

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΤΜΗΜΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΙΚΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΨΗΦΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ & ΔΙΚΤΥΩΝ



ΘΕΜΑ:

**Σχεδιασμός και υλοποίηση γεωμετρικού-
στοχαστικού μοντέλου ραδιοδιαύλου για
δορυφορικά συστήματα πολλαπλών εισόδων
πολλαπλών εξόδων**

Φοιτητής: Παναγιωτόπουλος Παναγιώτης Α.Μ.:08061

Επιβλέπων: Κανάτας Αθανάσιος ,Αναπληρωτής καθηγητής

Περίληψη

Το παρόν κείμενο περιγράφει τον σχεδιασμό και την υλοποίηση τριών μοντέλων ραδιοκαναλιών για δορυφορικά συστήματα πολλαπλών εισόδων και εξόδων. Αρχικά γίνεται εκτενής περιγραφή του θεωρητικού μοντέλου του συστήματος, που αποσκοπεί στον υπολογισμό της χωροχρονικής συσχέτισης μεταξύ δύο τυχαίων υποδιαύλων. Η εφαρμογή του συστήματος γίνεται με την βοήθεια του λογισμικού Matlab. Στη συνέχεια παρατίθεται η μεθοδολογία για τον υπολογισμό των κρουστικών αποκρίσεων. Έπειτα, περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος υπολογισμού των συσχετίσεων των υποδιαύλων. Κατόπιν, δίνεται με λεπτομέρειες η διαδικασία υπολογισμού της απόστασης του δορυφόρου από τον σκεδαστή. Ακολουθούν τα αποτελέσματα της εκτέλεσης των προγραμμάτων υπολογισμού της συσχέτισης που έχουν αναπτυχθεί. Στην συνέχεια, περιγράφονται τα μοντέλα προσομοίωσης που θα χρησιμοποιηθούν. Πρώτα το στοχαστικό, μετά το στατιστικό και τέλος το ντετερμινιστικό. Έπειτα, παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, απεικονίζοντας ξεχωριστά την χρονική συσχέτιση και την διαφορά του σφάλματος συσχέτισης μεταξύ του θεωρητικού και των υπόλοιπων μοντέλων.

Abstract

This thesis describes the designing and implementation of three radiochannel models for multiple input-multiple output satellite systems. In the beginning, an analytical description of the theoretical model, which aims at the calculation of the space-time correlation between two random subchannels, is taking place. The application of the system is done with the use of the software Matlab. Afterwards, the methodology for the calculation of impulse responses is given. An analytical description of the calculation process for the correlation functions and the distance between the satellite and the scatterers follows. Next, the results from the execution of the developed Matlab programs for the reference model are presented. Then, a detailed description of the simulation models that are used in the analysis is provided. Afterwards, the simulation models of the system are presented. Firstly the stochastic, secondly the statistical and finally the deterministic. More specifically, the simulation results represent separately the temporal correlation and the correlation error difference between the theoretical and the rest of the models.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου, κύριο Κανάτα Αθανάσιο για την πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφερε κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας και για την υπομονή που επέδειξε με τα προβλήματα που προέκυψαν μέχρι την ολοκλήρωση της. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον υποψήφιο διδάκτορα Μάνο Μιχαηλίδη, για την βοήθεια που μου πρόσφερε σε συνεργασία με τον κ. Κανάτα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	2
Ευχαριστίες.....	3
Περιεχόμενα.....	4
1. Εισαγωγή.....	5
2. Περιγραφή θεωρητικού μοντέλου.....	15
3. Υπολογισμός κρουστικών αποκρίσεων.....	22
4. Υπολογισμός χωρο-χρονικών συσχετίσεων.....	26
5. Διαδικασία υπολογισμού απόστασης σκεδαστή-δορυφόρου.....	35
6. Αποτελέσματα εκτέλεσης προγράμματος.....	38
7. Μοντέλα προσομοίωσης δορυφορικού MIMO συστήματος.....	48
7.1 Στοχαστικό μοντέλο.....	49
7.2 Στατιστικό μοντέλο.....	51
7.3 Ντετερμινιστικό μοντέλο.....	54
8. Αποτελέσματα προσομοίωσης στατιστικού μοντέλου.....	55
9. Αποτελέσματα προσομοίωσης ντετερμινιστικού μοντέλου.....	60
10. Συμπεράσματα.....	65
Βιβλιογραφία.....	66

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι δορυφόροι είναι χρήσιμοι για έναν μεγάλο αριθμό εφαρμογών, μεταξύ των οποίων και οι κινητές επικοινωνίες. Τα κινητά δορυφορικά δίκτυα τρίτης γενιάς, μεταξύ των οποίων το S-UMTS (Satellite Universal Mobile Telecommunications System) και το IMT-2000, το δορυφορικό μέρος των επίγειων κυψελωτών δικτύων τρίτης γενιάς, περιλαμβάνουν έναν σημαντικό αριθμό από υπηρεσίες φωνής και δεδομένων. Λόγω της ταχείας διάδοσης της χρήσης του διαδικτύου, αυτά τα συστήματα εισάγουν την δυνατότητα χρήσης πολλών νέων υπηρεσιών, οι οποίες θα περιλαμβάνουν κυρίως την μετάδοση δεδομένων σε εφαρμογές πολυμέσων.[40] Η σχεδίαση δορυφορικών συστημάτων και συστημάτων HAP (High Altitude Platforms) απαιτεί την ύπαρξη αξιόπιστων μοντέλων καναλιών που περιγράφουν επαρκώς τις συνθήκες διάδοσης στο φυσικό επίπεδο. Η ραδιοδιάδοση και η μοντελοποίηση καναλιών για κινητά δορυφορικά συστήματα τρίτης γενιάς στις ζώνες συχνοτήτων L και S είναι αντικείμενο μελέτης τα τελευταία χρόνια και η διάδοση στην ζώνη Ka, καθώς και σε υψηλότερες συχνότητες, για ευρυζωνική μετάδοση, είναι ακόμα υπό μελέτη. Με σκοπό την περαιτέρω ανάπτυξη των συστημάτων αυτών, πολλοί ερευνητές ανά τον κόσμο έχουν προβεί στην δημιουργία θεωρητικών και μοντέλων προσομοίωσης. Για την αξιολόγηση της επίδοσης των μοντέλων αυτών χρησιμοποιούνται διάφορες παράμετροι, όπως οι απώλειες διάδοσης και η χωροχρονική συσχέτιση μεταξύ των υποδιαύλων σε συστήματα MIMO.

Για τον υπολογισμό των απωλειών διάδοσης υπάρχουν 3 κατηγορίες μοντέλων[39]:

1. Εμπειρικά μοντέλα
2. Στατιστικά μοντέλα
3. Αναλυτικά μοντέλα

Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή της κάθε κατηγορίας.

Τα εμπειρικά μοντέλα τυπικά παρουσιάζουν μια γραφική παράσταση προσαρμοσμένη σε δεδομένα μετρήσεων. Το πλεονέκτημα των εμπειρικών μοντέλων είναι η απλότητα των μαθηματικών εκφράσεων που τα περιγράφουν και κατά συνέπεια η εύκολη εφαρμογή τους. Ωστόσο, σχετίζονται αυστηρά με συγκεκριμένα

δεδομένα μετρήσεων και αδυνατούν να δώσουν οποιαδήποτε ένδειξη για τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο κανάλι κατά την διάδοση του κύματος. Τα μοντέλα αυτά είτε αναφέρονται στην μέση εξασθένιση που προκαλείται από την βλάστηση που υπάρχει στο περιβάλλον διάδοσης είτε στον υπολογισμό του περιθωρίου διάλειψης που απαιτείται προκειμένου να αντισταθμιστούν οι απώλειες διάδοσης και οι διαλείψεις. Διάφορες παράμετροι βρίσκουν εφαρμογή στην ανάλυση όπως η γωνία ανύψωσης, η συχνότητα, το μήκος της διαδρομής μέσα από την βλάστηση και διάφορες άλλες που σχετίζονται με το συγκεκριμένο περιβάλλον διάδοσης στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

Σε αντίθεση με τα εμπειρικά μοντέλα, που είναι προσαρμοσμένα σε αποτελέσματα μετρήσεων, τα στατιστικά μοντέλα προσφέρουν την δυνατότητα μελέτης των φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά την μετάδοση και λήψη ενός σήματος. Ωστόσο, συνήθως, αν όχι πάντα, απαιτούν την πραγματοποίηση αριθμητικής ανάλυσης, προκειμένου να ξεπεραστούν οι δυσκολίες στους υπολογισμούς. Η εργασία της μοντελοποίησης προσανατολίζεται κυρίως στον προκαθορισμό της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (PDF-Probability Density Function), της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής (CDF-Cumulative Distribution Function) του σήματος πληροφορίας και κάποιες φορές της φάσης του λαμβανόμενου σήματος. Ο υπολογισμός αυτών των στατιστικών μεγεθών είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό των περιθωρίων διάλειψης του σήματος. Λιγότερες μελέτες έχουν ασχοληθεί με τον καθορισμό των στατιστικών δεύτερης τάξης του σήματος, δηλαδή με την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, τα στατιστικά μεγέθη της διάρκειας διάλειψης και το level crossing rate (LCR). Οι ορισμοί των δύο τελευταίων μεγεθών δίνονται στην συνέχεια. Παρ' όλα αυτά, η πλειοψηφία των ερευνητών υπολογίζει και αυτά τα μεγέθη, μετά από στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, επειδή είναι η βάση για την επιλογή των τεχνικών διαμόρφωσης και κωδικοποίησης.

Υπάρχουν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για την μοντελοποίηση των στατιστικών πρώτης τάξης, η global και η state-oriented. Η πρώτη περιγράφει τις συνθήκες διάδοσης του καναλιού χρησιμοποιώντας μια μόνο πιθανοτική κατανομή, ενώ η δεύτερη χρησιμοποιεί μια κατανομή για την περιγραφή κάθε κατάστασης στην οποία μπορεί να βρεθεί το κανάλι. Η τελευταία προσέγγιση κάνει χρήση διαφορετικών κατανομών για την περιγραφή της σκίασης και της πολυδιαδρομικής διάδοσης.

Ο Rice στην μελέτη του [39] για τις στατιστικές ιδιότητες του θορύβου δίνει τον παρακάτω ορισμό για το level crossing rate (LCR): το LCR, N_R , σε ένα ορισμένο επίπεδο $r=R$ είναι ο αναμενόμενος ρυθμός με τον οποίο η περιβάλλουσα τέμνει το συγκεκριμένο επίπεδο κατά την θετική φορά. Η σχέση υπολογισμού αυτού του μεγέθους είναι η παρακάτω:

$$N_R = \int_0^{\infty} r \cdot p(R, r) dr$$

Το average fade duration κάτω από ένα ορισμένο επίπεδο $r=R$ είναι η μέση διάρκεια των χρονικών περιόδων για τις οποίες η περιβάλλουσα παραμένει κάτω από ένα προκαθορισμένο επίπεδο ισχύος. Αν τ_i είναι η διάρκεια της i -οστής περιόδου διάλειψης, η πιθανότητα $r \leq R$ κατά την διάρκεια μιας χρονικής περιόδου T μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$P(r \leq R) = \frac{1}{T} \sum_i \tau_i$$

και το μέγεθος AFD δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\tau = \frac{1}{TN_R} \sum_i \tau_i = \frac{1}{N_R} P(r \leq R)$$

Τα αναλυτικά μοντέλα που εξετάζονται στην βιβλιογραφία αναφέρονται κυρίως στα επίγεια κινητά κανάλια. Ακολουθεί μια ενδεικτική αναφορά των πιο σημαντικών αναλυτικών μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί. Ο ερευνητής Ossanna [39] ήταν ο πρώτος που ασχολήθηκε με την αναλυτική μοντελοποίηση κινητών καναλιών. Δημιούργησε ένα μοντέλο το οποίο θεωρεί ότι το κύμα που λαμβάνει ο δέκτης είναι το άθροισμα ενός απευθείας και ενός ή περισσότερων ανακλώμενων κυμάτων. Το κύριο μειονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι η θεώρηση ύπαρξης της απευθείας συνιστώσας. Αυτή η συνιστώσα δεν υπάρχει σε αστικά περιβάλλοντα, όπου ο κύριος μηχανισμός διάδοσης είναι η σκέδαση. Ο Clark [39] εισήγαγε ένα μοντέλο διάδοσης στο οποίο γίνεται η παραδοχή ότι οι ισχύς των συνιστωσών είναι ίσες μεταξύ τους και

σταθερές. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο το ηλεκτρικό πεδίο του λαμβανόμενου κύματος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$E(t) = \sum_{i=1}^N E_0 \exp(j2\pi(f_c + f_{d,MAX} \cos a_i)t + \varphi_i)$$

Όπου E_0 είναι το σταθερό πλάτος των επιμέρους συνιστωσών, $f_{d,MAX}$ είναι η μέγιστη ολίσθηση Doppler λόγω της κίνησης του κινητού σταθμού σε σχέση με τους σκεδαστές, φ_i είναι η φάση του κύματος και a_i είναι η οριζόντια γωνία άφιξης του κύματος. Οι δύο τελευταίες γωνίες είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στο διάστημα $0, 2\pi$.

