



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

**Μελέτη τεχνικής εκτίμησης καναλιού επικοινωνίας
υποβοηθούμενης από τηλεπισκόπηση με εντοπισμό
κινούμενου στόχου βάση τένσορα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Ιωάννη-Διαμαντή Τριπιντή-Ιγνατίου

Επιβλέπων : Μαλιάτσος Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής

Επιτροπή:

Σάμος, Ιούνιος 2025

Περίληψη

Η παρούσα εργασία είναι η μελέτη της τεχνικής εκτίμησης καναλιού επικοινωνίας και η υποβοήθηση της επικοινωνίας μέσω τηλεπισκόπησης με χρήση ανάλυσης τενσόρων. Μελετάμε θεωρητικά τον τομέα της ενοποίησης τηλεπισκόπησης και επικοινωνίας, τις ανάγκες που οδηγούν στην συνένωση τους και τα κοινά τους θεμέλια. Πραγματοποιείται ανάλυση σχετικού άρθρο, αποσαφηνίζουμε την τεχνική, κάνουμε προσομοίωση και συλλέγουμε δεδομένα. Σχολιάζουμε τα αποτελέσματα και προτείνουμε μελλοντικές ερευνητικές ευκαιρίες.

Abstract

This work focuses on the study of channel estimation techniques and the enhancement of communication through sensing performed using tensor analysis. We theoretically examine the research area of joint communications and sensing, the benefits and requirements driving their integration, and their common foundations. A relevant article is analyzed and becomes basis for our work, the technique is thoroughly investigated, simulations are conducted, and data is collected. The results are discussed and future research directions are proposed.

Keywords:

Integrated sensing and communication, sensing aided communication, channel parameter estimation, tensor analysis, CP Decomposition, 6G, multiple input multiple output



Περιεχόμενα

Λίστα Σχημάτων.....	5
Εισαγωγή	7
Ενσωματωμένη Τηλεπισκόπηση και Επικοινωνία	8
Ραδιοεντοπισμός και Τηλεπικοινωνίες	8
Ραδιοεντοπισμός/Τηλεπισκόπηση	8
Τηλεπικοινωνίες	10
Επισκόπηση της σχέσης Ραδιοεντοπισμού και Τηλεπικοινωνιών	11
Προς Δίκτυα Νέας Γενιάς	12
6G Αναδυόμενες εφαρμογές, Μετρικά, και νέες Κλάσεις Υπηρεσιών	12
6G: Driving Trends.....	15
6G: Enabling Technologies	17
Παρουσίαση Άρθρου.....	20
Παρουσίαση Βασικών όρων	22
Ηλεκτρομαγνητική Ισχύς	23
Ηλεκτρικό Πεδίο	23
Μαγνητικό Πεδίο.....	25
Επαγωγή Ηλεκτρικού Πεδίου.....	25
Επαγωγή Μαγνητικού Πεδίου.....	26
Ηλεκτρομαγνητικό Κύμα	29
Ασύρματες Επικοινωνίες	29
Ασύρματο Κανάλι	29
Quadrature Phase-Shift Keying Modulation	41
Orthogonal Frequency Division Multiplexing	41
Τένσορες, συμβολισμός και πράξεις τους.....	44
Συμβολισμός.....	45
Τάξη.....	46
Βασικές Πράξεις.....	47
Ανάλυση Τένσορα	49
Βαθμός Τένσορα.....	49



Ανάλυση Άρθρου Μελέτης.....	51
Εισαγωγή.....	51
Μοντέλο Σήματος Τένσορα	51
Βασικά Χαρακτηριστικά Συστήματος.....	51
Μοντέλο Καναλιού.....	54
Τένσορας Σήματος.....	56
Εκτίμηση Μετρικών Καναλιού	60
Εκτίμηση Παραγόντων Τένσορα.....	60
Εύρεση Παραμέτρων Σκεδαστών.....	62
Προσομοίωση.....	64
Παρουσίαση και Επεξήγηση Κώδικα Δοκιμής.....	66
Αποτελέσματα.....	74
Συμπεράσματα	78
Πηγές	81



Λίστα Σχημάτων

Εικόνα 1 Ανάκλαση ακτίνας φωτός.....	9
Εικόνα 2 Χρήση ραντάρ για εντοπισμό κινούμενου στόχου.....	9
Εικόνα 3 Παράδειγμα τηλεπισκόπησης στην φύση.....	10
Εικόνα 4 Παλιά στρατιωτική εγκατάσταση ραδιοεντοπισμού	10
Εικόνα 5 Παράδειγμα κεραίας.....	11
Εικόνα 6 Οι τρεις κύριες μορφές εικονικής πραγματικότητας.....	13
Εικόνα 7 Σχήμα BCI.....	14
Εικόνα 8 Παρακολούθηση ποδηλάτη με τεχνητή νοημοσύνη	16
Εικόνα 9 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....	17
Εικόνα 10 Περίπτωση No Line-of-Sight	18
Εικόνα 11 Χρήση LIS για την δημιουργία διαδρομών για το σήμα.....	19
Εικόνα 12 Δύο φορτία και το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ τους.....	24
Εικόνα 13 Πυκνωτής	24
Εικόνα 14 Μαγνήτης και το μαγνητικό φορτίο	25
Εικόνα 15 Μαγνήτης και η επαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.....	26
Εικόνα 16 Ηλεκτρικό ρεύμα και η επαγωγή μαγνητικού πεδίου	27
Εικόνα 17 Ηλεκτρικός Κινητήρας.....	28
Εικόνα 18 Ηλεκτρομαγνητικό κύμα στο κενό.....	29
Εικόνα 19 Εκπομπή ηλεκτρομαγνητικού κύματος από πομπό σε δέκτη.....	30
Εικόνα 20 Μεταφορά σήματος από τον χρόνο στην συχνότητα	31
Εικόνα 21 Παραδείγματα συχνοτήτων διαφορετικών σημάτων	32
Εικόνα 22 Εύρος ζώνης	33
Εικόνα 23 Δειγματοληψία σήματος με διαφορετικές συχνότητες.....	33
Εικόνα 24 Διαμόρφωση σήματος σε υψηλότερη συχνότητα	34
Εικόνα 25 Απόσβεση ενέργειας και αλλαγή φάσης με την απόσταση.....	35
Εικόνα 26 Συμβολισμός πολικής μορφής μιγαδικού.....	36
Εικόνα 27 Αντιστοίχιση του σήματος στο μιγαδικό πεδίο	37
Εικόνα 28 Σύστημα πομπού-δέκτη με πολλές κεραίες.....	38
Εικόνα 29 Φαινόμενο Doppler στην συχνότητα των ηχητικών κυμάτων	40
Εικόνα 30 Ολίσθηση της συχνότητας του σήματος μετά από ανάκλαση σε κινούμενο στόχο....	40
Εικόνα 31 Τα σύμβολα του QPSK	41
Εικόνα 32 Διαδοχικά σύμβολα QPSK στον χρόνο.....	42
Εικόνα 33 Μετασχηματισμός στην συχνότητα.....	42
Εικόνα 34 Επικάλυψη του διαθέσιμου φάσματος με ορθογώνιες συχνότητες.....	43
Εικόνα 35 Δομή ενός OFMD frame	43
Εικόνα 36 Έγχρωμη εικόνα ως τένσορας.....	45
Εικόνα 37 Τένσορας 3 ^{ης} τάξης.....	46
Εικόνα 38 Ανάλυση τένσορα σε γινόμενο διανυσμάτων	49



Εικόνα 39 Ανάλυση τένσορα $N^{\text{οστου}}$ βαθμού σε άθροισμα N τένσορων $1^{\text{ου}}$ βαθμού.....	50
Εικόνα 40 Αριθμός κεραιών πομπού-δέκτη	52
Εικόνα 41 Απόσταση πομπού-δέκτη	53
Εικόνα 42 Οι διαδρομές του σήματος μέσα απο το κανάλι.....	53
Εικόνα 43 Χαρακτηριστικά κάθε διαδρομής/στόχου	54
Εικόνα 44 Σύνθεση τένσορα από την κεραία του δέκτη	57
Εικόνα 45 Αποτέλεσμα του ALS.....	60
Εικόνα 46 Θέση του βοηθητικού σημείου g	62
Εικόνα 47 Εκτίμηση χαρακτηριστικών καναλιού	74
Εικόνα 48 Αποτελέσματα Δοκιμών	75
Εικόνα 49 Αποτελέσματα δοκιμών αρχικού άρθρου.....	76
Εικόνα 50 Αποτελέσματα δοκιμών της παρούσας εργασίας.....	76
Εικόνα 51 Διάγραμμα πολικών συντεταγμένων των στόχων από το αρχικό άρθρο	79
Εικόνα 52 Στοιχεία από τον πίνακα B_2	80



Εισαγωγή

Η εργασία αυτή έγινε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του τμήματος Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων. Σκοπός είναι η μελέτη τεχνικών επικοινωνίας υποβοηθούμενων από τηλεπισκόπηση και συγκεκριμένα με χρήση τενσόρων – βασιζόμενοι στο άρθρο “Sensing-Aided Communication Channel Estimation with Tensor-Based Moving Target Localization” [1].

Πρόκειται για ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον άρθρο στο πεδίο των τηλεπικοινωνιών στον δρόμο για την 6^η γενιά ραδιοσυστημάτων. Είναι μέρος της επικείμενης προσπάθειας ολοκλήρωσης/συνένωσης των πεδίων των επικοινωνιών και του εντοπισμού.

Η εργασία αυτή αποτέλεσε μια θαυμάσια πρόκληση, καθώς δοκίμασε όλες τις γνώσεις ενός προπτυχιακού φοιτητή στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, και τελικά έδωσε την ευκαιρία για περαιτέρω εμβάθυνση. Για την κατανόησή του, χρειάστηκε η μελέτη και κατανόηση άλλων άρθρων, και η περαιτέρω εξερεύνηση της βιβλιογραφίας πάνω στα θέματα που άπτονται της ιδέας.

Το πειραματικό κομμάτι υλοποιήθηκε σε περιβάλλον Matlab. Χρειάστηκε να γίνουν ορισμένες παραδοχές ώστε να μπορέσουμε να έχουμε συγκρίσιμα αποτελέσματα με την αρχική μελέτη, οι οποίες θα παρουσιαστούν και συζητηθούν στο αντίστοιχο κομμάτι. Παρ’ όλ’ αυτά, δεν αλλοιώθηκε το πνεύμα της ιδέας που παρατίθεται στο άρθρο. Μάλιστα, εντοπίστηκαν και σημεία στο άρθρο, που σε συνδυασμό με άλλα άρθρα, προσφέρονται πολύ ενδιαφέρουσες ερευνητικές ευκαιρίες.

Αυτό που συνεισφέρει η εργασία είναι η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων (ακόμη και διόρθωση των αδυναμιών της), η περαιτέρω μελέτη των περιορισμών και των αναγκών της μεθόδου, η διευκρίνηση εννοιών που δεν εξηγούνται στο άρθρο και τέλος η επισήμανση σφαλμάτων που εντοπίστηκαν στο κείμενο.



Ενσωματωμένη Τηλεπισκόπηση και Επικοινωνία

Σε αυτό το κομμάτι, εξερευνούμε την ενσωματωμένη τηλεπισκόπηση και επικοινωνία (Integrated Sensing and Communication – ISAC).

Τα δύο μέρη που αποτελούν αυτήν την τεχνολογία, είναι ο ραδιοεντοπισμός και οι τηλεπικοινωνίες. Και οι δύο αυτές τεχνολογίες έχουν τις ρίζες τους στις εξισώσεις του Maxwell [2], στα μέσα του 19^{ου} αιώνα.

Ραδιοεντοπισμός είναι η διαδικασία με την οποία προσπαθούμε να αποκτήσουμε γνώση για τον χώρο (και τα αντικείμενα) γύρω μας [2] [3]. Αυτό το κάνουμε εκπέμποντας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στον χώρο, και συλλέγοντας τα κύματα που αντανακλώνται από τα αντικείμενα/σκεδαστές. Μέσα από τα κύματα αυτά, συλλέγουμε πληροφορία για την φύση του χώρου, τα αντικείμενα μέσα σε αυτόν, το σχήμα τους, την ταχύτητά τους κ.α. ανάλογα με τις ανάγκες μας.

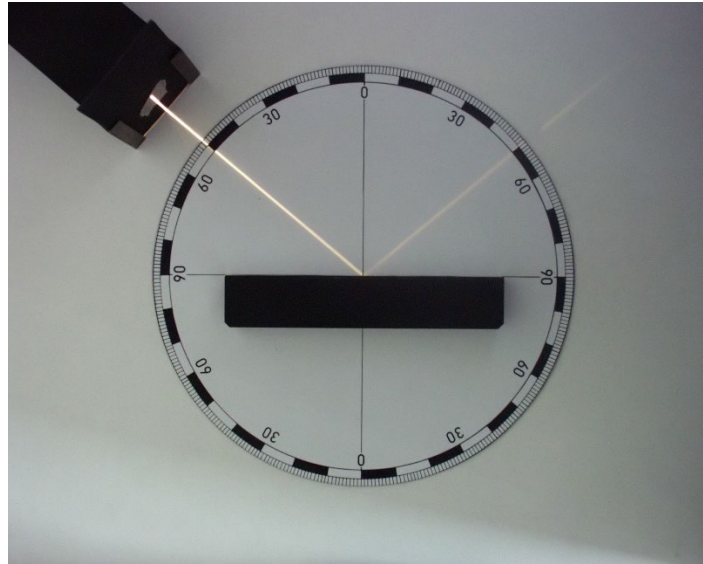
Σε ιστορικό πλαίσιο, και ειδικά στα πλαίσια των στρατιωτικών εφαρμογών, χρησιμοποιούμε την λέξη ραδιοεντοπισμός ή ραντάρ. Καθώς πλησιάζει η τεχνολογία αυτή τον οικονομικό τομέα των τηλεπικοινωνιών, έχει νόημα να αλλάξει και ο όρος. Καθώς εξετάζουμε την τεχνολογία σε νέα πλαίσια, αποκαλείται πλέον sensing, και αποδίδεται στα ελληνικά σαν ανίχνευση, εντοπισμός ή τηλεπισκόπηση.

Στις τηλεπικοινωνίες, πάλι στέλνουμε Η/Μ ακτινοβολία στο χώρο την οποία συλλέγουμε αφού περάσει μέσα από το κανάλι. Σε αντίθεση με τον ραδιοεντοπισμό όμως, εδώ μας ενδιαφέρει το ίδιο το κύμα, καθώς στα χαρακτηριστικά του έχουμε διαμορφώσει και κωδικοποιήσει την πληροφορία που θέλουμε να στείλουμε.

Ραδιοεντοπισμός και Τηλεπικοινωνίες

Ραδιοεντοπισμός/Τηλεπισκόπηση

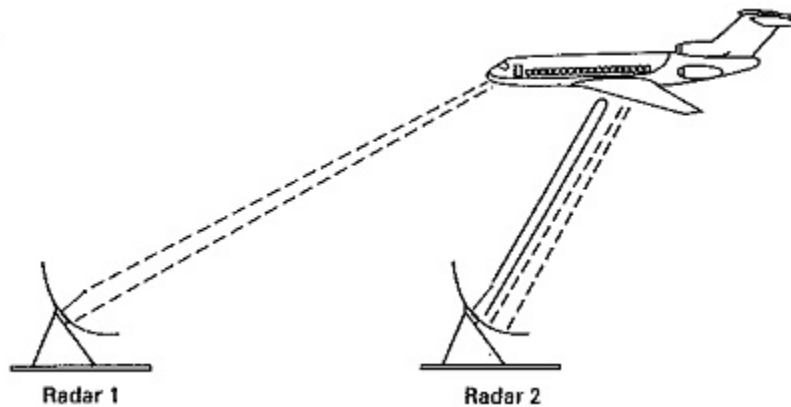
Ο βασικός στόχος του ραδιοεντοπισμού είναι η συλλογή πληροφορίας του περιβάλλοντος [2]. Ο πομπός στέλνει η/μ κύματα στον χώρο. Αυτά ταξιδεύουν, μέχρι να συναντήσουν εμπόδια/αντικείμενα που συνήθως αναφέρονται ως στόχοι/σκεδαστές. Αυτά αλληλοεπιδρούν με το κύμα και του αλλάζουν τα χαρακτηριστικά. Ο πιο απλός μηχανισμός είναι μέσω της ανάκλασης.



Εικόνα 1 Ανάκλαση ακτίνας φωτός

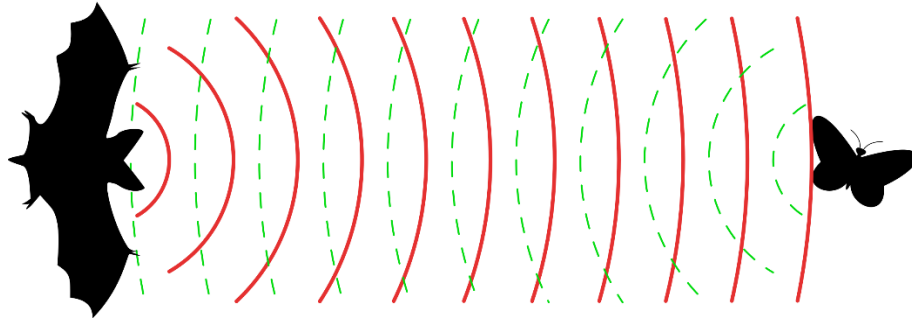
Το φως πέφτει πάνω σε μία επιφάνεια και μετά ανακλάται προς άλλη κατεύθυνση.

Παρόμοια με την οπτική, όταν το η/μ κύμα πέφτει σε ένα αντικείμενο ανακλάται. Ο δέκτης λαμβάνει το κύμα που ανακλάται και σε συνδυασμό με την γνώση του που βρίσκεται ο δέκτης και ποια ήταν τα χαρακτηριστικά του κύματος όταν εκπέμφθηκε, μπορεί να καταλάβει τα χαρακτηριστικά του αντικείμενου.



Εικόνα 2 Χρήση ραντάρ για εντοπισμό κινούμενου στόχου

Είναι μία μέθοδος παρόμοια με αυτήν που χρησιμοποιούν πολλά ζώα σε συνθήκες που δεν υπάρχει πολύ φως. Οι νυχτερίδες χρησιμοποιούν σόναρ (ακουστικά κύματα) για να πλοηγούνται την νύχτα, και πολλά κητώδη, όπως δελφίνια και φάλαινες, για να μπορούν να εντοπίζουν τροφή στα βάθη της θάλασσας.



Εικόνα 3 Παράδειγμα τηλεπισκόπησης στην φύση

Ιστορικά, οι πιο σημαντικές εφαρμογές του ραδιοεντοπισμού ήταν στρατιωτικές. Μέχρι και στις μέρες μας, χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό σκαφών από μεγάλη απόσταση, τόσο στον αέρα όσο και στην θάλασσα. Χρησιμοποιώντας ραντάρ, μπορούμε να ξέρουμε το που βρίσκονται, ποια είναι η κατεύθυνση τους, ποιο είναι το μέγεθός τους και άλλες πληροφορίες που έχουν τεράστια στρατηγική σημασία.

Παρατίθεται μία εικόνα από μια παλιά εγκατάσταση ραδιοεντοπισμού κοντά στο Ηράκλειο Κρήτης.



Εικόνα 4 Παλιά στρατιωτική εγκατάσταση ραδιοεντοπισμού

Τηλεπικοινωνίες

Οι τηλεπικοινωνίες προσπαθούν να στείλουν πληροφορία μέσα από το ασύρματο κανάλι, από τον πομπό στον δέκτη.

Ο πομπός χρησιμοποιεί ενέργεια για να ενεργοποιήσει φορτία στην κεραία. Ένα μέρος αυτής της ενέργειας εγκλωβίζεται σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα, που ταξιδεύουν στον χώρο. Ορισμένη από

αυτήν την ενέργεια φτάνει στον δέκτη, ο οποίος έχει μια αντίστοιχη κεραία με του πομπού. Αυτός, χρησιμοποιεί την διάταξη κεραίας και την επαγόμενη ενέργεια για να μετρήσει το ρεύμα και εντέλει να συμπεράνει ποιο ήταν το σήμα που στάλθηκε από τον πομπό.



Εικόνα 5 Παράδειγμα κεραίας

Πομπός και δέκτης, έχοντας συνεννοηθεί από πριν (με συμφωνία ενός ράδιο-πρωτοκόλλου), μπορούν να εκμεταλλευτούν αυτό το φαινόμενο για να στείλουν πληροφορία μεταξύ τους.

Συνήθως, στις τηλεπικοινωνίες το κανάλι αλλάζει το σήμα με ανεπιθύμητο τρόπο. Παράδειγμα, όταν το σήμα φτάνει στον δέκτη από πολλές διαδρομές μέσα από το κανάλι, γίνεται δύσκολο για τον δέκτη να καταλάβει ποιο ήταν το αρχικό κύμα.

Επισκόπηση της σχέσης Ραδιοεντοπισμού και Τηλεπικοινωνιών

Όπως είδαμε παραπάνω, και οι δύο τεχνολογίες βασίζονται στην εκπομπή και συλλογή η/μ κυμάτων [4]. Καθώς τα κύματα ταξιδεύουν μεταξύ των κεραιών, αλλοιώνονται τα χαρακτηριστικά τους από το περιβάλλον. Σε επόμενο κεφάλαιο, θα δούμε με περισσότερες λεπτομέρειες την ιστορική και επιστημονική πορεία της γνώσης μας για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, ποια είναι η φύση τους και τι χρειαζόμαστε για να μπορούμε να τα χρησιμοποιήσουμε.

Στις τηλεπικοινωνίες, ο πομπός στέλνει η/μ κύματα στο περιβάλλον, ο δέκτης τα λαμβάνει και συλλέγει την πληροφορία που έστειλε ο πομπός. Η χρήσιμη πληροφορία βρίσκεται στην τυχαιότητα του σήματος που έστειλε ο πομπός.

Αντίθετα, ο ραδιοεντοπισμός στέλνει ένα γνωστό σήμα από τον πομπό, και ο δέκτης προσπαθεί να εξάγει πληροφορία για το περιβάλλον/κανάλι από τις μεταβολές στο αρχικό σήμα. Πληροφορίες όπως τοποθεσία, σχήμα και ταχύτητα για αντικείμενα στον χώρο.

Οπότε, ιστορικά αυτές οι τεχνολογίες/λειτουργίες ήταν ξεχωριστές. Βέβαια, στην πραγματικότητα, οι πορείες τους ήταν παράλληλες. Και στις δύο, χρησιμοποιούνται κεραίες, η/μ ακτινοβολία, έχουμε μια μετάβαση σε συστήματα με πολλές κεραίες κ.λπ. Τώρα πλέον, βλέπουμε μια τάση συνένωσης των δύο τεχνικών. Μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την ομοιότητα του εξοπλισμού για να κάνουμε και τις δύο εργασίες από κοινού.

Ένα μεγάλο ερώτημα είναι πώς μπορεί να γίνει αυτό αποδοτικά. Και υπάρχει ένα θεμελιώδες όριο στο πόσο καλά μπορούν να γίνουν οι δύο αυτές εργασίες παράλληλα. Με αυτά τα θέματα ασχολείται η έρευνα πάνω στην ενσωματωμένη τηλεπισκόπηση και επικοινωνία.

Μέχρι να φτάσουμε σε πλήρη ενσωμάτωση των δύο τεχνολογιών, ο τομέας χωρίζεται σε δύο έννοιες. Την τηλεπισκόπηση βοηθούμενη από επικοινωνία και την επικοινωνία βοηθούμενη από τηλεπισκόπηση.

Η τηλεπισκόπηση βοηθούμενη από επικοινωνία προσπαθεί να αποκτήσει πληροφορία για το κανάλι, μέσω από την ήδη υπάρχουσα τηλεπικοινωνιακή ζεύξη. Από τον χρόνο που χρειάζεται το σήμα να φτάσει στον δέκτη από τον πομπό, μπορούμε να ξέρουμε περίπου ποια είναι η απόσταση μεταξύ τους. Άλλο παράδειγμα είναι να χρησιμοποιούμε το δίκτυο τηλεπικοινωνιών για να εντοπίσουμε το τερματικό του χρήστη.

Αντίστοιχα, η επικοινωνία βοηθούμενη από τηλεπισκόπηση χρησιμοποιεί την τηλεπισκόπηση για να στείλει πληροφορία. Παράδειγμα, ξέροντας την τοποθεσία του χρήστη, μπορούμε να έχουμε καλύτερη εικόνα για τις ανάγκες της τηλεπικοινωνιακής ζεύξης.

Το άρθρο με το οποίο ασχολείται αυτή η εργασία, ανήκει στον τομέα της επικοινωνίας βοηθούμενης από τηλεπισκόπηση. Ουσιαστικά, προσπαθούμε να καταλάβουμε τις συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι, ώστε να έχουμε βελτιωμένη μετάδοση πληροφορίας.

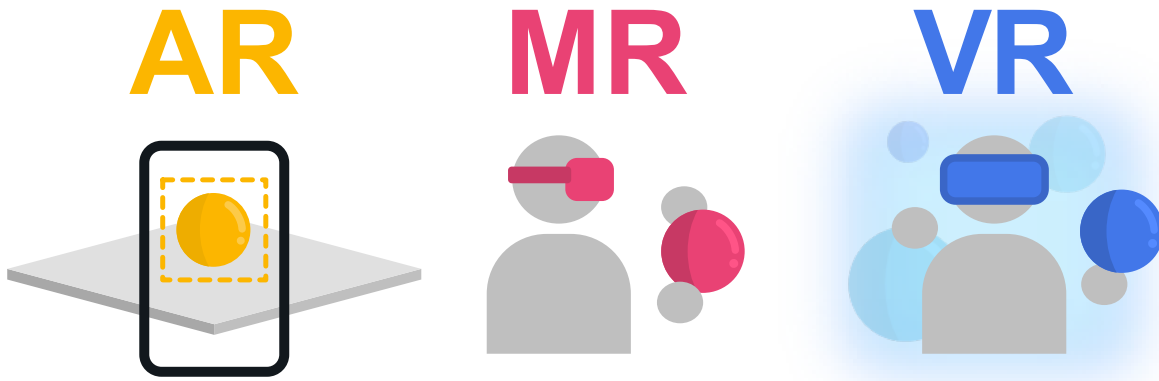
Προς Δίκτυα Νέας Γενιάς

6G Αναδυόμενες εφαρμογές, Μετρικά, και νέες Κλάσεις Υπηρεσιών

Σε αυτή την παράγραφο, συζητείται το όραμα της επιστημονικής κοινότητας για το ποιες είναι οι τάσεις των λειτουργιών που θα καλείται το δίκτυο να καλύψει στην 6^η γενιά ραδιοσυστημάτων. Αυτές θα ορίσουν τις απαιτήσεις που θα έχουμε για το δίκτυο. Στη συνέχεια εξετάζονται νέες ιδέες και βλέπουμε τι εφαρμογές θα απαιτηθεί να καλυφθούν από τα δίκτυα 6^{ης} γενιάς. [5]

Πολυαισθητηριακές Εφαρμογές Επεκταμένης Πραγματικότητας (Extended Reality - XR)

Καθώς οι τεχνολογίες επαυξημένης/μικτής/εικονικής πραγματικότητας (AR/MR/VR) ωριμάζουν, γίνονται όλο και πιο προσβάσιμες στο ευρύ κοινό. Αυτό δημιουργεί μια πληθώρα καινούργιων εφαρμογών, οι οποίες είναι εξαιρετικά χρήσιμες και απαιτητικές.



Εικόνα 6 Οι τρεις κύριες μορφές εικονικής πραγματικότητας

Αναμένεται ότι αυτές οι εφαρμογές δεν θα περιοριστούν στα τοπικά δίκτυα, αλλά θα δημιουργήσουν ζήτηση για να προσφέρονται αυτές οι υπηρεσίες και στους δημόσιους χώρους. Γι' αυτό θα πρέπει το δίκτυο να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες αυτές. Αυτό αυξάνει όχι μόνο τις απαιτήσεις για χωρητικότητα του δικτύου, αλλά και σε ταχύτητα, μειωμένη καθυστέρηση και αξιοπιστία.

Ένα άλλο κομμάτι που πρέπει να αναπτυχθεί είναι η ικανότητα των υπολογιστή και του δικτύου να καταλαβαίνει και να ερμηνεύει τις ανθρώπινες δραστηριότητες, ώστε να μπορούν να προσφέρουν την μέγιστη δυνατή εμπειρία στους χρήστες.

Ένα παράδειγμα είναι τα γυαλιά εικονικής πραγματικότητας, τα οποία ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιεί και σε εξωτερικούς χώρους.

Συνδεδεμένη Ρομποτική και Αυτόματα Συστήματα

Στις προηγούμενες γενιές, ο σκοπός του συστήματος ήταν να εξυπηρετεί τις ανάγκες επικοινωνίας των χρηστών. Καθώς το πεδίο αλλάζει, αλλάζουν και οι ανάγκες που υπάρχουν. Ειδικά, αλλάζει το σύνολο των χρηστών που πρέπει να εξυπηρετηθεί.

