης

Matrix Pencil:

- ιδανική για χαμηλούς συντελεστές απόσβεσης
- ικανή στο θόρυβο

Prony:

- ιδανική για χαμηλούς συντελεστές απόσβεσης
- όχι τόσο ικανή στο θόρυβο

Ibrahim Time Domain:

- ικανή να εντοπίζει ιδιοανύσματα με υψηλό συντελεστή απόσβεσης
- εργάζεται και στην περίπτωση της ελεύθερης απόκρισης

4.2 Μέθοδος Matrix Pencil

Με την εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier στη συνάρτηση μεταφοράς **FRF** λαμβάνεται η παραμετροποιημένη συνάρτηση μεταφοράς στο πεδίο του χρόνου (**IRF**):

$$[x] = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_m \ x_n)$$

(4.27)

όπου ορίζεται:

AR order=αριθμός ιδιοσυχνοτήτων $\times 2=m$

sub order=αριθμός ιδιοσυχνοτήτων $=m/2$

(4.28)

κατασκευάζονται οι πίνακες:

$$[X] = (x_m \ \dots \ \dots \ x_{n-m})$$

(4.29)

$$[Y] = (x_m \ \dots \ \dots \ x_1)$$

(4.30)

με τη χρήση των οποίων δημιουργείται ο πίνακας **Toeplitz**[T]:

$$[T] = \begin{pmatrix} x_m & x_{m-1} & x_{m-2} & \dots & \dots & x_2 & x_1 \\ x_{m+1} & x_m & x_{m-1} & \dots & \dots & x_3 & x_2 \\ x_{m+2} & x_{m+1} & x_m & \dots & \dots & x_4 & x_3 \\ \vdots & \vdots & x_{m+1} & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_{n-1} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & x_{n-m} \end{pmatrix}$$

(4.31)

ο οποίος ονομάζεται $[Y_0]$

και ο:

$$[T] = \begin{pmatrix} x_{m+1} & x_m & x_{m-1} & \dots & \dots & x_3 & x_2 \\ x_{m+2} & x_{m+1} & x_m & \dots & \dots & x_4 & x_3 \\ x_{m+3} & x_{m+2} & x_{m+1} & \dots & \dots & x_5 & x_4 \\ \vdots & \vdots & x_{m+2} & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_n & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & x_{n-m+1} \end{pmatrix}$$

(4.32)

Εφαρμόζεται ο **SVD** μετασχηματισμός (singular value decomposition) στον πίνακα

$$[Y_0] : \begin{matrix} [U] & [s] & [V^H] \\ (n-m) \times m & 1 \times m & m \times m \end{matrix}$$

(4.33)

και ο πίνακας

$$[s] = \begin{matrix} (s_1 & s_2 & \dots & \dots & s_m) \\ 1 \times m \end{matrix} \text{ μετασχηματίζεται στον}$$

$$[s'] = \begin{matrix} \left(\frac{1}{s_1} & \frac{1}{s_2} & \dots & \dots & \frac{1}{s_m} \right) \\ 1 \times m \end{matrix}$$

(4.34)

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο πίνακας [Λ]:

$$[A] = [s'] U^T$$

(4.35)

με κάθε στοιχείο από τον τύπο:

$$\frac{1}{s_i} (u_{i1} \quad u_{i2} \quad \dots \quad u_{i(n-m)})$$

(4.36)

έπειτα παράγεται ο πίνακας [P]:

$$[P] = \begin{matrix} [A] & x & [Y_1] \\ (m \times m) & m \times (n-m) & (n-m) \times m \end{matrix}$$

(4.37)

και από αυτόν ο:

$$[Π] = \begin{matrix} [P] & x & [V] \\ m \times m & (m \times m) & m \times m \end{matrix}$$

(4.38)

$$[Z_e] = \begin{matrix} \dot{Π} \\ \frac{m}{2} \times \frac{m}{2} \end{matrix}$$

(4.39)

Υπολογίζονται οι ιδιοτιμές του [Z_e] :

$$[e] = (e_1 \quad e_2 \quad \dots \quad e_{m/2})$$

(4.40)

δημιουργείται ο πίνακας:

$$[E] = \begin{pmatrix} e_1^0 & e_2^0 & \cdots & e_{m/2}^0 \\ e_1^1 & e_2^1 & \cdots & e_{m/2}^1 \\ e_1^2 & e_2^2 & \cdots & e_{m/2}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_1^n & e_2^n & \cdots & e_{m/2}^n \end{pmatrix}$$

(4.41)

και λύνεται το γραμμικό σύστημα:

$$[E] \cdot [A] = [X^T]$$

$n \times m/2$ $n \times l$

(4.42)

[A] το πλάτος σε μιγαδική μορφή.

Και έτσι υπολογίζεται:

$$[A] = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ \vdots \\ a_{m-1} \\ a_m \end{pmatrix}$$

(4.43)

όπου ισχύει:

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ \vdots \\ a_{m-1} \\ a_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2^* \\ a_2 \\ a_3^* \\ a_3 \\ \vdots \\ a_{m-1}^* \\ a_{m-1} \end{pmatrix}$$

(4.44)

απομακρύνονται τα συζυγή στοιχεία του πίνακα και φιλτράρονται οι αρνητικές συχνότητες. Οι αριθμοί γράφονται σε μορφή πλάτους-φάσης (r,θ) και r το πλάτος της ταλάντωσης ενώ στο θ προστίθεται γωνία 2π και διαιρείται με 2π. Το υποσύνολο της τελευταίας διαίρεσης είναι η φάση κάθε ιδιοσυχνότητας.

