



Μελέτη Ασύρματου Ραδιοκαναλιού με Σταθμούς Βάσης σε UAVs Study of the wireless radiochannel with base stations on UAVs

Σ. Μουκίδου, Γ. Αθανασιάδου

Εργαστήριο Ασυρμάτων και Κινητών Επικοινωνιών (<http://wmclab.uop.gr>)

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου

Email: gathanas@uop.gr

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν αποτελέσματα προσομοίωσης ραδιοκαναλιού που παρήχθησαν με την τεχνική ray tracing. Για την παραγωγή των αποτελεσμάτων προσομοίωσης της ασύρματης ζεύξης, ο σταθμός βάσης ήταν πάνω σε UAV, ενώ ο χρήστης ήταν στους δρόμους μια τυπικής μικρής ελληνικής πόλης (Τρίπολη). Το μοντέλο που αναπτύχθηκε με το πρόγραμμα MATLAB [1], διαβάζει τα δεδομένα που έχουν παραχθεί από τον προσομοιωτή ray tracing του εργαστηρίου [2, 3, 4], τα επεξεργάζεται και τα αποθηκεύει για περαιτέρω επεξεργασία. Υπολογίζει και εμφανίζει τη συνολικά λαμβανόμενη ισχύ, το προφίλ ισχύος - καθυστέρησης (Power Delay Profile), την RMS εξάπλωση καθυστέρησης (RMS delay spread), τον παράγοντα K (K -factor), το εύρος ζώνης συνοχής (Coherence Bandwidth) και την RMS εξάπλωση της γωνίας αζιμουθίου και ανύψωσης (RMS angular phi και theta spread). Μπορεί να πραγματοποιήσει ανάλυση σημείου, αλλά και να απεικονίσει όλες τις προαναφερθείσες παραμέτρους, κατά μήκος μίας επιλεγμένης διαδρομής. Ο χρήστης μπορεί επίσης να διαπιστώσει, εάν και ποια σημεία ικανοποιούν τα κριτήρια που θέτει ως προς λαμβανόμενη ισχύ, RMS εξάπλωση καθυστέρησης και παράγοντα K . Τα αποτελέσματα προκύπτουν με βάση τα αρχικά δεδομένα για ισοτροπικές κεραίες, ενώ υπάρχει και η δυνατότητα για χρήση διαφορετικών διαγραμμάτων ακτινοβολίας στα άκρα της ζεύξης. Τέλος, παρέχεται η επιλογή της ανάλυσης μεγίστου κέρδους (max gain analysis), δηλαδή της βέλτιστης περίπτωσης, όπου τόσο ο χρήστης όσο και ο σταθμός βάσης έχουν στρέψει τις κεραίες τους προς την κατεύθυνση της ακτίνας που μεταφέρει τη μέγιστη ισχύ.

© 2024 Βιβλιοθήκη και Κέντρο Πληροφόρησης Πανεπιστημίου Πελοποννήσου

Λέξεις-κλειδιά: Ασύρματες Ζεύξεις, Τηλεπικοινωνίες με τη βοήθεια UAVs, Matlab προσομοιώσεις, Ανάλυση ζεύξης για βέλτιστο προσανατολισμό διαγραμμάτων ακτινοβολίας

Doi:

Abstract

In the present work, radio channel simulation results produced with the ray tracing technique were studied. To produce the simulation results of the wireless link, the base station was on a UAV, while the user was on the streets of a typical small Greek city (Tripoli). The model developed with the MATLAB program [1], reads the data produced by the laboratory ray tracing simulator [2, 3, 4], processes them and stores them for further processing. It calculates and displays total received power, power-delay profile, RMS delay spread, K-factor, coherence bandwidth, and RMS angular spread for azimuth and elevation angle. It can perform point analysis and display all the mentioned parameters along a selected path. The user can also determine whether and which of the points meet the criteria set for the received power, RMS delay spread, and K-factor. The results are based on the initial data for isotropic antennas, whereas there is the option of employing different antenna radiation patterns on both ends of the radio link. Lastly, there is also the capability for maximum gain analysis, i.e., for the optimal case where both the user and the base station have oriented their antennas towards the direction of the ray carrying the maximum power.

© 2024 Library and Information Center, University of the Peloponnese

Keywords: Wireless Links, UAV assisted communications, Matlab simulation, Link analysis for optimum antenna pattern orientation

1. Εισαγωγή

Η χρήση των μη επανδρωμένων οχημάτων αέρος (Unmanned Aerial Vehicles – UAVs) προτείνεται στο πλαίσιο των κυψελωτών δικτύων 5G, ώστε να λειτουργήσουν ως φορητοί σταθμοί βάσης ή αναμεταδότες, με σκοπό να προσφέρουν τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες σε περιοχές χαμηλής κάλυψης, να αυξήσουν τη χωρητικότητα του δικτύου σε έκτακτες συνθήκες απότομης προσέλευσης πληθυσμού σε μία συγκεκριμένη περιοχή ή ακόμα να υποστηρίξουν την τηλεπικοινωνιακή κάλυψη σε περιπτώσεις κατεστραμμένου επίγειου δικτύου (όπως για παράδειγμα μετά από ένα σεισμό, ή σε ένα στάδιο κατά τη διάρκεια ενός αγώνα) [2, 5, 6]. Οι φορητοί σταθμοί βάσης μπορούν να αυξήσουν την πιθανότητα για Line of Sight – LOS επικοινωνία σε αστικά περιβάλλοντα όπου, εξαιτίας της διαμόρφωσης του περιβάλλοντος, είτε κατόπιν ανθρώπινης παρέμβασης, είτε από φυσικά αίτια, η τηλεπικοινωνιακή κάλυψη υφίσταται μεγάλη απώλεια διαδρομής λόγω NLOS επικοινωνίας, η οποία οδηγεί σε σημαντική μείωση της λαμβανόμενης ισχύος [2, 6].

Τα UAVs πετώντας στο κατάλληλο ύψος (πάνω από το ύψος που καθαρίζει η πρώτη ζώνη Fresnel, αλλά όχι τόσο ψηλά ώστε οι απώλειες διαδρομής να είναι πολύ μεγάλες), μπορούν να λειτουργήσουν ως αναμεταδότες προκειμένου να καλύψουν απομακρυσμένες περιοχές. Σε αστικό περιβάλλον, μπορεί να υπάρχει μεγάλη διακύμανση του σήματος λόγω παρεμβολών, όταν πετούν πάνω από το ύψος των κτιρίων, λόγω της εγγύτητάς τους σε επίγειους σταθμούς βάσης, γεγονός το οποίο αντισταθμίζεται όταν επιλεγθεί μεγαλύτερο ύψος πτήσης [2]. Από την άλλη πλευρά, ακόμα και στην πτήση χαμηλού υψομέτρου, λίγο πιο πάνω από το ύψος των κτιρίων, τα UAVs ανιχνεύουν πολλές υπάρχουσες κυψέλες, επομένως θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτικές πύλες επικοινωνίας, σε ένα υπερφορτωμένο δίκτυο [7].



Εικόνα 1. Χρήση των UAVs ως ενάεριοι σταθμοί βάσης σε αστική περιοχή [2]

2. Μοντελοποίηση ασύρματου καναλιού

Ο κύριος περιοριστικός παράγοντας που επηρεάζει τα ασύρματα συστήματα οφείλεται στα χαρακτηριστικά του ασύρματου καναλιού, με ιδιαίτερη έμφαση στις απώλειες λόγω διαδρομής. Τα απλά μοντέλα διάδοσης διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη, τον σχεδιασμό και την εγκατάσταση κινητών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Ωστόσο, με την αυξανόμενη χρήση της κινητής τηλεφωνίας από τον πληθυσμό, σε περισσότερες αστικές περιοχές, το κύριο ζήτημα πλέον είναι η χωρητικότητα έναντι της κάλυψης. Επιπλέον, με την εξέλιξη των σύγχρονων συστημάτων επικοινωνίας, όπως η σταθερή ασύρματη πρόσβαση (FWA) και συστήματα πολλαπλών εισόδων – πολλαπλών εξόδων (MIMO), οι λεπτομερείς μελέτες των χαρακτηριστικών του καναλιού σε ειδικά περιβάλλοντα όπως οι αστικές περιοχές, γίνονται όλο και πιο σημαντικές. Τα ντετερμινιστικά μοντέλα διάδοσης απαιτούνται ώστε να παρέχουν ακριβείς προβλέψεις της διάδοσης ραδιοκυμάτων, λαμβάνοντας υπόψη την ακριβή θέση, τον προσανατολισμό, και τις ηλεκτρικές ιδιότητες μεμονωμένων κτιρίων, καθώς και άλλα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος (π.χ. φύλλωμα) [3].

Η τεχνική που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση του ασύρματου καναλιού, λαμβάνοντας υπόψη το συγκεκριμένο περιβάλλον που μελετάται, είναι η ανίχνευση ακτινών (ray tracing) [4]. Η ανίχνευση ακτινών βασίζεται στη γεωμετρική οπτική (Geometrical Optics). Στη θεωρία της γεωμετρικής οπτικής, η ενέργεια θεωρείται ότι ακτινοβολείται σε απειροελάχιστους σωλήνες, οι οποίοι ονομάζονται ακτίνες. Οι ακτίνες αυτές είναι κάθετες στις επιφάνειες με ίση ισχύ σήματος, βρίσκονται στην κατεύθυνση διάδοσης και κινούνται σε ευθείες γραμμές, υπό την προϋπόθεση ότι ο δείκτης διάθλασης είναι σταθερός. Η τεχνική ray tracing, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι κυρίαρχοι μηχανισμοί διάδοσης είναι η ανάκλαση και η περίθλαση των ακτίνων, παράγει ντετερμινιστικό μοντέλο καναλιού που λειτουργεί με την επεξεργασία περιβαλλόντων που ορίζονται από το χρήστη. Η ανίχνευση ακτινών χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της φάσης, της χρονικής καθυστέρησης και της γωνίας άφιξης των διαφόρων ακτινών από πολλαπλές διαδρομές (multipath). Οι πληροφορίες που παρέχονται από αυτά τα εργαλεία προσομοίωσης, συνδυάζοντας πολλές φορές τεχνικές μηχανικής μάθησης (Machine Learning – ML) και νευρωνικών δικτύων (Neural Networks – NNs), επιτρέπουν πρόβλεψη της απόδοσης των ασύρματων συστημάτων σε διαφορετικά περιβάλλοντα [8-11].

2.1 Παράμετροι καναλιού

2.1.1 Παράμετροι χρονικής διασποράς

Προκειμένου να συγκριθούν διαφορετικά ραδιοκανάλια πολλαπλών διαδρομών και να αναπτυχθούν ορισμένες γενικές γραμμές σχεδιασμού για ασύρματα συστήματα, χρησιμοποιούνται παράμετροι που ποσοτικοποιούν σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες του καναλιού. Η μέση υπερβάλλουσα καθυστέρηση (mean excess delay), η εξάπλωση καθυστέρησης (delay spread) και η εξάπλωση γωνίας (angular spread) έχουν ιδιαίτερη σημασία στα ασύρματα επικοινωνιακά συστήματα, καθώς επηρεάζουν την ποιότητα της επικοινωνίας. Αυτές οι

παράμετροι συχνά χαρακτηρίζονται από την Root Mean Square (RMS) τιμή τους, που αποτελεί ένα μέτρο της διασποράς του σήματος [12].

Η μέση υπερβάλλουσα καθυστέρηση υπολογίζεται ως εξής:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (\text{Εξίσωση 1}),$$

όπου $P(\tau_k)$, η ισχύς που λήφθηκε με χρονική καθυστέρηση τ_k , ενώ η RMS εξάπλωση καθυστέρησης ως:

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2} \quad (\text{Εξίσωση 2}),$$

$$\text{όπου: } \overline{\tau^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (\text{Εξίσωση 3}).$$

Η εξάπλωση καθυστέρησης αναφέρεται στο χρονικό διάστημα μεταξύ της πρώτης και της τελευταίας ακτίνας που φτάνουν σε ένα δέκτη από έναν πομπό, μέσω των διαφορετικών διαδρομών. Αυτό το φαινόμενο προκαλεί παραμόρφωση στο σήμα, λόγω της χρονικής επικάλυψης των σημάτων που φτάνουν με διαφορετική καθυστέρηση. Με ανάλογο τρόπο, η εξάπλωση γωνίας αφορά στην εκτίμηση της διασποράς των γωνιών του σήματος που φτάνει στο δέκτη [13].