Ο Aulin [39] ανέπτυξε ένα τρισδιάστατο μοντέλο που λαμβάνει υπ' όψιν και την κάθετη διάσταση κατά την άφιξη του κύματος, κάτι το οποίο φαίνεται να ισχύει σε μεγαλύτερο βαθμό στα LMS (Land Mobile Satellite) κανάλια, όπου ο δορυφόρος είναι τοποθετημένος πολύ ψηλότερα από τους δέκτες. Η προηγούμενη σχέση παίρνει την εξής μορφή:

$$E(t) = \sum_{i=1}^N E_0 \exp(j2\pi(f_c + f_{d,MAX} \cos \psi_i)t + \varphi_i)$$

όπου η γωνία a_i αντικαθίσταται από την ψ_i , η οποία μπορεί να αναλυθεί στην οριζόντια γωνία άφιξης a_i και στην κάθετη β_i . Η οριζόντια γωνία ακολουθεί ξανά την ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $0, 2\pi$, ενώ η pdf της κάθετης δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$p(\beta) = \frac{\cos \beta}{2 \sin \beta_m}, |\beta| \leq \beta_m \leq \frac{\pi}{2}$$

Ο Aulin κατέληξε σε παρόμοιες εκφράσεις για το πλάτος και την φάση του λαμβανόμενου σήματος, τα οποία ακολουθούν την κατανομή Rayleigh και την ομοιόμορφη αντίστοιχα, αλλά αυτή η προσέγγιση έδωσε διαφορετικό φάσμα σήματος, το οποίο συμφωνεί περισσότερο με τα αποτελέσματα μετρήσεων φάσματος.

Οι Parsons και Turkmani υιοθέτησαν την προσέγγιση του Aulin αλλά έδωσαν διαφορετική pdf για την γωνία ανύψωσης β_i :

$$p(\beta) = \frac{\pi}{4|\beta_m|} \cos\left(\frac{\pi\beta}{2\beta_m}\right), |\beta| \leq |\beta_m| \leq \frac{\pi}{2}$$

Αυτή η κατανομή απομακρύνει αποτελεσματικά τις ασυνέχειες στο φάσμα που υπάρχουν στο μοντέλο του Aulin.

Οι Gilbert, Aulin και Clark πρότειναν εκφράσεις για την x συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου, επειδή αρχικά θεωρούσαν ότι το εκπεμπόμενο σήμα ήταν κάθετα πολωμένο. Μόνο μια μελέτη που ασχολείται με την αναλυτική μοντελοποίηση του LMS καναλιού έχει αναφερθεί, αλλά αυτή δεν λαμβάνει υπ' όψιν την κυκλική πόλωση του εκπεμπόμενου σήματος. Ο κ. Κανάτας [39] παρουσίασε ένα μοντέλο σκέδασης για το LMS κανάλι που ακολουθεί τις παραδοχές του Aulin. Η κίνηση του δορυφόρου, σε σχέση με τους σκεδαστές, που θεωρούνται ακίνητοι, δημιουργεί μια ολίσθηση Doppler $f_{d,sat}$:

$$f_{d,sat} = vd / \lambda$$

όπου vd είναι η γωνιακή ταχύτητα του δορυφόρου και λ το μήκος κύματος. Κατά συνέπεια, όλοι οι σκεδαστές μπορούν να θεωρηθούν ως πομποί κυμάτων με συχνότητα $f_c + f_{d,sat}$. Ο δέκτης συλλέγει τις συνιστώσες που φτάνουν με ορισμένες οριζόντιες και κάθετες γωνίες. Η έκφραση που προτείνεται για το ηλεκτρικό πεδίο είναι η παρακάτω:

$$E(t) = E_0 \exp(j2\pi(f_c + f_{d,sat} + f_{d,MAX} (1 + \frac{Vd}{c_0}) \cos \psi_i)t + \varphi_i)$$

όπου c_0 είναι η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στον ελεύθερο χώρο.

Ιδιαίτερα σημαντικός είναι ο προσδιορισμός των στατιστικών ιδιοτήτων των τυχαίων φαινομένων πολυδιαδρομικής διάδοσης και διαλείψεων, καθώς παίζουν πρωτεύοντα ρόλο στον χαρακτηρισμό των ασύρματων καναλιών διάδοσης και ιδιαίτερα στην συνάρτηση ετεροσυσχέτισης, μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους των στατιστικών δεύτερης τάξης. Μοντέλα καναλιών δύο διαστάσεων με ομοιόμορφα

κατανομημένους σκεδαστές γύρω από τον σταθμό βάσης μελετούνται τα τελευταία 40 χρόνια. Βασισμένη σε αυτές τις μελέτες, έγινε η παραδοχή ύπαρξης πολλαπλών στοιχείων σε πομπό και δέκτη (Multiple Input-Multiple output MIMO), τεχνολογία η οποία εξαιτίας μιας σειράς πλεονεκτημάτων που διαθέτει, όπως η αποτελεσματική αντιμετώπιση των διαλείψεων και των παρεμβολών, βελτιώνει σε πολύ μεγάλο βαθμό την απόδοση των ασύρματων συστημάτων. Στην συνέχεια έγινε επέκταση του προαναφερθέντος μοντέλου σε 3 διαστάσεις με την ενσωμάτωση του παράγοντα της γωνίας ανύψωσης στους υπολογισμούς. Για γεωστατικούς δορυφόρους, κυρίως μικρές γωνίες ανύψωσης μπορούν να βρεθούν στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, ενώ οι χαμηλότερες τροχιές έχουν μεγαλύτερες γωνίες ανύψωσης, καθιστώντας εφικτή, εν μέρει, την αντιστάθμιση της σκίασης. Αυτή η εξάρτηση από την γωνία ανύψωσης πρέπει να συμπεριληφθεί στο μοντέλο του καναλιού. Παρ' όλα αυτά, το μοντέλο κινητού σταθμού-σταθμού βάσης, φαίνεται να υστερεί στην δυνατότητα ρεαλιστικής υλοποίησης, εξαιτίας της αδυναμίας προσομοίωσης της ταυτόχρονης κίνησης του πομπού και του δέκτη. Σε ορισμένες αναφορές έχουν παρουσιαστεί one ring και two ring μοντέλα, τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν σε ad hoc δίκτυα και σε συστήματα επικοινωνιών μικρής εμβέλειας. Είναι αναγκαίο να συνυπολογιστεί και η γωνία ανύψωσης στα προαναφερθέντα 2D μοντέλα, για πρακτικούς λόγους, καθώς τα τρισδιάστατα μοντέλα περιγράφουν με αρκετά καλή ακρίβεια τα αστικά περιβάλλοντα διάδοσης. Ωστόσο, στο παρόν κείμενο θεωρούμε την ύπαρξη ενός γεωστατικού δορυφόρου ως πομπού, γεγονός που σημαίνει ότι δεν κινείται (σε σχέση με τον δέκτη) και άρα δεν θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν στους υπολογισμούς η κατεύθυνση και η ταχύτητα κίνησης του. Οι μαθηματικές σχέσεις για τον υπολογισμό των κρουστικών αποκρίσεων και της ετεροσυσχέτισης περιγράφονται αναλυτικά στα κεφάλαια 3 και 4.

Η χρονική μεταβολή του σήματος που μεταδίδεται στα κινητά δίκτυα μπορεί να υποδιαιρεθεί σε 3 κατηγορίες. Πρώτη κατηγορία είναι οι μεταβολές της ισχύος του σήματος λόγω των απωλειών διάδοσης κατά την μετάδοση από τον πομπό στον δέκτη. Δεύτερη είναι οι αργές διακυμάνσεις της τοπικής μέσης τιμής λόγω της σκίασης από το περιβάλλον. Η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει μια γρήγορη ή βραχυπρόθεσμη μεταβολή, η οποία υπερτίθεται στις άλλες δύο και οφείλεται στην πολυδιαδρομική διάδοση. Οι παράγοντες που επιβαρύνουν περισσότερο την διάδοση στα δορυφορικά συστήματα στις ζώνες L και S είναι η σκίαση και η διακοπή του σήματος λόγω

εμποδίων στο περιβάλλον διάδοσης. Η κλασική μοντελοποίηση τέτοιων συστημάτων διαχωρίζει τις αργές από τις γρήγορες χρονικές μεταβολές εξαιτίας της σκίασης και της πολυδιαδρομικής διάδοσης αντίστοιχα και τις μοντελοποιεί ξεχωριστά. Στα συστήματα LMS (land mobile systems) η πιο συνηθισμένη προσέγγιση είναι η ταυτόχρονη μοντελοποίηση και των δύο. Ο λόγος είναι, ότι κατά την επίγεια διάδοση σπάνια υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη (LOS-Line of Sight), και το περιβάλλον συνεισφέρει εξ' ολοκλήρου και στις αργές και στις γρήγορες μεταβολές. Ωστόσο, η LOS συνιστώσα είναι, συνήθως, παρούσα όταν ο πομπός είναι τοποθετημένος αρκετά πάνω από το έδαφος, λόγω των μεγαλύτερων γωνιών ανύψωσης και για τον ίδιο λόγο η παρεμπόδιση του σήματος οφείλεται κυρίως στο κοντινό περιβάλλον διάδοσης. Προκειμένου να αντισταθμιστούν οι επιδράσεις του συνδυασμού σκίασης και multipath μια προσέγγιση που κάνει χρήση ενός εμπειρικού-στατιστικού μοντέλου, χρησιμοποιεί συνδυασμούς κατανομών, ενώ τα πιθανά σενάρια διάδοσης μπορούν να ταξινομηθούν σε έναν περιορισμένο αριθμό κατηγοριών: open area, urban area, suburban area, tree shadowed κλπ. Ενδεικτικά, αναφέρονται κάποια από τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για το μοντέλο δορυφορικού συστήματος[40]:

- Το μοντέλο Loo θεωρεί ότι το λαμβανόμενο σήμα ακολουθεί την κατανομή Rice (απευθείας συνιστώσα+ multipath), όπου η ισχύς των multipath συνιστωσών είναι σταθερή, ενώ η ισχύς της απευθείας ακολουθεί τοπικά την λογαριθμοκανονική κατανομή.
- Το μοντέλο Corazza- Vatalaro θεωρεί ότι το λαμβανόμενο σήμα ακολουθεί την κατανομή Rice, όπου και η LOS συνιστώσα και οι multipath ακολουθούν τοπικά την λογαριθμοκανονική κατανομή.
- Το μοντέλο Hwang θεωρεί ότι το λαμβανόμενο σήμα ακολουθεί την κατανομή Rice, ενώ και η απευθείας και οι multipath συνιστώσες ακολουθούν την ανεξάρτητη λογαριθμοκανονική κατανομή.
- Οι Vogel και Akturan έχουν αναπτύξει ένα μοντέλο που ορίζει τις πιθανότητες ύπαρξης των συνθηκών clear (C), shadowed (S) και blocked (B), δηλαδή συνθηκών LOS, συνθηκών ύπαρξης σκίασης και συνθηκών παρεμπόδισης του σήματος, αντίστοιχα. Η κατανομή Rice εφαρμόζεται στην κατάσταση clear και το μοντέλο Loo για τις συνθήκες σκίασης και παρεμπόδισης του σήματος. Το προκύπτον μοντέλο δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$f_r(r, a) = C(a)f_{Rice}(r) + S(a)f_{Loo}(r) + B(a)f_{Loo}(r)$$

όπου r είναι το λαμβανόμενο σήμα και a είναι η γωνία ανύψωσης. Οι παράμετροι των κατανομών Rice και Loo προκύπτουν βάσει μετρήσεων.

- Το μοντέλο Lutz προτείνει ένα μαρκοβιανό μοντέλο δύο καταστάσεων («καλή» και «κακή»), στο οποίο οι μεταβάσεις και οι πιθανότητες της κάθε κατάστασης υπολογίζονται βάσει μετρήσεων. Στην καλή κατάσταση το σήμα μοντελοποιείται ως Rice, ενώ στην άλλη ως Rayleigh και Lognormal.
- Στην βιβλιογραφία έχουν προταθεί και Μαρκοβιανά μοντέλα τριών καταστάσεων, τα οποία προτείνουν διαφορετικές κατανομές για κάθε κατάσταση του σήματος. Τυπικά, κάθε κατάσταση διαρκεί για μερικά μέτρα από την συνολική διαδρομή του κύματος. Από διάφορες μετρήσεις έχει προκύψει ότι η κάθε κατάσταση λαμβάνει χώρα για 3 με 5 μέτρα .

Τα στατιστικά-εμπειρικά μοντέλα που περιγράφηκαν παραπάνω είναι λιγότερο χρονοβόρα κατά την παραγωγή χρήσιμων εξόδων και γι' αυτόν τον λόγο είναι κατάλληλα για την ανάλυση τέτοιων συστημάτων. Παρ' όλα αυτά, όταν είναι διαθέσιμες πληροφορίες για την μορφολογία του εδάφους και τα χαρακτηριστικά των κτηρίων, είναι προτιμότερη η χρήση ντετερμινιστικών-φυσικών μοντέλων, αν και ο καθορισμός της ακρίβειας του μοντέλου είναι δύσκολος και στις δύο περιπτώσεις. Αυτά τα μοντέλα είναι καθορισμένα ανάλογα με την τοποθεσία και συνδυάζουν μεθόδους υψηλής συχνότητας για τον υπολογισμό του πλάτους των περιθλώμενων κυμάτων με τοπογραφικές-μορφολογικές πληροφορίες και επιτάχυνση των υπολογισμών με χρήση τεχνικών ray-tracing παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στην σύνθεση ψηφιακών εικόνων. Οι πιο δημοφιλείς τεχνικές είναι η Γεωμετρική Θεωρία της Περίθλασης (GTD- Geometrical Theory of Diffraction) και η Ομοιόμορφη Θεωρία της Περίθλασης (Uniform Theory of Diffraction UTD), η οποία αποτελεί προέκταση της GTD για να απομακρύνει τις ασυνέχειες της ανάκλασης και της σκίασης.