Τέλος γράφονται τα ιδιοδιανύσματα σε μορφή (r, θ) και οι συντελεστές απόσβεσης υπολογίζονται ως $j=ln$ της ενώ οι ιδιοσυχνότητες υπολογίζονται από την διαίρεση του με 2π και στη συνέχεια με την συχνότητα δειγματοληψίας.

[7]

4.3 Εκτίμηση DoA σημάτων σε χώρο τριών διαστάσεων για συστήματα ευφυών κεραιών

Οι ευφυείς κεραιές έχουν κινήσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών αποτελώντας συστήματα ικανά να ενισχύσουν τις επιδόσεις κινητών αλλά και σταθερών δικτύων ασύρματων επικοινωνιών που στις μέρες μας είναι σημαντικά στα συστήματα 4G. Η δυνατότητα που έχουν είναι να προσαρμόζουν το διάγραμμα ακτινοβολίας τους στο ηλεκτρομαγνητικό τους περιβάλλον. Επιπρόσθετα μπορούν εκμεταλλευόμενες την παράμετρο του χώρου να συνδυαστούν με όλες τις μεθόδους πολλαπλής πρόσβασης σε δίκτυα επικοινωνιών που χρησιμοποιούν την παράμετρο του χρόνου τη συχνότητα ή κάποιον άλλο κώδικα. Η ικανότητά τους να λειτουργούν σαν «χωρικά φίλτρα» μεταξύ των χρηστών που χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι επικοινωνίας ή μεταξύ χρήστη και παρεμβολέων μπορεί να βοηθάει στην αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου και τη βελτίωση του SNIR του χρήστη. Η λειτουργία ενός προσαρμοστικού συστήματος ευφυούς κεραιάς (Adaptive Smart Antennas System) προϋποθέτει την γνώση των διευθύνσεων άφιξης των προσπιπτόντων σημάτων του χρήστη που εξυπηρετείται καθώς και των παρεμβολέων. Για το λόγο αυτό η εφαρμογή ειδικών αλγορίθμων εκτίμησης DoA (Direction of Arrival) της διεύθυνσης των σημάτων προηγείται της διεργασίας προσαρμογής της δέσμης η οποία έχει σαν στόχο να ενισχύσει το σήμα του χρήστη και παράλληλα να αποκλείσει τους παρεμβολείς.

Μελετήθηκαν συστήματα επίπεδης συστοιχία κεραιών σημειακών ιστροπικών πηγών για την περίπτωση ενός και δύο προσπιπτόντων σημάτων. Οι αλγόριθμοι αναπτύχθηκαν στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab. Τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τις εφαρμογές του αλγορίθμου Matrix Pencil σε όλες τις στοιχειοκεραίες δυο διαστάσεων και τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν συνοψίζοντας τα εξής:

- Ο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση του αλγορίθμου είναι οι αποστάσεις μεταξύ των στοιχείων της κεραιάς. Οι επιδόσεις του είναι πολύ καλές για μικρές αποστάσεις στοιχείων τις τάξεως του 0.25λ. Αντίθετα το πλήθος των στοιχείων της κεραιάς φαίνεται να έχει πολύ μικρή έως μηδενική επίδραση στην απόδοση του αλγορίθμου. Παρατηρήθηκε βέβαια ότι οι κεραιές με πολύ μικρό αριθμό στοιχείων για παράδειγμα (3X3) είναι πιο ευαίσθητες στη μεταβολή της τιμής της διαφοράς στάθμης ισχύος μεταξύ των προσπιπτόντων σημάτων καθώς τα στατιστικά αποτελέσματα δείχνουν σημαντικές διακυμάνσεις μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης σε σχέση με τη μεταβολή της τιμής της διαφοράς στάθμης ισχύος των σημάτων.
- Η γενική παρατήρηση που προκύπτει από όλες τις περιπτώσεις (κεραίες με διαφορετικό πλήθος στοιχείων και αποστάσεις μεταξύ των στοιχείων) είναι ότι ο αλγόριθμος δίνει πολύ καλά αποτελέσματα για σήματα που προέρχονται από οποιαδήποτε διεύθυνση του χώρου

ακόμη και όταν οι διευθύνσεις των σημάτων σχηματίζουν μικρή γωνία μεταξύ τους μόνο όταν η απόσταση μεταξύ των στοιχείων της κεραίας είναι μικρή. Για μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ των στοιχείων τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά μόνο όταν προέρχονται από περιοχές με μεγάλη γωνία ανύψωσης σε σχέση με το επίπεδο της κεραίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ των στοιχείων τόσο η γωνία ανύψωσης είναι μεγαλύτερη. Όλες αυτές οι παρατηρήσεις είναι κοινές για όλες τις κεραίες ανεξαρτήτως αριθμού στοιχείων.

- Ο αλγόριθμος σε όλες τις περιπτώσεις βρίσκει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη διεύθυνση άφιξης του ισχυρότερου σήματος. Τα σφάλμα προσδιορισμού του δεύτερου σήματος αυξάνει καθώς μειώνεται η ισχύς του. [8]

4.4 Αλγόριθμος μετατροπής από μήτρα συστήματος σε εξισώσεις κατάστασης (MATRIX PENCILS)