Για τον υπολογισμό της RMS εξάπλωσης γωνίας στο αζιμούθιο και στο επίπεδο ανύψωσης (ϕ και θ), μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παραπάνω εξισώσεις, αντικαθιστώντας την καθυστέρηση τ_k με τη γωνία άφιξης ϕ (ϕ) ή θ (θ) αντίστοιχα.

Όπως η εξάπλωση καθυστέρησης περιγράφει στο πεδίο του χρόνου τις πολλαπλές διαδρομές, το εύρος ζώνης συνοχής (coherence bandwidth) είναι μια σχέση που περιγράφει το ίδιο φαινόμενο στο πεδίο συχνοτήτων. Το εύρος ζώνης συνοχής είναι ένα στατιστικό μέτρο του εύρους των συχνοτήτων στο οποίο το κανάλι μπορεί να θεωρηθεί «επίπεδο» [14], δηλαδή με την ίδια περίπου απόκριση.

Η εμπειρική εξίσωση που συνδέει την RMS εξάπλωση καθυστέρησης με το εύρος ζώνης συνοχής είναι η ακόλουθη:

$$B_c \approx \frac{1}{5 \sigma_\tau} \quad (\text{Εξίσωση 4}).$$

Ο Ricean K factor (παράγοντας K) δίνει μια εκτίμηση της αναλογίας μεταξύ της κυρίαρχης διαδρομής που συνήθως προέρχεται από την επικοινωνία οπτικής επαφής (Line of Sight) και των υπόλοιπων διαδρομών. Έχει σημαντικό ρόλο στη μοντελοποίηση του καναλιού, διότι χρησιμοποιείται για να περιγράψει την διακύμανση της ισχύος του ραδιοκαναλιού και επηρεάζει την αξιοπιστία και την απόδοση του.

Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του παράγοντα K στον κώδικα είναι η εξής:

$$K = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{max}}{\sum_k P_k - P_{max}} \right) \quad (\text{Εξίσωση 5}),$$

όπου: P_{max} είναι η μέγιστη λαμβανόμενη ισχύς, P_k η λαμβανόμενη ισχύς της κάθε πολλαπλής διαδρομής και $\sum_k P_k$ το άθροισμα των ισχύων όλων των διαδρομών. Εάν ο όρος $\sum_k P_k - P_{max}$ είναι μηδενικός, τότε η τιμή του παράγοντα K ορίζεται στην προεπιλεγμένη μέγιστη τιμή των 30dB.

3. Το μοντέλο επεξεργασίας και απεικόνιση

3.1 Γραφικό Περιβάλλον Επικοινωνίας

Το πρόγραμμα ξεκινά με το ακόλουθο Γραφικό Περιβάλλον Επικοινωνίας, το οποίο δίνει διάφορες επιλογές για παραμέτρους και ανάλυση:

The screenshot shows the 'Analysis' window with the following sections and callouts:

- Select file for analysis:** Includes a 'Browse' button. Callout: "Επιλογή αρχείου."
- BS Information:** Includes fields for dBm (30), mW (1000), BS Antenna Gain (dB) (0), and User Antenna Gain (dB) (0). Callout: "Επιλογή ισχύος, κέρδους κεραιών σταθμού βάσης και χρήστη. Επιλογή υπολογισμού με ή χωρίς ζώνες Fresnel."
- Calculation Mode:** Includes radio buttons for 'without Fresnel' (selected) and 'with Fresnel'.
- Select BS antenna pattern:** Includes a dropdown menu (Isotropic) and an 'Open' button. Callout: "Επιλογή διαγράμματος ακτινοβολίας για σταθμό βάσης και χρήστη."
- Select User antenna pattern:** Includes a dropdown menu (Isotropic) and an 'Open' button.
- BS Phi (degrees):** Input field (0). Callout: "Αρχικά δεδομένα / ανάλυση μεγίστου κέρδους."
- User Phi (degrees):** Input field (0).
- BS Theta (degrees):** Input field (0).
- User Theta (degrees):** Input field (0).
- Analysis Mode:** Includes radio buttons for 'Original Data' (selected) and 'Max Gain Analysis'. Callout: "Ανάλυση πλέγματος / ανάλυση διαδρομής."
- Grid / Route Mode:** Includes radio buttons for 'Grid Analysis' (selected) and 'Route Analysis'. Callout: "Εμφάνιση σημείων με βάση κριτήρια."
- Outage Criteria:** Includes checkboxes for 'Received Power (dBm)', 'RMS delay spread (nsec)', and 'K-factor (dB)'. Callout: "Επιλογές για ανάλυση σημείου."
- Point Analysis:** Includes checkboxes for 'Power Delay Profiles', 'RMS Angular Phi Spread', 'RMS Angular Theta Spread', 'BS Angular Plots', and 'user Angular Plots'. Callout: "Κουμπί έναρξης ανάλυσης."
- Run Analysis:** A large button at the bottom.

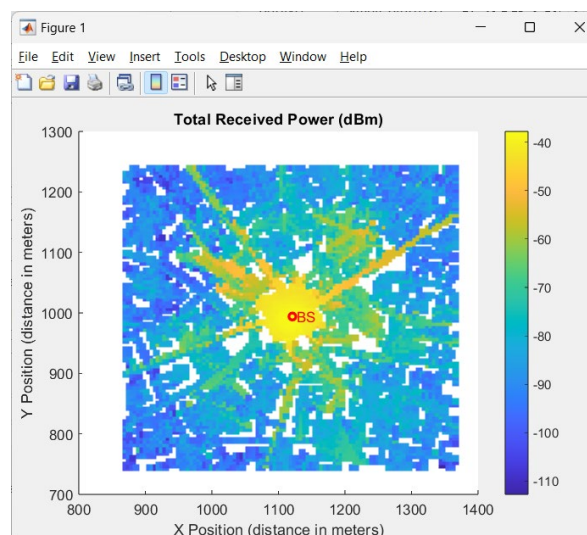
Εικόνα 2. Γραφικό Περιβάλλον Επικοινωνίας

3.2 Απεικονίσεις Αποτελεσμάτων

3.2.1 Ανάλυση αρχικών δεδομένων

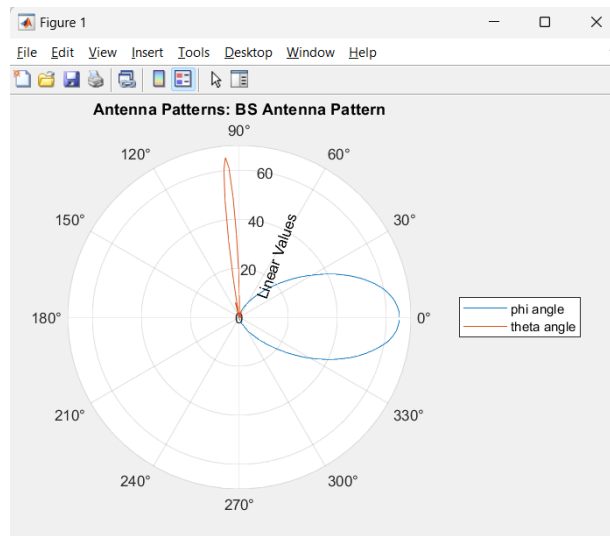
Με την ανάλυση των αρχικών προσομοιωμένων δεδομένων, ο χρήστης αποκτά μία πρώτη εικόνα της τηλεπικοινωνιακής κάλυψης μιας περιοχής, για την περίπτωση που ένα UAV λειτουργήσει ως σταθμός βάσης. Ο χρήστης, μπορεί να τροποποιήσει διάφορες παραμέτρους και το πρόγραμμα να εμφανίσει αποτελέσματα που αφορούν τη συνολική λαμβανόμενη ισχύ, την RMS εξάπλωση καθυστέρησης, τον παράγοντα K, το εύρος ζώνης συνοχής και την RMS εξάπλωση των γωνιών ρ και θ . Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα ανάλυσης διαδρομής, σημείου και η μελέτη καλής λειτουργίας (non outage study).

Παρακάτω εμφανίζεται η προσομοίωση της συνολικά λαμβανόμενης ισχύος σε όλο το πλέγμα των σημείων, με υψόμετρο πτήσης του UAV στα 30m, έχοντας 30dBm ισχύ σταθμού βάσης, ιστροπικές κεραίες και ανάλυση χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι ζώνες Fresnel.

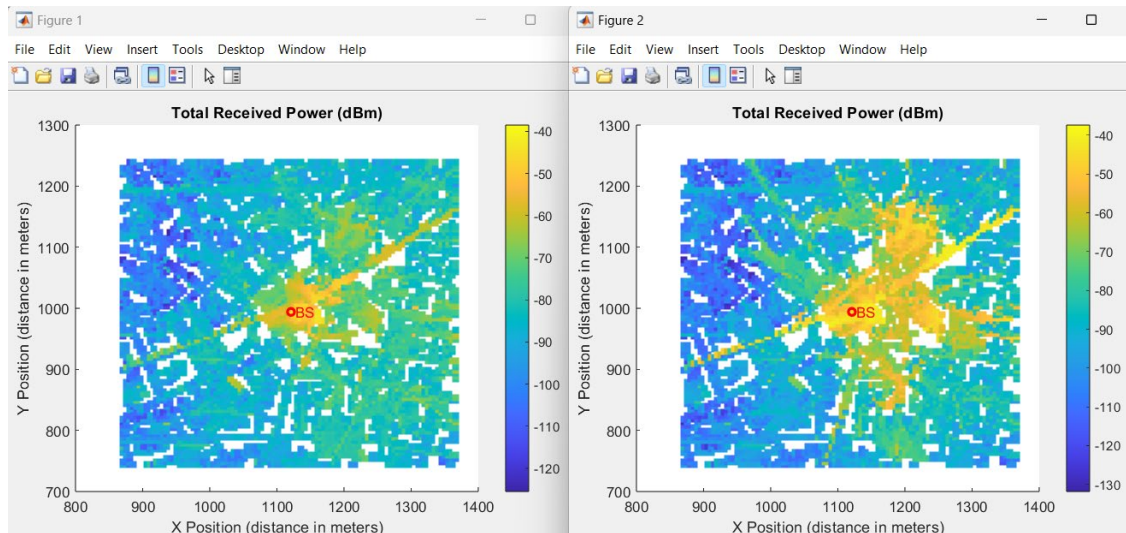


Εικόνα 3. Απεικόνιση συνολικά λαμβανόμενης ισχύος

Ο χρήστης του μοντέλου έχει τη δυνατότητα να εφαρμόσει διαγράμματα ακτινοβολίας στο σταθμό βάσης, στο χρήστη ή και στους δύο. Επιλέγοντας από τις αντίστοιχες drop down λίστες, μπορεί να επιλέξει ανάμεσα από τα αποθηκευμένα διαγράμματα ακτινοβολίας και εάν το επιλέξει, να εμφανιστεί στην οθόνη του η γραφική απεικόνιση του διαγράμματος. Ο χρήστης έχει επίσης τη δυνατότητα να αλλάξει τόσο τις γωνίες κατεύθυνσης της κεραίας (ρ και θ), όσο και την τιμή του κέρδους σε dB, προκειμένου να κατανοήσει καλύτερα τις αλλαγές που επέρχονται στην προς μελέτη περιοχή, λόγω της κατευθυντικότητας και του προσανατολισμού των χρησιμοποιούμενων κεραίων.