Μέχρι τώρα, ο χρήστης ήταν άνθρωπος, και χρειαζόταν να μπορεί να ανταλλάσσει πακέτα με το δίκτυο. Δηλαδή, οι βασικές ανάγκες ήταν η τηλεφωνία και η πρόσβαση στο διαδίκτυο.

Τώρα, το σύνολο των χρηστών χρειάζεται να επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει συσκευές, drones και άλλα αυτόνομα οχήματα, όπως αυτόνομα αμάξια. Τα αυτόνομα οχήματα θα φέρουν επανάσταση στις συγκοινωνίες, καθώς θα έχουν την ικανότητα να επικοινωνούν και να συγχρονίζονται μεταξύ τους, μειώνοντας τον χρόνο και την συμφόρηση στους δρόμους. Επιπλέον, ένα αυτόματο όχημα δεν χρειάζεται να σταθμεύσει κοντά στον προορισμό του χρήστη, αλλά μπορεί απλώς να περάσει από τον προορισμό και να τον αφήσει. Έπειτα, μπορεί να σταθμεύσει

όπου υπάρχει διαθέσιμος χώρος. Γίνεται μέχρι και να λειτουργεί σαν όχημα επί πληρωμή τις ώρες που ο ιδιοκτήτης δεν το χρειάζεται, αντί να καταλαμβάνει θέση σε χώρο στάθμευσης.

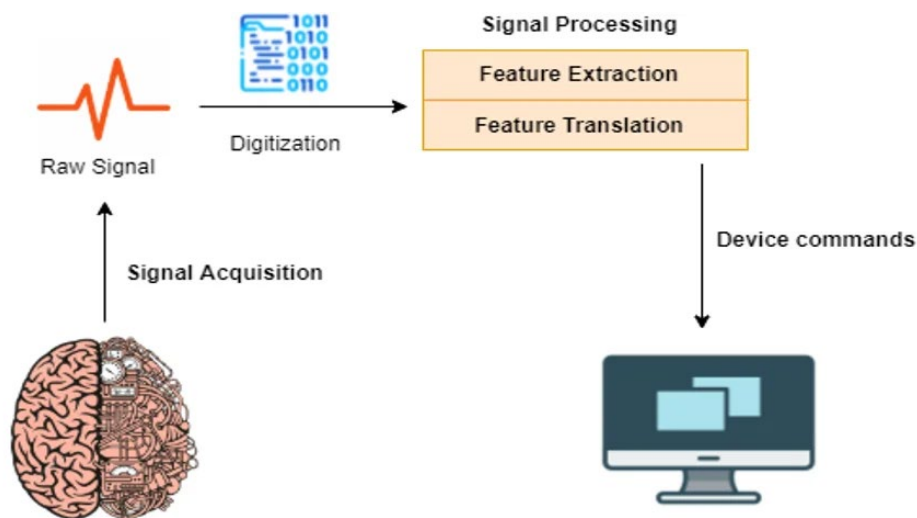
Επίσης, η χρήση του Internet of Things - IoT στην βιομηχανία και το αστικό περιβάλλον είναι μία εφαρμογή που θα παίζει μεγάλο ρόλο. Έχοντας μικροεπεξεργαστές σε ένα εργοστάσιο, πολλές εργασίες μπορούν να αυτοματοποιηθούν, ώστε να μην απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση. Τα μηχανήματα επικοινωνούν μεταξύ τους, όχι μόνο μέσω του τοπικού δικτύου, αλλά και του δικτύου τηλεπικοινωνίας, ακόμα και ανάμεσα σε διαφορετικές τοποθεσίες. Έτσι, μπορούμε να συλλέγουμε πληροφορίες για την κατάσταση της παραγωγικής διαδικασίας έγκαιρα. Αυτό αυξάνει και την απόδοση, καθώς κάνει την εφοδιαστική αλυσίδα πιο διαφανή και αντιδραστική στις συνθήκες.

Αντίστοιχα, σε επίπεδο πόλης, υπάρχουν πολλές εφαρμογές που μπορούν να ωφελήσουν τους πολίτες. Παράδειγμα, η χρήση τηλεματικής βοηθάει τις αστικές συγκοινωνίες να καλύπτουν τις ανάγκες του πληθυσμού καλύτερα. Ένα οργανωμένο σύστημα αστικών συγκοινωνιών συλλέγει πληροφορίες σχετικά με τις τάσεις κίνησης του κοινού και τις συνθήκες που τις κινητοποιούν, την κυκλοφορική συμφόρηση και τις πραγματικές ανάγκες των χρηστών. Έχοντας καλύτερη εικόνα της κατάστασης, μπορούμε να αναθέσουμε πόρους πιο αποδοτικά.

Αυτές όμως οι εφαρμογές έχουν παραπάνω ανάγκες από αυτές που προσφέρονται στους ανθρώπινους χρήστες. Παράδειγμα, ένα drone χρειάζεται να έχει πολύ ακριβείς πληροφορίες για την θέση του, πέρα από αυτό που προσφέρει το GPS. Άρα, πρέπει να μπορούμε να προσφέρουμε υπηρεσίες εντοπισμού και σύνδεσης με άλλα συστήματα.

Ασύρματες Αλληλεπιδράσεις Εγκέφαλου-Υπολογιστή

Καθώς κοιτάζουμε προς το μέλλον, μία νέα δυνατότητα εισέρχεται στο προσκήνιο, μία που μέχρι πρόσφατα αποτελούσε σενάριο επιστημονικής φαντασίας. Η δυνατότητα αλληλεπίδρασης εγκεφάλου-υπολογιστή (Brain-Computer Interaction – BCI).



Εικόνα 7 Σχήμα BCI

Η πιο απλή εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας αφορά την χρήση προσθετικών άκρων, αλλά σε καμία περίπτωση δεν περιορίζεται σε αυτές τις εφαρμογές.

Έχοντας βάλει τις βασικές αρχές αυτής της τεχνολογίας, οι δυνατότητες είναι τεράστιες. Η επικοινωνία μεταξύ ανθρώπου και μηχανής θα αλλάξει εντελώς. Δεν θα χρειαζόμαστε πλέον συσκευές εισόδου όπως πληκτρολόγια και ποντίκια, καθώς οι υπολογιστές θα μπορούν να ερμηνεύσουν τις σκέψεις και κινήσεις μας και να αντιδράσουν αντίστοιχα.

6G: Driving Trends

Έχοντας αναλύσει κάποιες από τις μελλοντικές εφαρμογές που τα δίκτυα επόμενης γενιάς θα πρέπει να εξυπηρετούν, μπορούμε να καταλάβουμε ποιες είναι οι συγκεκριμένες ανάγκες που θα πρέπει να καλύψουμε. Συνεπώς, θα δούμε τις συγκεκριμένες απαιτήσεις όπως μεταφράζονται οι παραπάνω εφαρμογές, στο πλαίσιο των τηλεπικοινωνιών. Σε αυτό το κομμάτι, θα αναλύσουμε μερικές από αυτές, και θα δούμε σε υψηλό επίπεδο τι σημαίνουν.

Τέλος της Εποχής των Εξυπνων Κινητών

Όπως είδαμε στο προηγούμενο μέρος, έχουμε νέους τύπους τερματικών. Πρέπει να αλλαχθεί αντίστοιχα το μοντέλο κινητών συσκευών, ώστε να μπορεί να εξυπηρετηθούν οι ανάγκες αυτών των νέων χρηστών.

Μεγαλύτερες Ταχύτητες, Μεγαλύτερο Φάσμα, Μεγαλύτερη Αξιοπιστία

Το πιο σημαντικό και ξεκάθαρο πόρισμα από τις εφαρμογές που καλούμαστε να καλύψουμε, είναι η ανάγκη για μεγαλύτερη ταχύτητα, για να μπορούμε να στέλνουμε τον τεράστιο όγκο πληροφορίας που απαιτείται.

Αυτή η απαίτηση δεν περιορίζεται μόνο στις προσωπικές εφαρμογές, αλλά και στον τεράστιο όγκο πληροφορίας που παράγεται από εφαρμογές IoT.

Η απαίτηση για μεγαλύτερες ταχύτητες μεταφράζεται σε απαίτηση για μεγαλύτερο φάσμα. Χρησιμοποιώντας περισσότερο φάσμα, μπορούμε να πετύχουμε μεγαλύτερες ταχύτητες.

Βέβαια, το φάσμα που έχουμε στην διάθεση μας δεν είναι απεριόριστο. Οι συχνότητες που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε χωρίζονται σε ζώνες, οι οποίες έχουν αφιερωθεί για διάφορες χρήσεις. Παράδειγμα, υπάρχουν συγκεκριμένες συχνότητες που χρησιμοποιούνται για το ραδιόφωνο, την τηλεόραση, μέχρι και τα αεροπλάνα και για στρατιωτική χρήση. Υπάρχουν κανονισμοί που ορίζουν ποιες συχνότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για ποιες χρήσεις.

From Aerial to Volumetric Spectral and Energy Efficiency

Η εισαγωγή νέων τύπων συσκευών, όπως drones, θα αλλάξει τον τρόπο που αντιμετωπίζουμε το τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον.

Μέχρι τώρα, θεωρούσαμε ότι οι χρήστες είναι άνθρωποι και οι συσκευές κινητά τηλέφωνα. Οπότε αντιμετωπίζαμε το περιβάλλον σε δύο διαστάσεις, όπως σε έναν χάρτη.

Τώρα, θα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη και διαφορετικού τύπου τερματικά, που μπορεί να βρίσκονται και σε μεγάλο ύψος πάνω από το έδαφος. Αντίστοιχα, πρέπει να αλλάξει και ο τρόπος που λειτουργούν τα συστήματά του δικτύου (σταθμοί βάσεις).

Συνένωση Επικοινωνιών, Υπολογισμού, Ελέγχου, Εντοπισμού και Ανίχνευσης

Το 6G θα μπορεί να προσφέρει όλες αυτές τις διαφορετικές υπηρεσίες στους χρήστες. Ειδικά στις νέες κλάσεις χρηστών, που περιμένουμε να είναι αυτόνομα μηχανήματα.

Έχοντας πολλά τερματικά και χρήστες με υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις, το σύστημα θα μπορεί να προσφέρει υπηρεσίες υπολογισμού. Δηλαδή, όταν έναν χρήστη χρειάζεται να κάνει κάποια εργασία η οποία είναι ιδιαίτερα περίπλοκη, θα μπορεί να μεταφέρει τα δεδομένα και το πρόγραμμα στο δίκτυο, και το ίδιο το δίκτυο να τρέξει το πρόγραμμα και να επιστρέψει τα αποτελέσματα.

Ένα σενάριο που είναι πολύ χρήσιμη μια τέτοια υπηρεσία είναι π.χ. μία ζωντανή μετάδοση ενός αγώνα. Ο αγώνας καταγράφεται από ένα drone, ώστε να υπάρχει καλή οπτική επαφή και εντυπωσιακές γωνίες λήψης. Πολύ συχνά, όμως, πρέπει να γίνει επεξεργασία των εικόνων, για καλύτερο αποτέλεσμα, όπως παρακολούθηση αντικειμένων.



Εικόνα 8 Παρακολούθηση ποδηλάτη με τεχνητή νοημοσύνη

Αυτή η εργασία είναι πολύ χρονοβόρα και ενεργοβόρα, ειδικά για ένα drone που πρέπει να είναι μικρό και να έχει υψηλή αυτονομία. Εδώ, μπορεί να προσφέρεται από το δίκτυο η επεξεργασία της εικόνας, ώστε να μπορεί να γίνει γρήγορα και αξιόπιστα.

Ο έλεγχος αναφέρεται στο σύνολο των ενεργειών και διαδικασιών που χρειάζεται να γίνει για την διαχείριση ενός στόλου αυτόνομων οχημάτων. Αποτελεί όρο που μας έρχεται από τον τομέα των

δορυφορικών επικοινωνιών, ο οποίος ασχολείται με την διαχείριση στόλων δορυφόρων εδώ και δεκαετίες. Καθώς περιμένουμε τα αυτόνομα μηχανήματα να είναι ακρογωνιαίος λίθος του μέλλοντος των τηλεπικοινωνιών, πρέπει να υπάρχουν υποδομές για την διαχείριση τους.

Αντίστοιχα, αυτοί οι χρήστες χρειάζονται να έχουν πολύ καλή αντίληψη του περιβάλλοντός τους. Αυτόματα οχήματα πρέπει να έχουν άριστη αντίληψη του χώρου γύρω τους, ώστε να αποφεύγονται ατυχήματα. Πέρα από τους αισθητήρες που έχουν τα οχήματα, το δίκτυο μπορεί να συμπληρώνει την εικόνα του περιβάλλοντος με υπηρεσίες εντοπισμού, ώστε να παίρνονται σωστές αποφάσεις σε ικανό χρόνο.

Τέλος, η δυνατότητα ενός δικτύου να ανιχνεύει το ασύρματο περιβάλλον, δίνει επίκαιρες πληροφορίες για τις επικοινωνιακές δυνατότητες του συστήματος ώστε να γίνεται καλή διαχείριση των πόρων.

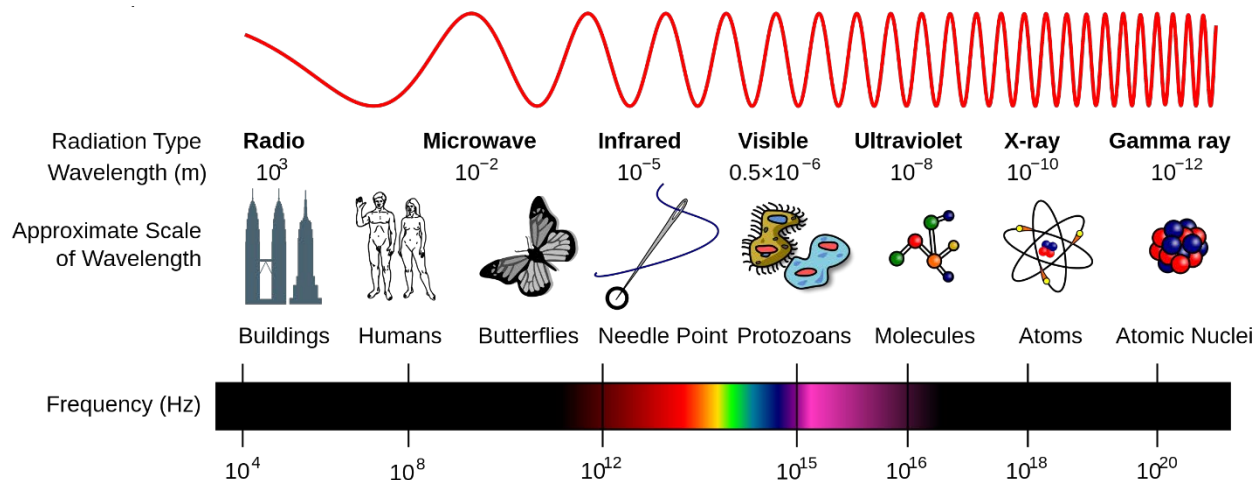
6G: Enabling Technologies

Στα προηγούμενα μέρη, είδαμε τις εφαρμογές του μέλλοντος, και αντίστοιχα τις λειτουργικές απαιτήσεις που αυτές δημιουργούν.

Σε αυτό το μέρος, θα αναλύσουμε τις τεχνολογίες που υπόσχονται ότι θα μπορέσουν να καλύψουν αυτές τις ανάγκες.

6GHz για το 6G

Όπως είδαμε και προηγουμένως, η ανάγκη για τεράστιες ταχύτητες δημιουργεί ανάγκη για μεγαλύτερο φάσμα συχνοτήτων. Όμως, το φάσμα των χρήσιμων συχνοτήτων είναι πολύ κορεσμένο και χρησιμοποιείται για υπηρεσίες πέραν των τηλεπικοινωνιών. Αυτό μας ωθεί να στραφούμε σε νέες κατευθύνσεις.



Εικόνα 9 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Όταν μιλάμε για το φάσμα των χρήσιμων συχνοτήτων, εννοούμε συχνότητες κάτω των 7GHz. Αυτό είναι λόγω του φαινομένου απόσβεσης της ενέργειας του κύματος σε υψηλές συχνότητες.

Πανεπιστήμιο Αιγαίου – Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων



Δηλαδή, καθώς ανεβαίνει η συχνότητα ενός η/μ κύματος, χάνει πιο γρήγορα την ενέργειά του. Οπότε, περιορίζεται και η απόσταση στην οποία η πληροφορία μπορεί να ανακτηθεί. Επίσης, λόγω της απόσβεσης, το σήμα περνάει από διακριτές διαδρομές μέσα από το κανάλι. Σε αντίθεση με πιο χαμηλές συχνότητες, οι οποίες ανακλώνται καλύτερα από το περιβάλλον (σε μικρότερες επιφάνειες), οπότε μπορούν να θεωρηθούν σαν κύμα που απλώνεται στον χώρο.

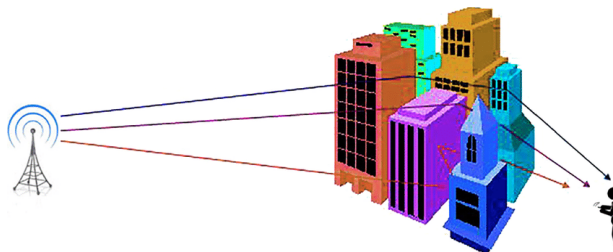
Μία εύκολη λύση στο παραπάνω πρόβλημα, θα ήταν να αυξάνουμε την ενέργεια που εκπέμπει ο πομπός καθώς ανεβαίνει η συχνότητα. Όμως, υπάρχουν προβλήματα με αυτήν την προσέγγιση. Το πρώτο είναι ότι έτσι ανεβαίνει η κατανάλωση ενέργειας στον πομπό. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερο κόστος λειτουργίας, κάτι που γενικά μας οδηγεί αναγκαστικά στον περιορισμό κατανάλωσης της ενέργειας, και την προσπάθεια χρήσης άλλων μεθόδων αύξησης της απόδοσης, όπως beamforming.

Επίσης, και πιο σημαντικά, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μεγάλης ισχύος είναι γνωστό ότι μπορεί να έχουν αρνητικές επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία. Είναι ευρέως γνωστό ότι οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες (ακτίνες γ και χ) είναι βλαβερές για την υγεία. Συγκεκριμένα, ξέρουμε ότι προκαλούν ζημιές στο γενετικό κώδικα των κυττάρων, οδηγώντας σε καρκινογένεση. Βέβαια, μιλάμε για συχνότητες στα 3×10^{16} Hz και πάνω, πολύ πιο χαμηλά από τα GHz (1×10^9 Hz) που πρόκειται να λειτουργήσει το 6G. Ακόμη όμως και σε χαμηλές συχνότητες, ακτινοβολία με υψηλή ενέργεια (ειδικά με εκτενή έκθεση) ενδέχεται να οδηγεί σε ζημιά στους βιολογικούς ιστούς. Γι' αυτό τον λόγο, υπάρχει νομοθεσία που επιβάλλει ανώτατο όριο στην ενέργεια από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ειδικά σε αστικές περιοχές.

Οπότε, στο 6G καλούμαστε να αξιοποιήσουμε νέες ζώνες συχνοτήτων, και ταυτόχρονα να αντιμετωπίσουμε τις προκλήσεις (όπως τις διακριτές διαδρομές και κόστος εκπομπής λόγω ενέργειας) και τους αντίστοιχους περιορισμούς (περιορισμός εκπεμπόμενης ενέργειας).

Επικοινωνία Χρησιμοποιώντας Μεγάλες Ευφυείς Επιφάνειες

Άλλη μια τεχνολογία που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το 6G, είναι οι Μεγάλες Ευφυείς Επιφάνειες (Large Intelligent Surfaces – LISs). Αποτελούν μία πολλά υποσχόμενη ιδέα για την αντιμετώπιση των σκιάσεων σε αστικά περιβάλλοντα.



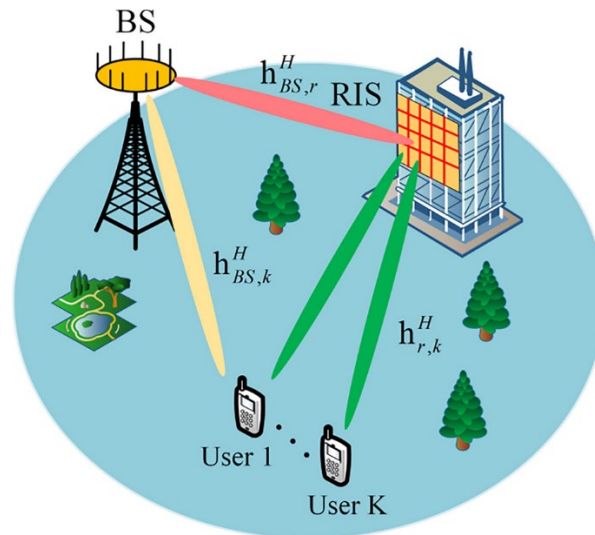
Εικόνα 10 Περίπτωση No Line-of-Sight

Ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη, το σήμα ταξιδεύει ως κύμα. Είναι λογικό λοιπόν, ότι η πιο σύντομη διαδρομή είναι η ευθεία από τον πομπό στον δέκτη. Αυτήν την διαδρομή την ονομάζουμε

Line-of-Sight (LoS), που σημαίνει ουσιαστικά ότι πρόκειται για την οπτική επαφή ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη. Αυτή η διαδρομή είναι που θα προσφέρει την περισσότερη ενέργεια σήματος στο δέκτη.

Όταν βρισκόμαστε σε ένα περιβάλλον με πολλά εμπόδια, όπως ένα αστικό περιβάλλον, είναι πολύ συχνό φαινόμενο να χάνετε η οπτική επαφή ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη. Επειδή για παράδειγμα, ο χρήστης κινείται στον χώρο, και παρεμβάλλει ένα κτήριο ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη. Αυτό οδηγεί σε σημαντική μείωση της λαμβανόμενης ισχύος του σήματος στον δέκτη, και άρα κακή λήψη.

Οι LIS προσπαθούν να δώσουν λύση σε αυτό το πρόβλημα. Ουσιαστικά, οι επιφάνειες αυτές θα χτίζονται σε μεγάλες επιφάνειες σε μία πόλη και θα λειτουργούν σαν «καθρέφτες». Έτσι, ανακλώντας με πολύ καλή απόδοση το σήμα που προσπίπτει πάνω τους, θα δημιουργούν οπτική επαφή ανάμεσα στον πομπό και δέκτη.



Εικόνα 11 Χρήση LIS για την δημιουργία διαδρομών για το σήμα

Αυτές οι επιφάνειες θα μπορούν να είναι επαναπροσδιορίσιμες και ιδιαίτερα ευφυείς. Θα μπορούν να έχουν αντίληψη των δίαυλων στον χώρο τους και να μην είναι απλώς παθητικά στοιχεία. Θα μπορούν να ακολουθούν τον κινούμενο χρήστη, και να παρέχουν κάλυψη σε πολλούς ταυτόχρονα, με διαφορετικές ανάγκες ο καθένας.

Ενσωματωμένα Επίγεια, Αέρια και Δορυφορικά Δίκτυα

Αυτή η αλλαγή στις ανάγκες που έχουμε από το δίκτυο τηλεπικοινωνιών μας αναγκάζει να αλλάξουμε και τον τρόπο με τον οποίο βλέπουμε το από τί αποτελείται ένα τέτοιο δίκτυο.

Μέχρι τώρα το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο πρόσβασης αποτελούνταν από σταθμούς βάσης (Base Station – BS) που ήταν τοποθετημένοι σε μία συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους. Για κάθε σταθμό οριζόνταν ένα εξάγωνο. Ο σταθμός ήταν υπεύθυνος για την εξυπηρέτηση των χρηστών

εντός της εμβέλειάς του. Φυσικά οι σταθμοί επικοινωνούν μεταξύ τους, ώστε να προσφέρουν καλύτερες υπηρεσίες στους χρήστες.

Αυτό το σχήμα όμως δεν μπορεί πλέον να καλύψει όλες τις ανάγκες που θα προκύψουν από τις τάσεις των χρηστών και της τεχνολογίας και έτσι δημιουργήθηκε το κίνητρο της εξέτασης των δικτύων μέσα από μια καινούργια οπτική.

Χρησιμοποιώντας τα drones ως ιπτάμενους σταθμούς βάσης, μπορούμε δυναμικά να αλλάζουμε τα ασύρματα δίκτυα. Όταν παρατηρούμε ότι σε ένα μέρος δεν υπάρχει επαρκής κάλυψη, μπορούμε να στέλνουμε ένα drone πάνω από αυτήν την περιοχή, ώστε να βοηθάει στην εξυπηρέτηση των χρηστών. Αυτή η χρήση επεκτείνεται και στην περίπτωση που υπάρχουν πολλοί χρήστες σε μία περιοχή.

Αντίστοιχα, για να μπορέσει το δίκτυο να ανταπεξέλθει, μπορεί να συνδυάζεται με κάλυψη από δορυφόρους.

Αυτές οι ετερογενείς τεχνολογίες μπορούν να συνδυαστούν, ώστε να παρέχουν την απαραίτητη ποιότητα υπηρεσίας.

Συλλογή και Μεταφορά Ενέργειας

Άλλη μια τεχνολογία η οποία θα μπορέσει να αλλάξει τελείως τον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε τις τηλεπικοινωνίες, είναι ο συνδυασμός των δικτύων επικοινωνιών και ενέργειας.

Η ιδέα είναι να μπορούμε να μεταφέρουμε με ασφάλεια ενέργεια σε ηλεκτρικές συσκευές, χωρίς να χρειάζεται να έχουμε σύνδεση με καλώδια. Αυτό θα έδινε μεγαλύτερη ανεξαρτησία σε συσκευές, και θα άνοιγε τον δρόμο για πάρα πολλές από τις εφαρμογές που ευελπιστούμε να αναπτυχθούν στον κλάδο του IoT.

Δυστυχώς, ακόμη και αν είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, είναι ακόμη σε πολύ αρχικό στάδιο, και χρειάζεται πολύ έρευνα και οικονομική επένδυση.

Παρουσίαση Άρθρου

Το άρθρο στο οποίο βασίστηκε η συγκεκριμένη εργασία είναι το «Sensing-Aided Communication Channel Estimation with Tensor-Based Moving Target Localization». Οι συγγραφείς του είναι οι:

- **Luning Lin:** Key Laboratory of Collaborative Sensing and Autonomous Unmanned Systems of Zhejiang Province, Zhejiang University, Hangzhou, **China**; Jinhua Institute of Zhejiang University, Zhejiang University, Jinhua, **China**
- **Hang Zheng:** Key Laboratory of Collaborative Sensing and Autonomous Unmanned Systems of Zhejiang Province, Zhejiang University, Hangzhou, **China**
- **Sergiy A. Vorobyov:** Department of Signal Processing and Acoustics, Aalto University, Espoo, **Finland**



- **Chengwei Zhou:** Key Laboratory of Collaborative Sensing and Autonomous Unmanned Systems of Zhejiang Province, Zhejiang University, Hangzhou, **China**
- **Zhiguo Shi:** Key Laboratory of Collaborative Sensing and Autonomous Unmanned Systems of Zhejiang Province, Zhejiang University, Hangzhou, **China**; Jinhua Institute of Zhejiang University, Zhejiang University, Jinhua, **China**

Δημοσιεύτηκε τον Απρίλιο του 2024, στο IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, που πραγματοποιήθηκε στην Σεούλ, Νότια Κορέα.

Το συγκεκριμένο άρθρο προτείνει έναν τρόπο να εκτιμούμε το τηλεπικοινωνιακό κανάλι, βρίσκοντας τα χαρακτηριστικά των σημείων σκέδασης. Έπειτα, μπορούμε να εξαιρέσουμε την επίδραση των πιο γρήγορων σκεδαστών, ώστε να μην επηρεάζουν αρνητικά το σήμα.

Ανήκει στον τομέα έρευνας της επικοινωνίας βοηθούμενης από τηλεπισκόπησης, που είναι μέρος της προσπάθειας ολοκλήρωσης της τηλεπισκόπησης και επικοινωνίας για τα δίκτυα νέας γενιάς.

Είναι ένα αρκετά δύσκολο κείμενο, καθώς δεν προσπαθεί να εξηγήσει στον αναγνώστη όλες τις έννοιες που διακυβεύεται, ούτε να δώσει μια ενδελεχή εικόνα του πεδίου με το οποίο ασχολείται. Με αποτέλεσμα το άρθρο να είναι σχετικά μικρό, αλλά αρκετά πυκνό σε έννοιες και φτωχό σε εξηγήσεις για το πώς φτάνει στα συμπεράσματά του. Είναι ένα τεχνικό κείμενο, που απευθύνεται σε ειδικούς του τομέα. Για αυτό τον λόγο, απαιτούνταν συνεχής αναζήτηση λεπτομερειών στις παρεχόμενες αναφορές.

Παρουσίαση Βασικών όρων

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν οι βασικοί όροι και έννοιες που θα χρησιμοποιήσουμε στην μελέτη μας. Κρίνεται ότι μια θεμελιώδη κατανόηση αυτών των όρων είναι απαραίτητη για να γίνει κατανοητή η μέθοδος που χρησιμοποιείται.