Σκοπός αυτής της παραγράφου είναι να υποδείξει ένα τρόπο για τη μετατροπή συστημάτων διαφορικών εξισώσεων ανωτέρου βαθμού που μοντελοποιούνται με πολυωνυμικές μήτρες στη μορφή $T(s) \cdot \xi(s) = U(s) \cdot u(s)$, σε εξισώσεις κατάστασης. Το πρώτο μας μέλημα είναι να ελέγξουμε αν η μήτρα $U(s)$ είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τη μεταβλητή s . Αν όντως είναι, τότε η μετατροπή είναι εύκολη επεκτείνοντας τη μήτρα T και με μετασχηματισμούς ομοιότητας μπορεί κανείς να τη φέρει στη μορφή $T(s) = sI - A$ όπου A είναι μια σταθερή μήτρα ανεξάρτητη από τη μεταβλητή s . Σε διαφορετική περίπτωση όπου δηλαδή η μήτρα U δεν είναι σταθερή τότε επειδή στις εξισώσεις κατάστασης οι εισόδοι εμφανίζονται σαν ανεξάρτητες συναρτήσεις και όχι σαν παράγωγοι άλλων συναρτήσεων, είναι απαραίτητο να θέσουμε μερικές από τις καταστάσεις του συστήματος ίσες με τις αρχικές εισόδους στις οποίες η αντίστοιχη στήλη της εισόδου στη μήτρα U έχει βαθμό μεγαλύτερο ή ίσο του ένα. Η διαπίστωση αυτή προέρχεται από τη σκέψη πως αφού σε μια περιγραφή με εξισώσεις κατάστασης οι εισόδοι δεν μπορούν να εμφανιστούν ως παράγωγοι άλλων συναρτήσεων και με δεδομένο το ότι μπορούμε να παραγωγίσουμε τις καταστάσεις, τόσο όσον αφορά τις πρώτες παραγώγους αλλά και διαδοχικά παραγωγίζοντας είναι εύκολο να φτάσουμε σε παραγώγους οποιασδήποτε τάξης. Επίσης είναι εύκολο να διαπιστώσει κανείς πως για κάθε επιπλέον παράγωγο κάθε μεταβλητής εισόδου απαιτείται και μια επιπλέον μεταβλητή, με συνέπεια να χρειάζονται τόσες μεταβλητές όση είναι και η πολυπλοκότητα της μήτρας U , με δεδομένο πως η τάξη της είναι ίση με την πολυπλοκότητά της, δηλαδή η μήτρα που περιέχει τους μεγιστοβάθμιους συντελεστές της κάθε στήλης έχει πλήρη βαθμό. Η περίπτωση όπου η τάξη της U είναι μικρότερη από την πολυπλοκότητά της μπορεί φυσικά να αναχθεί στην προηγούμενη εφαρμόζοντας συγκεκριμένες γραμμοπράξεις πάνω στις μήτρες T και U .

Σύμφωνα με τα παραπάνω για κάθε μεταβλητή απαιτούνται επιπλέον r_k μεταβλητές όπου r_k είναι ο βαθμός της k -στήλης της μήτρας $U(s)$. Επεκτείνοντας τη μήτρα T , είναι απαραίτητο να εισαχθούν μηδενικές γραμμές και στη μήτρα $U(s)$ ώστε να συμφωνούν οι διαστάσεις των μητρικών εξισώσεων.

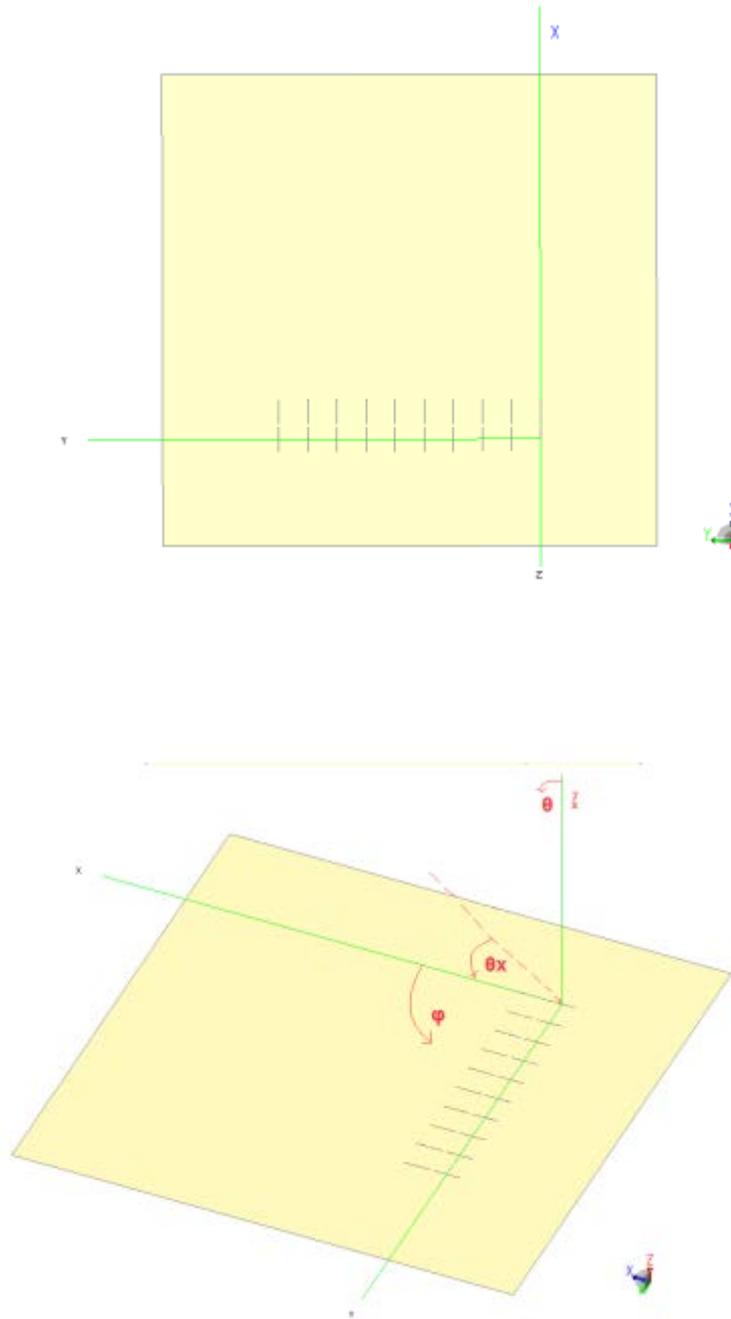
Επίσης επειδή χρειαζόμαστε εν γένει παραγώγους ανώτερης τάξης η μήτρα T επεκτείνεται κατά τρόπο ώστε να περιέχει μονάδες στην κύρια διαγώνιο και τη μεταβλητή s στη διαγώνιο η οποία βρίσκεται ακριβώς κάτω από την κύρια διαγώνιο. Επιπλέον, η μετασχηματισμένη μήτρα U θα περιέχει τελικά μόνο σταθερά στοιχεία όπως άλλωστε ήταν και ο αρχικός μας στόχος. Επίσης στην περιοχή των αρχικών εξισώσεων μπαίνουν όπως είναι γνωστό οι συντελεστές της αντίστοιχης γραμμής της αρχικής μήτρας U . [9]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