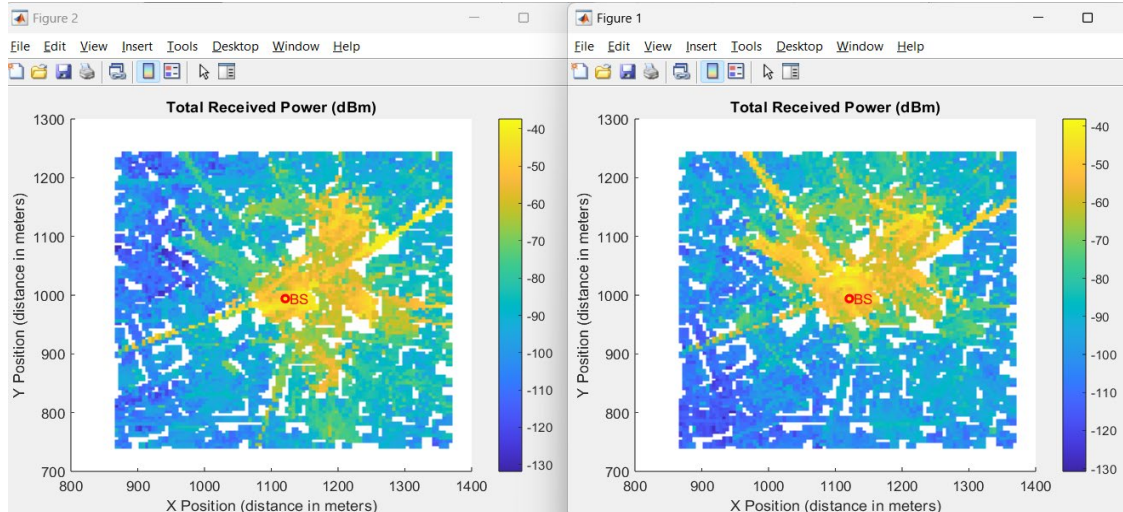
Εικόνα 4. Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας σταθμού βάσης



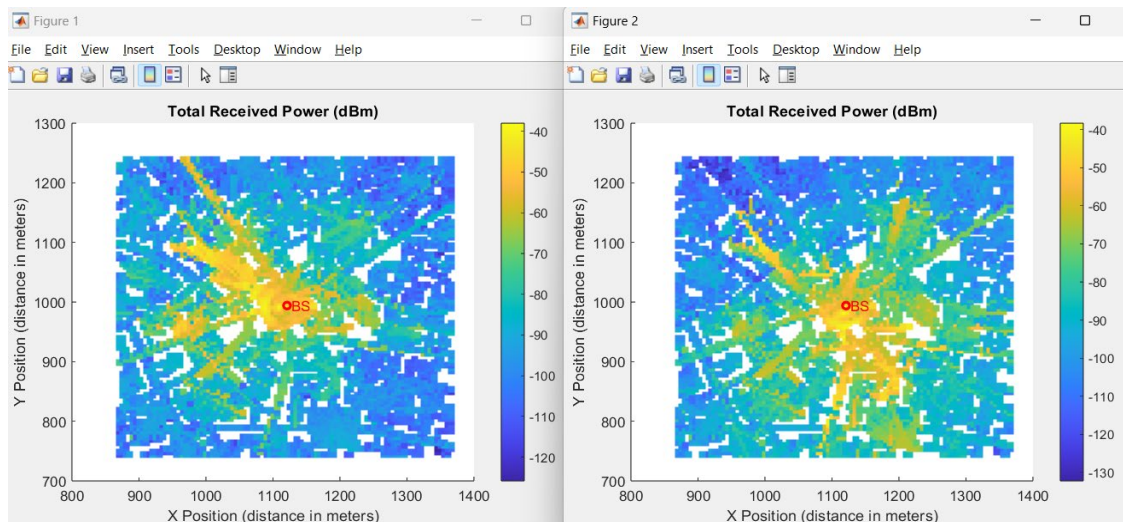
Εικόνα 5. Αλλαγή της γωνίας theta στο διάγραμμα ακτινοβολίας του σταθμού βάσης

Στην Εικόνα 5, παρουσιάζεται η αλλαγή στη συνολικά λαμβανόμενη ισχύ σε όλα τα σημεία του πλέγματος, εάν ο χρήστης αλλάξει τη γωνία ανύψωσης theta του διαγράμματος ακτινοβολίας του σταθμού βάσης, από 60 όπως φαίνεται στο αριστερό της τμήμα, σε -60, όπως εμφανίζεται στο δεξί της τμήμα. (Στο μοντέλο, η τιμή -90 για τη γωνία theta αφορά στη στροφή της κεραίας κάθετα προς το έδαφος, ενώ η τιμή 90 για τη στροφή της κεραίας κάθετα προς τα επάνω.) Ακολούθως, φαίνεται το αποτέλεσμα της στροφής της γωνίας αζιμουθίου από τις 00 στις 900 (Εικόνα 6) και από τις 1800 στις 2700 (Εικόνα 7) του διαγράμματος ακτινοβολίας, έχοντας κρατήσει σταθερή τη γωνία theta στις -60. Το κέρδος των 18.15dB που δίνει το διάγραμμα ακτινοβολίας δεν έχει αλλάξει.

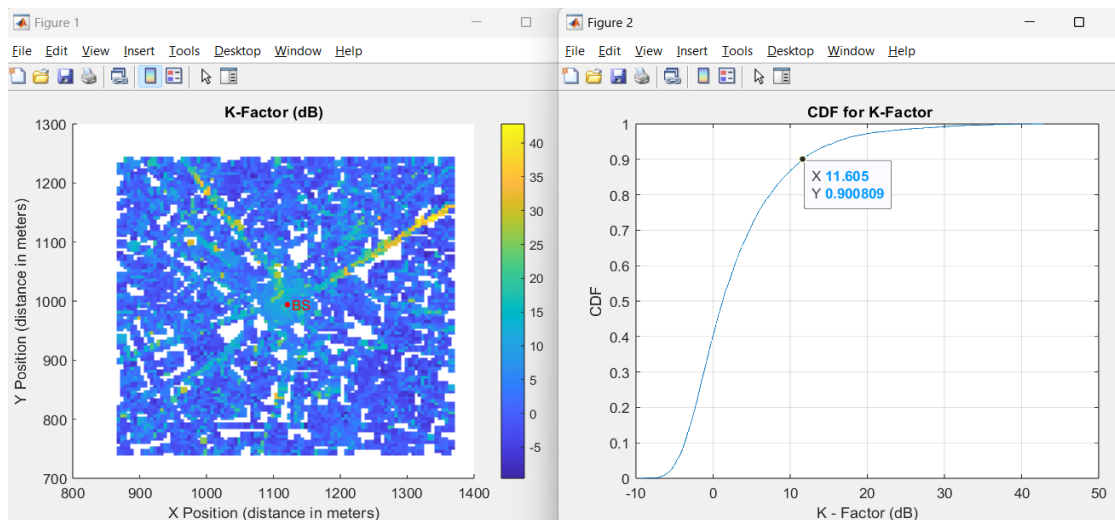
Μελέτη Ασύρματου Ραδιοκαναλιού με Σταθμούς Βάσης σε UAVs



Εικόνα 6. Στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας στις 00° , 90°



Εικόνα 7. Στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας στις 180° , 270°

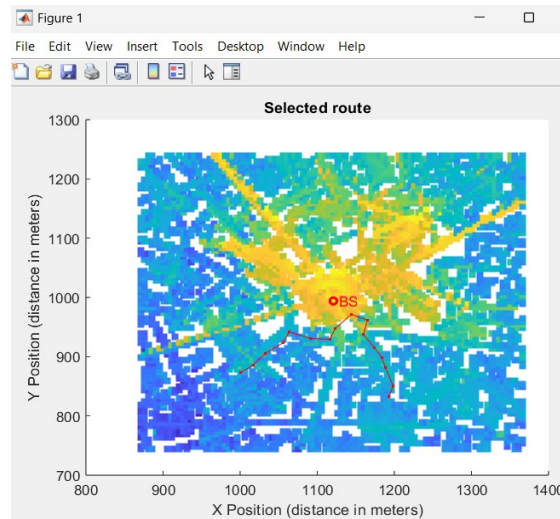


Εικόνα 8. Εμφάνιση K - factor και CDF

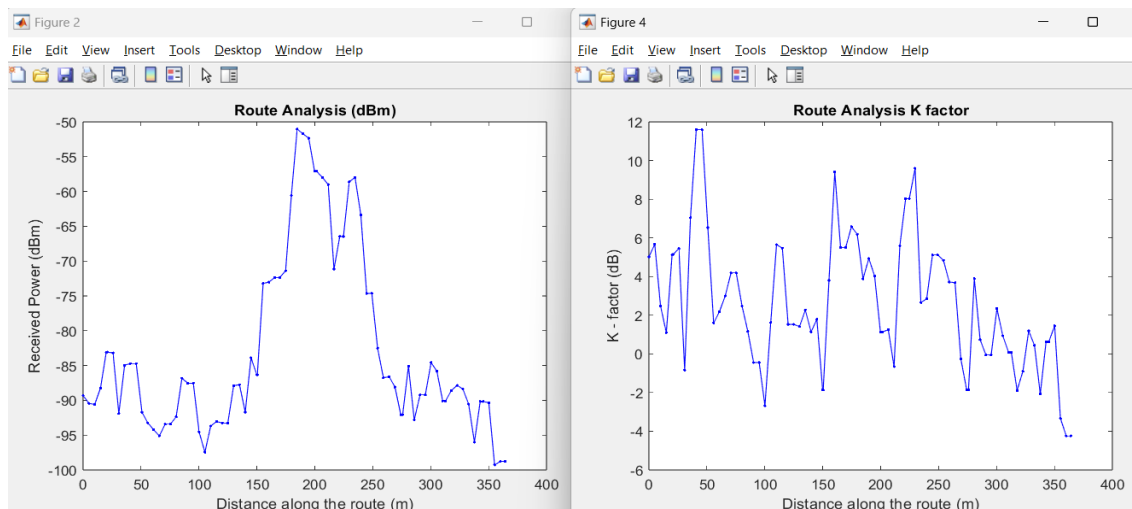
Ο χρήστης του μοντέλου μπορεί να επιλέξει την απεικόνιση του εύρους ζώνης συνοχής (coherence bandwidth) σε MHz, καθώς και των τιμών του παράγοντα K, μαζί με τις αντίστοιχες συναρτήσεις αθροιστικής κατανομής, CDF. Στην παραπάνω Εικόνα 8, φαίνεται πως το 10% περίπου των σημείων του πλέγματος έχει παράγοντα K μεγαλύτερο των 11.5dB.

3.2.2 Ανάλυση διαδρομής

Στην περίπτωση που ο χρήστης επιλέξει την ανάλυση διαδρομής (Route Analysis), επιλέγει μία υποθετική διαδρομή ενός κινητού (mobile station) για την οποία επιθυμεί να γίνει ανάλυση. Στις εικόνες που ακολουθούν, σχηματίζεται η διαδρομή προς ανάλυση και στη συνέχεια, εμφανίζονται οι μεταβολές των τιμών των διαφορετικών παραμέτρων του καναλιού κατά μήκος της διαδρομής (λαμβανόμενη ισχύς, παράγοντας K, RMS εξάπλωσης καθυστέρησης, εύρος ζώνης συνοχής, RMS εξάπλωσης γωνίας ρηι και theta).