Σε μοντέλα που αναφέρονται στην βιβλιογραφία, προτείνεται ένας συνδυασμός προσεγγίσεων με την ονομασία φυσικό-στατιστικό μοντέλο. Αυτή η προσέγγιση συνδυάζει την ευκολία χρήσης των στατιστικών και τις περιορισμένες ανάγκες σε

υπολογιστικούς πόρους των εμπειρικών-στατιστικών μοντέλων με την μελέτη των φυσικών διεργασιών μετάδοσης των ντετερμινιστικών μοντέλων. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, προτείνουν παραμετροποίηση των περιβαλλόντων που περιλαμβάνουν κτήρια με χρήση στατιστικής κατανομής για το ύψος τους.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η έρευνα για την ηλεκτρομαγνητική διάδοση για συχνότητες μεγαλύτερες των 10 GHz, βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη. Οι δορυφορικές επικοινωνίες σε αυτές τις συχνότητες, υπόκεινται στις παρακάτω αλλοιώσεις: εξασθένιση λόγω βροχής και σύννεφων, απορρόφηση καθαρού ουρανού, σπινθηρισμός, καθώς και αποπόλωση. Με σκοπό να μοντελοποιηθούν τέτοιες επιδράσεις και να αναπτυχθούν τεχνικές αντιμετώπισής τους, έχει πραγματοποιηθεί ένα σύνολο πειραμάτων με χρήση συσκευών όπως τα ραδιόμετρα. Επιπροσθέτως, άλλες διατάξεις όπως ραντάρ, radiosondes έχουν χρησιμοποιηθεί σε παγκόσμιο επίπεδο για να εκτιμηθεί η χρονική μεταβλητότητα της συγκέντρωσης υδρατμών. Οι τεχνικές αντιμετώπισης τέτοιων αλλοιώσεων που έχουν προταθεί για χρήση στην ζώνη Ka, περιλαμβάνουν έλεγχο ισχύος στην ευθεία και την αντίστροφη ζεύξη, προσαρμοστική κωδικοποίηση και διαμόρφωση, καθώς και διαφορισμό χώρου.

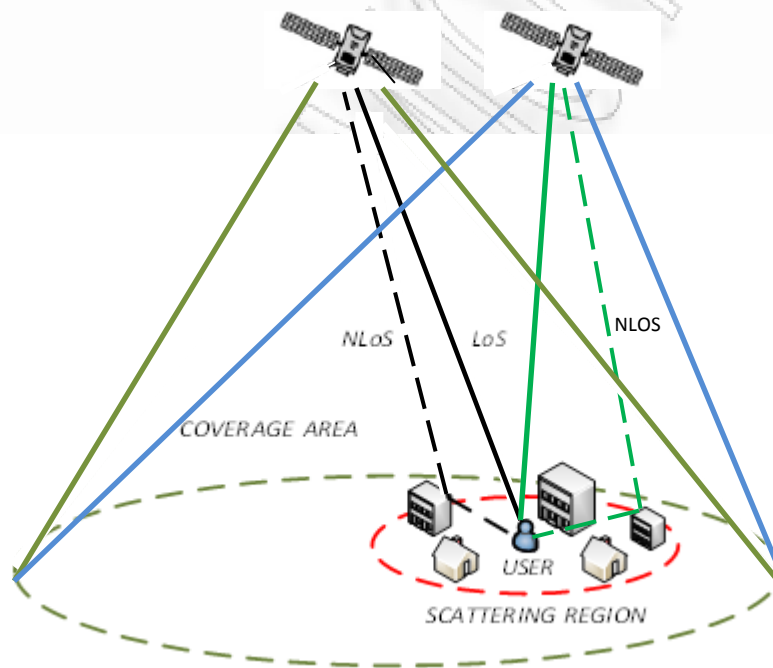
Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπως προαναφέρθηκε, είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός γεωμετρικού-στοχαστικού καναλιού για δορυφορικά συστήματα πολλαπλών εισόδων και εξόδων. Η διαδικασία υλοποίησης πραγματοποιείται μέσω της ανάπτυξης ενός θεωρητικού και δύο μοντέλων προσομοίωσης για τον ραδιοδιάλογο, των οποίων η εφαρμογή έγινε μέσω του λογισμικού Matlab[1],[2],[3],[4]. Η ανάπτυξη των μοντέλων βασίζεται στην παραδοχή ύπαρξης ενός γεωστατικού δορυφόρου, δηλαδή με ύψος τροχιάς τα 35786 χιλιόμετρα, και ενός χρήστη ο οποίος βρίσκεται στο κέντρο μιας κυκλικής περιοχής που περιλαμβάνει ένα σύνολο από σκεδαστές. Η ακτίνα της κυκλικής περιοχής ορίζει την μέγιστη απόσταση μεταξύ του κινητού σταθμού του χρήστη και ενός σκεδαστή. Στην πορεία υλοποίησης της εργασίας διαπιστώθηκε ότι με τη χρήση δύο στοιχείων κεραίας στον ίδιο δορυφόρο η συσχέτιση μεταξύ των δύο υποδιαύλων παραμένει σε υψηλά επίπεδα και γι' αυτόν τον λόγο, αποφασίστηκε να γίνει η παραδοχή ύπαρξης δύο γεωστατικών δορυφόρων, καθένας από τους οποίους φέρει από μια κεραία. Η ύπαρξη αυτών των δύο δορυφόρων χρησιμοποιείται προκειμένου να υπάρξει διαφορισμός χώρου του εκπεμπόμενου σήματος, έτσι ώστε να αντιμετωπιστούν

ανεπιθύμητα φαινόμενα της ασύρματης διάδοσης, όπως οι παρεμβολές και οι βαθιές διαλείψεις. Τα μοντέλα που θα περιγραφούν στην συνέχεια είναι τρισδιάστατα, προκειμένου να ανταποκρίνονται περισσότερο στις πραγματικές συνθήκες ασύρματης διάδοσης των δορυφορικών συστημάτων. Επίσης, δεδομένης της τρισδιάστατης φύσης του μοντέλου, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπ' όψη στους υπολογισμούς και η γωνία ανύψωσης του κάθε σκεδαστή. Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί ότι ο κινητός σταθμός και οι σκεδαστές μπορούν να συμπεριληφθούν στον όγκο ενός κυλίνδρου. Η ακτίνα του σχήματος αυτού αντιστοιχεί στην μέγιστη απόσταση των ενεργών σκεδαστών από τον χρήστη. Το ύψος του αντιστοιχεί στο μέγιστο ύψος των σκεδαστών αυτών. Αντίκτυπο στην διάδοση των κυμάτων έχουν αντικείμενα όπως κτήρια, δέντρα κλπ. Είναι σημαντικό επίσης να τονιστεί, ότι και η καμπυλότητα της Γης παίζει μεγάλο ρόλο στην ραδιοδιάδοση και συνεπώς πρέπει να συμπεριληφθεί και αυτή στον υπολογισμό των παραμέτρων της περιοχής κάλυψης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

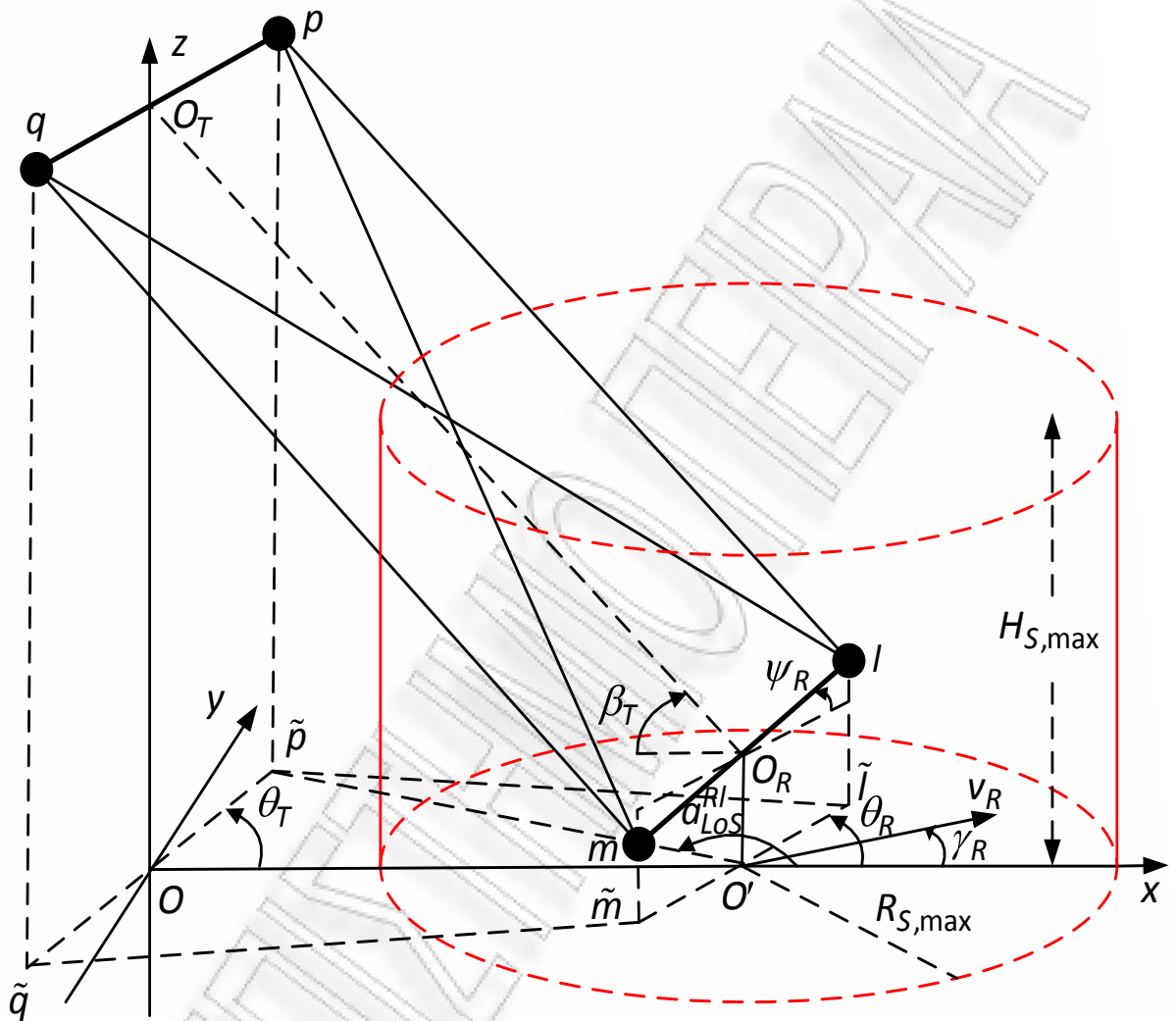
Στην εικόνα 1 φαίνεται το περιβάλλον διάδοσης του μοντέλου αναφοράς που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο σύγκρισης για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας, της αποδοτικότητας και της χρησιμότητας των μοντέλων προσομοίωσης που θα παρουσιαστούν στην συνέχεια της εργασίας.



Εικόνα 1. Απεικόνιση του περιβάλλοντος διάδοσης του συστήματος δορυφορικών επικοινωνιών που πρόκειται να αναλυθεί.

Στην εικόνα 2 φαίνονται οι γωνίες και οι αποστάσεις που θα χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό της ετεροσυσχέτισης μεταξύ δύο υποκαναλιών για συνθήκες κατά

τις οποίες υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ του πομπού και του δέκτη, δηλαδή για συνθήκες LOS (Line of sight):

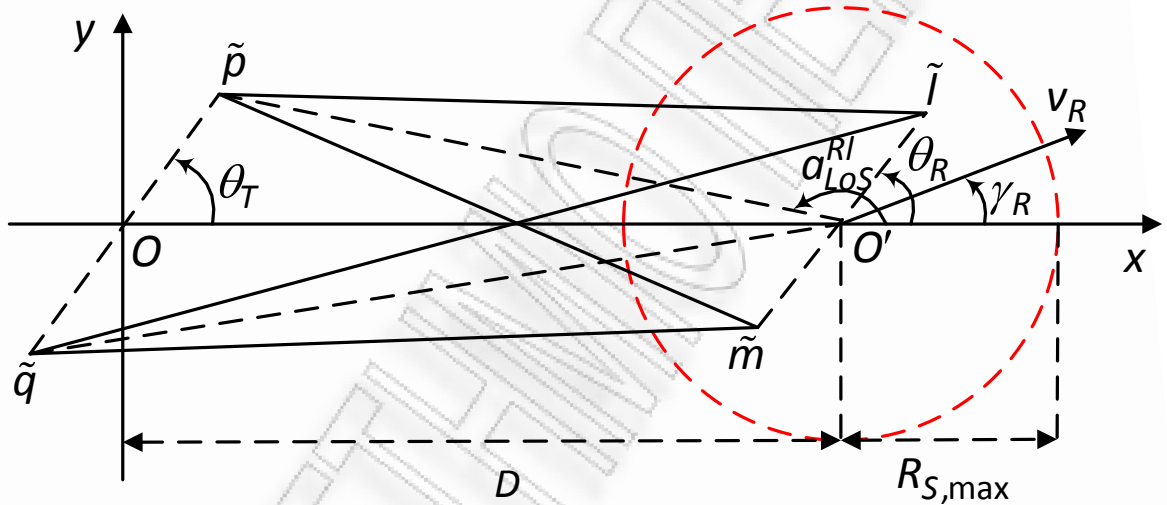


Εικόνα 2. Τα LOS μονοπάτια του τρισδιάστατου μοντέλου ,οι αποστάσεις και οι γωνίες που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση.