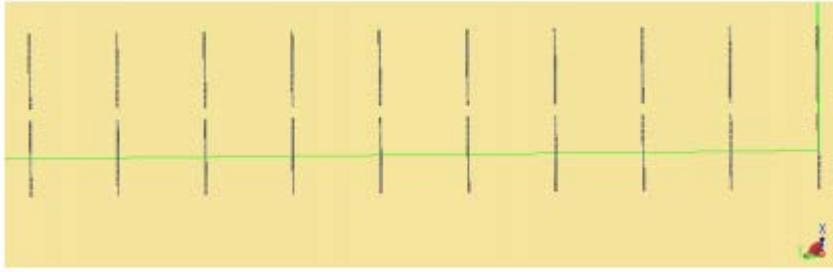
5. Εφαρμογή αλγορίθμων σε σύστημα επίπεδης συστοιχίας κεραιών 2×10 διπόλων

5.1 Γεωμετρία της επίπεδης συστοιχίας κεραιών 2×10 διπόλων

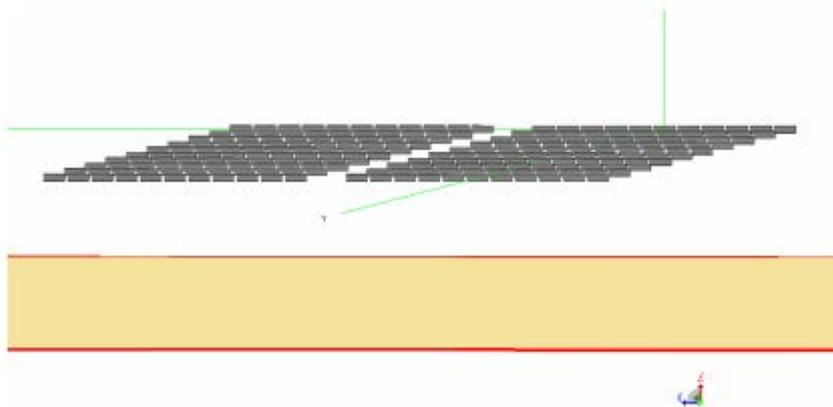
Από άλλες εργασίες φοιτητών οι οποίες παρατίθενται στις αναφορές Η κεραία αποτελείται από 2×10 δίπολα τοποθετημένα στο επίπεδο xy . Η κατανομή των δίπολων είναι σε δυο γραμμικές συστοιχίες στον άξονα x που η καθεμία αποτελείται από 10 δίπολα στον άξονα y , όπως φαίνεται στα σχήματα 5.1, 5.2 και 5.3. Το μήκος των δίπολων είναι $\lambda_0 / 2.275$. Τα κέντρα των δίπολων στον άξονα x έχουν απόσταση μεταξύ της $0.5\lambda_0$ αντίστοιχα και στον άξονα y . Κάθε δίπολο αποτελείται από 11 segments και στο κεντρικό είναι η τροφοδοσία του. Σε απόσταση $0.25 \lambda_0$ από το επίπεδο των δίπολων, στον άξονα z , είναι τοποθετημένος ο ανακλαστήρας διαστάσεων $8.5 \lambda_0 \times 8.5 \lambda_0$. Για την προσομοίωση της κεραίας χρησιμοποιείται η Μέθοδος των Ροπών ενώ για τον ανακλαστήρα χρησιμοποιείται η μέθοδος **Uniform Geometrical Theory of Difraction (UTD)**.



Σχήμα 5.1: Επίπεδη συστοιχία κεραιών 2×10 διπόλων



Σχήμα 5.2: Απόσταση κέντρων δίπολων στον άξονα x $0.5\lambda_0$ αντιστοίχως και στον άξονα y



Σχήμα 5.3: Απόσταση δίπολων από τον ανακλαστήρα ($0.25 \lambda_0$)

5.2 Προσδιορισμός διεύθυνσης άφιξης των σημάτων (DOA)

Για να γίνει ο προσδιορισμός των διευθύνσεων άφιξης σημάτων εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος Matrix Pencil σε τρεις περιπτώσεις.