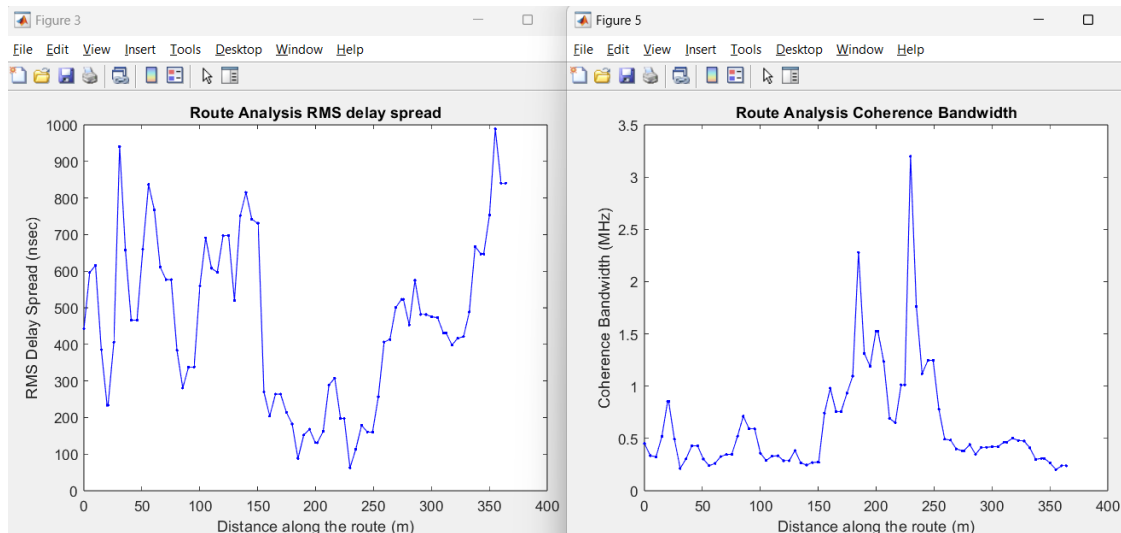


Εικόνα 9. Επιλογή διαδρομής για Route Analysis

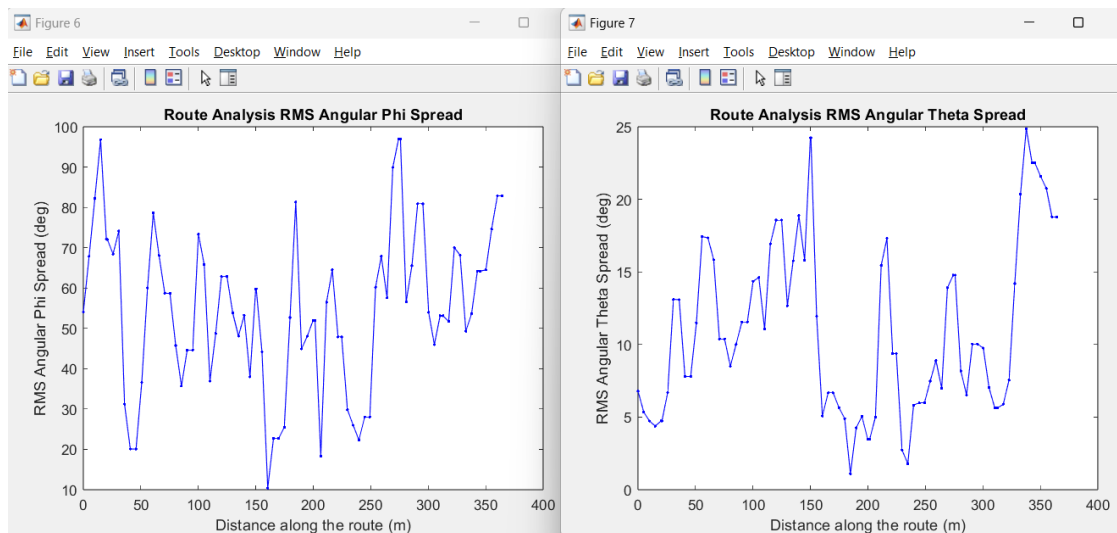


Εικόνα 10. Μεταβολή λαμβανόμενης ισχύος και παράγοντα K

Μελέτη Ασύρματου Ραδιοκαναλιού με Σταθμούς Βάσης σε UAVs



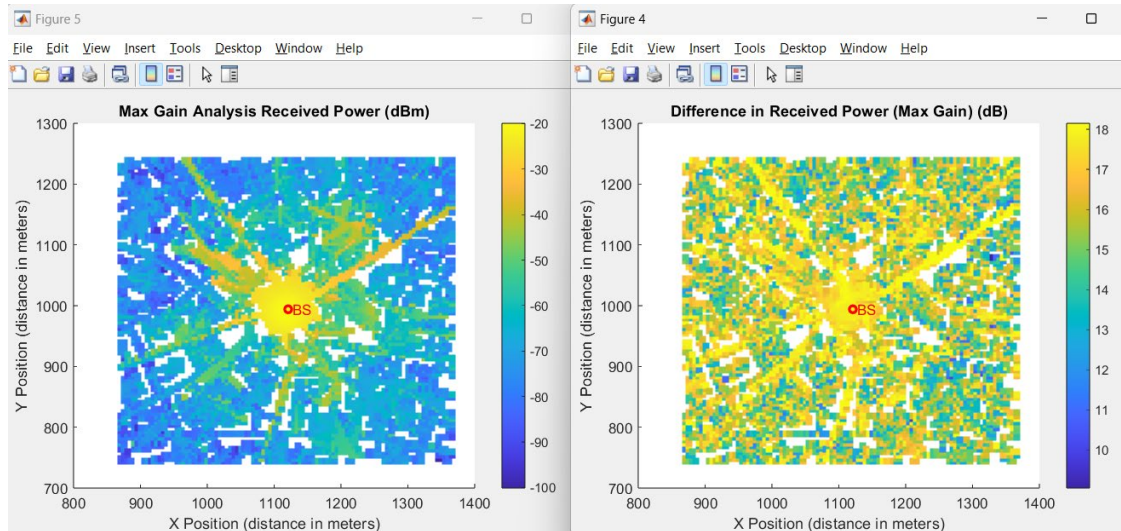
Εικόνα 11. Μεταβολή RMS delay spread και Coherence Bandwidth



Εικόνα 12. Μεταβολή RMS angular phi και theta spread

3.2.3 Ανάλυση μεγίστου κέρδους

Η συλλογή και ανάλυση τηλεπικοινωνιακών δεδομένων είναι απαραίτητη, ώστε να γίνουν οι κατάλληλες τροποποιήσεις σε κάθε περιοχή, με στόχο τη βελτίωση των παροχών στον τελικό χρήστη. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων όπως αυτά παρήχθησαν για ισοτροπικές κεραίες, σε σχέση με αυτά που προκύπτουν όταν εφαρμόζεται η λογική του μεγίστου κέρδους, είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα. Κατά την ανάλυση μεγίστου κέρδους στο άκρο του χρήστη, θεωρούμε ότι οι χρήστες όλων των σημείων του πλέγματος έχουν στρέψει την κεραία τους προς την κατεύθυνση της ακτίνας με την οποία έλαβαν τη μεγαλύτερη ισχύ ο καθένας.



Εικόνα 13. Συνολικά λαμβανόμενη ισχύς, μετά από ανάλυση μεγίστου κέρδους για το άκρο του χρήστη

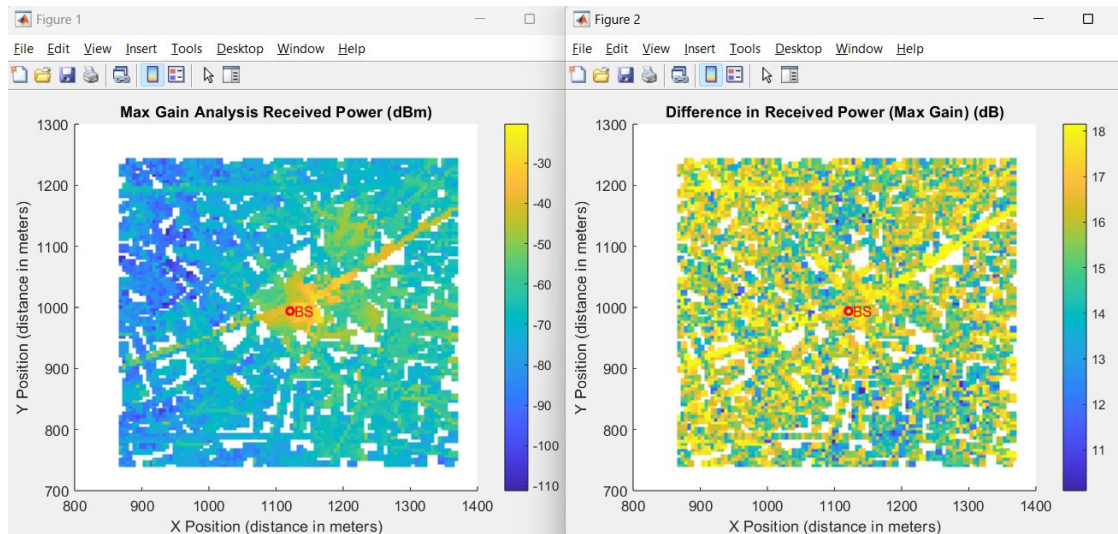
Το κέρδος σε όλα τα σημεία του πλέγματος είναι μεγαλύτερο από 9dB, φτάνοντας έως και τα 18.15dB που είναι το μέγιστο κέρδος του εφαρμοσμένου διαγράμματος ακτινοβολίας, όπως φαίνεται και στο δεξί τμήμα της Εικόνας 13.

Μπορεί να γίνει ανάλυση μεγίστου κέρδους σε ένα από τα δύο άκρα της ζεύξης, έχοντας εφαρμόσει σταθερό προσανατολισμό της κεραίας στο άλλο άκρο. Στην περίπτωση αυτή για το άκρο της ζεύξης στο οποίο εφαρμόζεται η λογική μεγίστου κέρδους, το εφαρμοσμένο διάγραμμα ακτινοβολίας στρέφεται προς την κατεύθυνση της ακτίνας που μεταφέρει τη μέγιστη ισχύ.

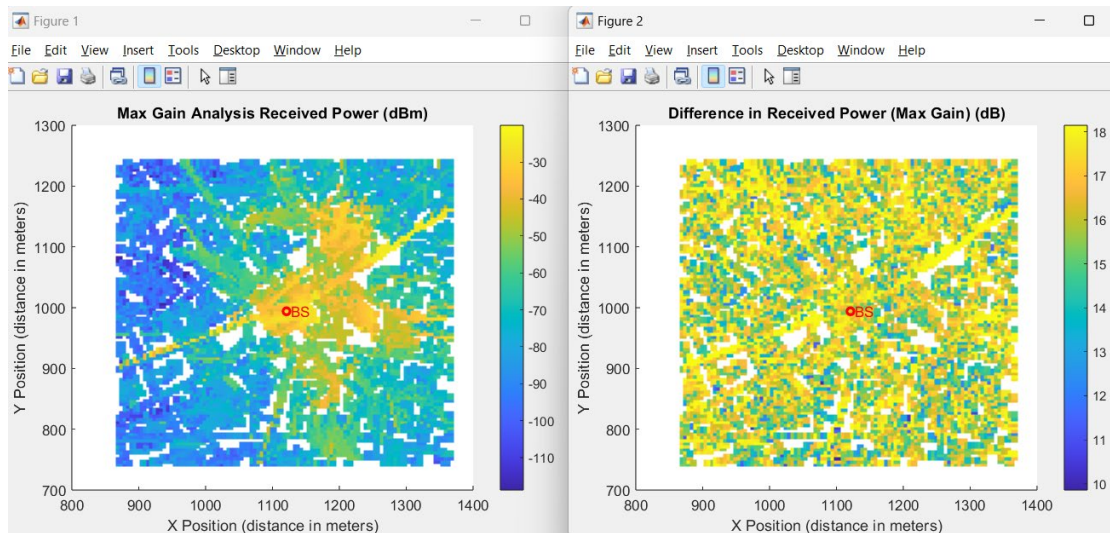
BS Information:		Calculation Mode:	
dBm:	<input type="text" value="30"/>	mW:	<input type="text" value="1000"/>
BS Antenna Gain (dB)	<input type="text" value="18.15"/>	<input checked="" type="radio"/> without Fresnel	<input type="radio"/> with Fresnel
User Antenna Gain (dB)	<input type="text" value="18.15"/>		
Select BS antenna pattern		Select User antenna pattern	
<input type="text" value="BS Antenna Pattern"/>	<input type="button" value="Open"/>	<input type="text" value="User Pattern"/>	<input type="button" value="Open"/>
BS Phi (degrees)	<input type="text" value="0"/>	User Phi (degrees)	<input type="text" value="0"/>
BS Theta (degrees)	<input type="text" value="6"/>	User Theta (degrees)	<input type="text" value="6"/>
Analysis Mode:		<input type="checkbox"/> Outage Criteria	
<input type="radio"/> Original Data		<input type="text" value="-30"/>	Received Power (dBm)
<input checked="" type="radio"/> Max Gain Analysis for: user		<input type="text" value="50"/>	RMS delay spread (nsec)

Εικόνα 14. Επιλογή μεγίστου κέρδους στο χρήστη, με εφαρμογή κατευθυντικότητας στο σταθμό βάσης