Όπου p και q είναι οι θέσεις των στοιχείων των κεραιών των δορυφόρων που εκπέμπουν προς τον κινητό σταθμό, β_T η γωνία ανύψωσης του πομπού, οι γωνίες θ_T και θ_R υποδηλώνουν τον προσανατολισμό των κεραιών σε πομπό και δέκτη, v_R είναι η ταχύτητα με την οποία κινείται το κινητό τερματικό του χρήστη, $R_{s,MAX}$ είναι η ακτίνα του κυλίνδρου, δηλαδή η μέγιστη απόσταση των σκεδαστών από τον χρήστη,

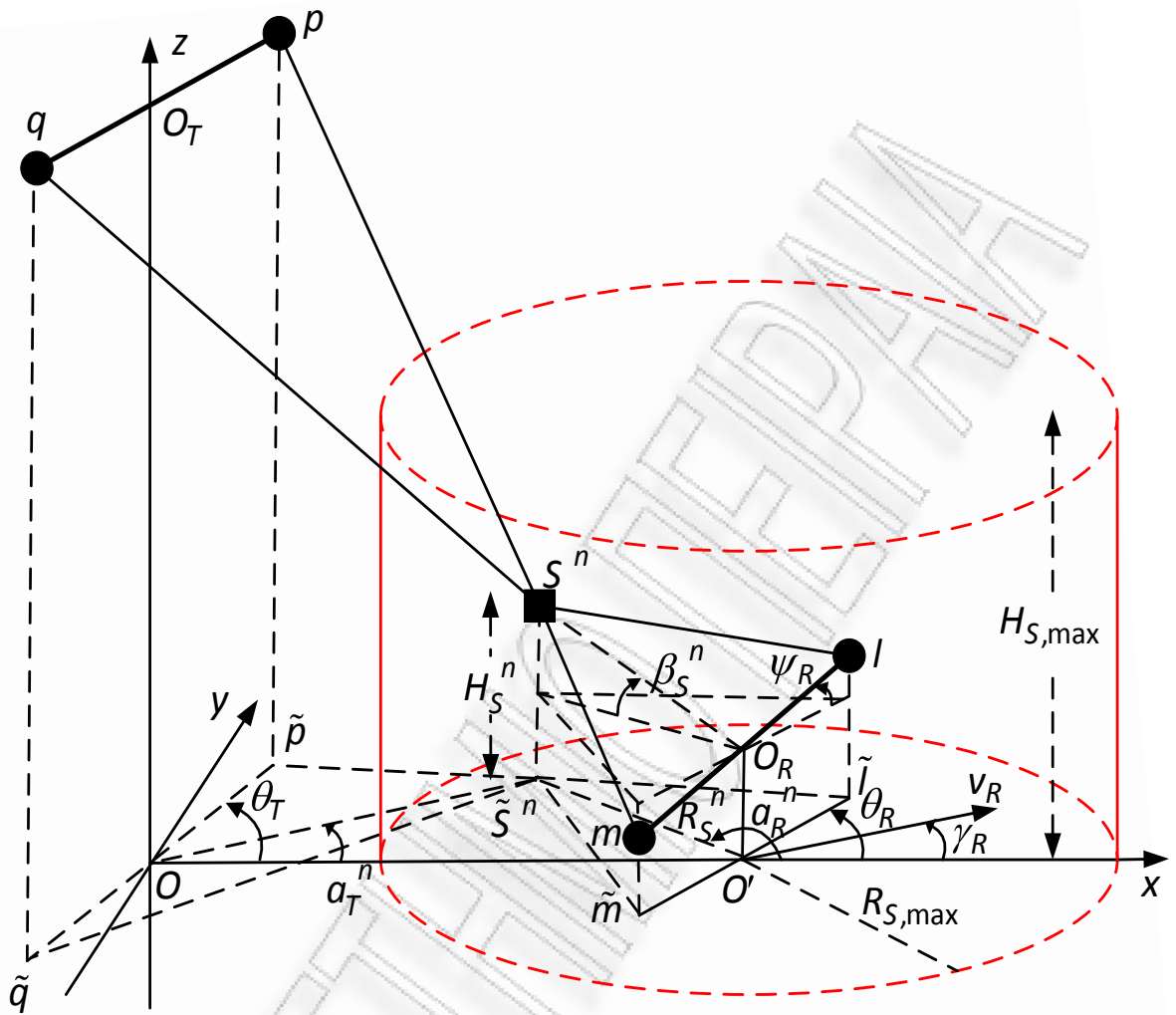
$H_{s,MAX}$ το ύψος του κυλίνδρου, που ισοδυναμεί με το μέγιστο ύψος των σκεδαστών, γ_R είναι η μεταβλητή που χρησιμοποιείται για να δηλώσει την κατεύθυνση κίνησης του δέκτη και α_{LOS} είναι η αζιμούθια γωνία άφιξης του απευθείας κύματος στον επίγειο σταθμό.

Η προβολή του μοντέλου σε δύο διαστάσεις, δηλαδή στο επίπεδο $x y$, είναι η παρακάτω:



Εικόνα 3. Η 2- D απεικόνιση του μοντέλου για τα LOS μονοπάτια.

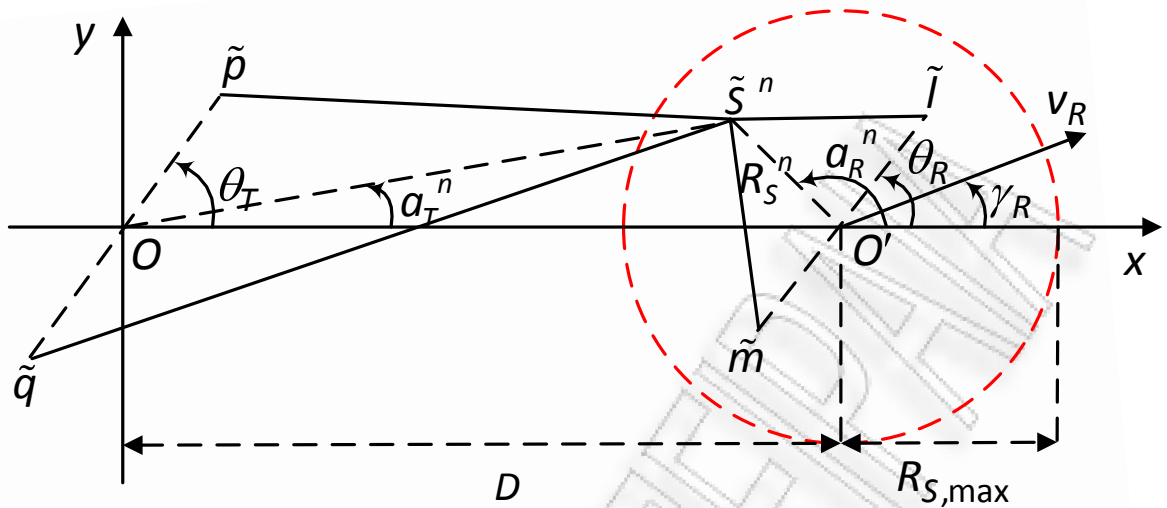
Για τις συνθήκες διάδοσης κατά τις οποίες δεν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ δορυφόρου και κινητού σταθμού, δηλαδή για non line of sight (NLOS), είναι απαραίτητο να ληφθούν υπ' όψη και τα χαρακτηριστικά των σκεδαστών που συμμετέχουν στην ραδιοδιάδοση. Το μοντέλο για NLOS φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4. Τα NLOS μονοπάτια του τρισδιάστατου μοντέλου, οι αποστάσεις και οι γωνίες που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση.

Η γωνία β_s υποδηλώνει την γωνία ανύψωσης του σκεδαστή, η μεταβλητή H_s είναι η απόσταση του σκεδαστή από το έδαφος, R_s είναι η απόσταση του από το κινητό τερματικό του χρήστη, α_R και α_T είναι οι αζιμούθιες γωνίες άφιξης και αναχώρησης του κύματος από τον σκεδαστή, αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι ίδιες με αυτές που περιγράφηκαν για το LOS μοντέλο.

Η προβολή του μοντέλου σε δύο διαστάσεις, δηλαδή στο επίπεδο $x y$ είναι η παρακάτω:



Εικόνα 5. Η 2- D απεικόνιση του μοντέλου για τα NLOS μονοπάτια.

Συνοψίζοντας, όλες χρησιμοποιούμενες παράμετροι φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

D	Η απόσταση μεταξύ του κέντρου των προβολών των στοιχείων του πομπού με το κέντρο O^t .
$R_{S,max}, H_{S,max}$	Η ακτίνα και το ύψος του κυλίνδρου που περιέχει τους σκεδαστές.
δ_T, δ_R	Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών στοιχείων κεραιών σε πομπό και δέκτη, αντίστοιχα.
θ_T, θ_R	Ο προσανατολισμός των κεραιών πομπού και δέκτη σε σχέση με το επίπεδο $x y$, αντίστοιχα.
ψ_T, ψ_R	Η γωνία ανύψωσης του p -οστού στοιχείου του πομπού και του l -οστού του δέκτη σε σχέση με το επίπεδο xy , αντίστοιχα.
v_R	Η ταχύτητα κίνησης του δέκτη.
γ_R	Η κατεύθυνση κίνησης του δέκτη.
$f_{R,MAX}$	Η μέγιστη ολίσθηση Doppler στον δέκτη.
β_T	Η γωνία ανύψωσης του πομπού σε σχέση με το O_R .
H_T, H_R, H_S^n	Τα ύψη πομπού, δέκτη και σκεδαστή, αντίστοιχα.

α_{LOS}^{RI}	Η αζιμούθια γωνία άφιξης των LOS συνιστωσών.
α_T^n, α_R^n	Οι αζιμούθιες γωνίες άφιξης και αναχώρησης από τον n-οστό σκεδαστή, αντίστοιχα.
R_S^n	Η απόσταση μεταξύ του O_t και της προβολής του n-οστού σκεδαστή στο επίπεδο x y.
β_S^n	Η γωνία ανύψωσης του n-οστού σκεδαστή σε σχέση με το σημείο O_R .
φ^n, g^n	Η τυχαία φάση και πλάτος του κάθε σκεδαστή.
μ	Η μέση γωνία αζιμούθιου στην οποία οι σκεδαστές είναι διασκορπισμένοι στο επίπεδο x y (von Mises pdf).
k	Η διασπορά των σκεδαστών γύρω από την μέση γωνία αζιμούθιου (von Mises pdf).
a	Η διασπορά των σκεδαστών γύρω από τον κινητό σταθμό. (hyperbolic pdf).
$H_{S,mean}$	Το μέσο ύψος σκεδαστή (log-normal pdf).
σ	Η τυπική απόκλιση του ύψους του σκεδαστή (log-normal pdf).

Σύμφωνα με τις απεικονίσεις του μοντέλου ο άξονας x, είναι η ευθεία που συνδέει το κέντρο των προβολών των δορυφόρων με το κέντρο της κάτω πλευράς του κυλίνδρου, O^t . Επιπλέον, O_T και O_R είναι τα κέντρα των κεραιών πομπού και δέκτη. Με σκοπό να γίνει πιο κατανοητή η ανάλυση, συμβολίζουμε ως $d(a,b)$ την απόσταση μεταξύ δύο σημείων a και b.

Η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών στοιχείων σε πομπό και δέκτη δίνονται μέσω των μεταβλητών δ_T και δ_R , αντίστοιχα. Οι γωνίες θ_T και θ_R αναπαριστούν τον προσανατολισμό των κεραιών σε πομπό και δέκτη. Επιπλέον, η γωνία ψ_R περιγράφει την γωνία ανύψωσης του i-οστού στοιχείου της κεραίας του κινητού σταθμού σε σχέση με το επίπεδο x y και η γωνία α_{LOS}^{RI} δείχνει την αζιμούθια γωνία άφιξης για τις LOS συνιστώσες. Τέλος, θεωρούμε ότι ο κινητός σταθμός κινείται με ταχύτητα v_R

στην κατεύθυνση γ_R .