- Ιδανική συστοιχία κεραιών σημειακών πηγών
- Πραγματική επίπεδη συστοιχία κεραιών 2×10 στοιχείων χωρίς μετασχηματισμό
- Μετασχηματισμένη ισοδύναμη συστοιχία κεραιών ULVA

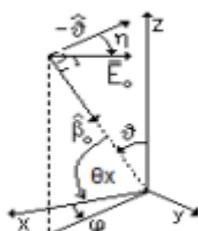
Η μετασχηματισμένη ισοδύναμη συστοιχία κεραιών δομήθηκε με στόχο τη βελτίωση των αποτελεσμάτων καθώς καταστέλλονται τα φαινόμενα αμοιβαίας σύζευξης που εμφανίζονται μεταξύ των στοιχείων της κεραιάς και τα οποία οδηγούν σε μείωση της απόδοσης του αλγορίθμου.

5.2.1 Έλεγχος λειτουργίας του αλγορίθμου Matrix Pencil σε ιδανική συστοιχία κεραιών

Από συμπεράσματα άλλων εργασιών οι οποίες παρατίθενται στις αναφορές αρχικά γίνεται ο έλεγχος λειτουργίας του αλγορίθμου Matrix Pencil σε ιδανική συστοιχία κεραιών 2×10 σημειακών, ιστροπικών πηγών που απέχουν μεταξύ τους $0.5\lambda_0$ ως προς τον άξονα x και αντίστοιχα $0.5\lambda_0$ ως προς τον άξονα y .

Το εύρος τιμών για τη γωνία θ είναι από 30° έως 90° με βήμα 0.8° . Για να υπολογιστεί η γωνία φ δημιουργήθηκαν ζευγάρια γωνιών θ και θ_x , από τα οποία βάσει της σχέσης 20 έγινε ο υπολογισμός της γωνίας. Το εύρος τιμών για τη γωνία θ_x είναι από 90° έως 175° με βήμα 0.8° .

$$\varphi = a \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta_x}{\sin \theta} \right)$$



Έτσι προέκυψαν τα ζευγάρια θ και φ των οποίων κάθε συνδυασμός αποτελεί ένα προσπίπτον σήμα. Για το σκοπό αυτό θεωρούμε 1000 τυχαίους συνδυασμούς γωνιών άφιξης των προσπιπτόντων σημάτων.

Στόχος είναι ο προσδιορισμός των γωνιών άφιξης, που σημαίνει ότι ρίχνοντας ένα σήμα από ένα συγκεκριμένο ζεύγος γωνιών, σύμφωνα με ερευνητές που χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο Matrix Pencil επαληθεύτηκε ότι αναγνωρίζει από ποιο συνδυασμό γωνιών είναι το συγκεκριμένο σήμα. Για τον υπολογισμό της παρακάτω σχέσης του Matrix Pencil αλγορίθμου το πλάτος A_p τέθηκε ίσο με τη μονάδα και η φάση γ_p μηδενική.

$$x(m, n) = \sum_{p=0}^P A_p \exp(j\gamma_p + j2\pi m \Delta_y \sin \theta_p \sin \varphi_p + j2\pi n \Delta_x \sin \theta_p \cos \varphi_p)$$

5.2.2 Πραγματική συστοιχία κεραιών 20 στοιχείων χωρίς μετασχηματισμό

Σύμφωνα με τις μετρήσεις και τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών από άλλες εργασίες οι οποίες παρατίθενται στις αναφορές στην ενότητα αυτή εμφανίζονται αποτελέσματα που έχουν σχέση με τη λειτουργία του αλγορίθμου Matrix Pencil σε κεραία πραγματικών στοιχείων. Χρησιμοποιώντας τους ίδιους 1000 τυχαίους συνδυασμούς γωνιών που χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση της ιδανικής συστοιχίας κεραιών και αφού κατασκευάστηκε η επίπεδη συστοιχία κεραιών των 20 δίπολων εκτελέστηκαν προσομοιώσεις ρίχνοντας στην κεραία επίπεδα κύματα προερχόμενα από τους τυχαίους συνδυασμούς γωνιών. Από τις προσομοιώσεις λαμβάνουμε τα ρεύματα που επάγονται στα στοιχεία της κεραίας και τα εισάγουμε στον αλγόριθμο Matrix Pencil.

5.2.3 Πραγματική επίπεδη συστοιχία κεραιών 2x10 στοιχείων μετασχηματισμένη σε ULVA

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του αλγορίθμου MP σύμφωνα με τις μετρήσεις και τα αποτελέσματα άλλων φοιτητών και ερευνητών από άλλες εργασίες οι οποίες παρατίθενται στις αναφορές όταν αυτός εφαρμόζεται στα ρεύματα που επάγονται στην κεραία του μοντέλου προσομοίωσης FEKO αφού όμως πρώτα μετασχηματιστούν με τη βοήθεια του πίνακα J, διαστάσεων 20x20, ο οποίος ουσιαστικά μετατρέπει τη πραγματική επίπεδη κεραία στην ισοδύναμη της (ULVA) που αποτελείται από σημειακές πηγές. Η μετατροπή αυτή, όπως αναφέρθηκε έχει σαν αποτέλεσμα να εισάγονται τελικά στον αλγόριθμο MP τιμές ρευμάτων που είναι απαλλαγμένες από φαινόμενα αμοιβαίας σύζευξης των πραγματικών στοιχείων καθώς και από τα αποτελέσματα της παρουσίας του ανακλαστήρα.