Από πλευρά μας, έγινε σημαντική προσπάθεια να παρουσιαστούν οι έννοιες όσο πιο απλά γίνεται, με εικόνες και παραδείγματα, ώστε να είναι εύκολη η κατανόηση και να είναι φυσική η μετάβαση ανάμεσα στις ιδέες.



Ηλεκτρομαγνητική Ισχύς

Ο τρόπος με τον οποίο οι ασύρματες επικοινωνίες λειτουργούν είναι χρησιμοποιώντας την φύση της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος.

Η ιδιότητες των ηλεκτρικών φορτίων και η ύπαρξη μαγνητών ήταν γνωστές στους επιστήμονες. Αλλά μόνο όταν μπόρεσε ο Maxwell να περιγράψει μαθηματικά την συμπεριφορά τους, έγινε πλήρως κατανοητή η φύση τους, και το πώς συνδέονται.



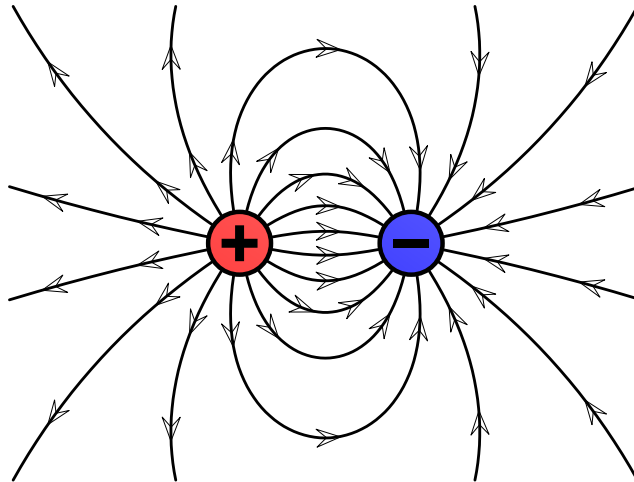
Ηλεκτρικό Πεδίο

Ηλεκτρικά φορτία δημιουργούν ηλεκτρικά πεδία.

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

Στην φύση συναντάμε θετικά και αρνητικά φορτία. Οι φορείς τους είναι το πρωτόνιο για τα θετικά και το ηλεκτρόνιο για τα αρνητικά. Κάθε ηλεκτρικό φορτίο ασκεί δύναμη σε κάθε άλλο φορτίο. Τα ομόσημα φορτία απωθούνται, ενώ τα ετερόσημα έλκονται.

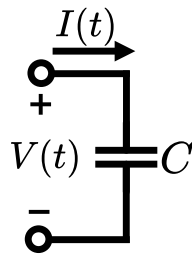
Όταν μελετάμε την δύναμη που ασκούν τα φορτία μεταξύ τους, μιλάμε για το ηλεκτρικό πεδίο. Δηλαδή το φορτίο δημιουργεί ένα πεδίο γύρω του, και η τιμή αυτού του πεδίου σε ένα σημείο είναι το μέτρο της δύναμης που θα ασκούσε το φορτίο σε ένα άλλο αν βρισκόταν σε εκείνη την θέση. Αντίστοιχα, η κατεύθυνση του πεδίου σε αυτό το σημείο είναι η κατεύθυνση της δύναμης που θα ασκούσαν.



Εικόνα 12 Δύο φορτία και το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ τους

Έχοντας μία κλειστή ή άπειρη επιφάνεια, το σύνολο του ηλεκτρικού πεδίου ισούται με το ηλεκτρικό φορτίο μέσα σε αυτή.

Αυτή η ιδιότητα των φορτίων οδηγεί την αρχή λειτουργίας των πυκνωτών. Ένας πυκνωτής είναι ουσιαστικά δύο αγωγίμες πλάκες, με έναν μονωτή μεταξύ τους. Δημιουργώντας διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο άκρες του πυκνωτή, συσσωρεύεται φορτίο στην μία πλάκα. Αυτό το φορτίο, «σπρώχνει» τα αντίστοιχα φορτία στην άλλη πλάκα, οπότε ουσιαστικά περνάει κανονικά ρεύμα μέσα από τον πυκνωτή, δηλαδή συμπεριφέρεται σαν κλειστό κύκλωμα.



Εικόνα 13 Πυκνωτής

Καθώς όμως φορτίζει η μία πλάκα, γίνεται όλο και πιο δύσκολο να μπουने κι άλλα φορτία στην πλάκα, οπότε το ρεύμα που περνάει μέσα από τον πυκνωτή πέφτει μέχρι που η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο πλάκες να γίνει ίση με αυτήν που βάλαμε στις άκρες του πυκνωτή και το ρεύμα σταματάει να περνάει. Σε αυτήν την φάση, λέμε ότι ο πυκνωτής έχει φορτίσει, και συμπεριφέρεται σαν ανοιχτοκύκλωμα.

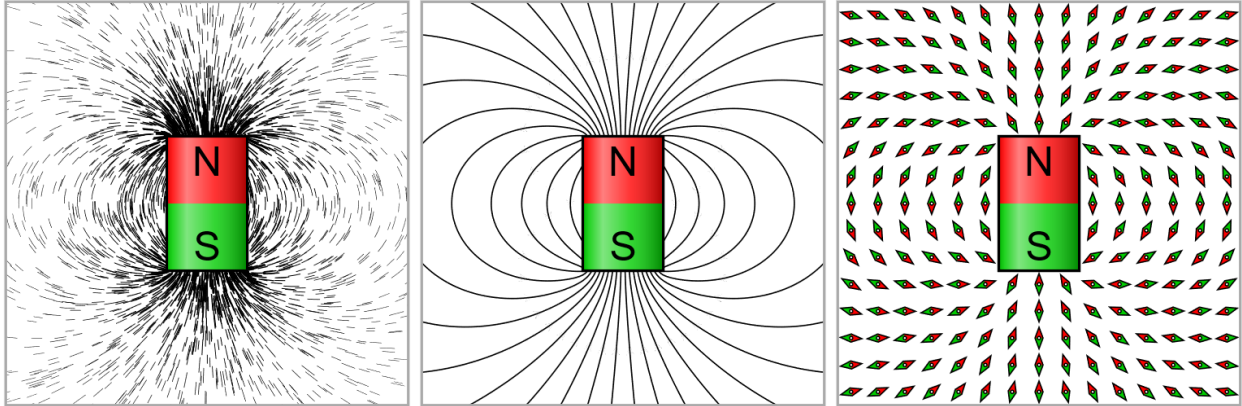
Αν όμως σταματήσουμε να ασκούμε διαφορά δυναμικού στον πυκνωτή, αυτός αδειάζει τις πλάκες του και φέρεται σαν πηγή τάσης. Αφού αποφορτίσει ο πυκνωτής, το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία.

Μαγνητικό Πεδίο

Σημειώνεται ότι δεν υπάρχει μαγνητικό φορτίο.

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

Σε αντίθεση με την προηγούμενη εξίσωση αυτή η εξίσωση μας δείχνει ότι δεν υπάρχει κάποιο σωματίδιο που να δημιουργεί μαγνητικό πεδίο. Αντίθετα, δημιουργείται από άλλα φαινόμενα.



Εικόνα 14 Μαγνήτης και το μαγνητικό φορτίο

Αν μετρήσουμε το μαγνητικό πεδίο σε οποιαδήποτε κλειστή ή άπειρη επιφάνεια, το αποτέλεσμα θα είναι πάντα μηδέν.

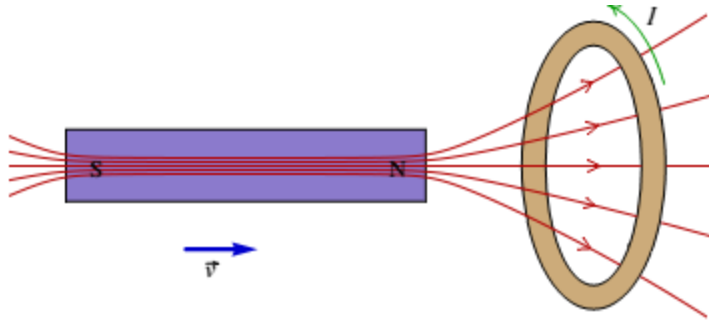
Το πιο παραδοσιακό παράδειγμα μαγνητικού πεδίου είναι αυτό που δημιουργούν οι μαγνήτες. Λόγω της ταύτισης των πεδίων των φορτίων μέσα σε αυτούς, εμφανίζουν την συμπεριφορά έλξης και απώθησης άλλων μαγνητών και μαγνητικών υλικών.

Επαγωγή Ηλεκτρικού Πεδίου

Μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία δημιουργούν ηλεκτρικό πεδίο.

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

Αυτή η εξίσωση μας δείχνει ότι εάν κινήσουμε έναν μαγνήτη, το μαγνητικό του πεδίο δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο.



Εικόνα 15 Μαγνήτης και η επαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος

Αυτό φαίνεται στην παραπάνω εικόνα. Πλησιάζοντας έναν μαγνήτη σε έναν αγωγό το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται ασκεί δύναμη στα φορτία μέσα στον αγωγό και έτσι παρατηρούμε ρεύμα μέσα στον αγωγό.

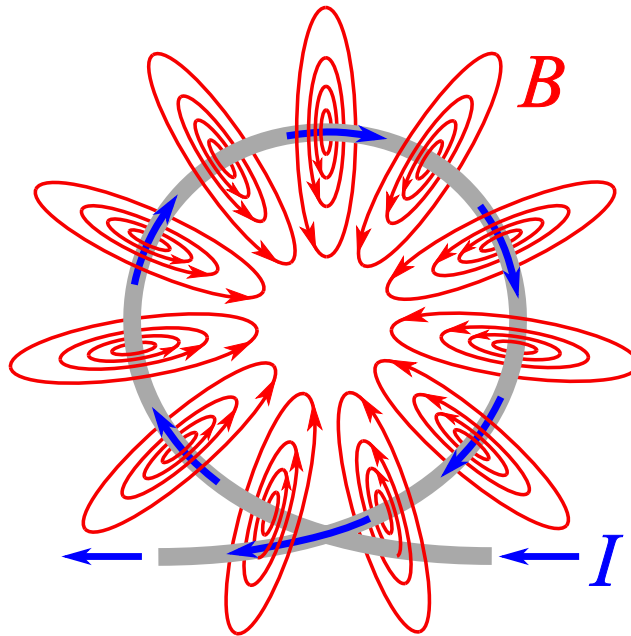
Στην παραπάνω αρχή στηρίζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έχοντας μία δύναμη που μπορεί να δημιουργήσει κίνηση, όπως το νερό σε ένα φράγμα ή ο αέρας, μπορούμε να επιταχύνουμε μαγνήτες κοντά σε αγωγούς και έτσι να έχουμε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Επαγωγή Μαγνητικού Πεδίου

Ηλεκτρικό ρεύμα και μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία δημιουργούν μαγνητικό πεδίο.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

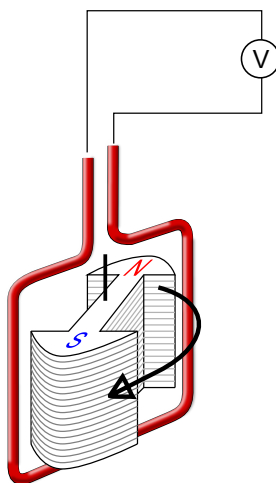
Όταν έχουμε ένα ηλεκτρικό φορτίο να επιταχύνεται, αλλάζει το ηλεκτρικό φορτίο που παράγει στον χώρο. Αυτό δημιουργεί ένα μαγνητικό φορτίο που ασκεί δύναμη σε άλλους μαγνήτες.



Εικόνα 16 Ηλεκτρικό ρεύμα και η επαγωγή μαγνητικού πεδίου

Σε αντιστοιχία με τον πυκνωτή, με αυτήν την ιδιότητα μπορούμε να περιγράψουμε την συμπεριφορά ενός πηνίου. Όταν συνδέουμε μία πηγή ρεύματος σε ένα κύκλωμα τα φορτία μέσα σε αυτό επιταχύνονται και έτσι δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Όταν ο αγωγός περιστρέφεται όπως σε ένα πηνίο, τα μαγνητικά φορτία συμβάλουν και η διάταξη λειτουργεί σαν ένας μαγνήτης. Στην αρχή, η διάταξη καταναλώνει την ενέργεια των φορτίων για να δημιουργηθεί το μαγνητικό φορτίο και το πηνίο λειτουργεί σαν ανοιχτοκύκλωμα. Καθώς όμως, «φορτίζει το μαγνητικό πεδίο», γίνεται όλο και πιο εύκολο για τα φορτία να περάσουν από μέσα. Όταν φορτίσει τελείως το πηνίο συμπεριφέρεται σαν απλό καλώδιο.

Αν σταματήσουμε την πηγή ρεύματος, τα φορτία προσπαθούν να σταματήσουν. Τότε, το μαγνητικό πεδίο καταναλώνει την ενέργεια του, συνεχίζοντας να προωθεί τα φορτία και το πηνίο φαίνεται να λειτουργεί σαν πηγή ρεύματος.

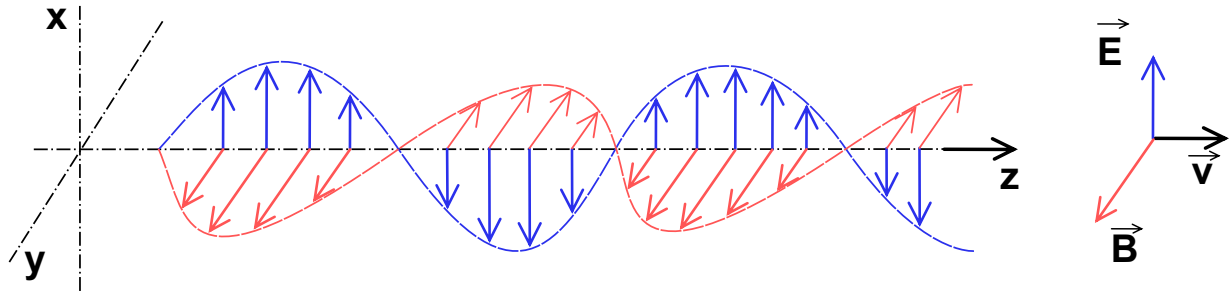


Εικόνα 17 Ηλεκτρικός Κινητήρας

Χρησιμοποιώντας αυτήν την αρχή λειτουργούν οι ηλεκτρικοί κινητήρες. Περνώντας ρεύμα μέσα από ένα πηνίο μπορούμε να ασκήσουμε δύναμη και να κινήσουμε μαγνήτες.

Ηλεκτρομαγνητικό Κύμα

Η τρίτη και η τέταρτη ιδιότητα είναι που μας αφορούν περισσότερο. Δείχνουν την σχέση ανάμεσα σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που συνθέτουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Όταν επιταχύνουμε ένα ηλεκτρικό φορτίο αλλάζει και το πεδίο που παράγει γύρω του. Καθώς μεταβάλλεται το ηλεκτρικό πεδίο, δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Έπειτα το ηλεκτρικό πεδίο αρχίζει να αποσβένει. Όμως η ενέργεια του μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο μεταβαλλόμενο δημιουργεί μαγνητικό πεδίο κτλ.



Εικόνα 18 Ηλεκτρομαγνητικό κύμα στο κενό

Έτσι επιταχύνοντας ηλεκτρικά φορτία, μπορούμε να μεταφέρουμε ενέργεια με την μορφή η/μ κυμάτων τα οποία είναι αυτοεπαγόμενα και ταξιδεύουν στον χώρο με την ταχύτητα του φωτός.

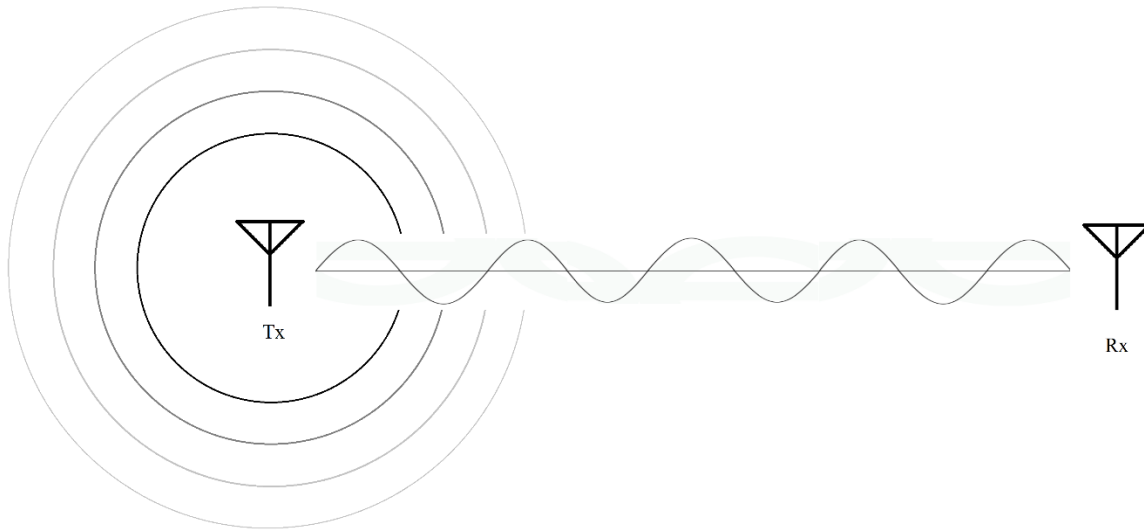
Το η/μ κύμα ταξιδεύει στον χώρο μακριά από την πηγή και συνήθως απλώνεται, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ισχύς του ανά μονάδα εμβαδού. Γι' αυτό μιλάμε για απώλειες διαδρομής, δηλαδή την απώλεια της ισχύος του σήματος όταν φτάνει στον δέκτη.

Ασύρματες Επικοινωνίες

Στις ασύρματες επικοινωνίες θέλουμε να στείλουμε πληροφορία από τον πομπό στον δέκτη. Αυτό το κάνουμε επιταχύνοντας ηλεκτρικά φορτία μέσα σε μία αγώγιμη διάταξη, την κεραία. Στη συνέχεια η κεραία πραγματοποιεί το σχηματισμό ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και ανάλογα με το διάγραμμα ακτινοβολίας της υποστηρίζει την κατεύθυνση τους προς τον δέκτη. Αντίστοιχα, ο δέκτης έχει μια κεραία η οποία λαμβάνει το σήμα μέσω της επαγωγής των η/μ κυμάτων και τα αφήνει να επιταχύνουν φορτία στον αγωγό. Έτσι, ο δέκτης καταλαβαίνει τα χαρακτηριστικά του ρεύματος στον δέκτη και μπορεί να τις μεταφράσει σε πληροφορία.

Ασύρματο Κανάλι

Έχοντας (τουλάχιστο) δύο κεραίες, υλοποιούμε την μεταξύ τους επικοινωνία. Ο πομπός στέλνει ένα αρμονικό/ημιτονοειδές σήμα στον δέκτη. Καθώς το σήμα ταξιδεύει, απλώνεται στον χώρο, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ενέργεια που θα φτάσει στον δέκτη. Σαν αποτέλεσμα, ο δέκτης θα το αντιληφθεί σαν πτώση στην ισχύ και το πλάτος του σήματος. Αντίστοιχα, το σήμα θα φτάσει με διαφορετική φάση στον δέκτη.



Εικόνα 19 Εκπομπή ηλεκτρομαγνητικού κύματος από πομπό σε δέκτη

Η μεταβολή του σήματος καθώς περνάει μέσα από το κανάλι μπορεί να γραφτεί μία εξίσωση ως:

$$y = h * s + n \quad (1)$$

Όπου s το σύμβολο που στέλνει ο πομπός, h η παραμόρφωση από το κανάλι – που μοντελοποιείται ως ένα γραμμικό φίλτρο με τη συγκεκριμένη κρουστική απόκριση, n ο θόρυβος και y το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης.

Το Κανάλι στην Τηλεπισκόπηση

Από το παραπάνω τύπο, μπορούμε να αναλύσουμε παραπάνω την παραμόρφωση, για να δούμε από ποιους παράγοντες εξαρτάται.

Συνήθως εξαρτάται από την απόσταση, την γωνία ανάμεσα στις κεραίες και την ταχύτητα πομπού-δέκτη ή και σκεδαστών. Πολύ συχνά, το κανάλι δεν παραμένει σταθερό στον χρόνο. Οπότε, η συνάρτηση (1) γίνεται:

$$y = h(\eta) * s + n$$

Όπου η η χρονική μεταβλητότητα των παραγόντων του καναλιού.

Ο σκοπός της τηλεπισκόπησης είναι γνωρίζοντας τα y και s , να βρούμε τους παράγοντες η . Έτσι, συλλέγουμε πληροφορία για το κανάλι.

Το Κανάλι στις Τηλεπικοινωνίες

Στις τηλεπικοινωνίες, ο αντικειμενικός σκοπός είναι ο δέκτης να μπορέσει να ανακτήσει το s που έστειλε ο πομπός.

Σε κάθε περίπτωση, ο θόρυβος είναι αναπόφευκτος και επιδρά αρνητικά στην επίδοση του συστήματος, καθώς πλέον δεν μπορούμε να καταλάβουμε ποιο κομμάτι του σήματος είναι λόγω της τυχαιότητας σε συνδυασμό με την μεταβλητότητα των παραγόντων του καναλιού.

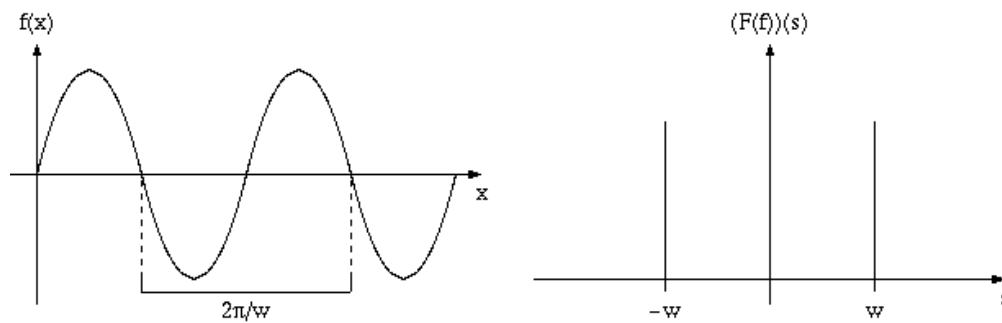
Μετασχηματισμός Fourier και Ασύρματες Επικοινωνίες

Σημαντικό ρόλο στις τηλεπικοινωνίες παίζει ο μετασχηματισμός Fourier.

Ο Fourier ήταν ένας Γάλλος μαθηματικός στα τέλη του 18^{ου} – αρχές 19^{ου} αιώνα, που ασχολήθηκε με πολλά θέματα της φυσικής και των μαθηματικών. Συνέλαβε τον μετασχηματισμό Fourier όταν μελετούσε την μετάδοση της θερμότητας μέσω στερεών σωμάτων. Σύμφωνα με αυτόν, ένα σήμα στον χρόνο μπορεί να αναλυθεί σε άθροισμα ημιτονοειδών συναρτήσεων με διαφορετικά πλάτη και συχνότητες. Πρόκειται ουσιαστικά για μια αντιστοίχιση μιας συνάρτησης σε ένα άθροισμα ημιτονοειδών συναρτήσεων. Πιο συγκεκριμένα, είναι η αντιστοίχιση συναρτήσεων από τον χρόνο στο πεδίο των συχνοτήτων και δίνεται από τον τύπο:

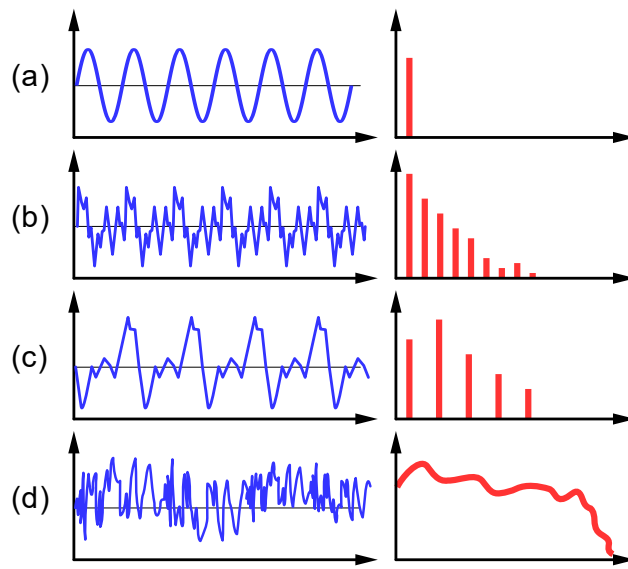
$$X(\Omega) \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\Omega t} dt$$

Τα ημιτονοειδή σήματα μετασχηματίζονται σε κρουστικές συναρτήσεις, στην συχνότητα του σήματος.



Εικόνα 20 Μεταφορά σήματος από τον χρόνο στην συχνότητα

Έχοντας ένα σήμα στον χρόνο μπορούμε να το αναλύσουμε στις συχνότητες που το αποτελούν. Η τετραγωνική τιμή του μετασχηματισμού είναι η κατανομή ισχύος του σήματος σε αυτήν την συχνότητα.

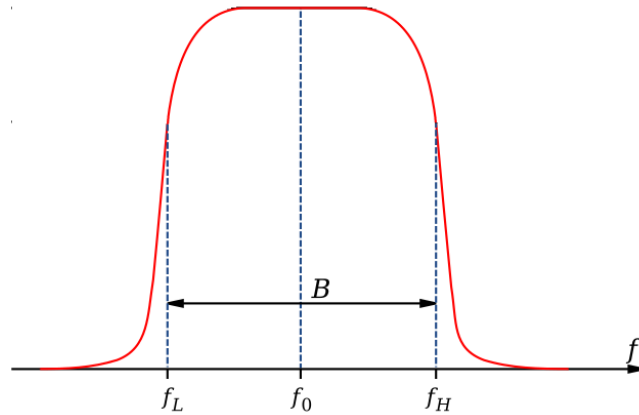


Εικόνα 21 Παραδείγματα συχνοτήτων διαφορετικών σημάτων

Στην εικόνα 21 βλέπουμε παραδείγματα αντιστοίχισης σημάτων με τον αντίστοιχο μετασχηματισμό τους. Το σήμα (a) είναι ένα απλό αρμονικό σήμα, και όπως είδαμε παραπάνω αντιστοιχεί σε κρουστική συνάρτηση στην συχνότητα του σήματος. Αντίστοιχα τα (b) και (c) αποτελούνται από σύνθεση διαφορετικών αρμονικών και αυτό φαίνεται και στους μετασχηματισμούς τους. Αντίθετα το (d) είναι ένα πιο αντιπροσωπευτικό παράδειγμα σημάτων που συναντάμε όταν συλλέγουμε σήματα από το φυσικό περιβάλλον. Αντιστοιχεί σε μη-αριθμήσιμο σύνολο συχνοτήτων. Δηλαδή, το σήμα έχει ενέργεια σε όλες τις συχνότητες μέσα στο εύρος φάσματός του.

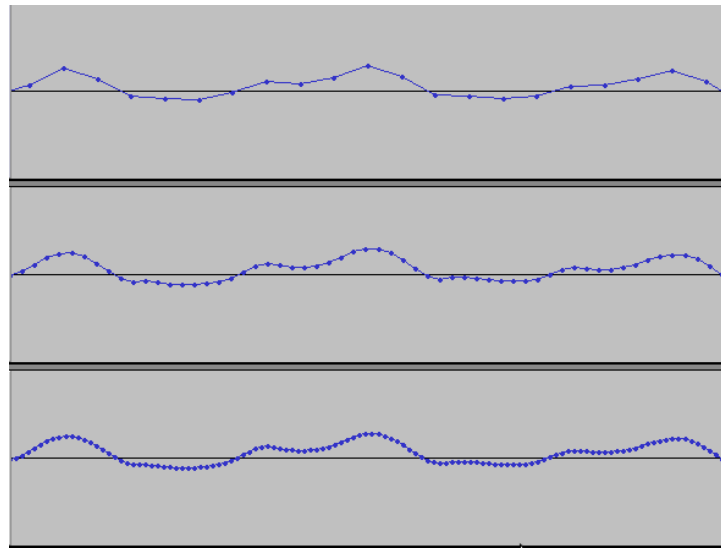
Η χρήση του μετασχηματισμού Fourier είναι τεράστιας σημασίας για τις τηλεπικοινωνίες καθώς μας δίνει την δυνατότητα να βλέπουμε τα σήματά μας τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας.

Παράδειγμα, έχοντας ένα σήμα που θέλουμε να το μεταδώσουμε, μπορούμε να το αναλύσουμε στην συχνότητα για να δούμε το εύρος ζώνης που θα χρειαστούμε.