Το προτεινόμενο μοντέλο θεωρεί άπειρο αριθμό σκεδαστών, που ανακλούν κύματα προς κάθε κατεύθυνση και ότι μεσολαβεί μια ανάκλαση μέχρι το κύμα να φτάσει στον προορισμό του. Ο κάθε σκεδαστής λοιπόν συμβολίζεται ως $S(n)$, η απόσταση μεταξύ της προβολής του στο επίπεδο xy και του κέντρου της κάτω πλευράς του κυλίνδρου συμβολίζεται $d \tilde{s}^n, \sigma' = R_S^n \in (0, R_{S, \max}]$, και το ύψος του ως

$d \tilde{s}^n, s^n = H_S^n \in (0, H_{S, \max}]$. Οι μεταβλητές $H_{S, \max}$ και $R_{S, \max}$ συμβολίζουν το ύψος και την ακτίνα του κυλίνδρου αντίστοιχα. Η γωνία ανύψωσης του κάθε σκεδαστή μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\beta_S^n \approx \arctan H_S^n / R_S^n. \quad (3)$$

Οι γωνίες $\alpha_T^{(n)}$ και $\alpha_R^{(n)}$ δηλώνουν τις αζιμούθιες γωνίες αναχώρησης των κυμάτων που αλληλεπιδρούν με τον κάθε σκεδαστή $S(n)$ και την αζιμούθια γωνία άφιξης των κυμάτων σε αυτόν, αντίστοιχα. Γίνεται η παραδοχή ότι οι γωνίες $\alpha_T^{(n)}$, $\alpha_R^{(n)}$, $R_S^{(n)}$, $H_S^{(n)}$ και $\beta_S^{(n)}$ είναι τυχαίες μεταβλητές. Η εξαρτάται από τις $\alpha_R^{(n)}$ και $R_S^{(n)}$, ενώ η $\beta_S^{(n)}$ εξαρτάται από τις $R_S^{(n)}$ και $H_S^{(n)}$. Παρ' όλα αυτά, οι γωνίες $\alpha_R^{(n)}$, $R_S^{(n)}$ και $H_S^{(n)}$ είναι ανεξάρτητες.

Επιπλέον, γίνεται η παραδοχή ότι η ακτίνα του κυλίνδρου είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση D . Έτσι, μπορούμε να υποθέσουμε ότι $\alpha_T^{(n)} = \arcsin(R_S^{(n)} / D) \leq \arcsin(R_{S, \max} / D)$ είναι μια μικρή γωνία για κάθε $R_S^{(n)} \in (0, R_{S, \max}]$. Επιπροσθέτως, θεωρούμε ότι η απόσταση δ_T είναι πολύ μικρότερη από την D . Έτσι μπορεί να ειπωθεί ότι ισχύει $\alpha_{LOS}^R \approx \pi$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΡΟΥΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΝ

Η κρουστική απόκριση του κάθε καναλιού πρέπει να υπολογιστεί ως υπέρθεση των LOS και NLOS συνιστωσών που φτάνουν στον δέκτη:

$$h_{pl}(t) = h_{pl,LoS}(t) + h_{pl,NLoS}(t). \quad (4)$$

Θεωρώντας ότι ο αριθμός των σκεδαστών είναι άπειρος, με χρήση του κεντρικού οριακού θεωρήματος, μπορεί να θεωρηθεί ότι η απόκριση ακολουθεί την κατανομή Gauss με μη μηδενική μέση τιμή.

Η LOS συνιστώσα της κρουστικής απόκρισης δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$h_{pl,LoS}(t) = \sqrt{\frac{K_{pl}\Omega_{pl}}{K_{pl}+1}} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d_{p,l}} e^{j2\pi t \left[f_{T,max} \cos(\pi - \alpha_{LoS}^{Rl} - \gamma_T) + f_{R,max} \cos(\alpha_{LoS}^{Rl} - \gamma_R) \right]}, \quad (5)$$

Αντίστοιχα για την NLOS συνιστώσα:

$$h_{pl,NLoS}(t) = \sqrt{\frac{\Omega_{pl}}{K_{pl}+1}} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N g^n e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} [d_{p,S^n} + d_{S^n,l}]} \times e^{j\varphi^n} e^{j2\pi t \left[f_{T,max} \cos(\alpha_T^n - \gamma_T) + f_{R,max} \cos(\alpha_R^n - \gamma_R) \right] \cos \beta_S^n}, \quad (6)$$

όπου $j^2 = -1$, και $f_{R,MAX} = v_T / \lambda$ είναι η μέγιστη ολίσθηση Doppler στον δέκτη. Το λ είναι το μήκος κύματος του φέροντος. Γίνεται η παραδοχή ότι η φάση $\varphi(n)$ που εισάγει στο κύμα ο κάθε σκεδαστής είναι μια τυχαία μεταβλητή ομοιόμορφα

κατανομημένη στο διάστημα $-\pi, \pi$ που είναι ανεξάρτητη από τις γωνίες αζιμούθιου του πομπού και του δέκτη και από τα χαρακτηριστικά του κάθε σκεδαστή. Επιπλέον, θεωρώντας μοναδιαία ισχύ εκπομπής, με $\Omega_{pl} = \mathbb{E}\left[|h_{pl}(t)|^2\right] \leq 1$, υποδεικνύεται η μεταδιδόμενη ισχύς του κάθε υποκαναλιού. $\mathbb{E}[\cdot]$ είναι ο στατιστικός μέσος. Επίσης, η σχέση $K_{pl} = |h_{pl,LoS}(t)|^2 / \mathbb{E}\left[|h_{pl,NLoS}(t)|^2\right]$ αναφέρεται στον Ricean factor του κάθε υποκαναλιού, και $g(n)$ είναι το πλάτος του n -οστού ανακλώμενου κύματος έτσι ώστε

$$N^{-1} \sum_{n=1}^N \mathbb{E}\left[|g^n|^2\right] = 1 \quad \text{καθώς το πλήθος των σκεδαστών τείνει στο άπειρο.}$$

Οι αποστάσεις πομπού-δέκτη $d(p, I)$, πομπού-σκεδαστή $d(p, S(n))$ και σκεδαστή-δέκτη $d(S(n), I)$ δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$d(p, I) \approx D - D_{T_1} + D_{R_1} / \cos \beta_T, \quad (7)$$

$$d(p, S^{(n)}) \approx d = \sqrt{r_e^2 + r_s^2 - 2r_e r_s \cos \gamma} \quad (8)$$

$$d(S^n, I) \approx R_S^n / \cos \beta_S^n - D_{R_1} \cos \alpha_R^n \cos \beta_S^n - D_{R_2} \sin \beta_S^n - D_{R_3} \sin \alpha_R^n \cos \beta_S^n, \quad (9)$$

Οι αποστάσεις που φαίνονται στους τύπους υπολογίζονται ως εξής:

$$D_{T_1} = 0.5 (n_T + 1 - 2\rho) \delta_T \cos \theta_T, \quad (10)$$

$$D_{T_2} = 0.5 (n_T + 1 - 2\rho) \delta_T \sin \theta_T / D, \quad (11)$$

$$D_{R_1} = 0.5 (n_R + 1 - 2l) \delta_R \cos \theta_R \cos \psi_R, \quad (12)$$

$$D_{R_2} = 0.5 (n_R + 1 - 2l) \delta_R \sin \psi_R, \quad (13)$$

$$D_{R_3} = 0.5 (n_R + 1 - 2l) \delta_R \sin \theta_R \cos \psi_R. \quad (14)$$

Τέλος, χρησιμοποιώντας την προσέγγιση ότι $\alpha_T^n \approx \sin \alpha_R^n R_S^n / D$ και τις παραπάνω σχέσεις οι τύποι για τις LOS και NLOS συνιστώσες παίρνουν την μορφή:

$$h_{pl,LoS} t = \sqrt{\frac{K_{pl}\Omega_{pl}}{K_{pl}+1}} e^{-j\frac{2\pi(D-D_{T1}+D_{R1})}{\lambda \cos \beta_T}} e^{j2\pi t F_{T,LoS}+F_{R,LoS}}, \quad (15)$$

$$h_{pl,NLoS} t = \sqrt{\frac{\Omega_{pl}}{K_{pl}+1}} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N g^n A_{p,S^n} A_{S^n} e^{j\varphi^n} e^{j2\pi t F_{T,NLoS}+F_{R,NLoS}}, \quad (16)$$

όπου

$$F_{T,LoS} = f_{T,max} \cos \pi - \alpha_{LoS}^{RI} - \gamma_T, \quad (17)$$

$$F_{R,LoS} = f_{R,max} \cos \alpha_{LoS}^{RI} - \gamma_R, \quad (18)$$

$$A_{p,S^n} = e^{-j\frac{2\pi}{\lambda \cos \beta_T} (D-D_{T1}-D_{T2}R_S^n \sin \alpha_R^n)}, \quad (19)$$

$$A_{S^n} = e^{-j\frac{2\pi R_S^n}{\lambda \cos \left[\arctan \left(H_S^n / R_S^n \right) \right]}} e^{j\frac{2\pi D_{R1} \cos \alpha_R^n \cos \left[\arctan \left(H_S^n / R_S^n \right) \right]}{\lambda}} \times e^{j\frac{2\pi D_{R2} \sin \left[\arctan \left(H_S^n / R_S^n \right) \right]}{\lambda}} e^{j\frac{2\pi D_{R3} \sin \alpha_R^n \cos \left[\arctan \left(H_S^n / R_S^n \right) \right]}{\lambda}}, \quad (20)$$

$$F_{T,NLoS} = f_{T,max} R_S^n \sin \gamma_T \sin \alpha_R^n / D + \cos \gamma_T, \quad (21)$$

$$F_{R,NLoS} = f_{R,max} \cos \alpha_R^n - \gamma_R \cos \left[\arctan H_S^n / R_S^n \right]. \quad (22)$$

ПАВЕЛЪЧЕВО РЕПАА

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΧΩΡΟ-ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ

Θεωρώντας τρισδιάστατο μη ιστροπικό περιβάλλον διάδοσης, η ετεροσυσχέτιση μεταξύ δύο τυχαίων καναλιών με κρουστικές αποκρίσεις h_{pl}, h_{qm} δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$R_{pl,qm}(\delta_T, \delta_R, \tau, t) = E[h_{pl}(t) h_{qm}^*(t+\tau)] / \sqrt{\Omega_{pl}\Omega_{qm}}, \quad (23)$$

όπου το σύμβολο * δηλώνει τον συζυγή μιγαδικό και το E[.] δηλώνει τον στατιστικό μέσο. Δεδομένου ότι οι αποκρίσεις $h_{pl,NLOS}$ και $h_{qm,NLOS}$ είναι διαδικασίες με μηδενική μέση τιμή, ο προηγούμενος τύπος για την συσχέτιση μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\begin{aligned} R_{pl,qm}(\delta_T, \delta_R, \tau, t) &= E[h_{pl,LoS}(t) + h_{pl,NLoS}(t) h_{qm,LoS}^*(t+\tau) + h_{qm,NLoS}^*(t+\tau)] / \sqrt{\Omega_{pl}\Omega_{qm}} \\ &= h_{pl,LoS}(t) h_{qm,LoS}^*(t+\tau) / \sqrt{\Omega_{pl}\Omega_{qm}} \\ &\quad + h_{pl,LoS}(t) E[h_{qm,NLoS}^*(t+\tau)] / \sqrt{\Omega_{pl}\Omega_{qm}} \\ &\quad + h_{qm,LoS}^*(t+\tau) E[h_{pl,NLoS}(t)] / \sqrt{\Omega_{pl}\Omega_{qm}} \\ &\quad + E[h_{pl,NLoS}(t) h_{qm,NLoS}^*(t+\tau)] / \sqrt{\Omega_{pl}\Omega_{qm}} \\ &= R_{pl,qm}^{LoS}(\delta_T, \delta_R, \tau, t) + R_{pl,qm}^{NLoS}(\delta_T, \delta_R, \tau, t) \end{aligned} \quad (24)$$

όπου $R_{pl}^{LoS}(\delta_T, \delta_R, \tau, t)$ και $R_{pl}^{NLoS}(\delta_T, \delta_R, \tau, t)$ είναι οι συναρτήσεις χωρο-χρονικής συσχέτισης για συνθήκες LOS και NLOS, αντίστοιχα. Με χρήση των

σχέσεων 5 , 18 , 24 η συνάρτηση για τις συνθήκες LOS μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\begin{aligned}
 & R_{pl,qm}^{LoS}(\delta_T, \delta_R, \tau, t) \\
 &= \sqrt{\frac{K_{pl}K_{qm}}{K_{pl}+1} \frac{1}{K_{qm}+1}} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}[d_{p,l}-d_{q,m}]} e^{-j2\pi\tau[f_{T,max}\cos(\pi-\alpha_{LoS}^{Rm}-\gamma_T) + f_{R,max}\cos(\alpha_{LoS}^{Rm}-\gamma_R)]} \\
 &\quad \times e^{j2\pi\tau f_{T,max}[\cos(\pi-\alpha_{LoS}^{Rl}-\gamma_T) - \cos(\pi-\alpha_{LoS}^{Rm}-\gamma_T)]} e^{j2\pi\tau f_{R,max}[\cos(\alpha_{LoS}^{Rl}-\gamma_R) - \cos(\alpha_{LoS}^{Rm}-\gamma_R)]}. \quad (25)
 \end{aligned}$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 7 , 10 , 12 και την προσέγγιση $\alpha_{LoS}^{Rl} = \alpha_{LoS}^{Rm} \approx \pi$, η προηγούμενη σχέση παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\begin{aligned}
 & R_{pl,qm}^{LoS}(\delta_T, \delta_R, \tau, t) \\
 &\approx R_{pl,qm}^{LoS}(\delta_T, \delta_R, \tau) \\
 &= \sqrt{\frac{K_{pl}K_{qm}}{K_{pl}+1} \frac{1}{K_{qm}+1}} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}[q-p\delta_T\cos\theta_T - m-l\delta_R\cos\theta_R\cos\psi_R]} \\
 &\quad \times e^{-j2\pi\tau[f_{T,max}\cos\gamma_T - f_{R,max}\cos\gamma_R]}. \quad (26)
 \end{aligned}$$

Επιπροσθέτως, με χρήση των σχέσεων (16) και (24) η συνάρτηση συσχέτισης για συνθήκες NLOS γράφεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 & R_{pl,qm}^{NLoS}(\delta_T, \delta_R, \tau, t) \\
 &= R_{pl,qm}^{NLoS}(\delta_T, \delta_R, \tau) \\
 &= \frac{1}{\sqrt{(K_{pl}+1)(K_{qm}+1)}} \\
 &\quad \times \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E \left[\left| g^n \right|^2 A_{p,S^n} A_{S^n,l} A_{q,S^n}^* A_{S^n,m}^* e^{-j2\pi\tau(F_{T,NLoS} + F_{R,NLoS})} \right]. \quad (27)
 \end{aligned}$$

Ο αριθμός των σκεδαστών του μοντέλου είναι άπειρος, έτσι οι διακριτές μεταβλητές $a_R^{(n)}$, $H_S^{(n)}$ και $R_S^{(n)}$ που δηλώνουν την γωνία αζιμούθιου, το ύψος του σκεδαστή και την απόσταση του από τον χρήστη, αντίστοιχα, μπορούν να αντικατασταθούν με συνεχείς τυχαίες μεταβλητές a_R, H_S, R_S με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) f_{a_R, R_S, H_S} .