Μελέτη Ασύρματου Ραδιοκαναλιού με Σταθμούς Βάσης σε UAVs

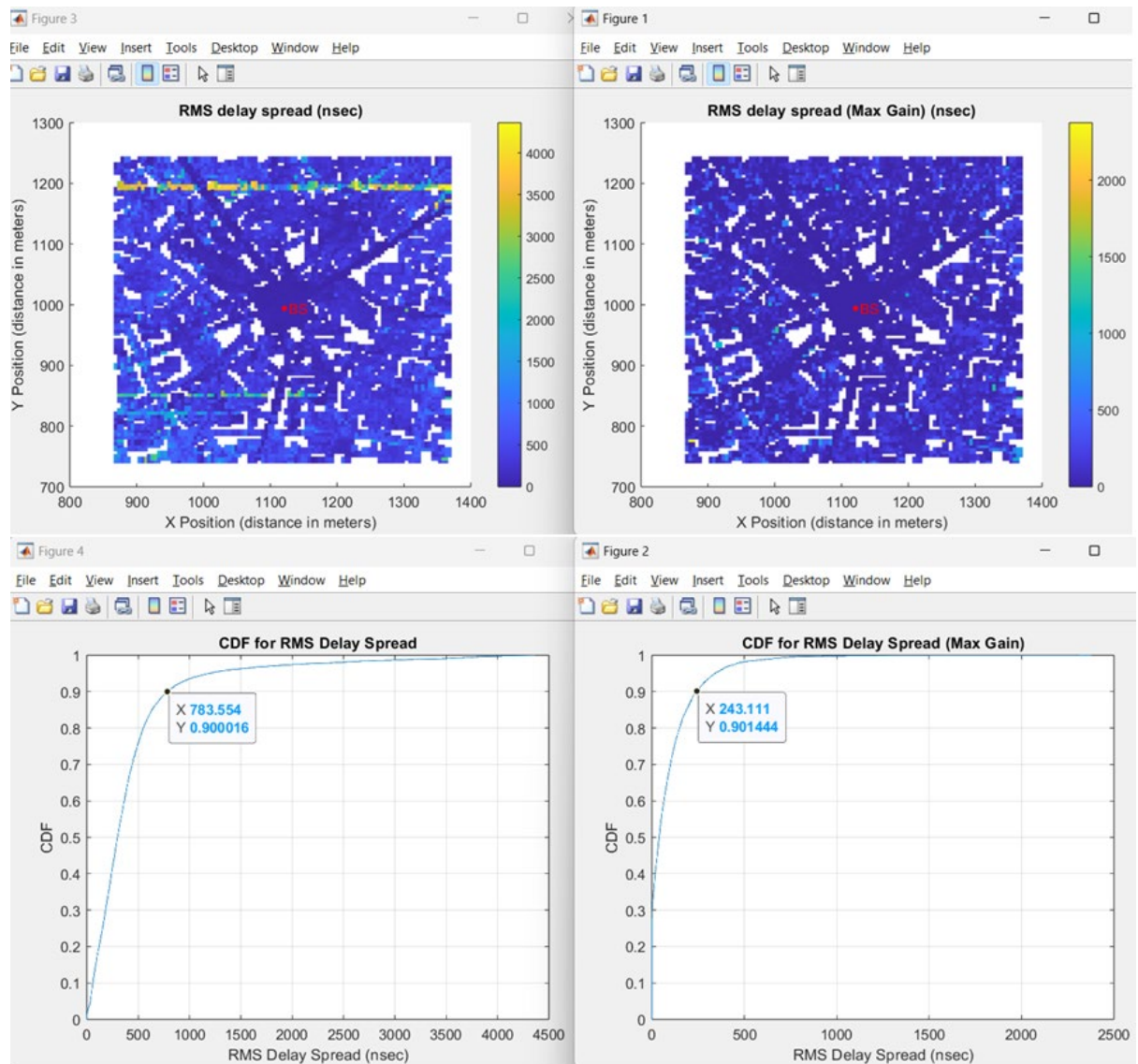


Εικόνα 15. Συνολικά λαμβανόμενη ισχύς, μετά από ανάλυση μεγίστου κέρδους για το χρήστη, με εφαρμογή κατευθυντικότητας στο σταθμό βάσης



Εικόνα 16. Συνολικά λαμβανόμενη ισχύς, μετά από ανάλυση μεγίστου κέρδους στο χρήστη, με αλλαγή στη γωνία θ του διαγράμματος ακτινοβολίας του σταθμού βάσης

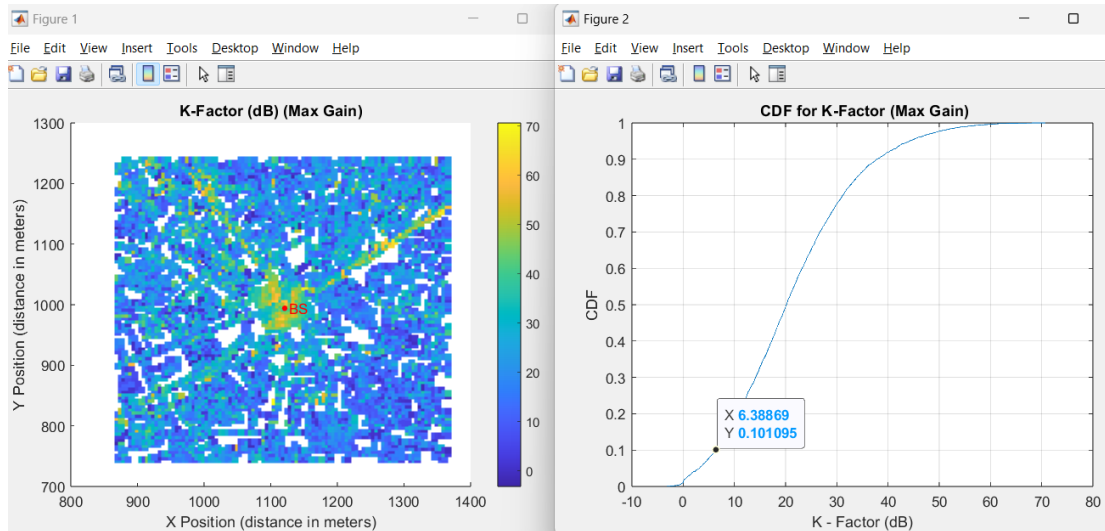
Η ανάλυση μεγίστου κέρδους αποδίδει επίσης, σημαντική βελτίωση στις τιμές της RMS εξάπλωσης καθυστέρησης. Από την αθροιστική συνάρτηση κατανομής, φαίνεται, ότι το 90% των σημείων του πλέγματος εμφανίζουν RMS εξάπλωση καθυστέρησης μικρότερη των 780 nsec, ενώ μετά την ανάλυση μεγίστου κέρδους στο δέκτη, η τιμή RMS εξάπλωσης καθυστέρησης για το 90% των σημείων είναι μικρότερη των 245 nsec, βελτίωση, δηλαδή, περίπου 540 nsec, για το 90% των σημείων του πλέγματος.



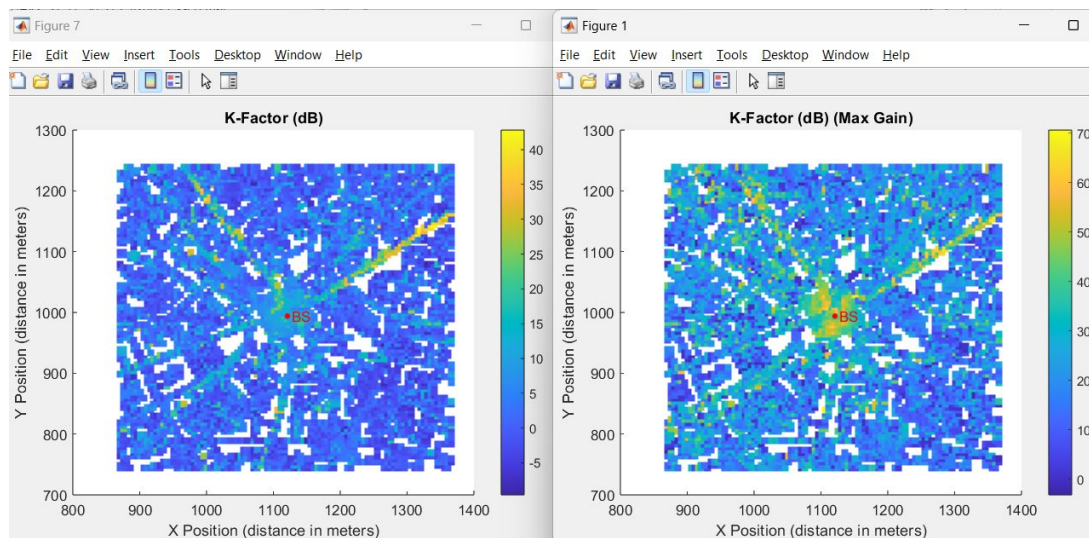
Εικόνα 17. Βελτίωση RMS εξάπλωση καθυστέρησης και αθροιστική συνάρτηση κατανομής (CDF) στα αρχικά δεδομένα (αριστερά) και μετά από ανάλυση μεγίστου κέρδους για το άκρο του χρήστη

Αντίστοιχες βελτιώσεις παρατηρούνται για τις τιμές όλων των επιλογών, όταν εφαρμόζεται η ανάλυση μεγίστου κέρδους. Ο παράγοντας K (K-factor) είναι μεγαλύτερος των 6.3dB για το 90% των σημείων του πλέγματος (Εικόνα 18), ενώ στις επόμενες εικόνες, παρουσιάζεται και συγκριτικά η βελτίωση που παρατηρείται, όταν γίνεται ανάλυση μεγίστου κέρδους στο χρήστη, σε σχέση με τα αρχικά δεδομένα για τον παράγοντα K (Εικόνα 19), για το εύρος ζώνης συνοχής (Εικόνα 20) και για την RMS εξάπλωση των γωνιών ϕ και θ (Εικόνα 21 και Εικόνα 22).

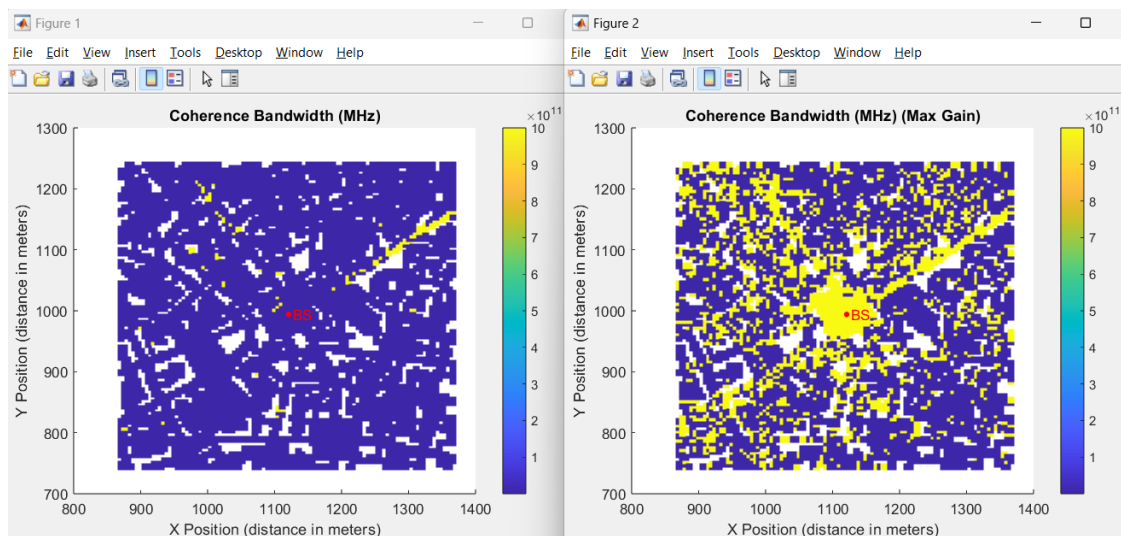
Μελέτη Ασύρματου Ραδιοκαναλιού με Σταθμούς Βάσης σε UAVs