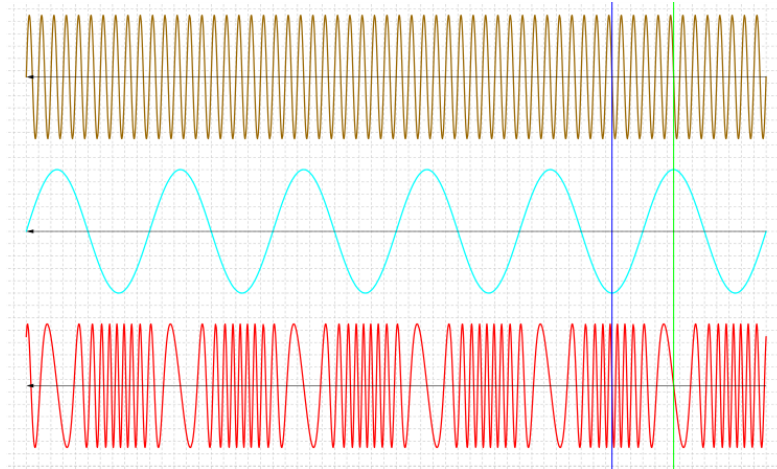
Εικόνα 22 Εύρος ζώνης

Για παράδειγμα, αναλύοντας την ηχογράφηση της ανθρώπινης φωνής, ξέρουμε ποια είναι η μέγιστη συχνότητα την οποία περιέχει. Χρησιμοποιώντας την διπλάσια συχνότητα ως συχνότητα δειγματοληψίας με βάση το θεώρημα δειγματοληψίας Nyquist, εξασφαλίζουμε ότι μπορούμε να περάσουμε το αναλογικό σήμα σε ψηφιακό, χωρίς να έχουμε απώλεια πληροφορίας.



Εικόνα 23 Δειγματοληψία σήματος με διαφορετικές συχνότητες

Τέλος, άλλη μια χρήσιμη λειτουργία που προκύπτει από τις ιδιότητες του μετασχηματισμού Fourier είναι η δυνατότητα διαμόρφωσης. Απλώς πολλαπλασιάζοντας το σήμα βασικής ζώνης με την φέρουσα υψηλής συχνότητας, μπορούμε να μεταφερθούμε αλλού στο φάσμα, όπου δεν έχουμε παρεμβολές ανάμεσα σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων.



Εικόνα 24 Διαμόρφωση σήματος σε υψηλότερη συχνότητα

Μιγαδικοί και Ασύρματες Επικοινωνίες

Ένα καλό μοντέλο του ασύρματου καναλιού με επίπεδες διαλείψεις (flat fading) είναι η θεώρηση του ως πολλαπλασιασμό με έναν μιγαδικό. Στην βάση του λόγου που χρησιμοποιούμε μιγαδικούς στην αναπαράσταση αρμονικών συναρτήσεων είναι ο τύπος του Euler:

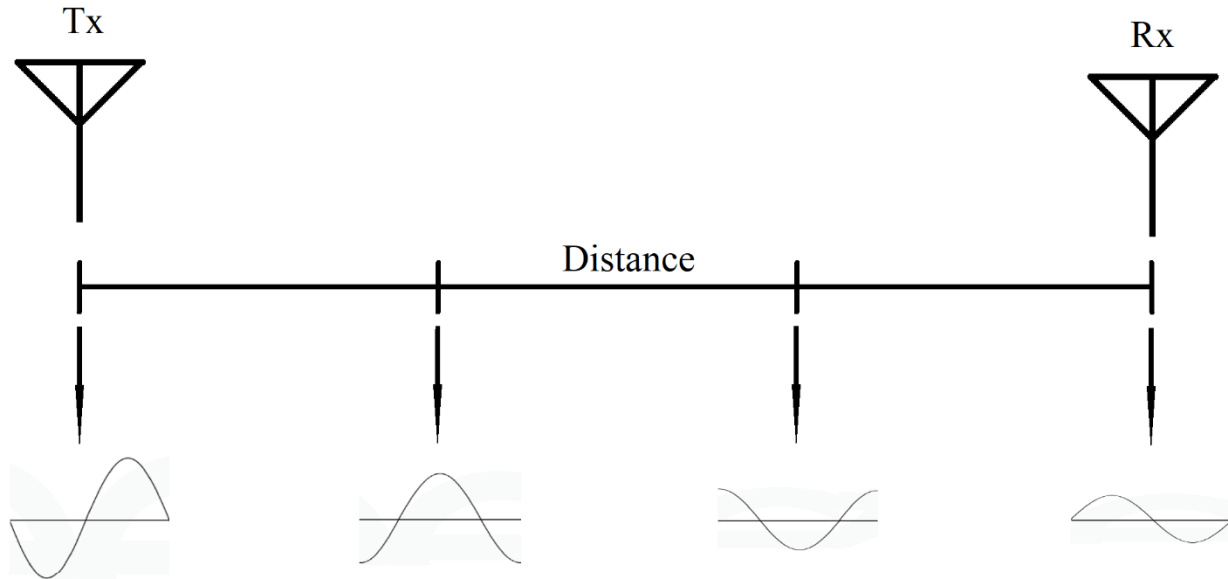
$$e^{ix} = \cos x + i \sin x$$

Χρησιμοποιώντας αυτόν τον τύπο, αντιστοιχούμε ημιτονοειδείς συναρτήσεις σε μιγαδικές συναρτήσεις και έπειτα σε πολική μορφή. Έτσι, μπορούμε να κάνουμε πράξεις και μαθηματικούς μετασχηματισμούς πολύ πιο εύκολα.

Ως παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι το σήμα που στέλνει ο πομπός στο σχήμα 25 δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$f(x) = a \cos(x + b)$$

Καθώς ταξιδεύει μειώνεται η ενέργειά του και άρα μειώνεται το πλάτος του. Ταυτόχρονα, λόγω της απόστασης, αλλάζει και η φάση του σήματος.



Εικόνα 25 Απόσβεση ενέργειας και αλλαγή φάσης με την απόσταση

Αυτήν την μεταβολή μπορούμε να την περιγράψουμε μαθηματικά με τριγωνομετρικές εξισώσεις. Το σήμα ξεκινάει ως:

$$a \cos(x + b)$$

Και καταλήγει στον δέκτη ως:

$$c \cos(x + d)$$

Αν θέλουμε να μοντελοποιήσουμε την επίδραση του καναλιού σύμφωνα με τον τύπο (1), πρέπει να βρούμε την συνάρτηση $h(x)$, για την οποία ισχύει:

$$h(x) = \frac{c \cos(x + d)}{a \cos(x + b)}$$

Γρήγορα, μπορούμε να δούμε ότι το πρόβλημα γίνεται αρκετά περίπλοκο, ειδικά όσο αφορά την φάση του σήματος.

Αντί αυτού, μπορούμε να προσέξουμε ότι το πραγματικό κομμάτι του μιγαδικού αριθμού e^{ix} συμπεριφέρεται ακριβώς όπως η $f(x)$. Οπότε, αντί να χρησιμοποιήσουμε τριγωνομετρικές ταυτότητες με τις $f(x)$ και $h(x)$, μπορούμε να τις φέρουμε σε πολική μορφή, δηλαδή:

$$f(x) = \operatorname{Re}(ae^{ix+b}) = \operatorname{Re}(a \cos(x + b) + a i \sin(x + b)) = a \cos(x + b)$$

Και αντίστοιχα, φτάνει ως:

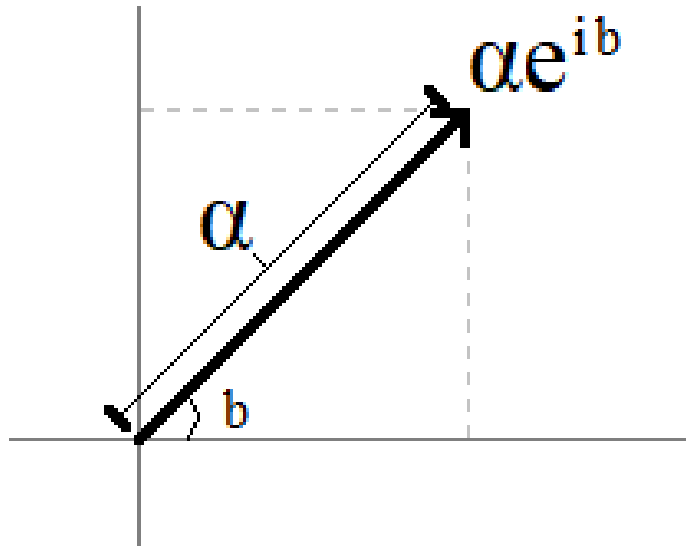
$$\operatorname{Re}(ce^{ix+d}) = \operatorname{Re}(c \cos(x + d) + c i \sin(x + d)) = c \cos(x + d)$$

Για να μην κάνουμε την διαίρεση ανάμεσα στις τριγωνομετρικές μορφές, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις πολικές μορφές, που είναι πιο απλές οι πράξεις, και να κρατήσουμε το πραγματικό κομμάτι:

$$h(x) = \operatorname{Re} \left(\frac{ce^{ix+d}}{ae^{ix+b}} \right) = \operatorname{Re} \left(\frac{c}{a} e^{ix+d-ix-b} \right) = \operatorname{Re} \left(\frac{c}{a} e^{d-b} \right) = \frac{c}{a} \cos (d - b)$$

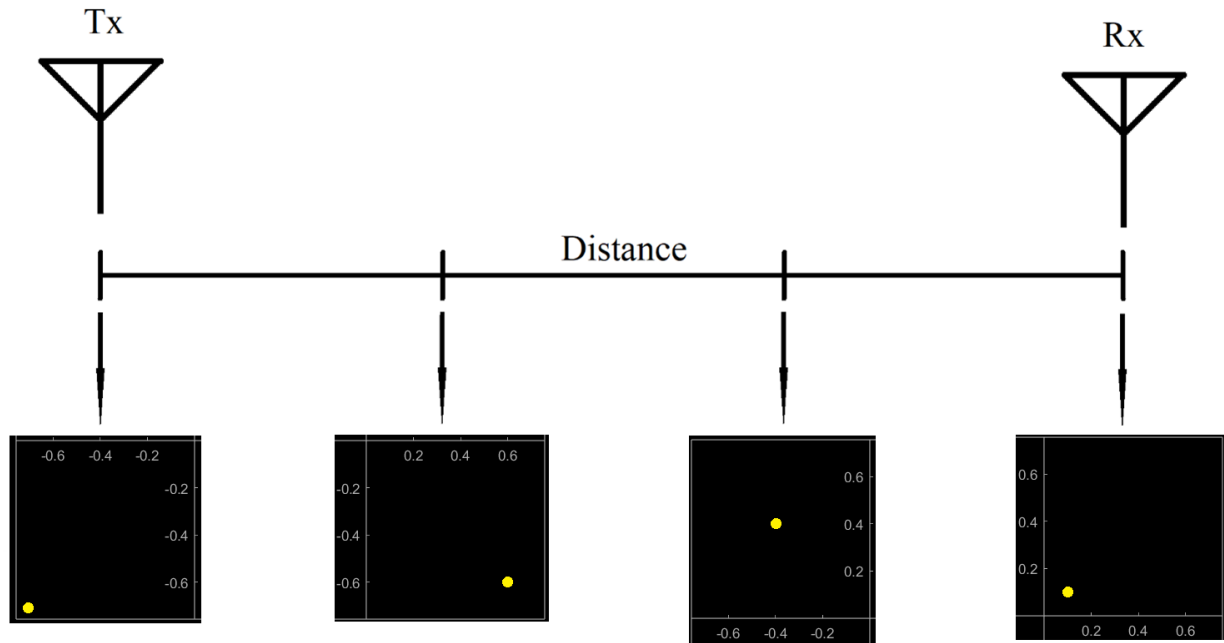
Έτσι, καταλήξαμε σε μία σταθερά για την επίδραση του καναλιού στο σήμα.

Πέρα από τα παραπάνω, δεν χρειάζεται να φύγουμε από την μιγαδική/πολική αναπαράσταση του σήματος και του συστήματος. Μένουμε σε πολική μορφή όσο πιο πολύ γίνεται, για την μαθηματική διευκόλυνσή. Συμβολίζουμε το σήμα στο μιγαδικό πεδίο, όπου το πλάτος του σήματος είναι το μέτρο του μιγαδικού, και η φάση η κατεύθυνση του μιγαδικού διανύσματος.



Εικόνα 26 Συμβολισμός πολικής μορφής μιγαδικού

Έτσι, μπορούμε να δούμε το σήμα σε όλες τις φάσεις της διάδοσης.



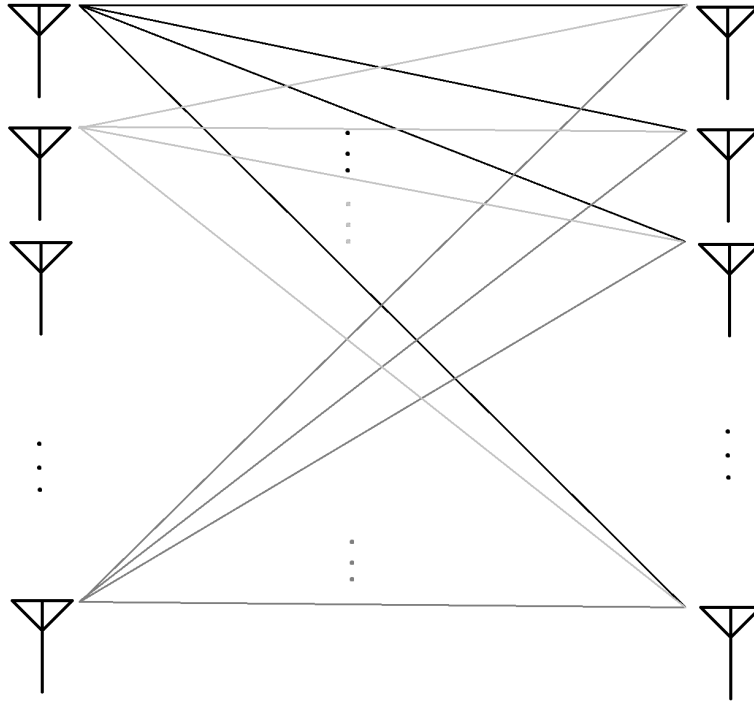
Εικόνα 27 Αντιστοίχιση του σήματος στο μιγαδικό πεδίο

Με αυτήν την τεχνική, κάνουμε πολύ πιο εύκολες και κατανοητές τις πράξεις.

Πέρα από αυτό, γίνεται και πιο εύκολη η προσομοίωση, καθώς έχουμε μοντέλα που μας δίνουν την μιγαδική αναπαράσταση του καναλιού σύμφωνα με τις συνθήκες που επικρατούν σε αυτό. Έτσι, έχοντας τα σύμβολα, το κανάλι και τον θόρυβο σε μιγαδική μορφή, γίνεται εύκολα και γρήγορα η προσομοίωση της επικοινωνίας ανάμεσα στον πομπό και δέκτη.

Πέρασμα από μία Κεραία σε Πολλές: MIMO

Η παραδοσιακή προσέγγιση για την τηλεπισκόπηση είναι να χρησιμοποιούμε μεγάλες παραβολικές κεραίες ή γενικά κεραίες με μεγάλη κατευθυντικότητα για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος. Παρ' όλ' αυτά, ήδη από πολύ νωρίς (2^{ος} Παγκόσμιος Πόλεμος) υπήρχε η ιδέα αντί να χρησιμοποιούμε λίγες μεγάλες και σύνθετες κεραίες, να χρησιμοποιούμε πολλές μικρές για τον πομπό και τον δέκτη.



Εικόνα 28 Σύστημα πομπού-δέκτη με πολλές κεραίες

Έτσι, έχουμε πολλά μικρά ανεξάρτητα συστήματα, το καθένα από αυτά συνεισφέρει λίγο διαφορετικά στην εικόνα του συνολικού συστήματος. Το κανάλι της διαδρομής από κάθε κεραία του πομπού σε κάθε κεραία του δέκτη χαρακτηρίζεται από έναν μιγαδικό. Μπορούμε να βάλουμε όλους αυτούς τους παράγοντες σε έναν πίνακα. Έτσι, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε γραμμική άλγεβρα για να κάνουμε πράξεις. Το πιο απλό παράδειγμα για να το αναλύσουμε αυτό είναι να δούμε τους πίνακες.

Έχοντας N_T κεραίες ο πομπός και N_R κεραίες ο δέκτης, έχουμε έναν πίνακα H για το κανάλι με διαστάσεις:

$$\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_R \times N_T}$$

Ο πομπός στέλνει το ίδιο σύμβολο από κάθε κεραία και ο δέκτης παίρνει μία τιμή από κάθε κεραία:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H} * \mathbf{S} + \mathbf{N}$$

Όπου:

$$\mathbf{S} \in \mathbb{C}^{N_T}$$

$$\mathbf{N} \in \mathbb{C}^{N_R}$$

Και από το αποτέλεσμα του γινομένου πινάκων:

$$\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{N_R}$$

Beamforming – Διαμόρφωση δέσμης

Βασιζόμενοι στην χρήση πολλών κεραιών, υπάρχουν πολλές τεχνικές που μπορούμε να υλοποιήσουμε για να βελτιώσουμε τη λήψη.

Η πιο απλή είναι η χρήση Phased Arrays (φασικές διατάξεις κεραιών) για να κάνουμε Beamforming. Phased Array είναι μία διάταξη πολλών κεραιών, οι οποίες στέλνουν το ίδιο σύμβολο, αλλά η κάθε κεραία μπορεί να το στείλει με διαφορετική φάση.

Αυτό μας επιτρέπει να διαλέξουμε σημεία στον χώρο, όπου οι διαφορετικές φάσεις των η/μ κυμάτων συμβάλουν προσθετικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να γίνεται πιο εύκολη η ανάκτηση του αρχικού συμβόλου.

Αντίστοιχα, ο δέκτης μπορεί να διαλέξει από ποιες κατευθύνσεις θα λαμβάνει καλύτερα το σήμα.

Ξέροντας ο πομπός και δέκτης την σχετική θέση μεταξύ τους, μπορούν να κατευθύνουν το σήμα ώστε να αυξήσουν την τελική ενέργεια του σήματος.

Τις διαφορές φάσης της κάθε κεραίας μαθηματικά τις τοποθετούμε σε διανύσματα (ή διαγώνιους πίνακες). Το τηλεπικοινωνιακό κανάλι έρχεται λοιπόν σε αυτήν την μορφή:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}^H \mathbf{H} \mathbf{F} \mathbf{S} + \mathbf{N}$$

Όπου $\mathbf{F}$ το διάνυσμα που χρησιμοποιεί για το beamforming ο πομπός και $\mathbf{W}$ το διάνυσμα για το πώς θα συνδυάσει ο δέκτης το σήμα από κάθε κεραία. Προφανώς, για αυτά ισχύει:

$$\mathbf{F} \in \mathbb{C}^{N_T}$$

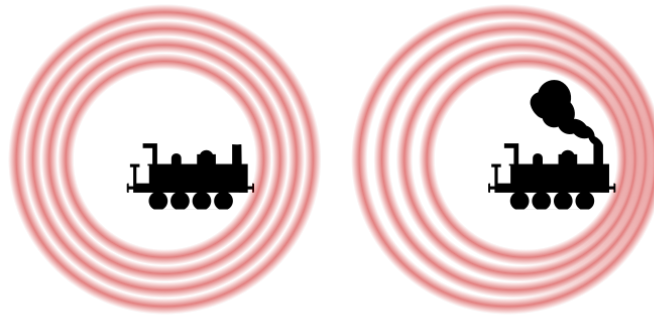
$$\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{N_R}$$

Φαινόμενο Doppler και Αντίκτυπο στις Τηλεπικοινωνίες

Το φαινόμενο Doppler είναι μεγάλης σημασίας στις τηλεπικοινωνίες, καθώς επηρεάζει σημαντικά το σήμα.

Αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται λόγω της σχετικής ταχύτητας ανάμεσα στον πομπό και δέκτη. Το πιο απλό παράδειγμα είναι κοινώς γνωστό, η μεταβολή στην συχνότητα του ήχου ενός οχήματος καθώς περνάει δίπλα από τον παρατηρητή.

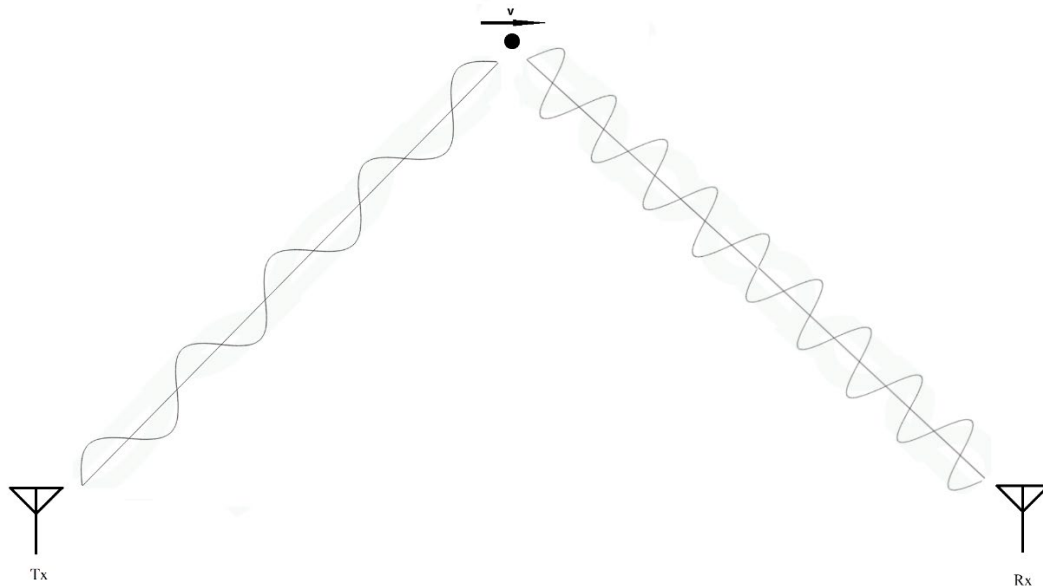




Εικόνα 29 Φαινόμενο Doppler στην συχνότητα των ηχητικών κυμάτων

Όταν το όχημα πλησιάζει παρατηρούμε αύξηση της συχνότητας του κύματος, ενώ αφού απομακρύνεται το όχημα μείωση της συχνότητας.

Αντίστοιχο φαινόμενο παρατηρείται και όταν δεν έχουμε διαφορά ταχύτητας ανάμεσα στον πομπό και δέκτη, αλλά κινείται στον χώρο ένα από τα σημεία ανάκλασης του κύματος.



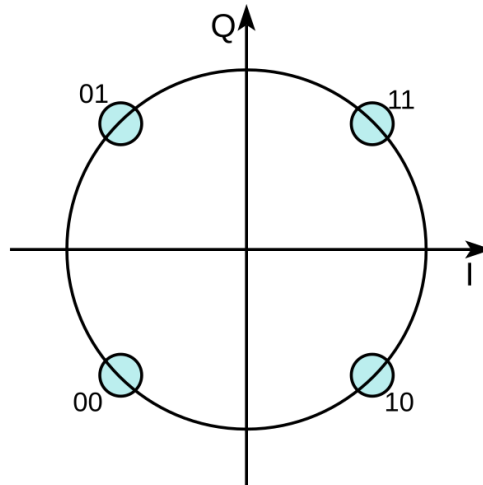
Εικόνα 30 Ολίσθηση της συχνότητας του σήματος μετά από ανάκλαση σε κινούμενο στόχο

Στις τηλεπικοινωνίες αυτό οδηγεί σε μείωση της επίδοσης, καθώς αλλάζει η συχνότητα του σήματος, οπότε και γίνεται πιο δύσκολη η ανάκτηση των αρχικών χαρακτηριστικών του σήματος.

Αντίθετα στην τηλεπισκόπηση, η μετατόπιση του σήματος λόγω του φαινομένου Doppler μας δίνει πληροφορία για την ταχύτητα του σημείου ανάκλασης στο περιβάλλον. Αν αυτό το σημείο είναι ένα αεροπλάνο, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του είναι τεράστιας στρατηγικής σημασίας.

Quadrature Phase-Shift Keying Modulation

Μία από τις βασικές ψηφιακές διαμορφώσεις, βασίζεται στην επισύναψη της ψηφιακής πληροφορίας στην φάση και πλάτος ενός αρμονικού σήματος. Με βάση μία συχνότητα, παράγουμε παλμούς με διαφορετική φάση και πλάτος.



Εικόνα 31 Τα σύμβολα του QPSK

Όπως είπαμε παραπάνω, στην QPSK στέλνουμε ένα αρμονικό σήμα, αλλάζοντας μόνο την φάση ανάμεσα σε διαφορετικούς παλμούς.

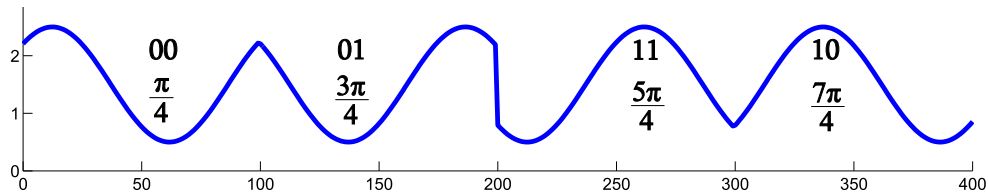
Η QPSK είναι από τις πιο απλές διαμορφώσεις, καθώς δεν αλλάζει σημαντικά το σήμα από σύμβολο σε σύμβολο. Επίσης καθώς όλα τα σύμβολα έχουν το ίδιο πλάτος, έχουν και την ίδια ενέργεια, οπότε γίνεται πολύ εύκολο να γνωρίζουμε τις απαιτήσεις ενέργειας που θα έχουμε.

Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Σε αυτήν την διαμόρφωση, βασιζόμαστε στην απόσβεση της ενέργειας ενός παλμού σε κάποιες συχνότητες, ώστε να επικαλύψουμε το διαθέσιμο φάσμα και να πετύχουμε υψηλή φασματική απόδοση.

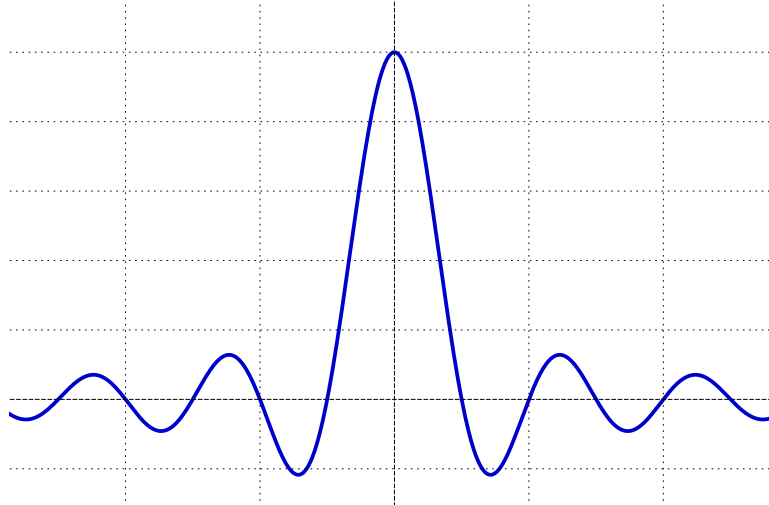
Όπως είδαμε παραπάνω, η QPSK αποτελείται από διαδοχικούς ημιτονοειδούς παλμούς. Ο μετασχηματισμός Fourier ενός ημιτονοειδούς σήματος, είναι η κρουστική συνάρτηση μετατοπισμένη στην συχνότητα του σήματος.

Καθώς οι παλμοί διαδέχονται ο ένας τον άλλον, στις αλλαγές εισάγονται νέες συχνότητες, πέρα της βασικής του αρμονικού σήματος. Η τελική μορφή του σήματος φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 32 Διαδοχικά σύμβολα QPSK στον χρόνο

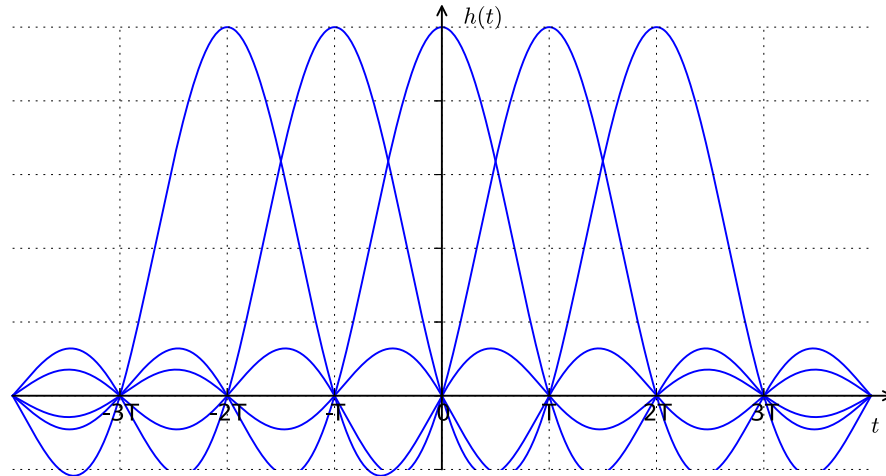
Και αντίστοιχα, ο μετασχηματισμός του είναι της μορφής $\sin(x)/x$.