Καθώς οι τρεις προαναφερθείσες μεταβλητές είναι ανεξάρτητες, η pdf μπορεί να χωριστεί σε $f(a_R)f(H_S)f(R_S)$. Κατ' αυτόν τον τρόπο, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (19)-(22) η συνάρτηση συσχέτισης για NLOS μπορεί να γραφεί [14 σ.23]:

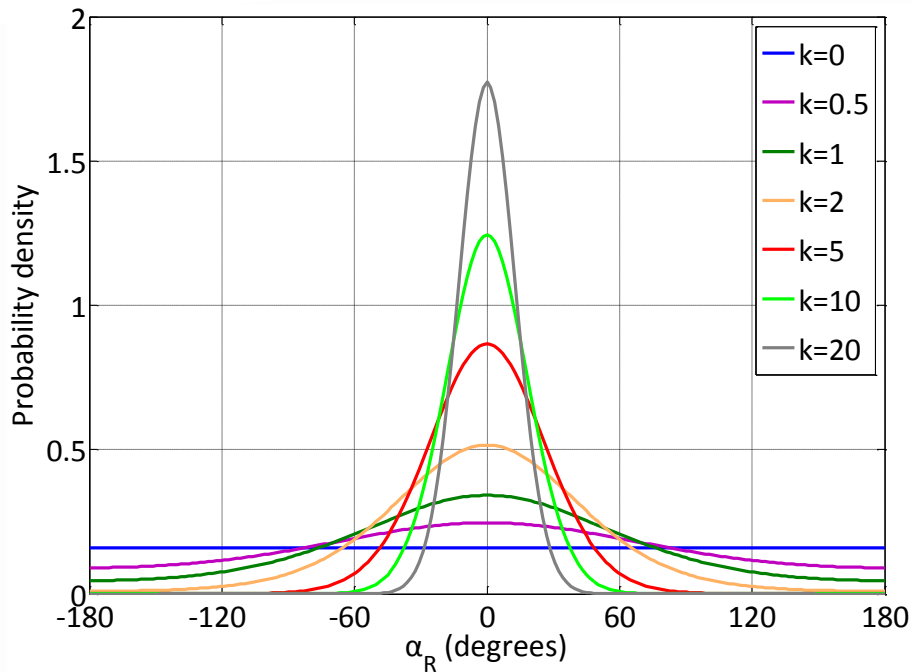
$$\begin{aligned}
 & R_{pl, qm}^{NLOS}(\delta_T, \delta_R, \tau) \\
 &= \frac{1}{\sqrt{K_{pl} + 1} \sqrt{K_{qm} + 1}} \int_0^{H_{S, \max}} \int_0^{R_{S, \max}} \int_{-\pi}^{\pi} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{q-p}{\cos \beta_T} \delta_T \cos \theta_T} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{q-p}{D \cos \beta_T} \delta_T \sin \theta_T R_S \sin a_R} \\
 & \times e^{j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{m-l}{\delta_R \sin \psi_R} \sin[\arctan H_S/R_S]} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{m-l}{\delta_R \sin \theta_R \cos \psi_R} \sin a_R \cos[\arctan H_S/R_S]} \\
 & \times e^{j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{m-l}{\cos \theta_R \cos \psi_R} \cos a_R \cos[\arctan H_S/R_S]} e^{-j 2\pi \tau f_{T, \max} \left(\frac{R_S \sin \gamma_T \sin a_R}{D} + \cos \gamma_T \right)} \\
 & \times e^{-j 2\pi \tau f_{R, \max} \cos a_R - \gamma_R \cos[\arctan H_S/R_S]} f_{a_R} f_{R_S} f_{H_S} da_R dR_S dH_S. \quad (28)
 \end{aligned}$$

Διάφορες πιθανοτικές κατανομές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον χαρακτηρισμό της γωνίας αζιμούθιου του δέκτη, όπως η Von Mises[15], η κανονική[1] και η κατανομή Laplace[5],[16]. Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί η Von Mises επειδή προσεγγίζει πολλές από τις προαναφερθείσες κατανομές και λόγω του ότι έχει εμπειρικά διαπιστωθεί ότι ισχύει σε αστικές και ημιαστικές περιοχές [17]. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της Von Mises είναι η παρακάτω:

$$f_{a_R} = \frac{e^{k \cos a_R - \mu}}{2\pi I_0 k}, \quad -\pi \leq a_R \leq \pi, \quad (29)$$

όπου I_0 είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης πρώτου είδους, μ είναι η μέση γωνία στην οποία οι σκεδαστές είναι κατανομημένοι στο επίπεδο x, y και ο παράγοντας k ελέγχει την τυπική απόκλιση της γωνίας. Αυτή η κατανομή αρχικά δημιουργήθηκε από τον R. Von Mises το 1918, για να μελετήσει τις αποκλίσεις των ατομικών βαρών από τις βασικές τιμές [18] και έχει παίξει κυρίαρχο ρόλο στην στατιστική μοντελοποίηση και ανάλυση γωνιακών μεταβλητών [19 σ.57-68]. Είναι ενδιαφέρον να αναφερθεί ότι η κατανομή αυτή έχει χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα εφαρμογών επικοινωνιών [20], όπως στους αποδιαμορφωτές PLL (Phase Lock Loop) [21] για την αναπαράσταση της φάσης ενός ημιτονικού κύματος σε κανάλι με AWGN (Additive White Gaussian Noise) και υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο [22].

Η εικόνα που φαίνεται παρακάτω δείχνει την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Von Mises, για διαφορετικές τιμές του παράγοντα k και της μέσης τιμής. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι για τιμή του $k=0$, προκύπτει ιστροπική σκέδαση. Με την αύξηση της τιμής του k η σκέδαση γίνεται ολοένα και πιο μη ιστροπική. Για μικρές τιμές του k η κατανομή προσεγγίζει την pdf της κατανομής cariboid [19 σ.60] και είναι παρόμοια με την pdf της κατανομής συνημιτόνου. Για μεγάλες τιμές του k , προσεγγίζεται η κανονική κατανομή [19 σ.60] με μέση τιμή μ και τυπική απόκλιση $1/\sqrt{k}$. Για $k=\infty$ η pdf μετατρέπεται στην συνάρτηση του Dirac ή μοναδιαία κρουστική ώση με τη γωνία αζιμούθιου να είναι ίση με την μέση τιμή, δηλαδή η pdf γίνεται ίση με $f_{a_R} = \delta_{a_R - \mu}$, όπου $\delta()$ είναι η συνάρτηση Dirac.



Εικόνα 6. Pdf της κατανομής Von Mises για διάφορες τιμές του k.

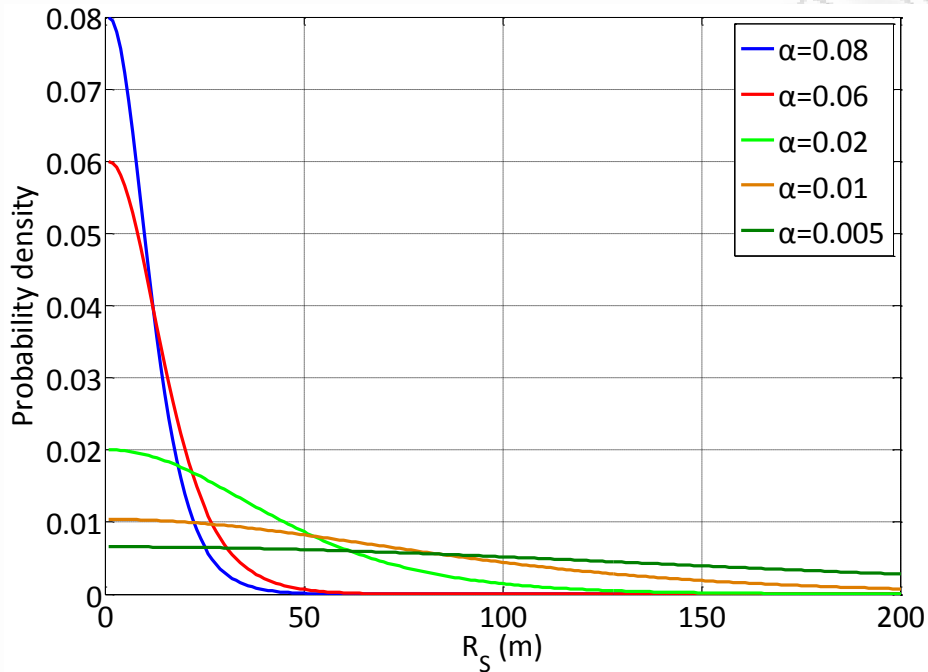
Η απόσταση των σκεδαστών γύρω από τον κινητό σταθμό ακολουθεί την υπερβολική κατανομή [24], η οποία αιτιολογείται εμπειρικά στις αναφορές [25] και [26]. Η εν λόγω κατανομή είναι πιο ρεαλιστική και προσαρμόσιμη από άλλες συνήθως χρησιμοποιούμενες κατανομές, όπως η κατανομή Gauss[6]-[27], γιατί επιτρέπει στους σκεδαστές να έχουν υψηλότερη συγκέντρωση σε περιοχές μεταβλητού μεγέθους κοντά στον χρήστη. Η pdf της υπερβολικής κατανομής, όπως προσδιορίζεται στις [24]-[26] είναι:

$$f_{R_S} = \frac{a}{\tanh aR_{S,\max} \cosh^2 aR_S}, \quad 0 < R_S \leq R_{S,\max}. \quad (30)$$

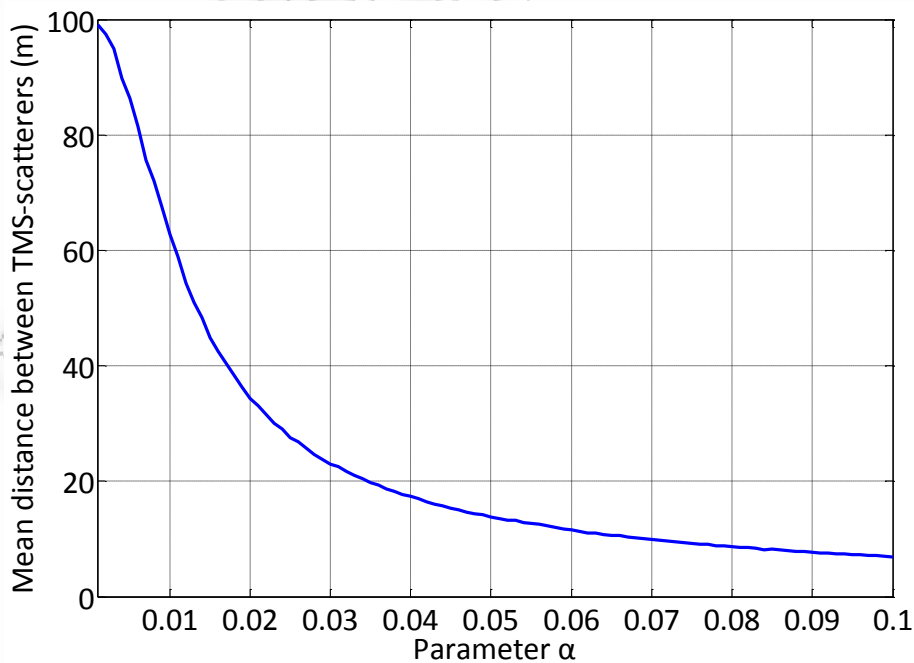
Η παράμετρος a καθορίζει την διασπορά των σκεδαστών γύρω από τον κινητό σταθμό και το εύρος των εφαρμόσιμων τιμών είναι το διάστημα $[0, R_{S,\max}]$.

Οι εικόνες 7 και 8 δείχνουν την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της υπερβολικής κατανομής και την μέση τιμή της απόστασης μεταξύ των σκεδαστών και του χρήστη για διάφορες τιμές του a και για ακτίνα κυλίνδρου ίση με 200 μέτρα. Μπορεί να παρατηρηθεί από τις γραφικές παραστάσεις ότι η μείωση του a , αυξάνει την διασπορά της pdf συναρτήσει της R_S και αυξάνει και την μέση απόσταση μεταξύ

των σκεδαστών και του κινητού τερματικού. Σε ενδεχόμενη αύξηση της γωνίας ανύψωσης του πομπού, οι σκεδαστές αναμένεται να έχουν πιο ευρεία κατανομή, κάτι το οποίο ισοδυναμεί με πιθανή μείωση του α . Ωστόσο, η τιμή της παραμέτρου α μπορεί να προσδιοριστεί και μέσω εκτεταμένων μετρήσεων.