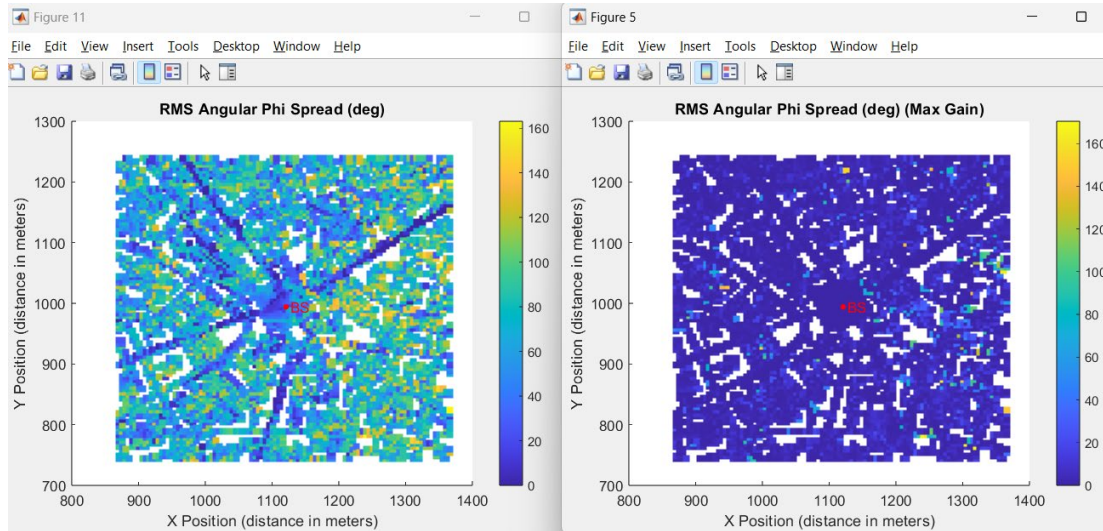
Εικόνα 18. Παράγοντας K μετά από ανάλυση μεγίστου κέρδους στο άκρο του χρήστη



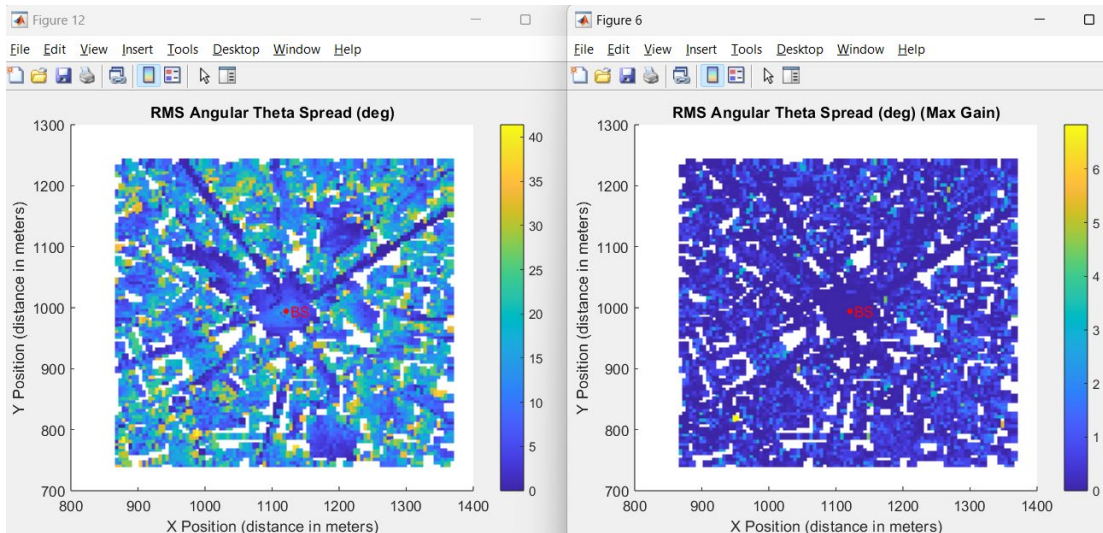
Εικόνα 19. Βελτίωση του παράγοντα K μετά από ανάλυση μεγίστου κέρδους στο άκρο του χρήστη



Εικόνα 20. Βελτίωση του εύρους ζώνης συνοχής μετά από ανάλυση μεγίστου κέρδους στο άκρο του χρήστη



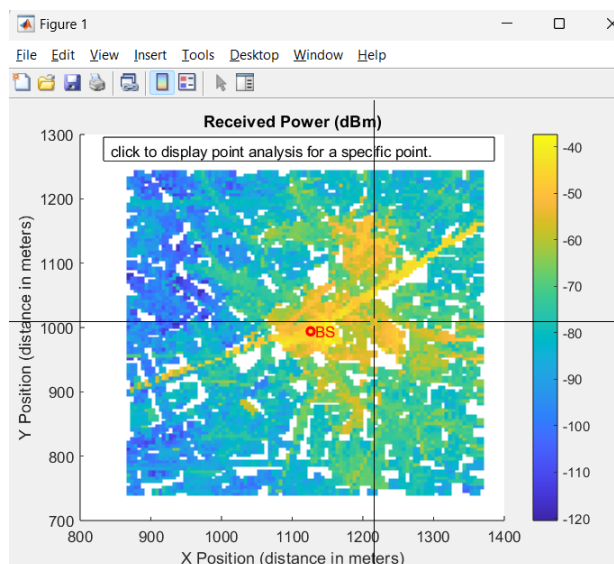
Εικόνα 21. Βελτίωση της RMS εξάπλωσης γωνίας phi μετά από ανάλυση μεγίστου κέρδους στο άκρο του χρήστη



Εικόνα 22. Βελτίωση της RMS εξάπλωσης γωνίας theta μετά από ανάλυση μεγίστου κέρδους στο άκρο του χρήστη

3.2.4 Ανάλυση σημείου

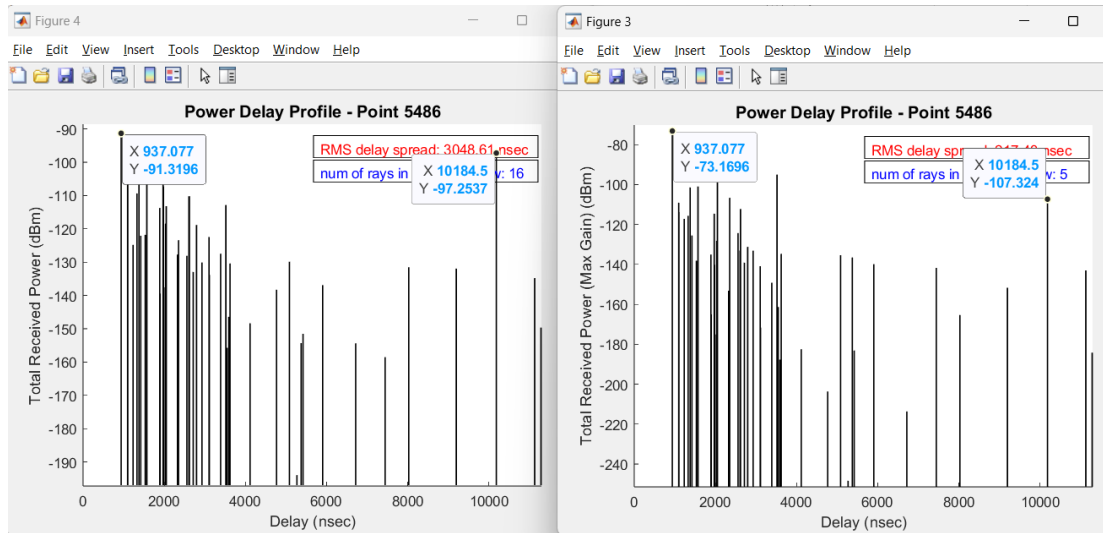
Για να γίνει ανάλυση σημείου, (είτε για ανάλυση των αρχικών δεδομένων, είτε για ανάλυση μεγίστου κέρδους), εμφανίζεται το πλέγμα όλων των σημείων και κατόπιν, ο χρήστης επιλέγει το σημείο προς ανάλυση. Στη συνέχεια, εμφανίζονται τα αποτελέσματα των παραμέτρων που επέλεξε ο χρήστης να δει για το συγκεκριμένο σημείο του πλέγματος.



Εικόνα 23. Επιλογή σημείου για point analysis

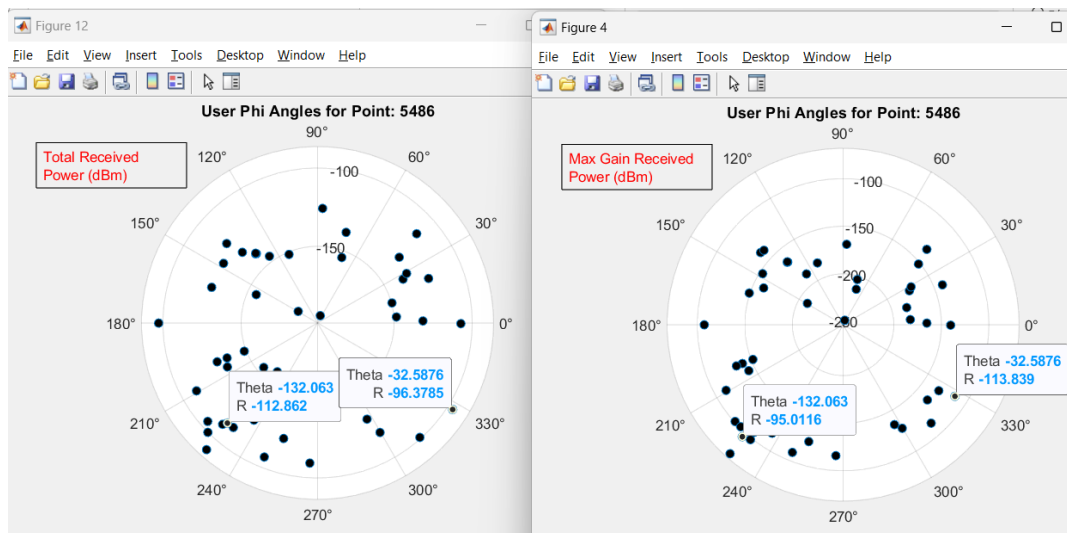
Στις εικόνες που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι τιμές κάποιων παραμέτρων συγκρίνοντας τα αρχικά δεδομένα με τις τιμές μετά από ανάλυση μεγίστου κέρδους για συγκεκριμένο σημείο. Η απεικόνιση Power Delay Profile μετά από την εφαρμογή της ανάλυσης μεγίστου κέρδους, δείχνει ότι, για παράδειγμα, στο σημείο 5486 με συντεταγμένες (1200, 1300), η τιμή της RMS εξάπλωσης καθυστέρησης μειώθηκε, από τα 3049nsec στα 217nsec και οι ακτίνες (rays) που συμμετέχουν στον υπολογισμό της τιμής RMS delay spread από 16 σε 5. (Να σημειωθεί εδώ ότι για τον υπολογισμό των τιμών εξάπλωσης καθυστέρησης και γωνίας χρησιμοποιείται ένα όριο (threshold) -30dB από τη δυνατότερη ακτίνα. Έτσι, παρόλο που στις απεικονίσεις φαίνεται να λαμβάνονται περισσότερες ακτίνες στα υπό μελέτη σημεία, στη διαμόρφωση των τιμών συμμετέχουν μόνο όσες βρίσκονται εντός του «παραθύρου ισχύος» των 30dB .)

Στην ανάλυση σημείου μετά την εφαρμογή του μεγίστου κέρδους, φαίνεται ότι η ισχυρότερη ακτίνα ενισχύεται κατά 18.15dB , όσο ακριβώς το κέρδος του διαγράμματος ακτινοβολίας του χρήστη. Η σημαντική βελτίωση στην τιμή RMS delay spread στην ανάλυση μεγίστου κέρδους, προκύπτει, εξαιτίας της στροφής του διαγράμματος ακτινοβολίας προς την ισχυρότερη ακτίνα. Λόγω της στροφής αυτής, η ακτίνα που έρχεται με καθυστέρηση 10184.5 nsec επηρεάζει σημαντικά την RMS εξάπλωση καθυστέρησης στα αρχικά δεδομένα (αφού βρίσκεται εντός του παραθύρου των 30dB), ενώ η αντίστοιχη ακτίνα, στην ανάλυση μεγίστου κέρδους, έρχεται με σημαντικά μειωμένη ισχύ και ως εκ τούτου, δεν συμμετέχει στον υπολογισμό της τιμής RMS delay spread καθώς βρίσκεται εκτός του ορίου των -30dB σε σχέση με την ισχυρότερη ακτίνα.