Εικόνα 33 Μετασχηματισμός στην συχνότητα

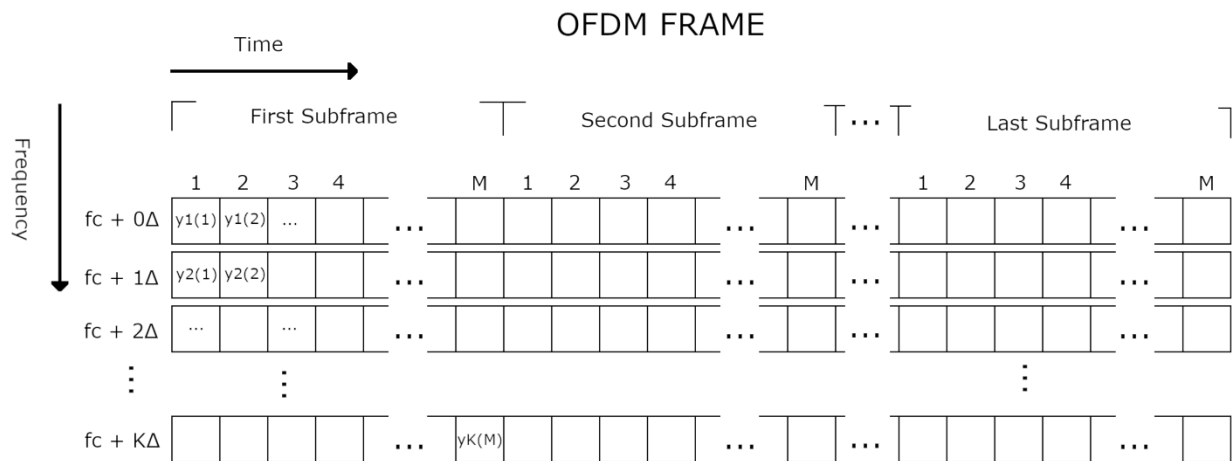
Παρατηρούμε ότι ο παλμός έχει μηδενική ενέργεια σε συχνότητες που είναι πολλαπλάσια της βασικής συχνότητας. Η ιδέα της διαμόρφωσης OFDM είναι να εκμεταλλευόμαστε αυτούς τους μηδενισμούς.

Επικαλύπτοντας το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων με παλμούς οι οποίοι έχουν μηδενική ενέργεια εκεί που οι διπλανοί έχουν μέγιστη, πετυχαίνουμε υψηλή φασματική απόδοση.



Εικόνα 34 Επικάλυψη του διαθέσιμου φάσματος με ορθογώνιες συχνότητες

Ο τρόπος που χρησιμοποιούμε αυτήν την διαμόρφωση, είναι ορίζοντας έναν αριθμό φορέων (subcarriers) και χωρίζοντας τον χρόνο σε σύμβολα.



Εικόνα 35 Δομή ενός OFDM frame

Με f_c συμβολίζουμε την βασική συχνότητα που χρησιμοποιούμε για να διαμορφώσουμε το σήμα.

Το Δ είναι η απόσταση στην συχνότητα ανάμεσα σε δύο διαδοχικές φέρουσες. Εξαρτάται από την περίοδο του συμβόλου. Οπότε, όσο πιο γρήγοροι οι παλμοί, τόσο αραιώνουν οι μηδενισμοί στην συχνότητα, οπότε χωράνε λιγότερες φέρουσες σε συγκεκριμένο φάσμα συχνοτήτων.

Κάθε OFDM frame χωρίζεται σε έναν αριθμό N_p subframes, που χρησιμεύουν για να χωρίσουμε τον χρόνο σε πιο κατάλληλα και βολικά μερίσματα.

Κάθε subframe αποτελείται από M OFDM σύμβολα. Εδώ, όταν λέμε σύμβολα, ουσιαστικά εννοούμε τον χρόνο στον οποίο εκπέμπονται οι παράλληλοι παλμοί από τα subcarriers που περιέχουν την πληροφορία. Ο τύπος του παλμού εξαρτάται από την διαμόρφωση που έχουμε διαλέξει για τα σύμβολα.

Το κάθε σύμβολο από τα M έχει μία συγκεκριμένη περίοδο, διάρκειας T_s δευτερόλεπτα.

Με $y_k(m)$ συμβολίζουμε το σύμβολο που έλαβε ο δέκτης την m -οστή περίοδο, στην συχνότητα της k -οστής φέρουσας, για το συγκεκριμένο subframe.

Τένσορες, συμβολισμός και πράξεις τους

Οι τένσορες είναι ένας όρος για να περιγράψουμε μία δομή δεδομένων, που έχει αποκτήσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την επιστήμη. Έχει εφαρμογές στην μοριακή βιολογία, στα μαθηματικά και πιο πρόσφατα στην τεχνητή νοημοσύνη [6].

Από αρκετά παλιά είναι ένα θέμα που απασχολούσε τους μαθηματικούς σαν δομή.

Είναι μια δομή αρκετά κοντά στις έννοιες του διανύσματος και του πίνακα. Αποτελεί μια επέκταση των εννοιών αυτών ώστε να συμπεριλαμβάνει μεγαλύτερες διαστάσεις. Δηλαδή, όπως μπορούμε να δούμε έναν πίνακα ως διανύσματα σε δύο διαστάσεις, μπορούμε να δούμε τον τένσορα ως διανύσματα σε τρεις και παραπάνω διαστάσεις.

Ένα πολύ απλό παράδειγμα τένσορα, είναι οι έγχρωμες ψηφιακές εικόνες. Μία έγχρωμη ψηφιακή εικόνα αποτελείται από τρεις πίνακες τιμών, που κάθε τιμή δείχνει, για το pixel αυτού του σημείου, την ένταση του χρώματος. Αφού κάθε χρώμα μπορεί να αναλυθεί σε τρεις συνιστώσες ανάλογα με την συμβολή του κάθε ένα από τα βασικά χρώματα, κόκκινο, πράσινο και μπλε.

Original Image



Red



Green



Blue



Εικόνα 36 Έγχρωμη εικόνα ως τένσορας

Η ιδέα του τένσορα είναι αρκετά οικεία σε όσους ασχολούνται με τον προγραμματισμό, καθώς είναι ακριβώς ανάλογη των πινάκων, οι οποίοι μπορούν να έχουν πολλές διαστάσεις.

Όμως, οι τένσορες δεν είναι απλώς πίνακες με περισσότερες διαστάσεις. Συνοδεύονται από μια πληθώρα νέων πράξεων που μπορούν να γίνουν πάνω τους, με αποτέλεσμα να προσφέρουν πολλές παραπάνω δυνατότητες.

Συμβολισμός

Οι τένσορες αποτελούν περίπλοκο θέμα, οπότε είναι σημαντικό να τεθεί σωστός συμβολισμός και να εξηγηθούν καλά οι όροι.

Επειδή οι τένσορες είναι ουσιαστικά δομές δεδομένων, πολύ συχνά για να τους εξηγήσουμε χρησιμοποιούμε τις απλούστερες δομές του διανύσματος και του πίνακα.

Ο συνήθης συμβολισμός ενός τένσορα είναι boldface Euler script. Αντίστοιχα, για διανύσματα χρησιμοποιούμε lowercase boldface γράμματα του λατινικού αλφάβητου, και για τους πίνακες uppercase boldface γράμματα [6].

Τάξη

Η τάξη ενός τένσορα είναι ο αριθμός των διαστάσεων στις οποίες αναλύεται. Παράδειγμα, ένα διάνυσμα μπορεί να θεωρηθεί ως ένας τένσορας πρώτης τάξης, ενώ ένας πίνακας ως τένσορας δεύτερης τάξης.

Για να δείξουμε γρήγορα πληροφορίες για τον τένσορα, χρησιμοποιούμε την ακόλουθη γραφή:

$$\mathcal{X} \in \mathbb{R}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_N}$$

Όπου R το πεδίο τιμών των κελιών του τένσορα, N η τάξη του τένσορα και I_N ο αριθμός των κελιών σε αυτή την διάσταση.

Παράδειγμα, ένα διάνυσμα στον τρισδιάστατο χώρο, $\mathbf{a}=[1,2,3]$, θα συμβολιζόταν σαν τένσορας:

$$\mathcal{A} \in \mathbb{R}^3$$

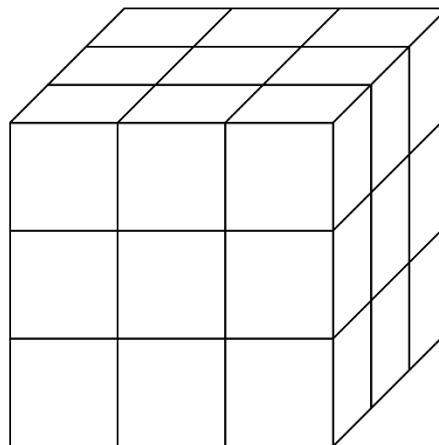
Ενώ ο πίνακας $\mathbf{A}=$

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{bmatrix}$$

Συμβολίζεται

$$\mathcal{A} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$$

Τέλος, ένας τένσορας τρίτης τάξης, έστω $\mathcal{P}$, ο οποίος είναι η σύνθεση τριών πινάκων, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα:



Εικόνα 37 Τένσορας 3^{ης} τάξης

Συμβολίζεται:

$$\mathcal{P} \in \mathbb{R}^{3 \times 3 \times 3}$$

Όπως βλέπουμε, αυτός ο τένσορας έχει συνολικά $3 \times 3 \times 3 = 27$ στοιχεία. Για να μιλήσουμε για κάθε στοιχείο του τένσορα, αρκεί να δείξουμε την θέση του στις τρεις διαστάσεις. Παράδειγμα, το κεντρικό στοιχείο αυτού του τένσορα είναι το $\mathcal{P}_{2,2,2}=14$. Αν θέλουμε, αντί για ένα στοιχείο του τένσορα, να μιλήσουμε για μία στήλη, γραμμή ή σήραγγα, βάζουμε άνω κάτω τελεία (:) στην διάσταση της οποίας θέλουμε όλα τα στοιχεία. Παράδειγμα, η πρώτη στήλη της πρόσοψης του τένσορα είναι:

$$\mathcal{P}_{:,1,1}=$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 7 \\ 9 \end{bmatrix}$$

Παρακάτω, είναι όλοι οι υποπίνακες του τένσορα $\mathcal{P}$, με τον αντίστοιχο συμβολισμό τους.

$$\mathcal{P}_{::,1}=$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{bmatrix}$$

$$\mathcal{P}_{::,2}=$$

$$\begin{bmatrix} 10 & 11 & 12 \\ 13 & 14 & 18 \\ 16 & 17 & 18 \end{bmatrix}$$

$$\mathcal{P}_{::,3}=$$

$$\begin{bmatrix} 19 & 20 & 21 \\ 22 & 23 & 24 \\ 25 & 26 & 27 \end{bmatrix}$$

Βασικές Πράξεις

Υπάρχουν πολλές πράξεις και μετασχηματισμοί πάνω στους τένσορες, ανάλογα με την εργασία που χρειαζόμαστε να κάνουμε. Αναφερόμαστε σε αυτές που θα μας είναι χρήσιμες στην μελέτη μας.

Πρόσθεση Τένσορων

Η πρόσθεση τένσορων είναι πολύ απλή, αλλά ορίζεται μόνο ανάμεσα σε τένσορες ίδιων διαστάσεων. Παράδειγμα, έχουμε τον τένσορα $\mathcal{PA}$:

$$\mathcal{PA}_{::,1}=$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{bmatrix}$$



$$\mathcal{PA}_{::,2} = \begin{bmatrix} 10 & 11 & 12 \\ 13 & 14 & 18 \\ 16 & 17 & 18 \end{bmatrix}$$

$$\mathcal{PA}_{::,3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Και τον τένσορα $\mathcal{PB}$:

$$\mathcal{PB}_{::,1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathcal{PB}_{::,2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathcal{PB}_{::,3} = \begin{bmatrix} 19 & 20 & 21 \\ 22 & 23 & 24 \\ 25 & 26 & 27 \end{bmatrix}$$

Προσθέτοντας τους δύο τένσορες, στοιχείο προς στοιχείο, καταλήγουμε στον τένσορα $\mathcal{P}$.

$$\mathcal{PA}, \mathcal{PB} \in R^{I \times J}$$

$$\mathcal{PA} + \mathcal{PB} = \mathcal{P} \in R^{I \times J}$$

Εξωτερικό Γινόμενο Διανυσμάτων

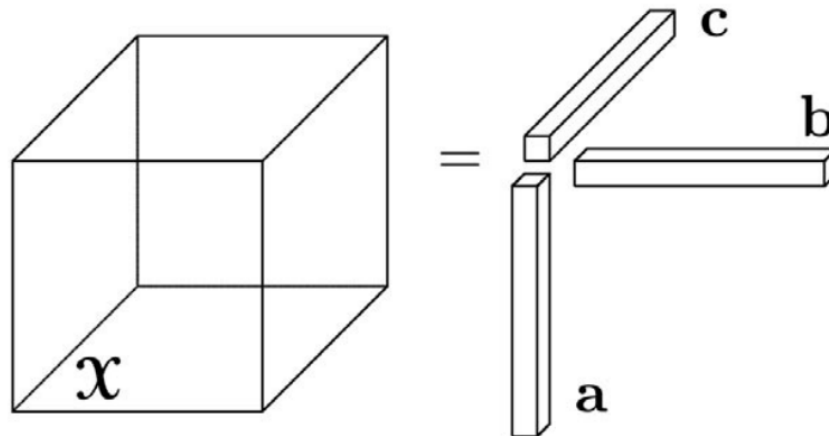
Το εξωτερικό γινόμενο δύο διανυσμάτων, $\mathbf{a}$ και $\mathbf{b}$, είναι η πράξη:

$$\mathbf{a} \circ \mathbf{b}$$

Που οδηγεί σε έναν πίνακα διαστάσεων $I_a \times I_b$. Και περεταίρω, πολλαπλασιάζοντας ένα διάνυσμα $\mathbf{c}$ με αυτόν τον πίνακα, καταλήγουμε σε έναν τένσορα $\mathcal{X}$ διαστάσεων $I_a \times I_b \times I_c$. Με άλλα λόγια:

$$\mathbf{a} \circ \mathbf{b} \circ \mathbf{c} = \mathcal{X} \in \mathbb{R}^{I_a \times I_b \times I_c}$$





Εικόνα 38 Ανάλυση τένσορα σε γινόμενο διανυσμάτων

Γινόμενο Hadamard ή Γινόμενο ανά στοιχείο

Έχοντας δύο τένσορες $\mathcal{A}$ και $\mathcal{B}$ ίδιων διαστάσεων, το γινόμενο Hadamard (συμβολίζεται $\odot$) είναι ένας νέος τένσορας $\mathcal{C}$ όπου κάθε στοιχείο του $\mathcal{C}$ είναι το γινόμενο των αντίστοιχων στοιχείων των $\mathcal{A}$ και $\mathcal{B}$. Συμβολίζουμε:

$$\mathcal{A}, \mathcal{B} \in \mathbb{R}^{I \times J}$$

$$\mathcal{A} \odot \mathcal{B} = \mathcal{C} \in \mathbb{R}^{I \times J}$$

Ανάλυση Τένσορα

Όπως είδαμε παραπάνω, το εξωτερικό γινόμενο τριών διανυσμάτων οδηγεί σε έναν τένσορα τρίτης τάξης. Ένα μεγάλο ερώτημα που προκύπτει, είναι δοθέντος ενός τένσορα νιοστής τάξης, να βρούμε τα n εκείνα διανύσματα που τον παράγουν.

Ο πιο απλός (αλλά και αργός) αλγόριθμος είναι ο Alternating Least Squares (ALS). Με αυτόν τον αλγόριθμο, ξεκινώντας από τον ίδιο τον τένσορα, υπολογίζουμε ποια διανύσματα τον παράγουν.

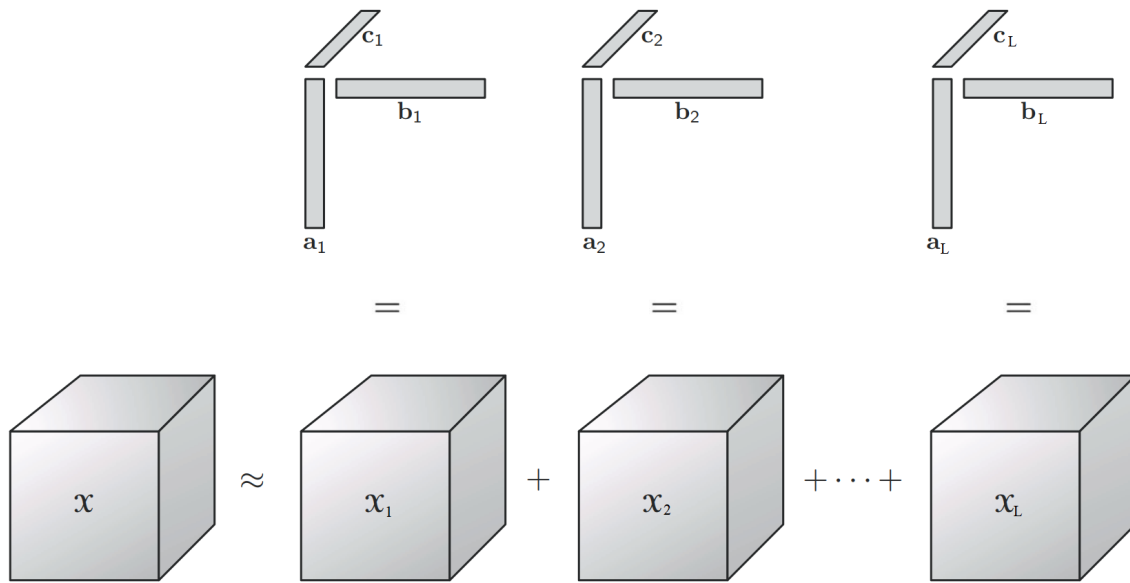
Βαθμός Τένσορα

Υπάρχουν όμως τένσορες οι οποίοι δεν μπορούν να αναλυθούν σε γινόμενο n διανυσμάτων. Εδώ έρχεται η έννοια του βαθμού ενός τένσορα. Αρχικά, όταν ένας τένσορας μπορεί να γραφτεί σαν το εξωτερικό γινόμενο διανυσμάτων, τότε λέμε ότι είναι βαθμού ένα (1).

Ο βαθμός ενός τένσορα είναι ο μικρότερος αριθμός τένσορων βαθμού 1 των οποίων το άθροισμα είναι αυτός ο τένσορας.

Δεν έχει βρεθεί τρόπος να μπορούμε να είμαστε σίγουροι για τον βαθμό ενός τυχαίου τένσορα. Αυτό που μπορούμε να κάνουμε, είναι έχοντας έναν τένσορα n τάξης και έναν αριθμό L , να

βρούμε εντός λογικού χρόνου και κάποιου ορίου λάθους, L τένσορες πρώτου βαθμού που τον παράγουν.



Εικόνα 39 Ανάλυση τένσορα $N^{\text{οστού}}$ βαθμού σε άθροισμα L τένσορων $1^{\text{ου}}$ βαθμού

Ανάλυση Άρθρου Μελέτης

Εισαγωγή

Όπως είπαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, υπάρχει ανάγκη για νέες τεχνολογίες που να καλύπτουν τις απαιτήσεις ρυθμού δεδομένων και την κάλυψη ενός περιβάλλοντος που θα είναι δυναμικό. Σε αυτό το περιβάλλον, περιμένουμε να υπάρχουν πολλά κινούμενα μέρη. Ειδικά σε ένα μοντέρνο περιβάλλον, όπως ένα αστικό περιβάλλον μιας έξυπνης πόλης. Τα κινητά μέρη μπορεί να είναι αμάξια, λεωφορεία μέχρι και drones.

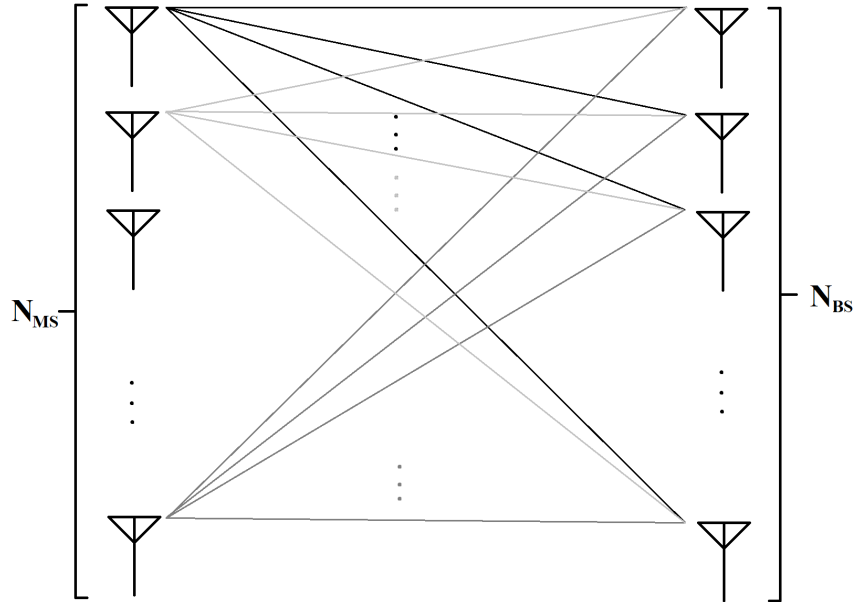
Σε ένα τέτοιο δυναμικό περιβάλλον, δεν επαρκεί να στέλνουμε το σήμα και να ελπίζουμε ότι θα φτάσει αρκετά καλά. Χρησιμοποιώντας πληροφορία για το περιβάλλον, μπορούμε να έχουμε καλύτερη εικόνα του της κατάστασης του καναλιού, και έτσι να δημιουργούμε καλύτερη ζεύξη ανάμεσα στον πομπό και δέκτη.

Μοντέλο Σήματος Τένσορα

Βασικά Χαρακτηριστικά Συστήματος

Προχωράμε στον ορισμό των βασικών χαρακτηριστικών που συστήματος.

Το σύστημα αποτελείται από τον Κινητό Σταθμό (Mobile Station – **MS**) που είναι για τη συγκεκριμένη περίπτωση χρήστης ο πομπός, και τον Σταθμό Βάσης (Base Station – **BS**) που λειτουργεί ως δέκτης. Σε ένα πραγματικό σύστημα, ο **BS** επικοινωνεί με πολλούς **MS**, αλλά για την μελέτη μας θα μελετήσουμε την επικοινωνία ανάμεσα σε δύο μόνο σταθμούς.



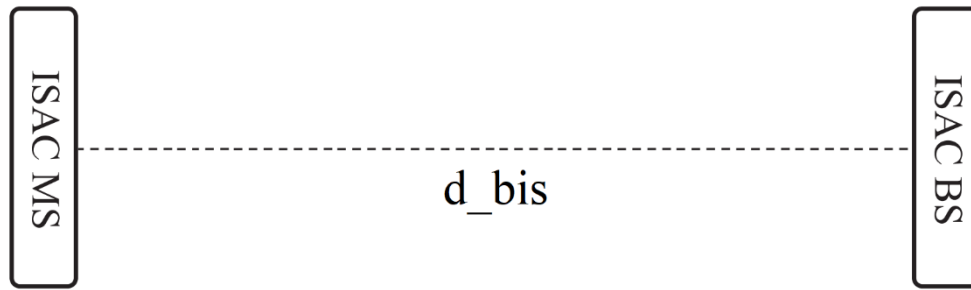
Εικόνα 40 Αριθμός κεραιών πομπού-δέκτη

Ο πομπός έχει N_{MS} κεραιές και ο δέκτης έχει N_{BS} . Αφού ο δέκτης είναι ο σταθμός βάσης **BS**, και άρα είναι μέρος της υποδομής του δικτύου επικοινωνίας, είναι λογικό ότι θα έχει πολλές κεραιές. Αντίθετα, ο πομπός είναι ένας κινητός σταθμός **MS**, που μπορεί να είναι ένα χρήστης που έχει κάποιο κινητό τερματικό π.χ smartphone, μπορεί να είναι αμάξι ή ακόμη και drone. Και λόγω της κινητής φύσης του, θα έχει λιγότερες κεραιές. Άρα, είναι λογικό να υποθέσουμε ότι $N_{MS} < N_{BS}$.

Και οι δύο έχουν κεραιές που είναι ομοιόμορφες γραμμικές στοιχειοκεραίες (uniform linear array - ULA). Δηλαδή οι κεραιές τους αποτελούνται από πολλά στοιχεία, που είναι στοιχισμένα σε μια ευθεία στη σειρά με απόσταση μεταξύ τους ίση με το μισό του μήκους κύματος για την συχνότητα που θα χρησιμοποιούμε. Δηλαδή, αν η συχνότητα είναι f_c , τότε το μήκος κύματος είναι $\lambda = c/f_c$, όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός.

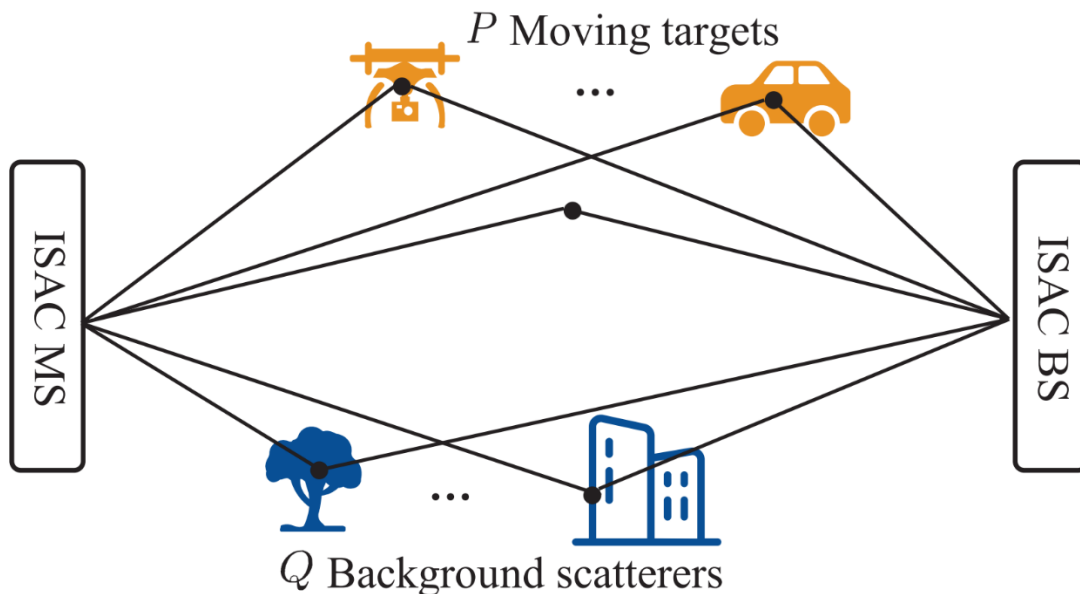
Η επικοινωνία γίνεται μέσα από OFDM frames. Κάθε frame περιέχει N_p subframes. Κάθε subframe αποτελείται από M σύμβολα. Προσοχή πρέπει να δοθεί εδώ, στην λέξη σύμβολο. Δεν εννοείται σύμβολο όπως στον αστερισμό μιας διαμόρφωσης, αλλά ως το time slot ενός subframe που περιέχει ένα OFDM σύμβολο. Σε κάθε σύμβολο, χρησιμοποιούνται K υποφορείς OFDM. Για αυτά, η βασική συχνότητα είναι f_c .

Η απόσταση μεταξύ πομπού-δέκτη d_{bis} θεωρείται γνωστή, είτε από χρήση GPS αλλά θα μπορεί να υπολογίζεται και από το time-of-flight, δηλαδή πόσο χρόνο καταναλώνει το σήμα για να φτάσει από τον πομπό στον δέκτη.



Εικόνα 41 Απόσταση πομπού-δέκτη

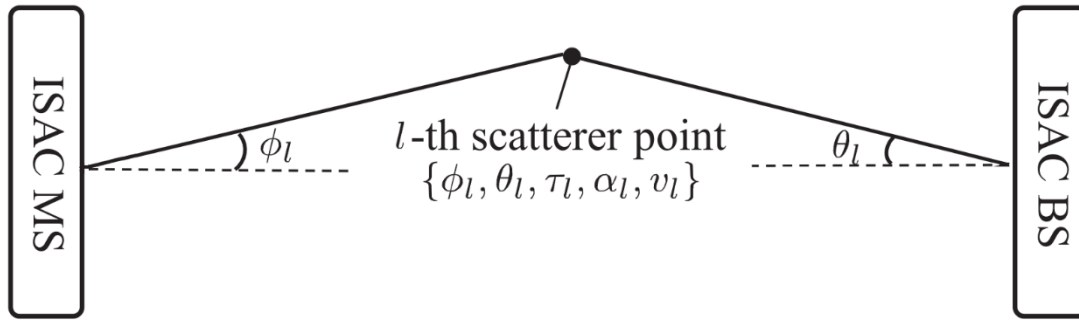
Στη συγκεκριμένη μελέτη μιλάμε για millimeter wave (20 GHz+) επικοινωνίες, ξέρουμε ότι το σήμα φτάνει στον δέκτη από μετρήσιμο αριθμό διαδρομών L . Πειραματικά έχειδειχθεί ότι σε αστικό περιβάλλον, αυτός ο αριθμός είναι συνήθως τουλάχιστον 5. Όπως θα δούμε και στο πειραματικό κομμάτι, αυτός ο αριθμός χρησιμοποιείται και για το υπόλοιπο της μελέτης. Υποθέτουμε ότι P από αυτούς κινούνται πολύ γρήγορα, όπως παράδειγμα ένα αμάξι ή drone και επηρεάζουν αρνητικά το κανάλι. Αντίθετα, οι άλλοι Q είναι από στατικά σημεία στον χώρο, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υποστηριχθεί η πληροφορία.