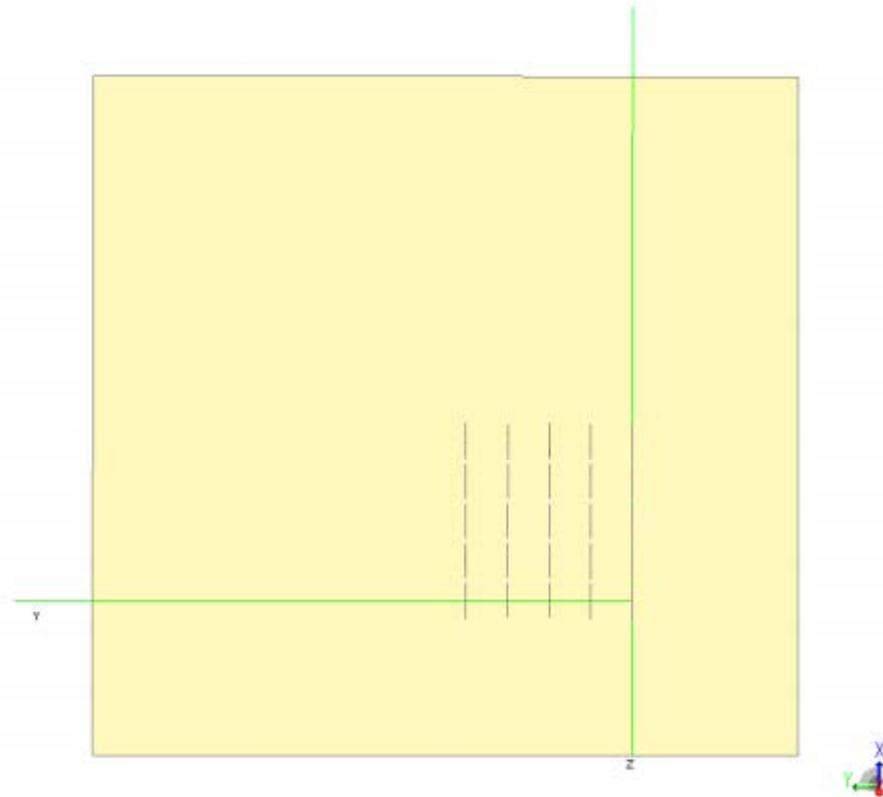
Ο πίνακας J προκύπτει έτσι όπως αναφέρθηκε για 14565 συνδυασμούς γωνιών, δηλαδή το εύρος γωνιών για τη γωνία θ είναι από 30° έως 90° με βήμα 0.5° και για τη γωνία Θ_x βάσει της οποίας υπολογίζεται κατ' επέκταση η γωνία ϕ είναι από 90° έως 175° με βήμα 0.5°

5.3 Εφαρμογή αλγορίθμου Matrix Pencil σε επίπεδη συστοιχία κεραιών 5x5 δίπολων

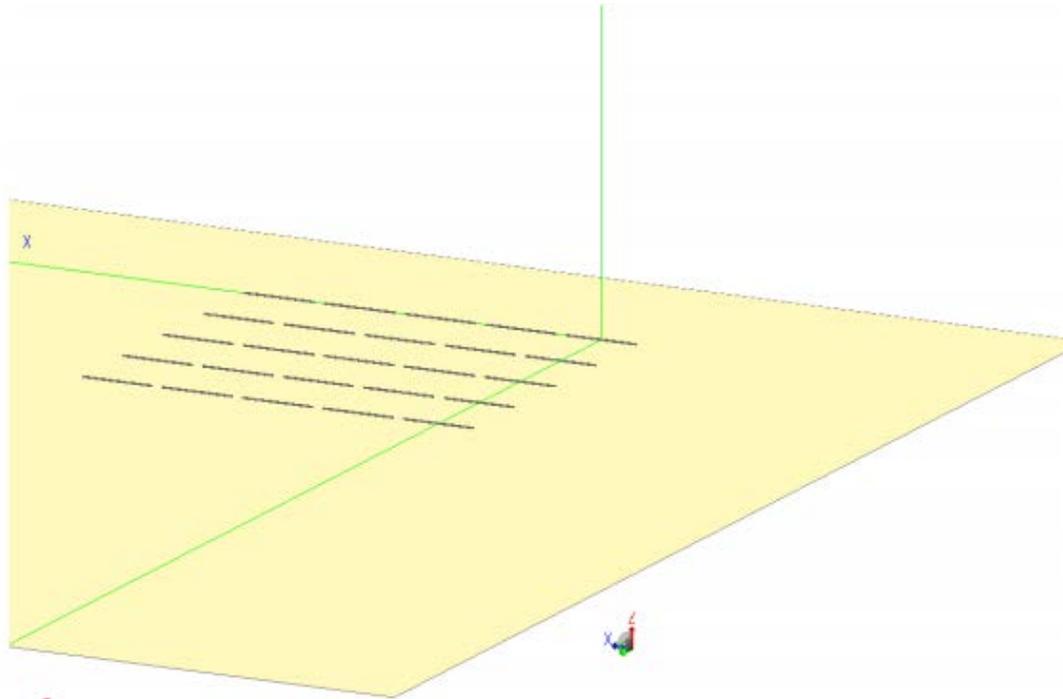
5.3.1 Γεωμετρία της επίπεδης συστοιχίας κεραιών 5x5 δίπολων

Από συμπεράσματα άλλων εργασιών φοιτητών και ερευνητών οι οποίες παρατίθενται στις αναφορές η κεραία αποτελείται από 5x5 δίπολα στο επίπεδο xy. Η κατανομή των δίπολων είναι σε 5 γραμμικές συστοιχίες στον άξονα x που η καθεμία αποτελείται από 5 δίπολα στον άξονα y όπως φαίνεται στα σχήματα 5.13, 5.14 και 5.15, 5.16. Το μήκος των δίπολων είναι $\lambda_0 / 2.275$ για καλύτερο συντονισμό της κεραίας στην επιθυμητή συχνότητα. Τα κέντρα