Εικόνα 24. Απεικονίσεις Power Delay Profile σημείου αρχικών δεδομένων (αριστερά) και του ίδιου σημείου μετά από ανάλυση μεγίστου κέρδους στο άκρο του χρήστη (δεξιά)

Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν κι από άλλα διαγράμματα για το προαναφερθέν σημείο (σημείο 5486). Στην περίπτωση του διαγράμματος απεικόνισης των γωνιών των ακτίνων, όπως αυτές έφτασαν στο χρήστη, φαίνεται πως, εκτός της ενίσχυσης της ισχυρότερης ακτίνας κατά 18.15dB που έφτασε με γωνία ρηί -1310, οι ακτίνες που ενισχύονται σημαντικά είναι αυτές που η γωνία άφιξης τους βρίσκεται κοντά στην ισχυρότερη, ενώ οι πιο μακρινές ελαττώνονται.



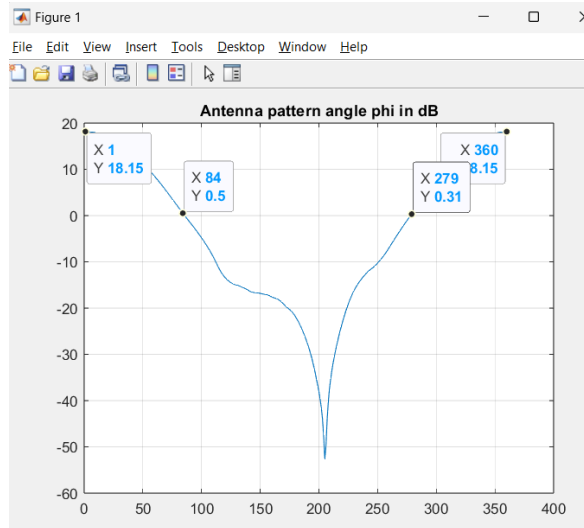
Εικόνα 25. Σύγκριση user angular plot σημείου αρχικών δεδομένων (αριστερά) και του ίδιου σημείου μετά από ανάλυση μεγίστου κέρδους στο άκρο του χρήστη (δεξιά)

Στην 25, στην περίπτωση της ανάλυσης μεγίστου κέρδους, φαίνεται η μεγάλη αύξηση της ισχύος της ακτίνας που λήφθηκε με -1320 κατά 17.85dB, διότι το στραμμένο διάγραμμα ακτινοβολίας την ενισχύει σημαντικά, αφού η γωνία της είναι πολύ κοντά στη γωνία της ακτίνας της μέγιστης ισχύος (η οποία

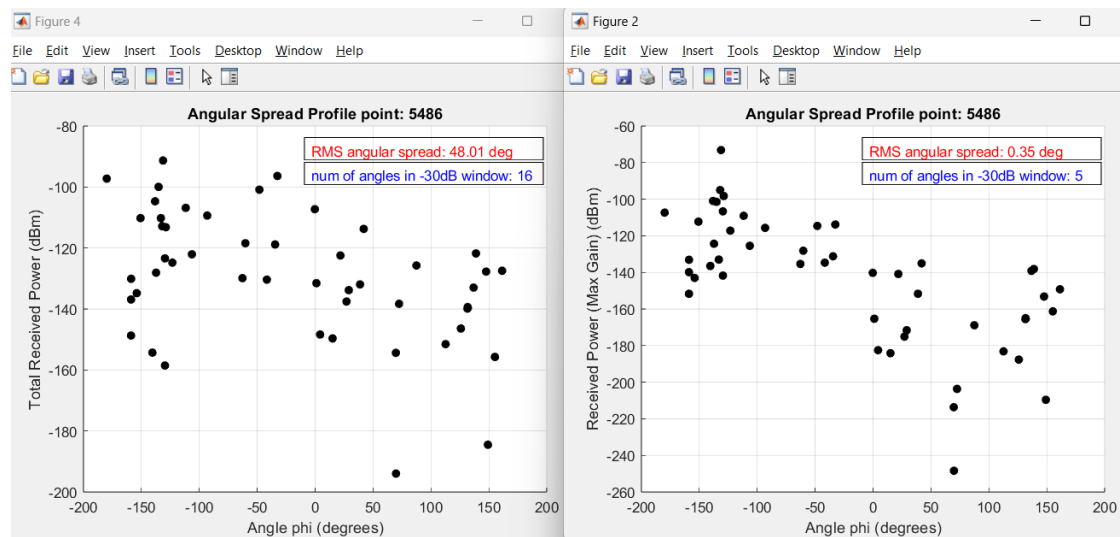
Μελέτη Ασύρματου Ραδιοκαναλιού με Σταθμούς Βάσης σε UAVs

αφικνείται με -1310), ενώ η δεύτερη ισχυρότερη ακτίνα κατά τα αρχικά δεδομένα, που είχε ληφθεί με γωνία -330 και ισχύ -96dBm , ελαττώνεται, καθώς βρίσκεται περίπου 1000 μακριά της ισχυρότερης.

Το εύρος των γωνιών που τυγχάνουν ενίσχυσης από το διάγραμμα ακτινοβολίας που έχει εφαρμοστεί στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ± 830 περίπου, από τη γωνία η οποία λαμβάνει τη μεγαλύτερη ισχύ.



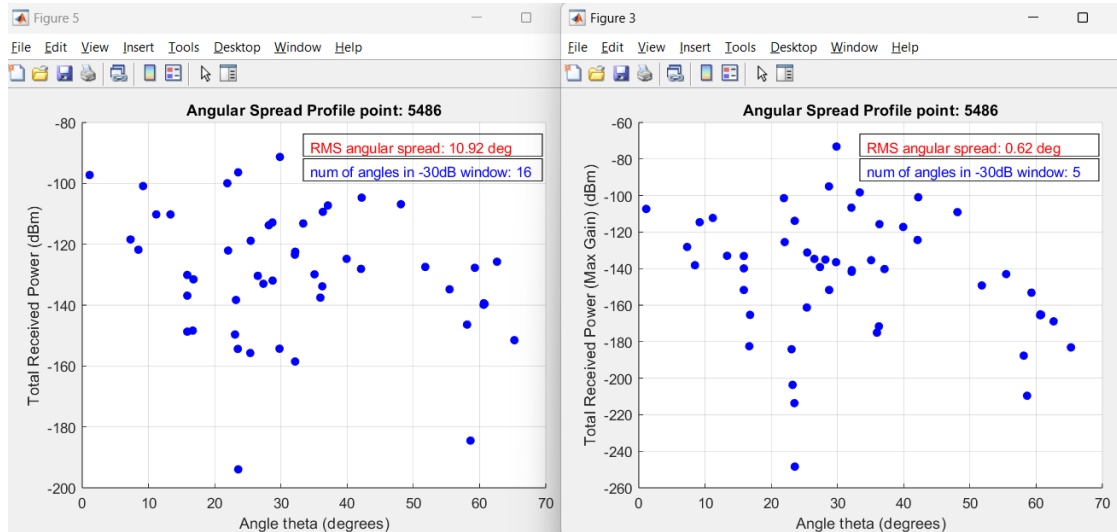
Εικόνα 26. Διάγραμμα ακτινοβολίας σε Db



Εικόνα 27. Βελτίωση της RMS εξάπλωσης γωνίας phi μετά από ανάλυση μεγίστου κέρδους στο άκρο του χρήστη

Συνεχίζοντας στις απεικονίσεις που αφορούν στη βελτίωση της τηλεπικοινωνιακής κάλυψης με ανάλυση μεγίστου κέρδους, παρουσιάζονται οι παρακάτω εικόνες για περαιτέρω ανάλυση του σημείου 5486. Αναφορικά με την RMS εξάπλωση των γωνιών phi και theta, παρατηρείται ότι οι ακτίνες που βρίσκονται κοντά στην ισχυρότερη ακτίνα «συγκεντρώνονται» προς αυτή, ενώ αυτές που βρίσκονται μακριά της «αποδυναμώνονται» ακόμα περισσότερο. Οι ακτίνες που συμμετέχουν στον προσδιορισμό της RMS τιμής εξάπλωσης των γωνιών μειώνονται από 16 σε 5, ενώ οι τιμές βελτιώνονται από 48 μοίρες σε 0.35

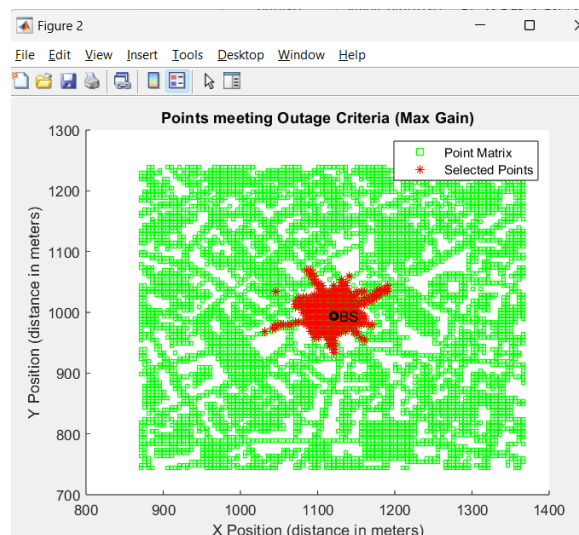
για τη γωνία ρηί και από 10.92 μοίρες στις 0.62 για τη γωνία theta (Εικόνες 27 και 28).



Εικόνα 28. Βελτίωση της RMS εξάπλωσης γωνίας theta μετά από ανάλυση μεγίστου κέρδους στο άκρο του χρήστη

3.2.5 Κριτήρια λειτουργίας

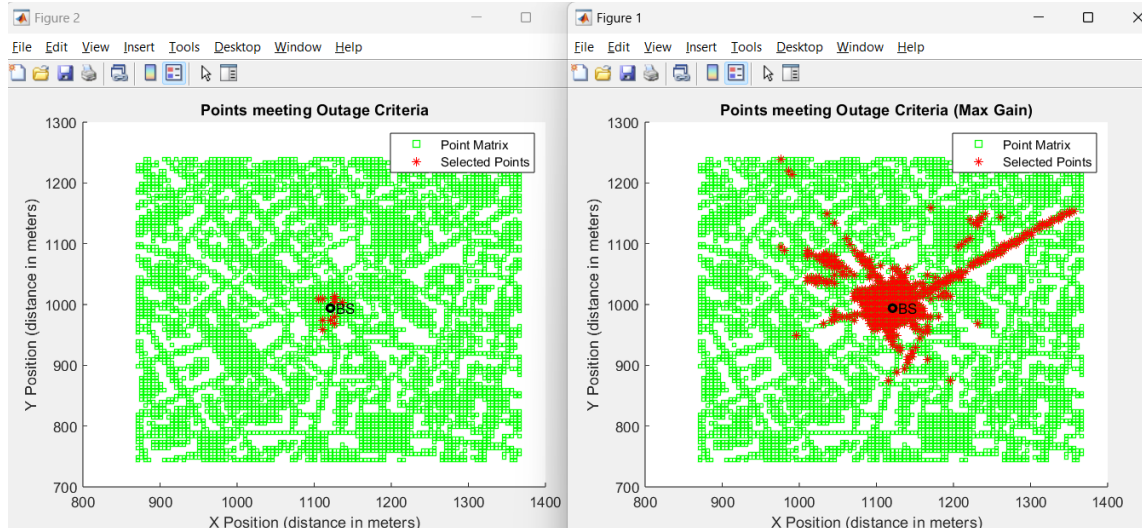
Επιπλέον, τα κριτήρια λειτουργίας (non-outage criteria) που θέτει ο χρήστης ικανοποιούνται πολύ πιο συχνά για ανάλυση μεγίστου κέρδους, σε σχέση με τα αρχικά δεδομένα. Ενώ κανένα σημείο δεν πληροί το κριτήριο η λαμβανόμενη ισχύς να είναι μεγαλύτερη ή ίση των -30dBm, για τα αρχικά δεδομένα με ιστροπικές κεραιές σταθμού βάσης και χρήστη, με ανάλυση μεγίστου κέρδους στο χρήστη το αποτέλεσμα είναι το εξής:



Εικόνα 29. Σημεία που πληρούν ένα κριτήριο μετά από ανάλυση μεγίστου κέρδους στο άκρο του χρήστη

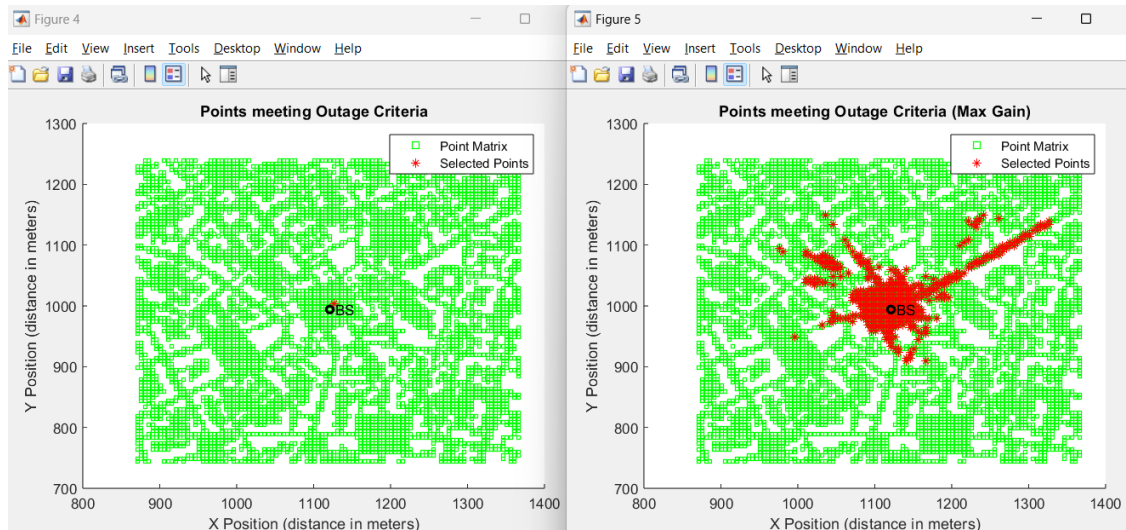
Μελέτη Ασύρματου Ραδιοκαναλιού με Σταθμούς Βάσης σε UAVs

Για εφαρμογή κριτηρίων ώστε η συνολικά λαμβανόμενη ισχύς να είναι μεγαλύτερη ή ίση των -40dBm και η τιμή RMS delay spread να είναι μικρότερη των 50 nsec , τα σημεία που απεικονίζεται να ικανοποιούν τις συνθήκες αυτές για τα αρχικά δεδομένα και μετά από ανάλυση μεγίστου κέρδους στο άκρο του χρήστη είναι τα εξής:



Εικόνα 30. Σημεία που ικανοποιούν δύο κριτήρια για αρχικά δεδομένα (αριστερά) και μετά από ανάλυση μεγίστου κέρδους στο άκρο του χρήστη (δεξιά)

Με εισαγωγή και τρίτου κριτηρίου για επιλογή σημείων, τέτοιου ώστε η λαμβανόμενη ισχύς να είναι μεγαλύτερη ή ίση των -39dBm , η τιμή RMS delay spread να είναι μικρότερη των 50 nsec και ο K-factor να είναι μεγαλύτερος του μηδενός, τα αποτελέσματα για τα αρχικά δεδομένα και μετά από ανάλυση μεγίστου κέρδους για το άκρο του χρήστη είναι τα εξής:



Εικόνα 31. Σημεία που πληρούν τα τρία κριτήρια για αρχικά δεδομένα (αριστερά) και μετά από ανάλυση μεγίστου κέρδους στο άκρο του χρήστη (δεξιά)

4. Συμπεράσματα

Η χρήση των UAVs ως φορητών σταθμών βάσης είναι μία προσέγγιση που μπορεί να καλύψει έκτακτες τηλεπικοινωνιακές ανάγκες σε μία αστική ή απομακρυσμένη περιοχή. Η χρήση τους βελτιώνει ή / και αποκαθιστά την τηλεπικοινωνιακή κάλυψη μίας περιοχής ενδιαφέροντος άμεσα, χωρίς να απαιτείται χρόνος και κόστος κατασκευής άλλου είδους σταθερής δομής.

Στην παρούσα εργασία, δίνεται η δυνατότητα απεικόνισης και παραμετροποίησης τηλεπικοινωνιακών δεδομένων ασύρματων ζεύξεων που προέκυψαν από την προσομοίωση σταθμού βάσης πάνω σε UAV. Οι απεικονίσεις της συνολικά λαμβανόμενης ισχύος, δεδομένης της εφαρμογής ή όχι κατευθυντικότητας στην κεραία του σταθμού βάσης ή και του χρήστη, η μελέτη της RMS εξάπλωσης καθυστέρησης ως εργαλείου για την ποιότητα του σήματος που λαμβάνει ο χρήστης, το προφίλ καθυστέρησης – ισχύος, το εύρος ζώνης συνοχής, ο παράγοντας K και η RMS εξάπλωση καθυστέρησης των γωνιών ρ και θ , είναι παράγοντες που το εργαλείο αυτό μπορεί να απεικονίσει πάνω στα τηλεπικοινωνιακά δεδομένα, ώστε να μελετηθεί η κάλυψη μίας συγκεκριμένης περιοχής, μέσω του σταθμού βάσης πάνω σε UAV.

Επιπλέον, η δυνατότητα ελέγχου της ικανοποίησης των κριτηρίων που τίθενται εμφανίζει παραστατικά στους μελετητές της περιοχής, εάν και ποιες παραμέτρους μπορούν να αλλάξουν, ώστε να επιτευχθεί η ικανοποίηση των επιθυμητών προϋποθέσεων, όσον αφορά στη λαμβανόμενη ισχύ, στην RMS εξάπλωση καθυστέρησης και στον παράγοντα K. Η ανάλυση σημείου παρέχει επιπλέον πληροφορίες πάνω στις προαναφερθείσες παραμέτρους, ώστε να μπορεί να ελεγχθεί σε ακόμα πιο λεπτομερές επίπεδο η ποιότητα της τηλεπικοινωνιακής κάλυψης. Σημαντική επιλογή είναι, επίσης, η ανάλυση των διαφόρων παραμέτρων εντός μίας διαδρομής, ώστε και πάλι, να μπορεί να γίνει πιο εύκολα κατανοητός ο τρόπος μεταβολής των τιμών τους, καθώς ένας χρήστης μετακινείται εντός της περιοχής κάλυψης από το φορητό σταθμό βάσης.

Αναφορικά με την ανάλυση μεγίστου κέρδους, για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις των παραμέτρων που παρέχει το εργαλείο, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη του να έχει μία πρώτη εικόνα της βέλτιστης εκδοχής της τηλεπικοινωνιακής κάλυψης της περιοχής. Με τη λογική της ανάλυσης μεγίστου κέρδους, λόγω της στροφής του χρήστη προς την κατεύθυνση της ισχυρότερης ακτίνας, ή ακόμα και του σταθμού βάσης προς αυτή, οι τελικοί χρήστες αποκομίζουν έως και το άθροισμα των κερδών των δύο κεραιών (σταθμού βάσης και χρήστη). Όλες οι μεταβλητές που μελετήθηκαν και αφορούν στη διασπορά του σήματος βελτιώνονται σημαντικά και ως εκ τούτου, η βελτίωση αυτή μπορεί να χρησιμεύσει ως παράμετρος για τη μεταβολή άλλων χαρακτηριστικών, όπως για παράδειγμα, της μείωσης της ισχύος εκπομπής του φορητού σταθμού βάσης, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση της διάρκειας της μπαταρίας του.

Η χρήση αυτού του εργαλείου θα μπορούσε να επεκταθεί και σε άλλα περιβάλλοντα, πέραν του αστικού για το οποίο έγινε η προσομοίωση των

ασύρματων ζεύξεων, όπως για παράδειγμα σε αγροτικές ή βιομηχανικές περιοχές, σε έξυπνα εργοστάσια κ.α. Μία άλλη αναδυόμενη περίπτωση χρήσης του λογισμικού είναι για περιβάλλοντα 5G+ ή 6G με φορητούς σταθμούς πάνω σε UAVs, σε συνδυασμό με τεχνολογίες κεραιών για ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών ροών δεδομένων (multiple-input-multiple-output, MIMO) ή και έξυπνων αναδιαμορφώσιμων επιφανειών (reconfigurable intelligent surfaces – RIS), ώστε να βελτιωθεί η απόδοση, η κάλυψη και η χωρητικότητα της επικοινωνίας.

Βιβλιογραφία

- [1] S. Moukidou, 'Processing and visualization of ray tracing simulation results for wireless links utilizing UAVs', MSc thesis, Modern Wireless Communications, <http://wireless-msc.uop.gr/>, 2024 (Σ.Μουκίδου, 'Επεξεργασία και απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης ασύρματης ζεύξης με την τεχνική ray tracing για περιβάλλοντα επικοινωνιών με χρήση UAVs', in greek).
- [2] G.E. Athanasiadou and G.V. Tsoulos, "Path Loss characteristics for UAV-to-Ground Wireless Channels", 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Krakow, Poland, 2019, pp. 1-4.
- [3] T.E. Athanaileas, G.E. Athanasiadou, G.V. Tsoulos and D.I. Kaklamani, "Parallel radio-wave propagation modeling with image-based ray tracing techniques", in *Parallel Computing*, vol. 36, no. 12, pp. 679-695, Dec. 2010, doi: 10.1109/49.840192.
- [4] G.E. Athanasiadou, A. R. Nix and J. P. McGeehan, "A microcellular ray-tracing propagation model and evaluation of its narrow-band and wide-band predictions", in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 322-335, March 2000,
- [5] V. Saxena, J. Jaldén and H. Klessig, "Optimal UAV Base Station Trajectories Using Flow-Level Models for Reinforcement Learning", in *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 5, no. 4, pp. 1101-1112, Dec. 2019, doi: 10.1109/TCCN.2019.2948324.
- [6] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis and M. Debbah, "Efficient Deployment of Multiple Unmanned Aerial Vehicles for Optimal Wireless Coverage", in *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 8, pp. 1647-1650, Aug. 2016, doi: 10.1109/LCOMM.2016.2578312.
- [7] G.E. Athanasiadou, M.C. Batistatos, D.A. Zarbouti and G.V. Tsoulos, "LTE Ground-to-Air Field Measurements in the Context of Flying Relays", in *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 1, pp. 12-17, February 2019, doi: 10.1109/MWC.2018.1800225.
- [8] S.P. Sotiroudis, G. Athanasiadou, G. Tsoulos, P. Sarigiannidis, C.G. Christodoulou and S.K. Goudos, "Evolutionary Ensemble Learning Pathloss Prediction for 4G and 5G Flying Base Stations with UAVs", in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 7, pp. 5994-6005, July 2023, doi: 10.1109/TAP.2023.3266784.
- [9] V.P. Rekkas, S.P. Sotiroudis, G. Athanasiadou, P. Sarigiannidis, G. Tsoulos, S.K. Goudos, "Path Loss Modeling for Flying Ad-Hoc Networks: An Ensemble Learning Approach", 2023 17th European Conference on

- Antennas and Propagation (EuCAP), Florence, Italy, 2023, pp. 1-5, doi: 10.23919/EuCAP57121.2023.10133008.
- [10] S.K. Goudos, G. Athanasiadou, G.V. Tsoulos and V. Rekkas, "*Modelling Ray Tracing Propagation Data Using Different Machine Learning Algorithms*", 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen, Denmark, 2020, pp. 1-4, doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135639.
- [11] D. Karra, S.K. Goudos, G.V. Tsoulos and G. Athanasiadou, "*Prediction of Received Signal Power in Mobile Communications Using Different Machine Learning Algorithms: A Comparative Study*", 2019 Panhellenic Conference on Electronics & Telecommunications (PACET), Volos, Greece, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/PACET48583.2019.8956271.
- [12] T.S. Rappaport, *Wireless Communications Principles and Practice*, 2nd ed., Prentice-Hall, 2002.
- [13] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2005.
- [14] J.G. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*, 5th ed., McGraw-Hill, 2008.