Εικόνα 42 Οι διαδρομές του σήματος μέσα από το κανάλι

Όταν το σήμα περνάει από μία διαδρομή, ανακλάται σε ένα σημείο σκέδασης (scatterer point). Τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε σημείου είναι 5. Αρχικά, οι γωνίες πρόσπτωσης ϕ από τον πομπό στον σκεδαστή και ανάκλασης θ από τον σκεδαστή στον δέκτη. Έπειτα, η απόσταση της διαδρομής, που εκφράζεται μέσα από τον χρόνο που χρειάζεται το σήμα για να φτάσει στον δέκτη. Η καθυστέρηση αυτή συμβολίζεται με τ . Η κάθε διαδρομή έχει το δικό της κέρδος διαδρομής, που

εκφράζει το πώς επηρεάζει η διαδρομή το πλάτος και φάση του σήματος. Το κέρδος διαδρομής συμβολίζεται με α . Τέλος, το κάθε σημείο έχει την αντίστοιχη ταχύτητα v . Αυτή ουσιαστικά εκφράζει το πώς επηρεάζει το φαινόμενο Doppler την επικοινωνία. Για την ταχύτητα συγκεκριμένα, υποθέτουμε ότι η κίνηση του σημείου γίνεται μόνο παράλληλα στην ευθεία ανάμεσα στον πομπό και δέκτη.



Εικόνα 43 Χαρακτηριστικά κάθε διαδρομής/στόχου

Πέρα από αυτά, χρειαζόμαστε και άλλα χαρακτηριστικά, που μας βοηθούν να γίνουν πιο γρήγορα οι υπολογισμοί. Από τον χρόνο διάδοσης του σήματος, βρίσκουμε την απόσταση διαδρομής d . Από αυτήν και τις γωνίες πρόσπτωσης/ανάκλασης βρίσκουμε την απόσταση αποχώρησης **DOD** (Distance of Departure) και απόσταση άφιξης **DOA** (Distance of Arrival). Τέλος, με βάση την ταχύτητα του κάθε σημείου βρίσκουμε την συχνότητα Doppler f που θα επηρεάσει το σήμα.

Φυσικά, υπάρχει και η απευθείας διαδρομή (Line of Sight – **LoS**), στην οποία δεν υπάρχει σημείο σκέδασης. Στην εργασία θεωρείται ότι δεν υπάρχει αυτή η διαδρομή (φράζεται από εμπόδιο), αλλά μπορεί εύκολα να προστεθεί, θέτοντας 0° τις γωνίες πρόσκρουσης-ανάκλασης, 0 την ταχύτητα του σκεδαστή και τον χρόνο διαδρομής ίσο με τον χρόνο διάδοσης του d_{bis} .

Μοντέλο Καναλιού

Αρχικά, όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, το διάνυσμα (ένα σύμβολο από κάθε κεραία του) που λαμβάνει ο δέκτης δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\mathbf{y}_k(m) = \mathbf{W}^H \mathbf{H}_k(m) \mathbf{F} \mathbf{s}_k(m) + \mathbf{W}^H \mathbf{n}_k$$

$$\forall k = 1, 2, \dots, K, m = 1, 2, \dots, M,$$

Δηλαδή, εξαρτάται από τα βάρη που έχουν δοθεί στην κάθε κεραία, τον θόρυβο, και τις παραμορφώσεις στο σήμα από το κανάλι.

Βασικό σημείο εκκίνησης του άρθρου είναι το μοντέλο του καναλιού:

$$\mathbf{H}_k(m) = \sum_{l=1}^L \alpha_l e^{j2\pi m T_s f_l} e^{-j2\pi k \tau_l \Delta} \mathbf{a}_{BS}(\theta_l) \mathbf{a}_{MS}^H(\phi_l)$$

Πρόκειται δηλαδή για εκείνον τον πίνακα $\mathbf{H}_k$ ο οποίος μας δίνει την μετατόπιση στην φάση και αλλαγή του πλάτους του σήματος καθώς περνάει μέσα από το κανάλι.

Παρακάτω αναλύεται κάθε όρος του παραπάνω τύπου.

Παρατηρούμε ότι ο τελικός $\mathbf{H}_k$ πίνακας είναι η σύνθεση τόσων πινάκων όσα τα σημεία διασποράς $\mathbf{L}$. Δηλαδή, κάθε σημείο διασποράς $\mathbf{l}$ συνεισφέρει δική του παραμόρφωση στην φάση και το πλάτος του σήματος, και ο τελικός πίνακας είναι το άθροισμα αυτών.

Κάθε διαδρομή χαρακτηρίζεται από το δικό της κέρδος διαδρομής, α_l .

Ο όρος $e^{j2\pi m T_s f_l}$ εκφράζει την επίδραση που έχει στο σήμα η ταχύτητα του σκεδαστή. Δηλαδή, όταν το σήμα προσπίπτει σε ένα κινούμενο στόχο, αφού ανακλαστεί, έχει αλλάξει η συχνότητά του. Δηλαδή, αυτό ο όρος βάζει την επίδραση του φαινομένου Doppler στο σήμα μας.

Ο επόμενος όρος, $e^{-j2\pi k \tau_l \Delta}$, αφορά την μετατόπιση της συχνότητας με βάση τον φορέα OFDM που χρησιμοποιούμε για αυτό το σήμα. Επίσης, περιέχει την αλλαγή στην φάση του σήματος που οφείλεται στον χρόνο διάδοσης του σήματος από τον πομπό στον δέκτη.

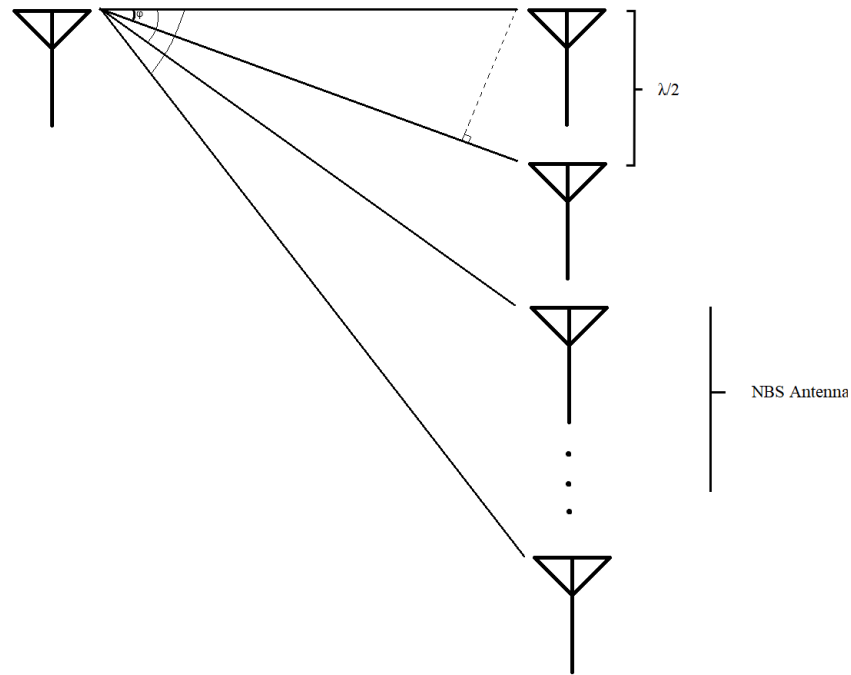
Από τους όρους $\mathbf{a}_{BS}$ και $\mathbf{a}_{MS}$ καταλαβαίνουμε ότι είναι ένας πίνακας με όσες γραμμές όσες οι κεραίες του δέκτη και στήλες όσα τα κεραιοστοιχεία του πομπού.

$$\mathbf{a}_{BS}(\theta_l) = [1, e^{-j\pi \sin \theta_l}, \dots, e^{-j\pi(N_{BS}-1) \sin \theta_l}]^T$$

Ο όρος $\mathbf{a}_{BS}(\theta_l)$ είναι ουσιαστικά το πόσο αλλάζει η απόσταση από τον σκεδαστή ανάμεσα στα διαφορετικά κεραιοστοιχεία και αντιστοιχεί σε μεταβολή φάσης. Υποθέτουμε ότι η διάταξη είναι μία τυπική για αυτές τις συχνότητες, δηλαδή η απόσταση ανάμεσα στα στοιχεία της κεραίας είναι το μισό του μήκους κύματος. Ξεκινώντας από την πρώτη κεραία, που θεωρούμε ότι είναι η βάση μας, κάθε επόμενο στοιχείο «στρίβει» την φάση του σήματος σύμφωνα με την ελαφρώς διαφορετική απόσταση και γωνία.

$$\mathbf{a}_{MS}(\phi_l) = [1, e^{-j\pi \sin \phi_l}, \dots, e^{-j\pi(N_{MS}-1) \sin \phi_l}]^T$$

Αντίστοιχα με τον προηγούμενο όρο, αλλά τώρα μιλάμε για την γωνία πρόσπτωσης, δηλαδή από τον πομπό στον σκεδαστή.

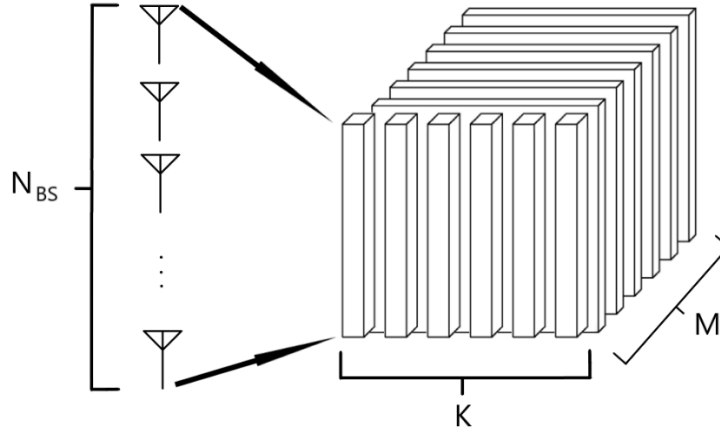


Τένσορας Σήματος

Έπειτα, σύμφωνα με το άρθρο, χρησιμοποιούμε ένα ολόκληρο OFDM subframe για να στείλουμε πιλοτικά σήματα. Σε αυτήν την φάση, ορίζουμε τον πιλότο να είναι ίδιος για όλους τους φορείς k . Αυτό γίνεται γιατί όπως θα δούμε σε επόμενη φάση, θα χρειαστεί να διατηρήσουμε τον όρο των συμβόλων σταθερό ανάμεσα σε φορείς.

Ο δέκτης βάζει αυτά τα σύμβολα σε έναν τένσορα τρίτης τάξης, $\mathbf{y}$. Οι τρεις διαστάσεις αυτού του τένσορα είναι τα κεραιοστοιχεία του δέκτη N_{BS} , οι OFDM φορείς K και τα σύμβολα M . Άρα, χρησιμοποιούμε τον συμβολισμό:

$$\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{N_{BS} \times K \times M}$$



Εικόνα 44 Σύνθεση τένσορα από την κεραία του δέκτη

Εφόσον τένσορας που λαμβάνει ο δέκτης $\mathbf{Y}$ είναι τρίτης τάξης, μπορεί να γραφτεί ως το γινόμενο Hadamard τριών διανυσμάτων. Όμως, όπως είχαμε δει παραπάνω, το κάθε στοιχείου του $\mathbf{Y}$ προκύπτει από την συμβολή L συμβόλων, ένα από κάθε σκεδαστή του καναλιού. Άρα, ξέρουμε ότι το $\mathbf{Y}$ είναι τένσορας βαθμού L . Άρα, αποτελείται από το άθροισμα L τένσορων 3ης τάξης πρώτου βαθμού.

Ας δούμε πιο αναλυτικά την δομή αυτού του τένσορα.

Ξεκινώντας, ας δούμε τι γίνεται για ένα σύμβολο, έστω $y_k(m)$. Αντικαθιστούμε λοιπόν τον τύπο του μοντέλου του καναλιού στον τύπο για το διάνυσμα που λαμβάνει ο δέκτης. Με την αντιμεταθετική ιδιότητα του πολλαπλασιασμού, μπορούμε να φέρουμε το $y_k(m)$ στην ακόλουθη μορφή:

$$y_k(m) = \sum_{l=1}^L \mathbf{W}^H \mathbf{a}_{BS}(\theta_l) \alpha_l e^{-j2\pi k \tau_l \Delta} e^{j2\pi m T_s f_l} \mathbf{a}_{MS}^H(\phi_l) \mathbf{F} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{s}_k(m)$$

Εδώ να σημειώσουμε ότι ο πιλότος $s_k(m)$ έχει πολλαπλασιαστεί με ένα μοναδιαίο διάνυσμα μεγέθους όσες οι κεραίες του πομπού.

Όπως είπαμε παραπάνω, βάζουμε σε έναν τένσορα το διάνυσμα από την κεραία του δέκτη, για κάθε φορά k και σύμβολο m . Σε αυτό το σημείο, μπορούμε να σπάσουμε το άθροισμα για κάθε μία από τις διαδρομές l του καναλιού. Για κάθε l , σχηματίζουμε τρία διανύσματα, ένα για κάθε διάσταση του τένσορα.

Ο όρος:

$$\tilde{\mathbf{a}}_{BS}(\theta_l) = \mathbf{W}^H \mathbf{a}_{BS}(\theta_l)$$

μένει ίδιος για δεδομένα k και m , άρα είναι η μία διάσταση του τένσορα. Ξέρουμε:

$$W^H a_{BS}(\theta_l) \in \mathbb{C}^{N_{BS}}$$

Τώρα, βάζουμε τα $\alpha_l e^{-j2\pi k t_l \Delta}$ σε ένα διάνυσμα. Ορίζουμε αυτό το διάνυσμα ως:

$$\alpha_l \mathbf{u}(\tau_l) = \alpha_l [e^{-j2\pi \tau_l \Delta}, e^{-j2\pi 2\tau_l \Delta}, \dots, e^{-j2\pi K \tau_l \Delta}]^T$$

Παρατηρούμε ότι και αυτό το διάνυσμα δεν εξαρτάται από τις άλλες διαστάσεις του τένσορα, δηλαδή την κεραία και το σύμβολο m . Άρα, αποτελεί το διάνυσμα της δεύτερης διάστασης. Εδώ έχουμε:

$$\alpha_l \mathbf{u}(\tau_l) \in \mathbb{C}^K$$

Εδώ, αξίζει να προσέξουμε ότι το κέρδος διαδρομής α_l παραμένει ίδιο και για όλους τους φορείς.

Αντίστοιχα στον όρο $e^{-j2\pi m f_l} \mathbf{a}_{MS}^H(\phi_l) \mathbf{F}^* \mathbf{s}_k(m)$, κάνουμε τις παρακάτω αντικαταστάσεις.

Τους όρους $e^{-j2\pi m f_l}$ για όλα τα σύμβολα m , τους βάζουμε σε ένα διάνυσμα:

$$\mathbf{v}(f_l) = [e^{j2\pi T_s f_l}, e^{j2\pi 2T_s f_l}, \dots, e^{j2\pi M T_s f_l}]^T$$

Από το άρθρο, θέτουμε το $\mathbf{F}$ για τα πιλοτικά σήματα σε μοναδιαίο διάνυσμα. Οπότε μπορεί να αγνοηθεί.

Άρα, το $\mathbf{a}_{MS}^H(\phi_l) \mathbf{F}^* \mathbf{s}_k(m)$ έρχεται σε αυτήν την μορφή:

$$\mathbf{a}_{MS}^H(\phi_l) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{s}_k(m)$$

Εδώ, προχωράμε στον πολλαπλασιασμό του $\mathbf{a}_{MS}^H$ με το μοναδιαίο διάνυσμα. Ουσιαστικά δηλαδή, προσθέτουμε τους όρους του $\mathbf{a}_{MS}^H$.

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{MS}^H(\phi_l) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} &= \sum_{n=1}^{N_{MS}} \mathbf{a}_{MS(n)}^H = \\ &= 1 + e^{-j\pi \sin \phi_l} + \dots + e^{-j\pi (N_{MS}-1) \sin \phi_l} = \\ &= \tilde{\mathbf{a}}_{MS}(\phi_l) \end{aligned}$$

Παρατηρούμε ότι ο παραπάνω όρος είναι σταθερός για όλα τις κεραίες, φορείς και σύμβολα. Αυτό το είδαμε και για το κέρδος διαδρομής α_l . Άρα, είναι ουσιαστικά σαν να έχουμε πολλαπλασιάσει όλον τον τένσορα με έναν βαθμωτό αριθμό. Κατά συνέπεια, μπορούμε να το βγάλουμε μπροστά από τον όρο.

Για το σύμβολο $s_k(m)$, είδαμε από πιο νωρίς ότι είναι ίδιο για όλους τους φορείς. Άρα, μπορούμε να γράψουμε:

$$\mathbf{S} = [\mathbf{s}(1), \mathbf{s}(2), \dots, \mathbf{s}(M)]$$

Είναι κατανοητός τώρα ο λόγος που στον πιλότο στέλνουμε το ίδιο σήμα σε κάθε φορέα. Ωστε να μπορεί να σχηματιστεί αυτό το διάνυσμα. Αν ο πιλότος άλλαζε από φορέα σε φορέα, δεν θα μπορούσε να βγει κοινός παράγοντας, και άρα δεν θα μπορούσαμε να ξεχωρίσουμε τους όρους με αυτόν τον τρόπο.

Και πάλι, αυτός ο συνολικός όρος είναι ίδιος για κάθε κεραία και φορέα k , οπότε αποτελεί το διάνυσμα της τρίτης διάστασης. Τέλος, εδώ είναι:

$$\tilde{\mathbf{a}}_{MS}(\phi_l) \mathbf{v}(f_l) \odot (\mathbf{S}^T) \in \mathbb{C}^M$$

Άρα ο τένσορας των συμβόλων που έλαβε ο δέκτης (από αυτήν την διαδρομή), είναι το εξωτερικό γινόμενο των παραπάνω διανυσμάτων. Οπότε έχουμε:

$$\tilde{\mathbf{a}}_{BS}(\theta_l) \circ [\alpha_l \mathbf{u}(\tau_l)] \circ [\tilde{\mathbf{a}}_{MS}(\phi_l) \mathbf{v}(f_l) \odot (\mathbf{S}^T)]$$

Τα μεγέθη α_l και $\tilde{\mathbf{a}}_{MS}(\phi_l)$ είναι βαθμωτά, και θεωρητικά θα μπορούσαμε να τα γράψουμε μπροστά από τους υπόλοιπους όρους. Παρ' όλα αυτά, αφήνονται στην συγκεκριμένη σειρά, για να είναι ξεκάθαροι οι όροι και η προέλευσή τους.

Μην ξεχνάμε όμως ότι έχουμε τόσους τένσορες όσες διαδρομές. Άρα, ο τελικός τένσορας είναι το άθροισμα των τένσορων όλων των διαδρομών, άρα τελικά:

$$\mathbf{Y} = \sum_{l=1}^L \tilde{\mathbf{a}}_{BS}(\theta_l) \circ [\alpha_l \mathbf{u}(\tau_l)] \circ [\tilde{\mathbf{a}}_{MS}(\phi_l) \mathbf{v}(f_l) \odot (\mathbf{S}^T)]$$

Φυσικά, όταν φτάνει το πιλοτικό subframe στον δέκτη, έχει προστεθεί και θόρυβος σε αυτό.

Βάζουμε τα διανύσματα κάθε όρου και κάθε διαδρομής, σε έναν πίνακα $\mathbf{A}_i$. Δηλαδή, έχουμε:

$$\mathbf{A}_1 = [\tilde{\mathbf{a}}_{BS}(\theta_1), \tilde{\mathbf{a}}_{BS}(\theta_2), \dots, \tilde{\mathbf{a}}_{BS}(\theta_L)]$$

$$\mathbf{A}_2 = [\alpha_1 \mathbf{u}(\tau_1), \alpha_2 \mathbf{u}(\tau_2), \dots, \alpha_L \mathbf{u}(\tau_L)]$$

$$\mathbf{A}_3 = [\tilde{\mathbf{a}}_{MS}(\phi_1) \mathbf{v}(f_1) \odot (\mathbf{S}^T), \tilde{\mathbf{a}}_{MS}(\phi_2) \mathbf{v}(f_2) \odot (\mathbf{S}^T), \dots, \tilde{\mathbf{a}}_{MS}(\phi_L) \mathbf{v}(f_L) \odot (\mathbf{S}^T)]$$

Το γινόμενο των αντίστοιχων όρων κάθε πίνακα $\mathbf{A}_i$ είναι ίσο με τον τένσορα πρώτου βαθμού που προκύπτει από εκείνη την διαδρομή. Οι διαστάσεις τους είναι:

$$\mathbf{A}_1 \in \mathbb{C}^{N_{BS} \times L}$$

$$\mathbf{A}_2 \in \mathbb{C}^{K \times L}$$

$$\mathbf{A}_3 \in \mathbb{C}^{M \times L}$$

Εκτίμηση Μετρικών Καναλιού

Προχωράμε στη εκτίμηση των μετρικών του καναλιού.

Εκτίμηση Παραγόντων Τένσορα

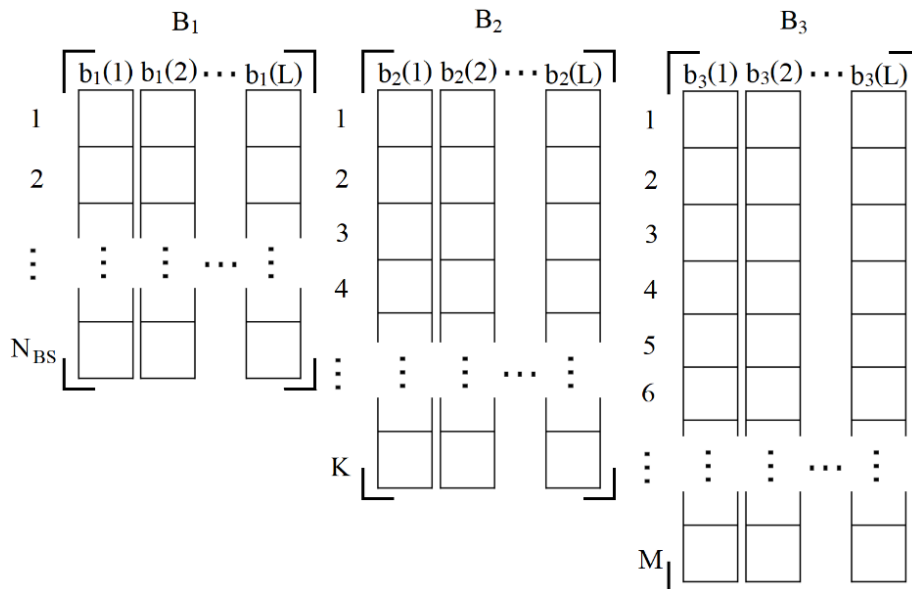
Έχοντας ο δέκτης τον τένσορα $\mathbf{Y}$, προχωράει στην εκτίμηση των πινάκων που τον συνθέτουν.

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε όποια τεχνική επιθυμούμε για την ανάλυση και διάκριση των τενσόρων. Το πρόβλημα που πρέπει να λυθεί εκφράζεται ως εξής:

$$\min_{\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{B}_3} \|\mathbf{Y} - [\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{B}_3]\|_F^2$$

Παράδειγμα, ένας από τους πιο γνωστούς αλγόριθμους για την ανάλυση τένσορα, είναι ο Alternating Least Squares (ALS). Στον ALS ξεκινάμε με τυχαίες λύσεις και χρησιμοποιούμε το επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα για να πλησιάσουμε τις τυχαίες λύσεις πιο κοντά στις επιθυμητές. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να φτάσουμε ικανοποιητικά κοντά στο επιθυμητό αποτέλεσμα, ή μετά από έναν προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων. Φυσικά, εισάγεται και κάποιο σφάλμα εκτίμησης, όσο μικρό και αν είναι.

Όπου το κάθε $\mathbf{B}_i$ είναι ένας πίνακας, με $\mathbf{B}_i = [b_i(1), b_i(2), \dots, b_i(L)]$.



Εικόνα 45 Αποτέλεσμα του ALS

Ουσιαστικά, τα $\mathbf{B}_1$ $\mathbf{B}_2$ $\mathbf{B}_3$ είναι εκτιμήσεις των $\mathbf{A}_1$ $\mathbf{A}_2$ $\mathbf{A}_3$. Οπότε και οι διαστάσεις τους είναι αντίστοιχες:

Πανεπιστήμιο Αιγαίου – Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων



$$\mathbf{B}_1 \in \mathbb{C}^{N_{BS} \times L}$$

$$\mathbf{B}_2 \in \mathbb{C}^{K \times L}$$

$$\mathbf{B}_3 \in \mathbb{C}^{M \times L}$$

Όμως, τα $\mathbf{B}_i$ δεν είναι ακριβώς ίδια με τα $\mathbf{A}_i$. Συνδέονται με τους ακόλουθους τύπους:

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{A}_1 \mathbf{\Pi} \mathbf{\Delta}_1 + \mathbf{E}_1$$

$$\mathbf{B}_2 = \mathbf{A}_2 \mathbf{\Pi} \mathbf{\Delta}_2 + \mathbf{E}_2$$

$$\mathbf{B}_3 = \mathbf{A}_3 \mathbf{\Pi} \mathbf{\Delta}_3 + \mathbf{E}_3$$

Το $\mathbf{\Pi}$ είναι ένας πίνακας που περιέχει τον τρόπο που έχουν ανακατευτεί οι διαδρομές. Δηλαδή, μετά την ανάλυση, δεν έχει κρατηθεί η σειρά των διαδρομών, καθώς δεν είναι δυνατόν ο αλγόριθμος να καταλάβει την σειρά με την οποία έχουν προστεθεί οι τένσορες πρώτου βαθμού. Αυτό εκφράζει ο πίνακας $\mathbf{\Pi}$. Σημειώνουμε όμως, ότι είναι ο ίδιος για κάθε $\mathbf{B}_i$, οπότε η ανασύνθεση του τένσορα μπορεί να γίνει σωστά.

Τα $\mathbf{\Delta}_i$ είναι διαγώνιοι πίνακες, οι οποίοι περιέχουν σταθερές για κάθε διάνυσμα των $\mathbf{B}_i$.

Στην πραγματικότητα, δεν υπάρχει μία λύση στο πρόβλημα ανάλυσης του τένσορα, αλλά άπειρες, όπου μία από αυτές είναι και οι αρχικοί πίνακες $\mathbf{A}_i$. Ο αλγόριθμος θα μας δώσει μία από αυτές τις άπειρες λύσεις. Είναι σχεδόν σίγουρο ότι δεν θα είναι η ίδια λύση με την αρχική. Αλλά όσο αφορά το γινόμενο τους, θα είναι ισοδύναμες.

Για να γίνει αυτό πιο κατανοητό, δίνεται ένα παράδειγμα. Έστω ότι έχουμε τρεις αριθμούς, 4, 5 και 6. Το γινόμενό τους είναι 120. Ο αλγόριθμος θα μας γυρίσει 3 αριθμούς, το γινόμενο των οποίων θα είναι 120, παράδειγμα 2, 10, 6. Όπως βλέπουμε, ο αριθμός στην πρώτη θέση μειώθηκε στο μισό, ενώ ο δεύτερος διπλασιάστηκε.

Τα $\mathbf{\Delta}_i$ περιέχουν αυτήν την πληροφορία, δηλαδή τις διαφορές στις τάξεις μεγέθους μεταξύ των διανυσμάτων για αυτήν την λύση. Αφού όλες οι λύσεις είναι πολλαπλασιαστικά ισοδύναμες, ισχύει ότι το γινόμενο των $\mathbf{\Delta}_i$ είναι μοναδιαίος πίνακας:

$$\mathbf{\Delta}_1 \mathbf{\Delta}_2 \mathbf{\Delta}_3 = \mathbf{I}_L \quad (2)$$

Δηλαδή, με τον πολλαπλασιασμό των αντίστοιχων διανυσμάτων, οι διαφορές στις τάξεις μεγέθους αναιρούνται, και το αποτέλεσμα είναι το ίδιο ανάμεσα σε διαφορετικές λύσεις.

Τέλος, τα $\mathbf{E}_i$ αντιστοιχούν στο σφάλμα που εισάγεται από τον θόρυβο, και από τον αλγόριθμο εκτίμησης.

Παίρνοντας το εξωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων μιας διαδρομής έχουμε έναν από τους τένσορες πρώτου βαθμού. Το άθροισμα και των L τένσορων πρώτου βαθμού είναι το $\mathbf{y}$.



Εύρεση Παραμέτρων Σκεδαστών

Έχοντας κάνει την ανάλυση του τένσορα, μπορούμε να προχωρήσουμε στην εκτίμηση των παραμέτρων του καναλιού. Για κάθε $\mathbf{B}_i$, έχουμε έναν τύπο για να βρούμε την αντίστοιχη παράμετρο.