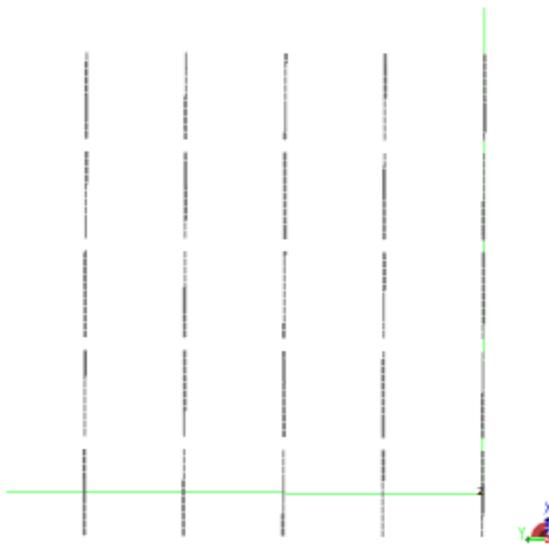
των δίπολων στον άξονα x έχουν απόσταση μεταξύ τους $0.5\lambda_0$ όπως αντίστοιχα και στον άξονα y . Κάθε δίπολο αποτελείται από 11 segments και στο κεντρικό είναι η τροφοδοσία του. Σε απόσταση $0.25\lambda_0$ από το επίπεδο των δίπολων, στον άξονα z , είναι τοποθετημένος ο ανακλαστήρας διαστάσεων $8.5\lambda_0 \times 8.5\lambda_0$. Για την προσομοίωση της κεραίας χρησιμοποιείται η **Μέθοδος των Ροπών** ενώ για τον ανακλαστήρα χρησιμοποιείται η μέθοδος **uniform geometrical theory of diffraction (UTD)**.



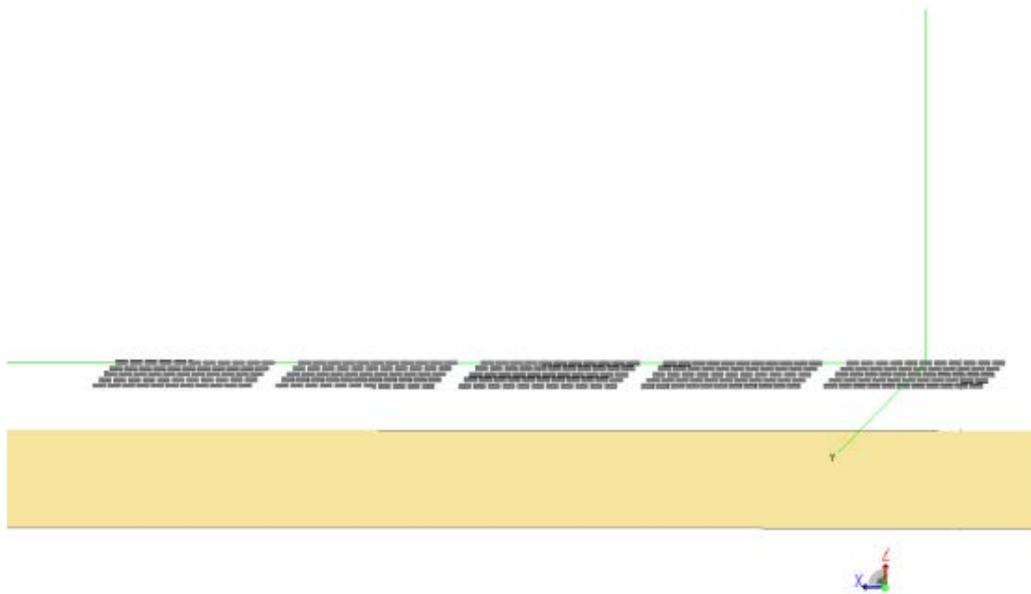
Σχήμα 5.4: Επίπεδη συστοιχία κεραιών 5x5 δίπολων με ανακλαστήρα



Σχήμα 5.5: Επίπεδη συστοιχία κεραιών 5x5 δίπολων με ανακλαστήρα



Σχήμα 5.6: Απόσταση κέντρων δίπολων στον άξονα x $0.5\lambda_0$ αντιστοίχως και στον άξονα y



Σχήμα 5.7: Απόσταση δίπολων από τον ανακλαστήρα ($0.25\lambda_0$)

5.3.2 Προσδιορισμός διεύθυνσης άφιξης των σημάτων (DOA)

Για να γίνει ο προσδιορισμός των διευθύνσεων άφιξης σημάτων ο αλγόριθμος Matrix Pencil θα πρέπει να εφαρμοστεί σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις:

- Ιδανική συστοιχία κεραιών σημειακών πηγών
- Πραγματική επίπεδη συστοιχία κεραιών 5×5 στοιχείων χωρίς μετασχηματισμό (προσομοίωση στο πρόγραμμα FEKO)
- Μετασχηματισμένη ισοδύναμη συστοιχία κεραιών ULVA

Το εύρος των ζευγών γωνιών από τις οποίες ρίχνονται τα προσπίπτοντα σήματα είναι το ίδιο με την προηγούμενη περίπτωση. Η μελέτη του προσδιορισμού διεύθυνσης άφιξης των σημάτων έγινε σε δείγμα 1000 τυχαίων συνδυασμών γωνιών θ και φ διαφορετικών από την προηγούμενη περίπτωση. **[10]**