Από το $\mathbf{B}_1$, βρίσκουμε την γωνία πρόσπτωσης θ_l του l -οστού σημείου, με τον ακόλουθο τύπο:

$$\hat{\theta}_l = \arcsin \frac{\sum_{n_{BS}=1}^{N_{BS}-1} \angle([\mathbf{B}_1]_{(n_{BS},l)} / [\mathbf{B}_1]_{(n_{BS}+1,l)})}{\pi(N_{BS} - 1)}$$

Και αντίστοιχα για τον χρόνο διάδοσης τ_l μέσω της διαδρομής l από το διάνυσμα $\mathbf{B}_2$:

$$\hat{\tau}_l = \frac{\sum_{k=1}^{K-1} \angle([\mathbf{B}_2]_{(k,l)} / [\mathbf{B}_2]_{(k+1,l)})}{2(K-1)\pi\Delta}$$

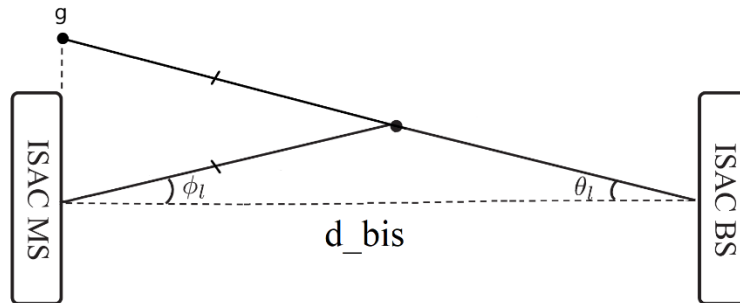
Έχοντας τις εκτιμήσεις για τις τιμές του χρόνου διάδοσης και της γωνίας πρόσπτωσης, μπορούμε να έχουμε εκτίμηση για την γωνία ανάκλασης ϕ_l , με βάση τον ακόλουθο τύπο:

$$\hat{\phi}_l = \arccos\left(\frac{\hat{d}_l^2 + g_l^2 - d_{bis}^2}{2\hat{d}_l g_l}\right) - \arccos\left(\frac{d_{bis}^2 + g_l^2 - \hat{d}_l^2}{2d_{bis} g_l}\right)$$

Όπου g_l είναι η απόσταση του $\mathbf{MS}$ από το σημείο που βρίσκεται σε απόσταση d_l και γωνία θ_l από το $\mathbf{BS}$. Δίνεται από τον τύπο των συνημίτονων:

$$g_l = \sqrt{\hat{d}_l^2 + d_{bis}^2 - 2\hat{d}_l d_{bis} \cos \hat{\theta}_l}$$

Σημειώνουμε ότι για να γίνει εκτίμηση της γωνίας ανάκλασης ϕ_l από τα θ_l και τ_l , χρειάζεται να ξέρουμε την απόσταση d_{bis} ανάμεσα στον πομπό και δέκτη. Ένας τρόπος να έχουμε αυτήν την πληροφορία, είναι από κάποιο σύστημα γεωεντοπισμού.



Εικόνα 46 Θέση του βοηθητικού σημείου g

Από το τρίτο διάνυσμα, μπορούμε να υπολογίσουμε την συχνότητα Doppler f_l :

$$\hat{f}_l = \frac{\sum_{m=1}^{M-1} \angle \left(\frac{[B_3]_{(m+1,l)} [S]_{(:,m)}^T}{[B_3]_{(m,l)} [S]_{(:,m+1)}^T} \right)}{2(M-1)\pi T_s}$$

Και με αυτά που ξέρουμε, έχουμε την εκτίμηση για την ταχύτητα v_l κάθε σκεδαστή:

$$\hat{v}_l = \frac{\lambda \hat{f}_l}{2 \sin((|\hat{\theta}_l| + |\hat{\varphi}_l|)/2)}$$

Το τελευταίο μέγεθος που χρειάζεται να ξέρουμε, είναι το κέρδος a_l κάθε διαδρομής. Όπως είδαμε στην παράγραφο **Τένσορας Σήματος**, το κέρδος της διαδρομής είναι ένα βαθμωτό μέγεθος, δηλαδή η επίδρασή του βρίσκεται σε ολόκληρο τον τένσορα. Άρα, δεν είναι τόσο εύκολο να το βρούμε, παίρνοντας ένα από τα διανύσματα για εκείνη την διαδρομή.

Με την παραπάνω διεργασία, έχουμε εκτιμήσεις για όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους. Άρα, μπορούμε να φτιάξουμε μία δεύτερη αναπαράσταση του τένσορα, από την οποία θα λείπει μόνο το κέρδος διαδρομής. Αυτή η δεύτερη αναπαράσταση θα είναι πολύ πιο κοντά στον αρχικό τένσορα, καθώς θα είναι ουσιαστικά η αρχική λύση. Έτσι, συγκρίνοντας τους δύο τένσορες, μπορούμε να βρούμε το κέρδος διαδρομής.

Ουσιαστικά, φτιάχνουμε τους πίνακες A_i , όπου λείπει το κέρδος της διαδρομής. Δηλαδή, για την διαδρομή l , έχουμε την εκτίμηση του τένσορα $\mathbf{y}_l$ από την αποσύνθεση του τένσορα:

$$\tilde{\mathbf{y}}_l \equiv \mathbf{b}_1(l) * \mathbf{b}_2(l) * \mathbf{b}_3(l)$$

Και έχουμε πάλι μία εκτίμηση του $\mathbf{y}_l$ ανακατασκευάζοντάς τον από τις εκτιμήσεις των μετρικών, εκτός του κέρδους:

$$\frac{\tilde{\mathbf{y}}_l}{\hat{\alpha}_l} \equiv \tilde{\mathbf{a}}_{BS}(\hat{\theta}_l) * \mathbf{u}(\hat{\tau}_l) * \tilde{\mathbf{a}}_{MS}(\hat{\varphi}_l) \mathbf{v}(\hat{f}_l) \odot (\mathbf{S}^T)$$

Ξέρουμε όμως, ότι συνδέονται με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\mathbf{b}_1(l) = \tilde{\mathbf{a}}_{BS}(\hat{\theta}_l) \Delta_1(l, l)$$

$$\mathbf{b}_2(l) = \hat{\alpha}_l \mathbf{u}(\hat{\tau}_l) \Delta_2(l, l)$$

$$\mathbf{b}_3(l) = \tilde{\mathbf{a}}_{MS}(\hat{\varphi}_l) \mathbf{v}(\hat{f}_l) \odot (\mathbf{S}^T) \Delta_3(l, l)$$

Λύνουμε ως προς Δ_i :

$$\Delta_1(l, l) = \tilde{\mathbf{a}}_{BS}(\hat{\theta}_l)^H \mathbf{b}_1(l)$$

$$\Delta_2(l, l) = \frac{\mathbf{u}(\hat{\tau}_l)^H}{\hat{\alpha}_l} \mathbf{b}_2(l)$$

$$\Delta_3(l, l) = (\tilde{a}_{MS}(\hat{\varphi}_l) v(\hat{f}_l) \odot (S^T))^H b_3(l)$$

Πολλαπλασιάζουμε τις παραπάνω σχέσεις ανά μέλος:

$$\Delta_1(l, l) \Delta_2(l, l) \Delta_3(l, l) = \tilde{a}_{BS}(\hat{\theta}_l)^H b_1(l) \frac{u(\hat{\tau}_l)^H}{\hat{\alpha}_l} b_2(l) (\tilde{a}_{MS}(\hat{\varphi}_l) v(\hat{f}_l) \odot (S^T))^H b_3(l)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την σχέση (2), ξέρουμε ότι η αριστερή πλευρά είναι ίση με 1, άρα τελικά:

$$\hat{\alpha}_l = \tilde{a}_{BS}(\hat{\theta}_l)^H b_1(l) u(\hat{\tau}_l)^H b_2(l) (\tilde{a}_{MS}(\hat{\varphi}_l) v(\hat{f}_l) \odot (S^T))^H b_3(l)$$

Έτσι, καταλήγουμε σε εκτιμήσεις για όλα τα χαρακτηριστικά του καναλιού.

Προσομοίωση

Στη συνέχεια, προχωράμε στην περιγραφή της μεθόδου που ακολουθήθηκε για την προσομοίωση του συστήματος.

Αρχικά, η προσομοίωση χρησιμοποιεί το μοντέλο για το κανάλι που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση. Δηλαδή, για τον φορέα k για το σύμβολο m , το κανάλι από το οποίο περνάει το σήμα δίνεται από το τύπο:

$$H_k(m) = \sum_{l=1}^L \alpha_l e^{j2\pi m T_s f_l} e^{-j2\pi k \tau_l \Delta} a_{BS}(\theta_l) a_{MS}^H(\phi_l)$$

Το πρώτο από τα subframe ενός OFDM frame χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του καναλιού. Τα σύμβολα που στέλνονται είναι γνωστά από πριν, οπότε λειτουργούν ως πιλότοι.

Δημιουργούμε L σκεδαστές, οι οποίοι βρίσκονται ανάμεσα στον πομπό και δέκτη. Σε κάθε σκεδαστή αποδίδεται μία τυχαία τιμή για την καθυστέρηση διάδοσης. Αυτή η καθυστέρηση μεταφράζεται απευθείας στην απόσταση αυτής της διαδρομής. Με βάση αυτή την καθυστέρηση, βρίσκουμε τυχαία γωνίες πρόσπτωσης και ανάκλασης.

Οι σκεδαστές χωρίζονται ώστε να βρίσκονται πάνω και κάτω από την ευθεία ανάμεσα στον πομπό και δέκτη.

Χρησιμοποιώντας την καθυστέρηση διάδοσης, αποδίδουμε σε κάθε διαδρομή κέρδος, ακολουθώντας την μοντελοποίηση του Power Delay Profile (Προφίλ ισχύος καθυστέρησης). Για το power delay profile που χρησιμοποιείται, όσο μικρότερη η απόσταση της διαδρομής, τόσο μικρότερες οι απώλειες στην ισχύ του σήματος, μαζί με κάποια τυχειότητα. Η τυχειότητα αυτή εξηγείται λόγω του περιβάλλοντος, του υλικού και μεγέθους του σκεδαστή κ.α.

Όταν δημιουργούμε σκεδαστές, φροντίζουμε ώστε να υπάρχει κάποια ελάχιστη απόσταση $\min_dist$ μεταξύ τους, ώστε να γίνεται πιο σωστά η αποσύνθεση του τένσορα. Αυτή η υπόθεση

θεωρείται λογική, καθώς δύο κινούμενοι στόχοι δεν θα βρίσκονται πολύ κοντά, για να αποφευχθεί σύγκρουση.

Τέλος, σε κάθε σκεδαστή αποδίδεται μία ταχύτητα, είτε προς την κατεύθυνση του πομπού είτε του δέκτη. Φροντίζουμε ώστε για κάθε L σκεδαστές, υπάρχουν τουλάχιστον N_s σκεδαστές που έχουν ταχύτητα κάτω από το όριο ξ που τίθεται. Το ξ θεωρείται η μεγαλύτερη ταχύτητα σκεδαστή η οποία καθιστά την διαδρομή αποδεκτή για χρήση στην επικοινωνία.

Το N_s είναι ο αριθμός των ροών δεδομένων που μπορεί να υποστηρίξει το σύστημα. Είναι ο αριθμός των rf chains που έχουν οι πομπός και δέκτης. Ισχύει:

$$N_s \leq \min(N_{BS}, N_{MS})$$

Στην επόμενη φάση, χρησιμοποιούμε τα δεδομένα των σκεδαστών για να ανά-συνθέσουμε το κανάλι. Στέλνουμε τον πιλότο μέσα από το κανάλι. Προσθέτουμε θόρυβο ανάλογα το SNR του σεναρίου. Ο δέκτης βάζει τα διανύσματα από κάθε φορέα και κάθε σύμβολο σε έναν τένσορα.

Χρησιμοποιούμε αλγόριθμο για να αναλύσουμε τον τένσορα σε διανύσματα.

Για την ανάλυση του τένσορα χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Alternating Least Squares όπως υλοποιήθηκε στον συνάρτηση `matlab cp3_alsls`, που βασίζεται στο άρθρο [7]. Ο κώδικας μπορεί να βρεθεί στην σελίδα http://dimitri.nion.free.fr/Codes/Tensor_Decompositions.html.

Από την ανάλυση του τένσορα παίρνουμε τρία διανύσματα για κάθε διαδρομή. Με αυτά τα διανύσματα βρίσκουμε τα χαρακτηριστικά κάθε σκεδαστή.

Κρατάμε μόνο τους σκεδαστές που έχουν ταχύτητα κάτω από το όριο ξ . Χρησιμοποιούμε το μοντέλο του καναλιού για να βρούμε τα beamforming (στο πομπό) και combining (στο δέκτη) διανύσματα ώστε να στέλνουμε το σήμα μόνο από αυτές τις διαδρομές.

Στέλνουμε σύμβολα από τον πομπό στον δέκτη, που ουσιαστικά μεταφέρουν την πληροφορία του σεναρίου. Και πάλι, προσθέτουμε θόρυβο. Ο δέκτης λαμβάνει τα σύμβολα. Κανονικοποιούμε ως προς την κλιμάκωση του αστερισμού λόγω διαφοράς πλάτους/φάσης, χρησιμοποιώντας ένα σύμβολο ως πιλότο ανά subframe.

Μετά από κάθε subframe, θεωρούμε ότι οι στόχοι θα έχουν μετακινηθεί λίγο. Οπότε αλλάζουμε την θέση των στόχων ανάλογα με την ταχύτητα τους και τον χρόνο που πέρασε. Αντίστοιχα ενημερώνουμε και τις εκτιμήσεις της θέσης των στόχων.

Τέλος, συγκρίνουμε τα σύμβολα ανάμεσα στον πομπό και δέκτη και μετράμε το ρυθμό σφάλματος ανά δυφίο, δηλαδή το Bit Error Rate – BER.

Παρουσίαση και Επεξήγηση Κώδικα Δοκιμής

Παρουσιάζουμε τον κώδικα, με όσο το δυνατόν πιο απλό και συνοπτικό τρόπο. Προσπαθούμε να εμπνεύσουμε την κατανόηση του κώδικα, και να διευκολύνουμε την μελλοντική χρήση του.

Αρχικές μεταβλητές:

```
5      % Simulation Initial Variables
6
7      % Number of transmit elements
8      N_MS=8;
9      % Number of receive elements
10     N_BS=32;
11     % Number of data streams
12     N_s=2;
13     % Carrier frequency
14     f_c=28*10^9;
15     % Subcarrier spacing
16     D=60*10^3;
17     % Elemental symbol duration
18     T_s=17.84*10^-6;
19     % Number of subcarriers
20     K=100;
21     % OFDM symbols per subframe
22     M=256;
23     % Subframes per frame
24     N_p=1;
25     % Distance between BS and MS
26     d_bis=100;
27     % Velocity threshold
28     xi=5;
29     % Light speed
30     c=3*10^8;
31     % Minimum distance between two scatterers
32     min_dist=10;
33     % SNR
34     SNR=20;
35     % Scatterers
36     L=5;
```

Ορισμός πιλότου. Ο πιλότος είναι ο ίδιος για όλους τους φορείς στην διάρκεια ενός συμβόλου.

```
34     % Pilot Creation
35     S_pilot=randi([0 3],1,M);
36     S_pilot(S_pilot==0)=1+1i;
37     S_pilot(S_pilot==1)=1-1i;
38     S_pilot(S_pilot==2)=-1+1i;
39     S_pilot(S_pilot==3)=-1-1i;
40     S_pilot=S_pilot*sqrt(2)/2;
41     S_pilot=ones(K,1)*S_pilot;
```


Δημιουργία πρώτου σκεδαστή. Ξεκινάμε δίνοντάς του καθυστέρηση διάδοσης σε ένα προκαθορισμένο εύρος. Υπολογίζουμε την απόσταση διαδρομής. Βρίσκουμε μία τυχαία γωνία θ , δίνοντας της μία τιμή στο εύρος από την μεγαλύτερη δυνατή (90°) στην μικρότερη (όταν η γωνία φ θα είναι 90°).

```
47 % Initial point creation
48 % Propagation Delay
49 t_l=zeros([1 L]);
50 t_l(1)=(rand(1)/10+0.35)*1.0e-06;
51 % Propagation Distance
52 d_l=zeros([1 L]);
53 d_l(1)=c*t_l(1);
54 % Angle Of Arrival/theta
55 DOD=zeros(1,L);
56 DOD(1)=(d_l(1)-(d_bis^2./d_l(1)))/2;
57 theta=zeros(1,L);
58 theta(1)=atand(DOD(1)/d_bis)+rand(1)*(90-atand(DOD(1)/d_bis));
59 ang=(randi([0 1])*2-1);
60 theta(1)=theta(1)*ang;
```

Βρίσκουμε τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του σκεδαστή. Χρησιμοποιούμε την απόσταση g_l , που μας βοηθάει στην τριγωνομετρία.

```
61 % Angle of Departure/phi
62 g_l=zeros(1,L);
63 g_l(1)=sqrt(d_l(1)^2+d_bis^2-2*d_l(1)*d_bis*cosd(theta(1)));
64 phi=zeros(1,L);
65 phi(1)=(acosd((d_l(1)^2+g_l(1)^2-d_bis^2)/(2*d_l(1)*g_l(1)))-acosd((d_bis^2+g_l(1)^2-d_l(1)^2)/(2*d_bis*g_l(1))))*ang;
66 % Distance Of Departure
67 DOD=zeros(1,L);
68 DOD(1)=d_bis./sind(180-abs(theta(1))-abs(phi(1))).*sind(abs(theta(1)));
69 % Distance Of Arival
70 DOA=zeros(1,L);
71 DOA(1)=d_l(1)-DOD(1);
72 % Scatterers distance from d_bis / Y coordinate (Negative for above d_bis)
73 y=zeros(1,L);
74 y(1)=DOA(1)*sind(theta(1));
75 % Distance of projection of scatterer on d_bis from BS / X coordinate
76 x=zeros(1,L);
77 x(1)=DOA(1)*cosd(abs(theta(1)));
```

Δημιουργούμε σκεδαστές και υπολογίζουμε τα χαρακτηριστικά τους, μέχρι να βρούμε L που πληρούν τα κριτήρια απόστασης μεταξύ τους.

Τίτλος Μελέτης: Μελέτη τεχνικής εκτίμησης καναλιού επικοινωνίας υποβοηθούμενης από τηλεπισκόπηση με
εντοπισμό κινούμενου στόχου βάση τένσορα
Ιωάννης-Διαμαντής Τριπιντής-Ιγνατίου – icsd13181

```
78 % Create rest of scatterers with distance constraints
79 for l=2:L
80     reject_flag=0;
81     while (true)
82         % Create new point
83         t_l_temp=(rand(1)/10+0.35)*1.0e-06;
84         d_l_temp=c*t_l_temp;
85         DOD_temp=(d_l_temp-(d_bis^2./d_l_temp))/2;
86         theta_temp=atand(DOD_temp/d_bis)+rand(1)*(90-atand(DOD_temp/d_bis));
87         ang=(randi([0 1])*2-1);
88         theta_temp=theta_temp*ang;
89         g_l_temp=sqrt(d_l_temp^2+d_bis^2-2*d_l_temp*d_bis*cosd(theta_temp));
90         phi_temp=acosd((d_l_temp^2+g_l_temp^2-d_bis^2)/(2*d_l_temp*g_l_temp))-acosd((d_bis^2+g_l_temp^2-d_l_temp^2)/(2*d_bis*g_l_temp));
91         phi_temp=phi_temp*ang;
92         DOD_temp=d_bis./sind(180-abs(theta_temp)-abs(phi_temp)).*sind(abs(theta_temp));
93         DOA_temp=d_l_temp-DOD_temp;
94         y_temp=DOA_temp*sind(theta_temp);
95         x_temp=DOA_temp*cosd(abs(theta_temp));
96
97         % Check with all previous points
98         for i=1:l-1
99             if(sqrt((x(i)-x_temp)^2+(y(i)-y_temp)^2)<min_dist)
100                 reject_flag=1;
101             end
102         end
103
104         % If new point acceptable
105         if(~reject_flag)
106             t_l(1)=t_l_temp;
107             d_l(1)=d_l_temp;
108             DOD(1)=DOD_temp;
109             theta(1)=theta_temp;
110             phi(1)=phi_temp;
111             DOD(1)=DOD_temp;
112             DOA(1)=DOA_temp;
113             y(1)=y_temp;
114             x(1)=x_temp;
115             break;
116         end
117     end
118     reject_flag=0;
119 end
```

Παράγουμε τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά των σκεδαστών.

```
121 % Scatterers gain
122 a_=13.5518;
123 b_=-7.7682e+06;
124 a=sqrt(a_*exp(b_*t_l));
125 a=a.*exp(1i*rand([1 L])*2*pi);
126 % Scatterers velocity
127 v=(rand(1,L)*20+10).*(randi([0 1],1,L)*2-1);
128 v(4:5)=mod(v(4:5),xi)-xi/2;
129 % Scatterers doppler frequency
130 f_l=2*v/(c/f_c).*sind(abs(theta/2)+abs(phi/2));
```

Συνθέτουμε το κανάλι με βάση τους σκεδαστές, στέλνουμε τον πιλότο και συμπληρώνουμε τον τένσορα.



```

132 % Channel Calculation w/ pilot + acc
133 W=diag(ones(1,N_BS));
134 F_pre=diag(ones(1,N_MS));
135 Y_bar=zeros(N_BS,K,M);
136 a_BS=zeros(N_BS,L);
137 a_MS=zeros(N_MS,L);
138 e1=zeros(1,L);
139 e2=zeros(1,L);
140
141 for m=1:M
142     e1(:)=exp(1i*2*pi*m*T_s*f_l);
143     a_BS(:)=exp([0:N_BS-1]'-1i*pi*sind(theta));
144     a_MS(:)=exp([0:N_MS-1]'-1i*pi*sind(phi));
145
146     for k=1:K
147         H_k=zeros(N_BS,N_MS);
148         e2(:)=exp(-1i*2*pi*k*t_l*D);
149         for l=1:L
150             H_k=H_k+a(l)*e1(l)*e2(l)*a_BS(:,l)*a_MS(:,l)';
151         end
152         Y_bar(:,k,m)=W'*(H_k*(F_pre*(ones(N_MS,1))*S_pilot(k,m)));
153         Y_bar(:,k,m)=awgn(Y_bar(:,k,m),SNR);
154     end
155 end
    
```

Ανάλυση τένσορα.

```

157 % CP Decomposition w/ Dimitri Nion @ http://dimitri.nion.free.fr/Codes/Tensor\_Decompositions.html
158 [B1,B2,B3]=cp3_alsls(Y_bar,L);
    
```

Εκτίμηση παραμέτρων σκεδαστών.

Τίτλος Μελέτης: Μελέτη τεχνικής εκτίμησης καναλιού επικοινωνίας υποβοηθούμενης από τηλεπισκόπηση με
εντοπισμό κινούμενου στόχου βάσει τένσορα
Ιωάννης-Διαμαντής Τριπιντής-Ιγνατίου – icsd13181

```

160 % Channel Parameter Estimation
161 theta_bar=zeros(1,L);
162 for l=1:L
163     for n=1:N_BS-1
164         theta_bar(l)=theta_bar(l)+angle((B1(n,l)/B1(n+1,l)));
165     end
166 end
167 theta_bar=asind(theta_bar/(pi*(N_BS-1)));
168
169 t_l_bar=zeros(1,L);
170 for l=1:L
171     for k=1:K-1
172         t_l_bar(l)=t_l_bar(l)+angle(B2(k,l)/B2(k+1,l));
173     end
174 end
175 t_l_bar=t_l_bar/(2*(K-1)*pi*D);
176
177 d_l_bar=t_l_bar*c;
178
179 g_l=sqrt(d_l_bar.^2+d_bis^2-2*d_l_bar.*d_bis.*cosd(theta_bar));
180 phi_bar=acosd((d_l_bar.^2+g_l.^2-d_bis^2)./(2*d_l_bar.*g_l))-acosd((d_bis^2+g_l.^2-d_l_bar.^2)./(2*d_bis.*g_l));
181 phi_bar(theta_bar<0)=phi_bar(theta_bar<0)*(-1);
182
183 f_l_bar=zeros(1,L);
184 for l=1:L
185     for m=1:M-1
186         f_l_bar(l)=f_l_bar(l)+angle(B3(m+1,l)*S_pilot(1,m)/(B3(m,l)*S_pilot(1,m+1)));
187     end
188 end
189 f_l_bar=f_l_bar/(2*(M-1)*pi*T_s);
190
191 v_bar=((c/f_c)*f_l_bar)./(2*sind((abs(theta_bar)/2)+(abs(phi_bar)/2)));
192
193 % Path gain estimation
194 a_bar=zeros(1,L);
195
196 G1=zeros(L);
197 G2=zeros(L);
198 G3=zeros(L);
199 for l=1:L
200     G1(l,1)=exp([0:N_BS-1]*-1i*pi*sind(theta_bar(l)))*B1(:,l);
201     G2(l,1)=exp([1:K]*-1i*2*pi*t_l_bar(l)*D)*B2(:,l);
202     G3(l,1)=(exp([1:M]*-1i*2*pi*T_s*f_l_bar(l)).*S_pilot(1,:)).'*B3(:,l);
203     a_bar(l)=(G1(l,1)*G2(l,1)*G3(l,1))/((exp([0:N_MS-1]*-1i*pi*sind(phi_bar(l)))*ones(N_MS,1))*N_BS*K*M);
204 end
205
206 % Estimation of Distance Of Departure
207 DOD_bar=d_bis./sind(180-abs(theta_bar)-abs(phi_bar)).*sind(abs(theta_bar));
208 % Estimation of Distance Of Arival
209 DOA_bar=d_bis./sind(180-abs(theta_bar)-abs(phi_bar)).*sind(abs(phi_bar));
210 % Estimation of Propagation Distance
211 d_l_bar=t_l_bar*c;
212 % Estimation of Scatterers distance from d_bis / Negative for above d_bis
213 y_bar=DOA_bar.*sind(theta_bar);
214 % Estimation of Distance of projection of scatterer on d_bis from BS
215 x_bar=DOA_bar.*cosd(abs(theta_bar));

```

Εύρεση σταθερών διαδρομών.

```

217 Q=find(abs(v_bar)<xi);
218
219 if(length(Q)>N_s)
220     Q=Q(1:N_s);
221 end

```

Δημιουργία δεδομένων πληροφορίας.



```
223 % Frame initialization
224 F=randi([0 3],N_p,length(Q),K,M);
225 F(F==0)=1+1i;
226 F(F==1)=1-1i;
227 F(F==2)=-1+1i;
228 F(F==3)=-1-1i;
229 F=F*sqrt(2)/2;
```

Αρχικοποίηση μεταβλητών προσομοίωσης της επικοινωνίας.

```
231 % Channel Calculation for BER calculation
232 F_bar=zeros(N_p,length(Q),K,M);
233
234 % Monte Carlo parameter prealloc
235 e1=exp(1i*2*pi*T_s*f_l);
236 a_BS=exp([0:N_BS-1]'-1i*pi*sind(theta));
237 a_MS=exp([0:N_MS-1]'-1i*pi*sind(phi));
238
239 % Monte Carlo parameters prealloc
240 e1_bar=exp(1i*2*pi*T_s*f_l_bar);
241 a_BS_bar=exp([0:N_BS-1]'-1i*pi*sind(theta_bar));
242 a_MS_bar=exp([0:N_MS-1]'-1i*pi*sind(phi_bar));
243
244
245 % For the remaining frames
246 F_bar=zeros(N_p,length(Q),K,M);
247 F_bar_bar=zeros(N_p,length(Q),K,M);
248
249 % Monte Carlo parameter prealloc
250 e1=zeros(1,L);
251 e2=zeros(1,L);
252 a_BS=zeros(N_BS,L);
253 a_MS=zeros(N_MS,L);
254
255 % Monte Carlo parameters prealloc
256 e1_bar=zeros(1,L);
257 e2_bar=zeros(1,L);
258 a_BS_bar=zeros(N_BS,L);
259 a_MS_bar=zeros(N_MS,L);
```

Δημιουργία ζεύξης και αποστολή δεδομένων.