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα γενικά συμπεράσματα που απορρέουν από τις εφαρμογές του αλγορίθμου Matrix Pencil δυο διαστάσεων σε επίπεδες συστοιχίες κεραιών που αποτελούνται από 2x10, 5x5, 10x5, 10x10 δίπολα αντίστοιχα και για περιπτώσεις που οι κεραιές θεωρήθηκαν πως αποτελούνται είτε από σημειακές ισοτροπικές πηγές είτε προσομοιώθηκαν τοποθετώντας πραγματικά στοιχεία, συνοψίζοντας τα εξής:

- Σε όλες τις περιπτώσεις των κεραιών με στοιχεία ισοτροπικές πηγές ο αλγόριθμος είχε εξαιρετική απόδοση και μπορούσε με μεγάλη ακρίβεια να προσδιορίσει το ζεύγος γωνιών άφιξης του προσπίπτοντος στην κεραιά σήματος. Σε δείγμα 1000 σημάτων η μέση τιμή απόκλισης, της εκτιμώμενης γωνίας από την πραγματική ήταν της τάξεως του $(10^{-8})^\circ$ ενώ η μέση τυπική απόκλιση (standard deviation) δεν υπερβαίνει τις 2.13°
- Η εφαρμογή του αλγορίθμου Matrix Pencil δυο διαστάσεων στην περίπτωση των επίπεδων συστοιχιών κεραιών δεν έχει τόσο καλή απόδοση συγκριτικά με τις κεραιές σημειακών πηγών. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκαν τα ρεύματα που επάγονται στις εισόδους των διπόλων όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις. Παρατηρήθηκε ότι ο αλγόριθμος έδωσε ακριβέστερα αποτελέσματα κατά την εύρεση της γωνίας θ και όσο αυξάνονται τα στοιχεία της κεραιάς μειώνεται η ακρίβεια εύρεσης της γωνίας φ . Στις περιπτώσεις αυτές σε δείγμα επίσης 1000 σημάτων, ανάλογα με την κεραιά, η μέση τιμή απόκλισης κυμαίνονταν από 0.61° έως 4.2° για τη γωνία θ , ενώ για τη γωνία φ οι τιμές ήταν σημαντικά μεγαλύτερες. Αντίστοιχα μεγαλύτερες τιμές προέκυψαν και για τη μέση τετραγωνική απόκλιση του πληθυσμού των διαφορών.
- Ακολούθησε η μελέτη των πραγματικών συστοιχιών κεραιών οι οποίες μετασχηματίστηκαν σε ομοιόμορφες επίπεδες συστοιχίες κεραιών σημειακών πηγών με εφαρμογή ειδικής μεθοδολογίας η οποία ουσιαστικά συνίσταται σε διεργασία μετατροπής των λαμβανόμενων σημάτων στην είσοδο των στοιχείων σε άλλα ισοδύναμα. Ο μετασχηματισμός αυτός είχε σαν στόχο την εξάλειψη των φαινομένων αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των δίπολων και της παρουσίας του ανακλαστήρα. Αποδείχθηκε ότι ο ανακλαστήρας ήταν αποδοτικότερος από την περίπτωση χωρίς μετασχηματισμό. Ωστόσο καλύτερη απόδοση παρατηρήθηκε και στην περίπτωση και στην περίπτωση αυτή στην εύρεση της γωνίας θ ενώ για τη γωνία φ παρατηρήθηκε ότι η αύξηση των στοιχείων της κεραιάς οδήγησε σε μείωση της απόδοσης MP.
- Καλύτερη απόδοση του αλγορίθμου Matrix Pencil δυο διαστάσεων παρατηρήθηκε στην περίπτωση της επίπεδης συστοιχίας κεραιών 2x10 δίπολων για την οποία φαίνεται ότι ο αλγόριθμος μπορεί με μεγάλη ακρίβεια να προσδιορίσει τόσο τη γωνία θ όσο και τη γωνία φ ειδικά όταν γίνεται ο μετασχηματισμός της πραγματικής κεραιάς σε ULVA.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ιστορία πινάκων Laura Smoller Τμήμα Ιστορίας Απρίλιος 2001
2. DoA σε δύο διαστάσεις με τη μέθοδο Matrix Pencil Μανώλη, Ζωή Φωτίου Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκη 2010
3. Ψηφιακές τεχνικές χωρικής διαμόρφωσης του διαγράμματος ακτινοβολίας σε ασύρματα συστήματα επικοινωνιών Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία Μιχαηλίδης Εμμανουήλ Σεπτέμβριος 2006
4. Υιοθέτηση τεχνικών έξυπνων κεραιών στα μελλοντικά ασύρματα συστήματα Διπλωματική Εργασία
5. Ψηφιακές τεχνικές χωρικής διαμόρφωσης του διαγράμματος ακτινοβολίας σε ασύρματα συστήματα επικοινωνιών Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία Μιχαηλίδης Εμμανουήλ Σεπτέμβριος 2006
6. Αλγόριθμοι και νευρωνικά RBF δίκτυα σε συστήματα διπολικών έξυπνων στοιχειοκεραιών διπλωματική εργασία Στεφανίδη Άγγελου Θεσσαλονίκη 2007
7. Ανάλυση υπολογιστικών και πειραματικών μεθόδων ιδιοανυσμάτων μεθόδων δοκου Διπλωματική εργασία Γεροδήμος Βάιος Αθήνα 2012
8. Εκτίμηση DoA σημάτων σε χώρο τριών διαστάσεων για συστήματα ευφυών κεραιών Ευάγγελος Μουστάκας
9. Περιγραφή συστημάτων με ρητές μήτρες διπλωματική εργασία Μπαρμπούτης Διονύσιος Ιούνιος 2006
10. DoA σε δύο διαστάσεις με τη μέθοδο Matrix Pencil Διπλωματική εργασία Μανώλη Ζωή Θεσσαλονίκη 2010