Τίτλος Μελέτης: Μελέτη τεχνικής εκτίμησης καναλιού επικοινωνίας υποβοηθούμενης από τηλεπισκόπηση με
εντοπισμό κινούμενου στόχου βάση τένσορα
Ιωάννης-Διαμαντής Τριπιντής-Ιγνατίου – icsd13181

```

261 % For the remaining frames
262 for n_p=1:N_p
263     for m=1:M
264         % Monte Carlo parameters
265         e1=exp(1i*2*pi*m*T_s*f_l);
266         a_BS=exp([0:N_BS-1]'-1i*pi*sind(theta));
267         a_MS=exp([0:N_MS-1]'-1i*pi*sind(phi));
268
269         % Channel Estimation parameters
270         e1_bar=exp(1i*2*pi*m*T_s*f_l_bar);
271         a_BS_bar=exp([0:N_BS-1]'-1i*pi*sind(theta_bar));
272         a_MS_bar=exp([0:N_MS-1]'-1i*pi*sind(phi_bar));
273
274         for k=1:K
275             % Monte Carlo Channel Calc
276             H_k=zeros(N_BS,N_MS);
277             e2=exp(-1i*2*pi*k*t_l*D);
278             for l=1:L
279                 H_k=H_k+a(1)*e1(1)*e2(1)*a_BS(:,l)*a_MS(:,l)';
280             end
281
282             % Channel Estimation Calc
283             H_k_bar=zeros(N_BS,N_MS);
284             e2_bar=exp(-1i*2*pi*k*t_l_bar*D);
285             for q=Q
286                 H_k_bar=H_k_bar+a_bar(q)*e1_bar(q)*e2_bar(q)*a_BS_bar(:,q)*a_MS_bar(:,q)';
287             end
288
289             % Channelforming and Beamforming
290             [U,S,V]=svd(H_k_bar);
291             F_bar(n_p,:,k,m)=(U(:,1:length(Q))'*(H_k*(V(:,1:length(Q))*F(n_p,1:length(Q),k,m)'))));
292             F_bar(n_p,:,k,m)=awgn(F_bar(n_p,:,k,m),SNR);
293         end
294
295         % Change channel
296         x=x-v*T_s;
297         theta=atand(y./x);
298         phi=-atand(y./(d_bis-x));
299         f_l=2*v/(c/f_c).*sind(abs(theta/2)+abs(phi/2));
300         DOD=d_bis./sind(180-abs(theta)-abs(phi)).*sind(abs(theta));
301         DOA=d_bis./sind(180-abs(theta)-abs(phi)).*sind(abs(phi));
302         t_l=(DOD+DOA)/c;
303
304         % Change channel estimation
305         x_bar=x_bar-v_bar*T_s;
306         theta_bar=atand(y_bar./x_bar);
307         phi_bar=-atand(y_bar./(d_bis-x_bar));
308         f_l_bar=2*v_bar/(c/f_c).*sind(abs(theta_bar/2)+abs(phi_bar/2));
309         DOD_bar=d_bis./sind(180-abs(theta_bar)-abs(phi_bar)).*sind(abs(theta_bar));
310         DOA_bar=d_bis./sind(180-abs(theta_bar)-abs(phi_bar)).*sind(abs(phi_bar));
311         t_l_bar=(DOD_bar+DOA_bar)/c;
312     end
313
314     F_bar(n_p,:,:)=F_bar(n_p,:,:)./(F_bar(n_p,:,k,m)./F(n_p,:,k,m));
315 end

```

Υπολογισμός ρυθμού σφάλματος δυφίου BER.



```
320     temp=F_bar;  
321     F_bar(imag(F_bar(:))>0)=(real(F_bar(imag(F_bar(:))>0))+sqrt(2)/2*1i);  
322     F_bar(imag(F_bar(:))<0)=(real(F_bar(imag(F_bar(:))<0))-sqrt(2)/2*1i);  
323     F_bar(real(F_bar(:))>0)=(imag(F_bar(real(F_bar(:))>0))*1i+sqrt(2)/2);  
324     F_bar(real(F_bar(:))<0)=(imag(F_bar(real(F_bar(:))<0))*1i-sqrt(2)/2);  
325  
326     err=2*length(find(abs(F-F_bar)==2));  
327     err=err+length(find(abs(F-F_bar)==sqrt(2)));  
328     err/(length(F(:))*2)  
329     F_bar=temp;
```

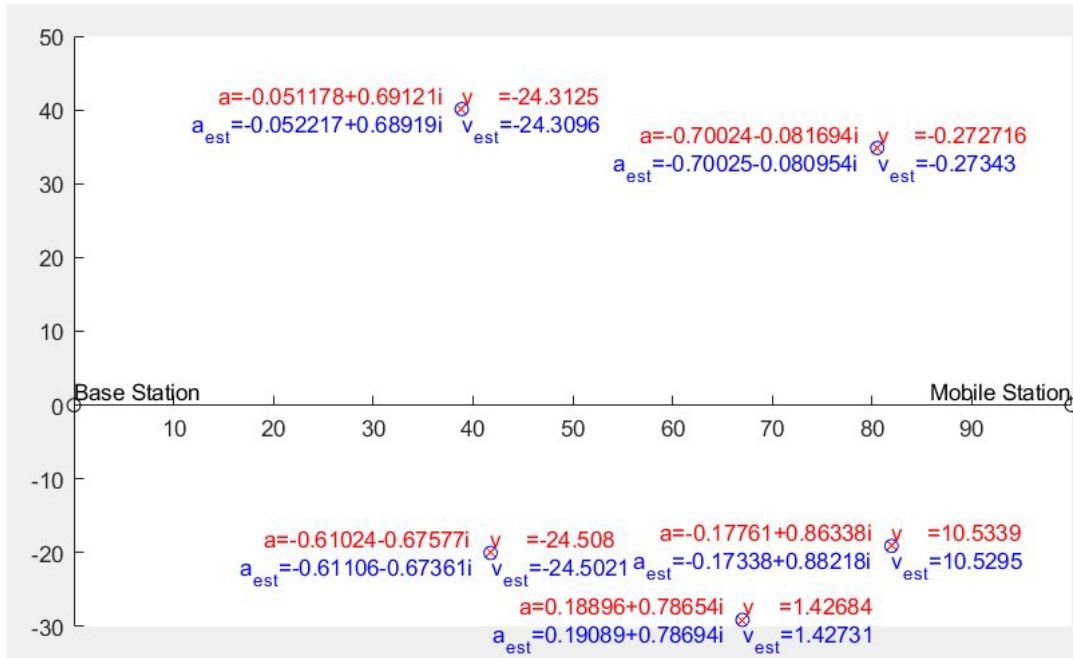
Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων.

```
328     scatterplot(F_bar(:))  
329  
330     figure  
331     scatter(x,y,'x')  
332     text(x,y,string(v), 'HorizontalAlignment','left', 'VerticalAlignment','bottom');  
333     text(x,y,string(a), 'HorizontalAlignment','right', 'VerticalAlignment','bottom');  
334     hold on;  
335     scatter(x_bar,y_bar,'o');  
336     text(x_bar,y_bar,string(v_bar), 'HorizontalAlignment','left', 'VerticalAlignment','top',Color="r");  
337     text(x_bar,y_bar,string(a_bar), 'HorizontalAlignment','right', 'VerticalAlignment','top',Color="r");  
338     set(gca, 'XAxisLocation', 'origin', 'YAxisLocation', 'origin');
```



Αποτελέσματα

Αρχικά, βλέπουμε την εκτίμηση των παραμέτρων του καναλιού για ένα τρέξιμο εξομοίωσης.



Εικόνα 47 Εκτίμηση χαρακτηριστικών καναλιού

Με κόκκινο 'x' είναι σημειωμένες οι πραγματικές θέσεις των στόχων. Από τις θέσεις τους, βλέπουμε τις γωνίες και την απόσταση της διαδρομής. Αντίστοιχα, με κόκκινη γραφή βλέπουμε το κέρδος της διαδρομής και την ταχύτητα του στόχου.

Με μπλε κύκλο είναι σημειωμένες οι εκτιμήσεις της τεχνικής για τα χαρακτηριστικά των στόχων. Παρατηρούμε ότι γίνεται πολύ καλή εκτίμηση των παραμέτρων του καναλιού.

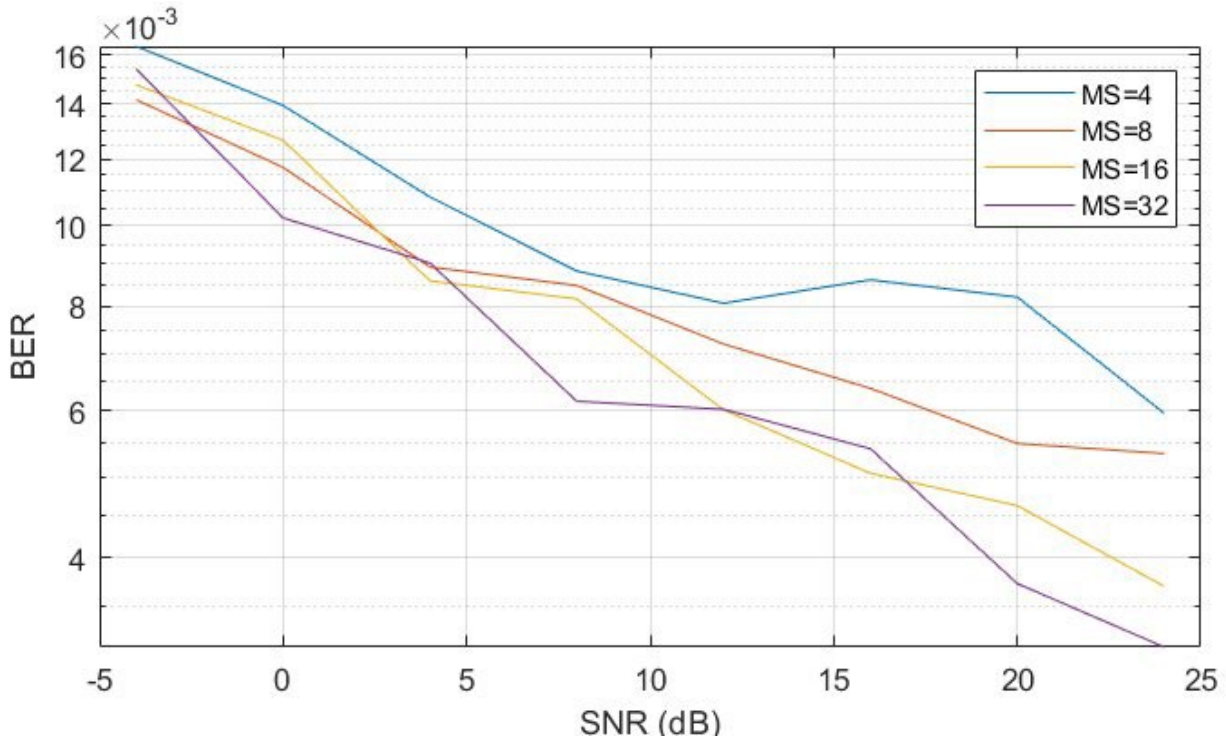
Προσομοιώνουμε το σύστημα ως προς δύο διαστάσεις, την ενέργεια του σήματος και τον αριθμό κεραιών του πομπού.

Για τον αριθμό των κεραιών του πομπού, ξεκινάμε από 4 κεραιές και διπλασιάζουμε μέχρι τις 32, όσες και οι κεραιές στον δέκτη. Η προσδοκία είναι ότι με περισσότερες κεραιές, θα έχουμε καλύτερα αποτελέσματα.

Αντίστοιχα για την ενέργεια του θορύβου, χρησιμοποιούμε τις ίδιες στάθμες που χρησιμοποιήθηκαν στο άρθρο. Δηλαδή, ξεκινάμε με SNR ίσο με -4, και ανεβαίνουμε ανά τέσσερα, μέχρι το SNR να γίνει 24. Περιμένουμε να έχουμε πτώση του BER όσο ανεβαίνει η ενέργεια του σήματος σε σχέση με την ενέργεια του θορύβου.

Για κάθε στάθμη SNR για κάθε αριθμό κεραιών, κάναμε 400 επαναλήψεις του πειράματος.

Υπενθυμίζουμε ότι σε κάθε εκτέλεση του πειράματος, στέλνεται ένα OFDM frame, όπου το πρώτο subframe χρησιμοποιείται για την τηλεπισκόπηση του καναλιού. Τα υπόλοιπα εννιά μεταφέρουν τα δεδομένα στα οποία μετράμε το BER.



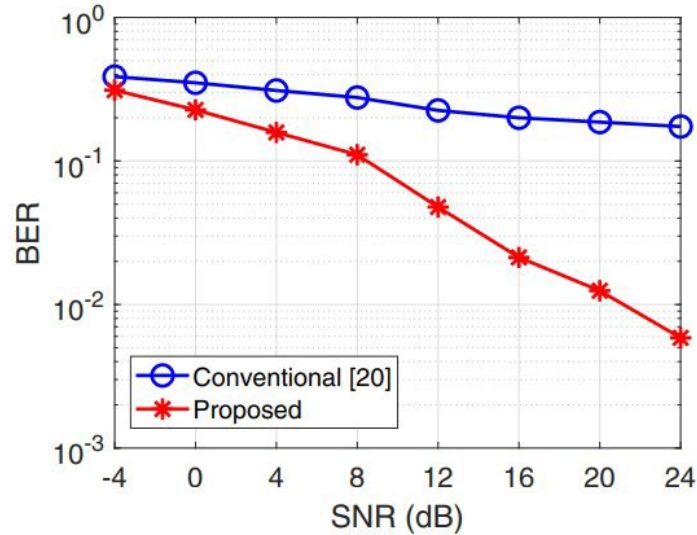
Εικόνα 48 Αποτελέσματα Δοκιμών

Παρατηρούμε ότι οι προσδοκίες μας επιβεβαιώνονται. Καθώς αυξάνεται η ενέργεια του σήματος, μειώνονται τα σφάλματα.

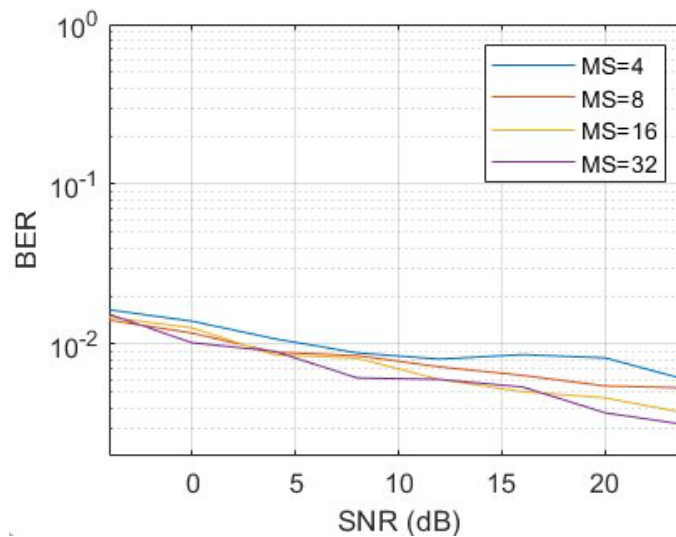
Αντίστοιχα, με περισσότερες κεραιές στον πομπό, βελτιώνονται τα αποτελέσματα. Για χαμηλό SNR, δεν είναι τόσο ξεκάθαρο αυτό και στην συνέχεια οι τρεις περισσότερες κεραιές δεν δείχνουν ξεκάθαρα την βελτιωμένη απόδοση. Προς το τέλος όμως, φαίνεται η βελτίωση με τον μεγαλύτερο αριθμό κεραιών. Πιστεύουμε ότι με περισσότερες επαναλήψεις, αυτό θα φαινόταν ακόμη καλύτερα.

Σημειώνουμε ότι με περισσότερες κεραιές ο χρόνος εκτέλεσης αυξανόταν σημαντικά. Αυτό είναι λογικό, καθώς με περισσότερες κεραιές μεγαλώνει το μέγεθος του πίνακα **H**, οπότε γίνονται και πιο πολλές οι πράξεις.

Στην συνέχεια, συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα από το άρθρο.



Εικόνα 49 Αποτελέσματα δοκιμών αρχικού άρθρου



Εικόνα 50 Αποτελέσματα δοκιμών της παρούσας εργασίας

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα των δικών μας δοκιμών είναι σημαντικά καλύτερα από αυτά που δίνονται από το αρχικό άρθρο.

Είναι δύσκολο να μπορέσουμε να συμπεράνουμε ακριβώς γιατί μπορεί να γίνεται αυτό, χωρίς να έχουμε ακριβώς τον κώδικα του πειράματος που εκτελέστηκε από την πλευρά των συγγραφέων. Μπορούμε να εικάσουμε ότι μπορεί να οφείλεται σε δύο παράγοντες.

Η συνθήκη που έχουμε προσθέσει για να έχουμε μια ελάχιστη απόσταση ανάμεσα στους στόχους, οδηγεί σε καλύτερη και πιο αποδοτική αποσύνθεση του τένσορα. Αν δεν γίνει σωστά η ανάλυση του τένσορα, αποκτάμε μια τελείως λανθασμένη εικόνα για το κανάλι, που οδηγεί σε υψηλό ποσοστό λαθών.

Άλλος ένας παράγοντας πιθανόν να είναι η αλλαγή του καναλιού με τον χρόνο. Αν δεν γίνει η αντίστοιχη αλλαγή των θέσεων των στόχων, δεν μπορούμε να κάνουμε beamforming προς την ακριβή θέση των στόχων.

Τέλος, να σημειώσουμε ότι ακολουθήσαμε την πηγή που αναφέρεται για να βρεθεί η τεχνική με την οποία συγκρίνουν οι συγγραφείς. Παρ' όλ' αυτά, δεν βρέθηκε ποια τεχνική εννοούν οι συγγραφείς ως conventional.

Συμπεράσματα

Το άρθρο [1] προτείνει μια πολύ ενδιαφέρουσα τεχνική η οποία φαίνεται πειραματικά να είναι αποτελεσματική. Όμως, τόσο το άρθρο όσο και η τεχνική παρουσιάζουν μερικά προβληματικά σημεία.

Σημαντικό για την υλοποίηση της τεχνικής είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να κάνουμε εκτίμηση του καναλιού. Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο ALS που υλοποιείται στην μέθοδο `cp3_alsls` που περιγράφεται στο [7], η ανάλυση του τένσορα με τις παραμέτρους που τέθηκαν χρειάζεται πάνω από 1 δευτερόλεπτο σε ένα σύγχρονο επεξεργαστή. Σε αντίθεση, για να εκπεμφθούν τα υπόλοιπα εννιά subframes του OFDM Frame χρειάζονται λιγότερα από 50 millisecond. Είναι σημαντικό να μπορούμε να έχουμε τις εκτιμήσεις του καναλιού όσο είναι ακόμη έγκυρες.

Ένα σημαντικό σημείο που χρειάζεται να σημειώσουμε για το άρθρο είναι η δυσκολία κατανόησης και η έλλειψη εξηγήσεων. Παράδειγμα, ο τύπος που προτείνεται για την εκτίμηση του κέρδους μιας διαδρομής δίνεται χωρίς εξήγηση. Μετά από έρευνα, η μέθοδος βρέθηκε στο άρθρο [8]. Με αποτέλεσμα να μην εξηγείται γιατί χρειάζεται να διαιρέσουμε με τον αριθμό των στοιχείων του τένσορα για να έχουμε σωστά αποτελέσματα. Περαιτέρω, ο τύπος που δίνεται στο άρθρο είναι αναίτια περίπλοκος και έτσι υλοποιήθηκε πιο απλός τρόπος.

Ο τύπος (10) του άρθρου περιέχει τον όρο Δ στον παρονομαστή, ο οποίος είναι λάθος. Το διάνυσμα $B_3(l)$ είναι αντίστοιχο του διανύσματος που περιέχει την ολίσθηση στην συχνότητα λόγω Doppler και δεν χρειάζεται να διαιρέσουμε με το subcarrier spacing.

$$\hat{f}_l = \frac{\sum_{m=1}^{M-1} \left(\frac{[B_3]_{(m+1,l)}}{([S]_{(:,m+1)}^T \tilde{a}_{MS}(\hat{\phi}_l))} / \frac{[B_3]_{(m,l)}}{([S]_{(:,m)}^T \tilde{a}_{MS}(\hat{\phi}_l))} \right)}{2(M-1)\pi T_s \Delta}, \quad (10)$$

Ο τύπος (5) δεν έχει μαθηματική συνοχή με την αντικατάσταση του τύπου (2) στον τύπο (1).

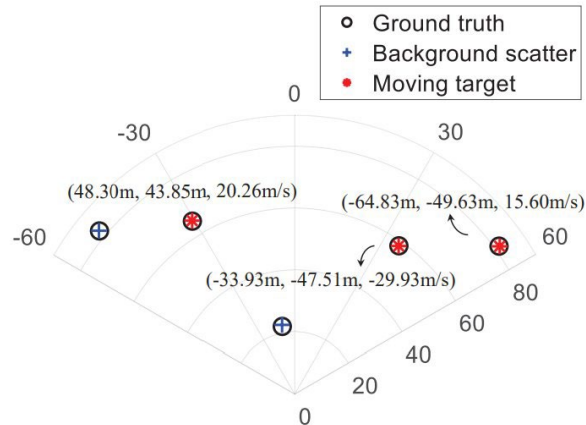
$$\mathcal{Y} = \sum_{l=1}^L \tilde{a}_{BS}(\theta_l) \circ [\alpha_l \mathbf{u}(\tau_l)] \circ [\mathbf{v}(f_l) \odot (\mathbf{S}^T \tilde{a}_{MS}(\phi_l))].$$

Αντί αυτού, χρησιμοποιήθηκε ο δικός μας τύπος:

$$\mathcal{Y} = \sum_{l=1}^L \tilde{a}_{BS}(\theta_l) \circ [\alpha_l \mathbf{u}(\tau_l)] \circ [\tilde{a}_{MS}(\phi_l) \mathbf{v}(f_l) \odot (\mathbf{S}^T)]$$

Ο παραπάνω τύπος είναι μαθηματικά συνεπής και οδηγεί σε σωστά αποτελέσματα.

Άλλο ένα σημείο που θέλουμε να επισημάνουμε είναι το διάγραμμα 2 του άρθρου [1].



Εικόνα 51 Διάγραμμα πολικών συντεταγμένων των στόχων από το αρχικό άρθρο

Το διάγραμμα δείχνει τις πολικές συντεταγμένες από τον δέκτη των σημείων που δίνονταν στο παράδειγμα, και αντίστοιχα τις εκτιμήσεις τους. Πρώτον, για το διάγραμμα χρησιμοποιήθηκαν οι γωνίες των σημείων από τον δέκτη, και οι αποστάσεις από τον πομπό. Δεύτερον, ένα σημείο με πολικές συντεταγμένες (63m, -30°) δεν έχει καρτεσιανές συντεταγμένες (48.3m, 43.85m).

Κατά την μελέτη της τεχνικής, για το κομμάτι της προσομοίωσης, κάναμε την παραδοχή ότι πρέπει να υπάρχει κάποια ελάχιστη απόσταση μεταξύ των στόχων του καναλιού. Έγινε σε μια προσπάθεια να μπορέσει να γίνει πιο αξιόπιστα η ανάλυση του τένσορα.

Στην συνέχεια, έγινε κατανοητό ότι το σφάλμα ήτανε στον τύπο (5) του άρθρου. Όταν διορθώθηκε, βελτιώθηκε η απόδοση του συστήματος. Παρ' όλ' αυτά, κρατήθηκε το παραπάνω κριτήριο, καθώς έχει νόημα και στην φυσική διάσταση του καναλιού.

Παραπέρα, θέλουμε να ζητήσουμε συγγνώμη από τον αναγνώστη, καθώς σε κάποια σημεία είναι ασυνεπείς ο συμβολισμός. Έγινε προσπάθεια να είναι οι τύποι όσο πιο κοντά στο αυθεντικό άρθρο, αλλά ταυτόχρονα η τήρηση της σύμβασης πως οι τένσορες συμβολίζονται με boldface Euler script. Αυτή η γραμματοσειρά δεν είναι διαθέσιμη στο πρόγραμμα συγγραφής, με αποτέλεσμα σε εικόνες και screenshots να τηρείται η σύμβαση, αλλά στην γραφή και σε τύπους όχι.

Όπως αναφέραμε, αποτελεί μια πολύ ενδιαφέρον τεχνική. Πολύ ενδιαφέρον θα είχε να ερευνηθεί πόσο θα μπορούσαμε να μειώσουμε το μέγεθος του τένσορα, ώστε να μην χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε ένα ολόκληρο OFDM subframe για την εκτίμηση του καναλιού. Έτσι, θα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε λιγότερους πιλότους και να γίνεται πιο γρήγορα η ανάλυση του τένσορα. Ερευνητικό ενδιαφέρον έχει η μελέτη του tradeoff μεταξύ χρόνου και σωστών αποτελεσμάτων.

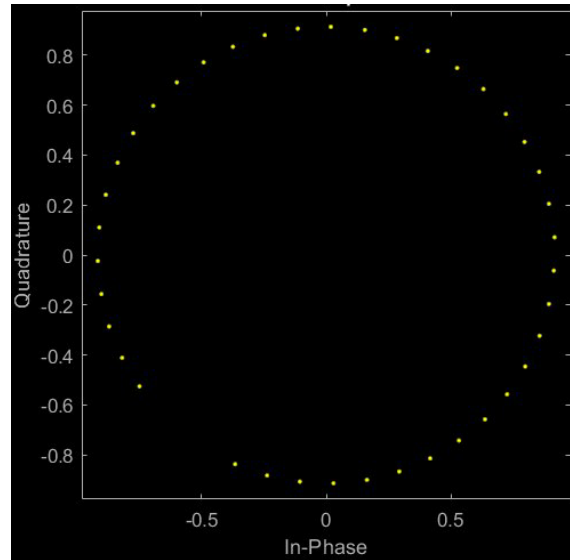
Σε πολλά άρθρα στον ίδιο τομέα, όπως [9], λαμβάνουνε υπόψη στο σύστημα τους πολλαπλούς χρήστες. Αυτό είναι μια λογική υπόθεση, καθώς σε ένα αστικό περιβάλλον και για μία εμπορική εφαρμογή, είναι πολλοί οι χρήστες που θέλουμε να εξυπηρετήσουμε.

Πανεπιστήμιο Αιγαίου – Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων



Τέλος, το άρθρο [9] προτείνει έναν τρόπο να γίνει γραμμικά η ανάλυση του τένσορα. Οι συγγραφείς του [9] χρησιμοποιούν το γεγονός ότι οι στήλες του πίνακα της μιας διάστασης του τένσορα είναι γεωμετρική σειρά, άρα όλος ο πίνακας είναι ένας πίνακας Vandermonde. Γνωρίζοντας την δομή του πίνακα, χρησιμοποιούν γραμμική άλγεβρα για να αναλύσουν τον τένσορα.

Παρατηρήθηκε ότι ο πίνακας $\mathbf{B}_2$ είναι πίνακας Vandermonde. Άρα, ο τένσορας μπορεί να αναλυθεί αντίστοιχα με γραμμική άλγεβρα.



Εικόνα 52 Στοιχεία από τον πίνακα B_2

Δοκιμάστηκε η μέθοδος που προτείνεται στο [9], αλλά λόγω μεγέθους των N_{BS} , K και M , ο χρόνος που χρειαζόταν ήταν ακόμη μεγαλύτερος. Θα μπορούσε να μελετηθεί για τι μέγεθος τένσορα είναι λογικό να χρησιμοποιήσουμε την μία τεχνική, και τότε την άλλη.

Πηγές

- [1] L. Lin, H. Zheng, S. A. Vorobyov, C. Zhou και Z. Shi, «SENSING-AIDED COMMUNICATION CHANNEL ESTIMATION WITH TENSOR-BASED MOVING TARGET LOCALIZATION,» *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2024.
- [2] F. Liu, L. Zheng, Y. Cui, C. Masouros, A. P. Petropulu, H. Griffiths και Y. C. Eldar, «“Seventy years of radar and communications: The road from separation to integration,”» *IEEE Signal Process. Mag.*, τόμ. 40, αρ. 5, p. 106–121, 2023.
- [3] D. Tse και P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [4] F. Liu, Y. Cui, C. Masouros, J. Xu, T. X. Han, Y. C. Eldar και S. Buzzi, «Integrated Sensing And Communications: Towards Dual-Functional Wireless Networks for 6G and Beyond,» *IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS*, τόμ. 40, αρ. 6, pp. 1728-1767, 2022.
- [5] W. Saad, M. Bennis και M. Chen, «A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems,» *IEEE Network*, pp. 134-142, 2020.
- [6] T. G. Kolda και B. W. Bader, «Tensor Decompositions and Applications,» *SIAM (Society for Industrial and Applied Mathematics) REVIEW*, τόμ. 51, αρ. 3, pp. 455-500, 2009.
- [7] L. D. L. D. Nion, «Decompositions of a Higher-Order Tensor in Block Terms - Part III: Alternating Least Squares Algorithms,» *SIAM J. Matrix Anal. Appl. (SIMAX), Special Issue on Tensor Decompositions and Applications*, τόμ. 30, αρ. 3, pp. 1067-1083, 2008.
- [8] R. Zhang, L. Cheng, S. Wang, Y. Lou, W. Wu και D. W. K. Ng, «Tensor Decomposition-Based Channel Estimation for Hybrid mmWave Massive MIMO in High-Mobility Scenarios,» *IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS*, τόμ. 70, αρ. 9, pp. 6325-6340, 2022.
- [9] J. Wang, W. Zhang, Y. Chen, Z. Liu, J. Sun και C.-X. Wang, «Time-Varying Channel Estimation Scheme for Uplink MU-MIMO in 6G Systems,» *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, τόμ. 71, αρ. 11, pp. 11820-11831, 2022.

Τίτλος Μελέτης: Μελέτη τεχνικής εκτίμησης καναλιού επικοινωνίας υποβοηθούμενης από τηλεπισκόπηση με
εντοπισμό κινούμενου στόχου βάση τένσορα
Ιωάννης-Διαμαντής Τριπιντής-Ιγνατίου – icsd13181