Εικόνα 7.Pdf της υπερβολικής κατανομής για διάφορες τιμές της παραμέτρου α .

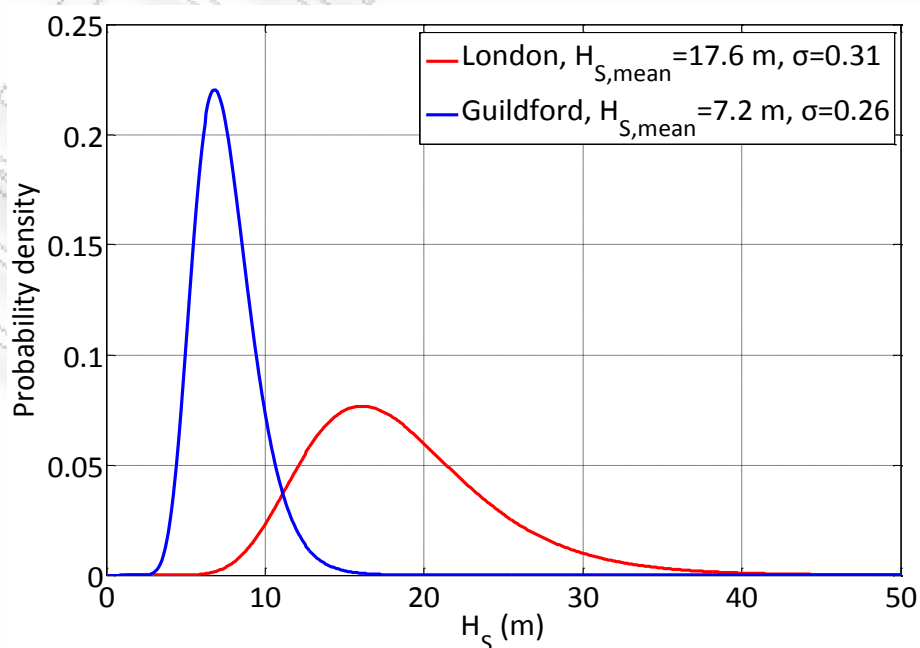


Εικόνα 8. Μέση απόσταση σκεδαστών κινητού σταθμού συναρτήσει της παραμέτρου α .

Το ύψος των κτηρίων που υπάρχουν στο περιβάλλον διάδοσης ακολουθεί είτε την κανονική κατανομή [28], είτε την λογαριθμοκανονική (log-normal) [28]-[30], είτε την κατανομή Rayleigh [31], ανάλογα με την πυκνότητα δόμησης. Πιο συγκεκριμένα, οι προαναφερθείσες κατανομές ταιριάζουν σε δεδομένα μετρήσεων υψών κτηρίων σε μεσαίας και υψηλής πυκνότητας δόμησης ευρωπαϊκές πόλεις. Με σκοπό τον χαρακτηρισμό των υψών των σκεδαστών, χρησιμοποιείται η pdf της λογαριθμοκανονικής κατανομής που ορίζεται ως:

$$f_{H_S} = \frac{e^{-\frac{[\ln H_S - \ln H_{S,\text{mean}}]^2}{2\sigma^2}}}{H_S \sigma \sqrt{2\pi}}, \quad 0 < H_S \leq H_{S,\text{max}}, \quad (31)$$

όπου οι παράμετροι $H_{S,\text{mean}}$ και σ δηλώνουν μέση τιμή και την τυπική απόκλιση του ύψους των κτηρίων αντίστοιχα. Η γραφική παράσταση που ακολουθεί δείχνει την πειραματικά επαληθευμένη λογαριθμοκανονική κατανομή που ακολουθούν τα ύψη των κτηρίων στο Λονδίνο (μια πυκνά δομημένη πόλη) και το Guildford (UK) (μεσαίας πυκνότητας δόμησης πόλη) με μέση τιμή 17,6 μέτρα και τυπική απόκλιση 0,31 για το Λονδίνο και 7,2 μέτρα και 0,26 για το Guildford [28].



Εικόνα 9.Pdf της log-normal κατανομής για το Λονδίνο και το Guildford.

Τέλος, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (28)-(31) και την ισότητα

$$\int_{-\pi}^{\pi} e^{a \sin c + b \cos c} dc = 2\pi I_0 \sqrt{a^2 + b^2} \quad [32 \text{ eq.3.338-4}] \text{ η σχέση (28) παίρνει την μορφή:}$$

$$R_{pl,qm}^{NLoS} \delta_T, \delta_R, \tau = r_1 \int_0^{H_{S,\max}} \int_0^{R_{S,\max}} r_2 I_0 \sqrt{r_3^2 + r_4^2} dR_S dH_S, \quad (32)$$

όπου

$$r_1 = \frac{a \cdot e^{j2\pi \left[\frac{q-p}{\lambda \cos \beta_T} \delta_T \cos \theta_T - \tau f_{T,\max} \cos \gamma_T \right]}}{\sigma \sqrt{2\pi} \tanh a R_{S,\max} I_0 k \sqrt{K_{pl} + 1} K_{qm} + 1}, \quad (33)$$

$$r_2 = \frac{e^{\frac{[\ln H_S - \ln H_{S,\text{mean}}]^2}{2\sigma^2}} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} m-l \delta_R \sin \psi_R \sin [\arctan H_S / R_S]}}{H_S \cosh^2 a R_S}, \quad (34)$$

$$r_3 = j \frac{2\pi}{\lambda D \cos \beta_T} \frac{q-p}{\delta_T \sin \theta_T R_S} - j2\pi \tau f_{T,\max} \sin \gamma_T R_S / D + j2\pi m-l \delta_R \sin \theta_R \cos \psi_R \cos [\arctan H_S / R_S] / \lambda - j2\pi \tau f_{R,\max} \sin \gamma_R \cos [\arctan H_S / R_S] + k \sin \mu, \quad (35)$$

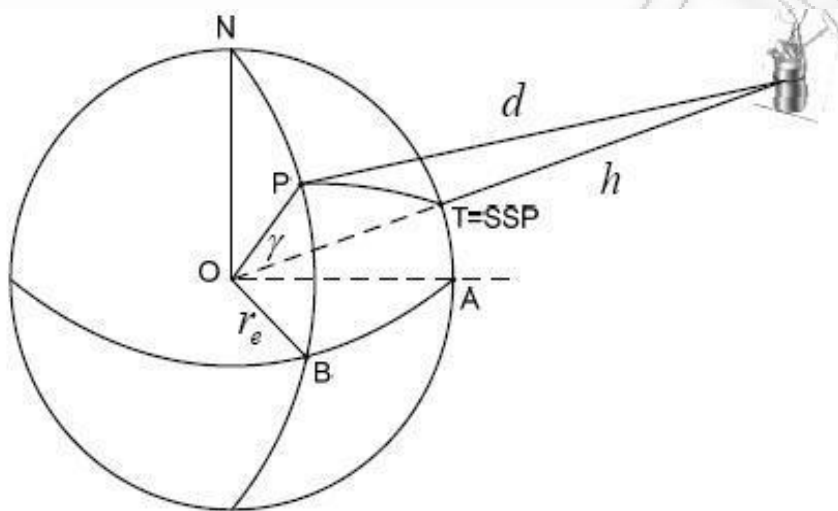
$$r_4 = j2\pi \frac{m-1}{\lambda} \delta_R \cos\theta_R \cos\psi_R \cos\left[\arctan\left(\frac{H_S}{R_S}\right)\right] - j2\pi\tau f_{R,\max} \cos\gamma_R \cos\left[\arctan\left(\frac{H_S}{R_S}\right)\right] + k \cos\mu. \quad (36)$$

Προκειμένου να υπολογιστεί η χωρο-χρονική συσχέτιση για την NLOS συνιστώσα, το ολοκλήρωμα στην σχέση (32) πρέπει να επαληθευτεί αριθμητικά.

Κλείνοντας, η χωρο-χρονική συσχέτιση μεταξύ δύο τυχαίων υποκαναλιών $h_{pl}(t)$ και $h_{qm}(t)$ μετατρέπεται σε ένα άθροισμα των συναρτήσεων ετεροσυσχέτισης για τις LOS και NLOS συνιστώσες όπως ορίστηκαν στις σχέσεις (26) και (32)-(36), αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΣΚΕΔΑΣΤΗ-ΔΟΡΥΦΟΡΟΥ



Εικόνα 10. Απεικόνιση των αποστάσεων και των γωνιών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της απόστασης d .

Η εικόνα 10 δείχνει τις αποστάσεις του δορυφόρου από το κέντρο της Γης και τον σκεδαστή και τις γωνίες που σχηματίζονται μεταξύ τους. Το σημείο P είναι η θέση του σκεδαστή. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, r_e είναι η ακτίνα της Γης, rs είναι το συνολικό μήκος της ευθείας που ενώνει τον δορυφόρο με το κέντρο της Γης, δηλαδή το άθροισμα των αποστάσεων της ακτίνας της Γης και του ύψους του δορυφόρου.

Προκειμένου να καταστεί εφικτός ο υπολογισμός της συσχέτισης μεταξύ δύο τυχαίων υποκαναλιών πρέπει να υπολογιστεί η απόσταση d . Η απόσταση αυτή, όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, δίνεται από την σχέση:

$$d = \sqrt{r_e^2 + r_s^2 - 2r_e r_s \cos \gamma} \quad (37)$$

όπου γ , όπως φαίνεται και στην εικόνα, είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του ευθύγραμμου τμήματος που ενώνει τον δορυφόρο με το κέντρο της Γης και του τμήματος που ενώνει τον σκεδαστή με το κέντρο.

Για να ξεκινήσει η διαδικασία υπολογισμού της απόστασης d πρέπει να υπολογιστεί το συνημίτονο της γωνίας γ . Για να γίνει αυτό, πρέπει να δοθούν τιμές στο γεωγραφικό πλάτος και μήκος του δορυφόρου. Κατόπιν, με γνωστά τα αντίστοιχα μεγέθη για τον επίγειο κινητό σταθμό, υπολογίζεται το σχετικό γεωγραφικό πλάτος και μήκος του δορυφόρου ως προς τον σταθμό.

Πιο αναλυτικά, για τον υπολογισμό του συνημιτόνου της γωνίας γ γίνεται χρήση του παρακάτω τύπου:

$$\cos \gamma = \cos(l_{SSP} - l_s) \cos L_{ES} \quad (38)$$

όπου $l_{SSP} - l_s$ είναι το σχετικό γεωγραφικό μήκος του δορυφόρου ως προς τον κινητό σταθμό και L_{ES} είναι το γεωγραφικό πλάτος του επίγειου σταθμού.

Ο υπολογισμός της γωνίας ανύψωσης του δορυφόρου απαιτεί την εύρεση της τιμής του ημιτόνου της γωνίας γ . Έχοντας την τιμή του συνημιτόνου, χρησιμοποιώντας τον τύπο που ακολουθεί μπορεί να υπολογιστεί αυτή η τιμή:

$$\sin \gamma = \sqrt{1 - \cos^2 \gamma} \quad (39)$$

Έπειτα, το συνημίτονο της γωνίας ανύψωσης δίνεται από τον τύπο που ακολουθεί:

$$\cos \varepsilon = \frac{r_s}{d} \sin \gamma \quad (40)$$

Προκειμένου να υπολογιστεί η απόσταση D για χρήση στον τύπο υπολογισμού της συσχέτισης, γίνεται χρήση του παρακάτω τύπου:

$$dia = 2R(\cos^{-1}(\frac{R}{R+h} \cos \alpha) - \alpha) \quad (41)$$

Για να προκύψουν σωστά αποτελέσματα, είναι αναγκαίο στον παραπάνω τύπο στην θέση της μεταβλητής R να χρησιμοποιηθεί η ακτίνα της Γης, δηλαδή περίπου 6378χιλιόμετρα. Δηλαδή ο τύπος παίρνει αυτήν την μορφή:

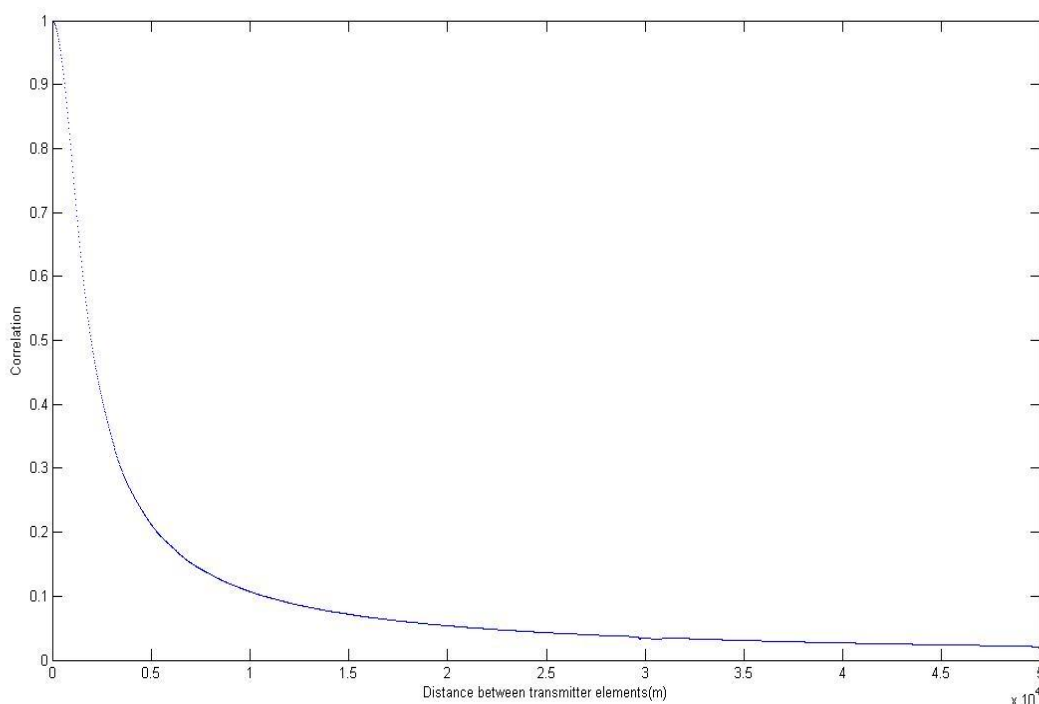
$$D = r_e(\cos^{-1}(\frac{r_e}{r_e+h} \cos \alpha) - \alpha) \quad (42)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Τα αποτελέσματα του παρακάτω πίνακα προέκυψαν από την εκτέλεση του προγράμματος που υπολογίζει την συσχέτιση κάνοντας χρήση της σχέσης (32):

Απόσταση στοιχείων πομπού (σε χλμ.)	Συσχέτιση
0,1	0,9973
0,2	0,9895
0,5	0,9376
1	0,7908
2	0,5199
5	0,2323
10	0,1183
50	0,0228
70	0,0174
100	0,0066
200	0,0036
300	0,0034
500	0,0024



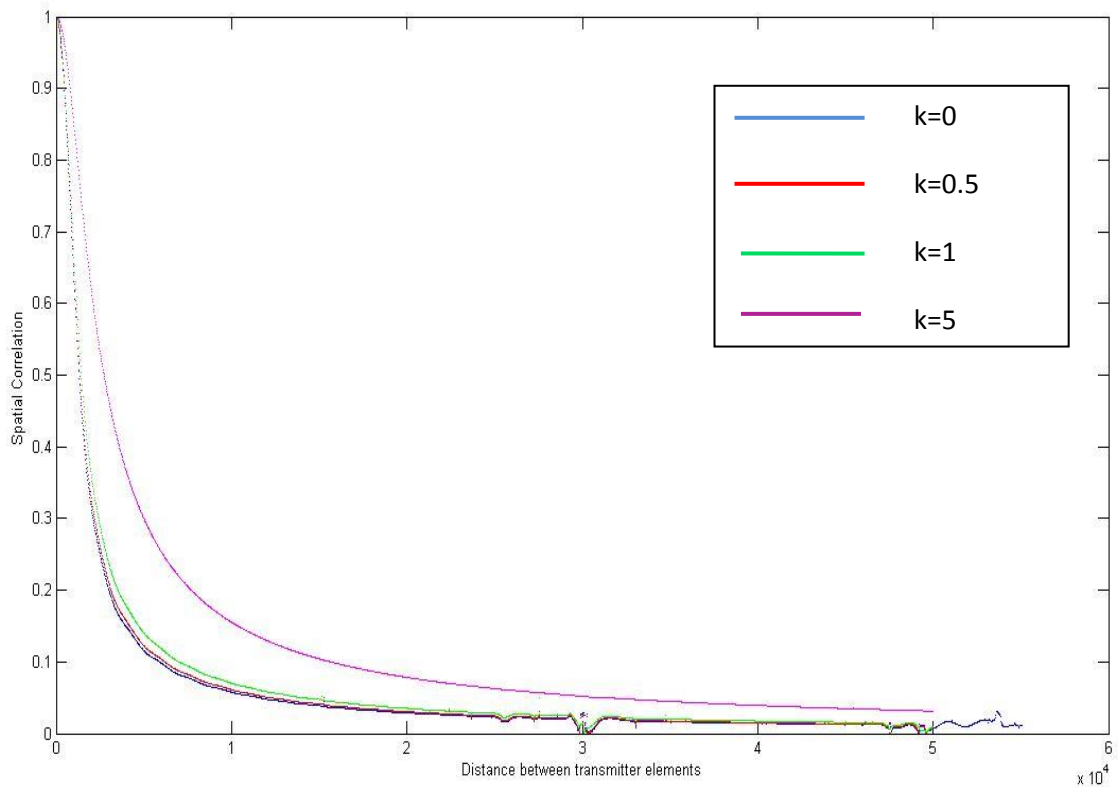
Εικόνα 11. Μεταβολή της συσχέτισης συναρτήσει της απόστασης των στοιχείων του πομπού.

Μετά από πολλές εκτελέσεις του τελευταίου προγράμματος, από τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα, εξάγεται το συμπέρασμα ότι για αποστάσεις ίσες ή μεγαλύτερες των 50 χιλιομέτρων μεταξύ των δορυφόρων, η συσχέτιση παίρνει αποδεκτές τιμές. Κατ' αυτόν τον τρόπο, λόγω της μεγάλης απόστασης που απαιτείται για την αποσυσχέτιση των διαύλων κρίθηκε αναγκαία η παραδοχή ύπαρξης δύο δορυφόρων.

Στην συνέχεια, μελετάται η επίδραση της μεταβολής της τιμής της παραμέτρου k στην συσχέτιση μεταξύ των υποδιαύλων. Ακολουθεί ένας πίνακας με ενδεικτικές τιμές για το k και την συσχέτιση και μετά γίνεται γραφική απεικόνιση του αντίκτυπου της μεταβολής αυτής.

Απόσταση στοιχείων πομπού (σε χλμ.)	k	Συνολική συσχέτιση
0,1	0	0,9951

0,2	0,5	0,9812
0,5	1	0,8995
1	2	0,7373
2	3	0,4924
5	4	0,2365
10	5	0,1294
50	6	0,0273
70	7	0,0204
100	8	0,0148
200	10	0,0077
300	15	0,0052
500	20	0,0031



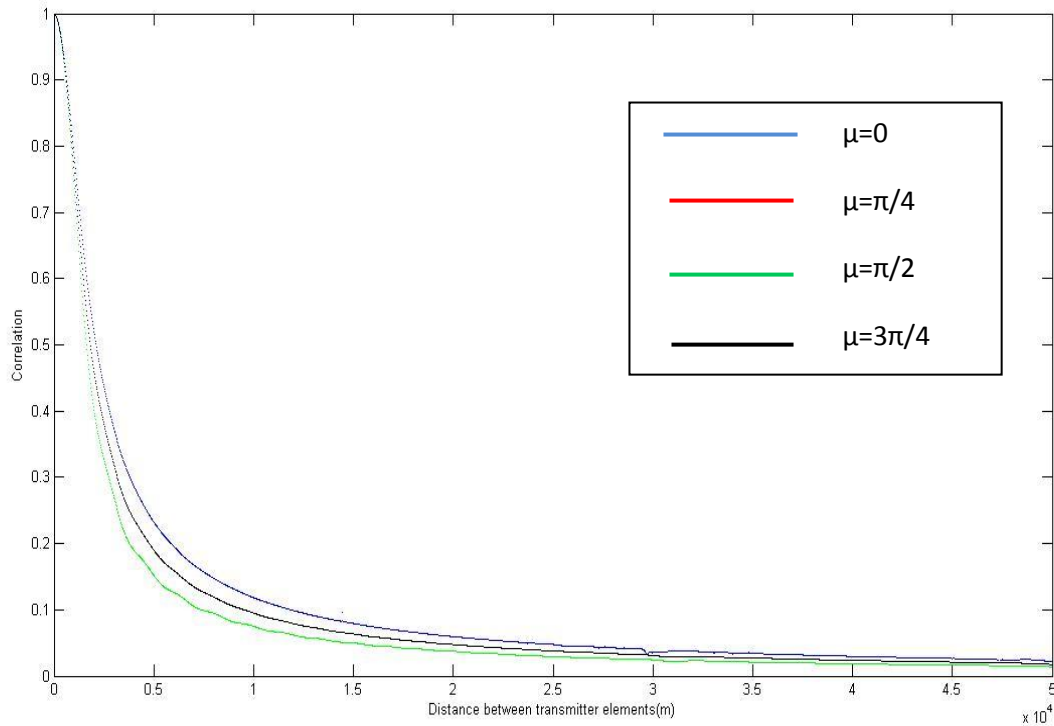
Εικόνα 12. Απεικόνιση της συσχέτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου k.

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η αύξηση της τιμής της παραμέτρου k προκαλεί σημαντική αύξηση της ετεροσυσχέτισης μεταξύ των υποδιαύλων.

Επιπροσθέτως, είναι σημαντικό να μελετηθεί η επιρροή της μεταβολής της μέσης γωνίας αζιμούθιου των σκεδαστών στην συσχέτιση. Ξανά, παρατίθεται ένας πίνακας με ενδεικτικά αποτελέσματα και οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις.

Απόσταση στοιχείων πομπού (σε χλμ.)	Μέση γωνία αζιμούθιου σκεδαστών	Συσχέτιση
0,1	0	0,9973
0,2	$\frac{\pi}{8}$	0,9893
0,5	$\frac{\pi}{6}$	0,9350
1	$\frac{\pi}{4}$	0,7681
2	$\frac{\pi}{3}$	0,4308
5	$\frac{\pi}{2}$	0,1519
10	$\frac{2\pi}{3}$	0,0848
50	$\frac{3\pi}{4}$	0,0162
70	π	0,0174
100	$\frac{7\pi}{6}$	0,0066
200	$\frac{8\pi}{6}$	0,0162
300	$\frac{3\pi}{2}$	0,0025

500	2π	0,0024
-----	--------	--------



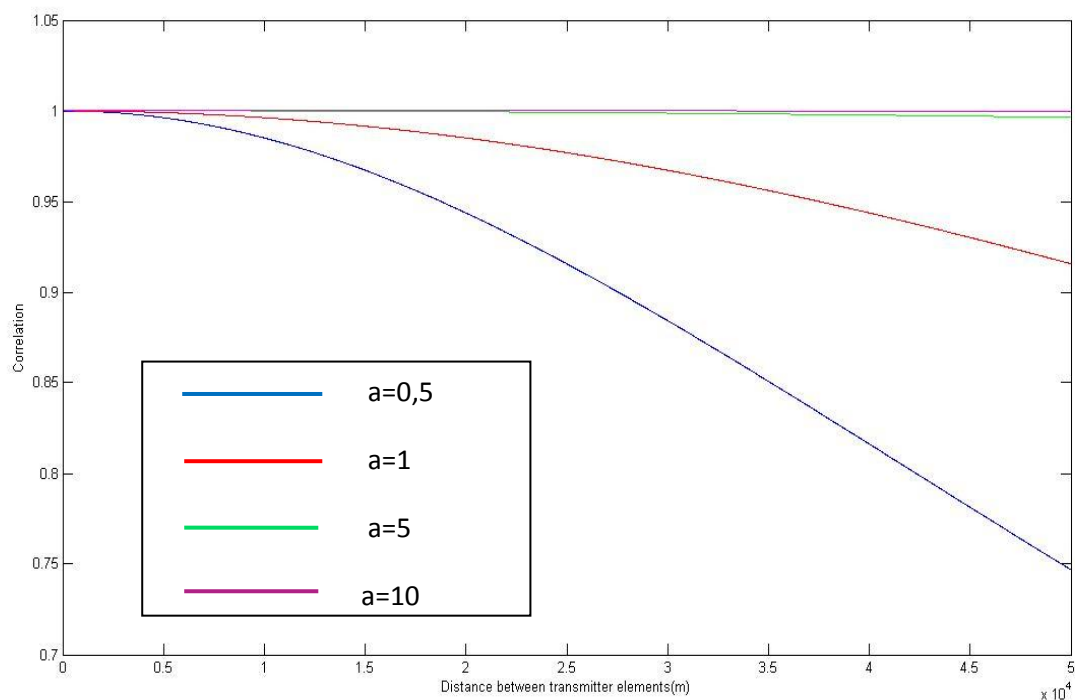
Εικόνα 13. Απεικόνιση της συσχέτισης για διαφορετικές τιμές της μέσης γωνίας των σκεδαστών.

Παρατηρώντας την γραφική παράσταση γίνεται προφανές ότι η αύξηση της μέσης γωνίας των σκεδαστών έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της συσχέτισης μέχρι την γωνία $\frac{\pi}{2}$. Για μεγαλύτερες γωνίες υπάρχει αύξηση της ετεροσυσχέτισης.

Επιπλέον, είναι σκόπιμο να μελετηθεί το πώς επηρεάζεται η συσχέτιση από την τυπική απόκλιση της απόστασης των σκεδαστών από το κινητό τερματικό. Για μια ακόμη φορά, παρατίθενται ένας πίνακας με ενδεικτικά αποτελέσματα και οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις:

Απόσταση στοιχείων πομπού (σε χλμ.)	Παράγοντας α	Συνολική συσχέτιση
-------------------------------------	---------------------	--------------------

0,1	0,1	1
0,2	0,5	1
0,5	1	1
1	2	1
2	5	1,0001
5	10	1,0004
10	15	1,0007
50	20	1,0007
70	25	1,0004
100	30	1,0013
200	35	1,0008
300	40	1,0001
500	50	0,9981



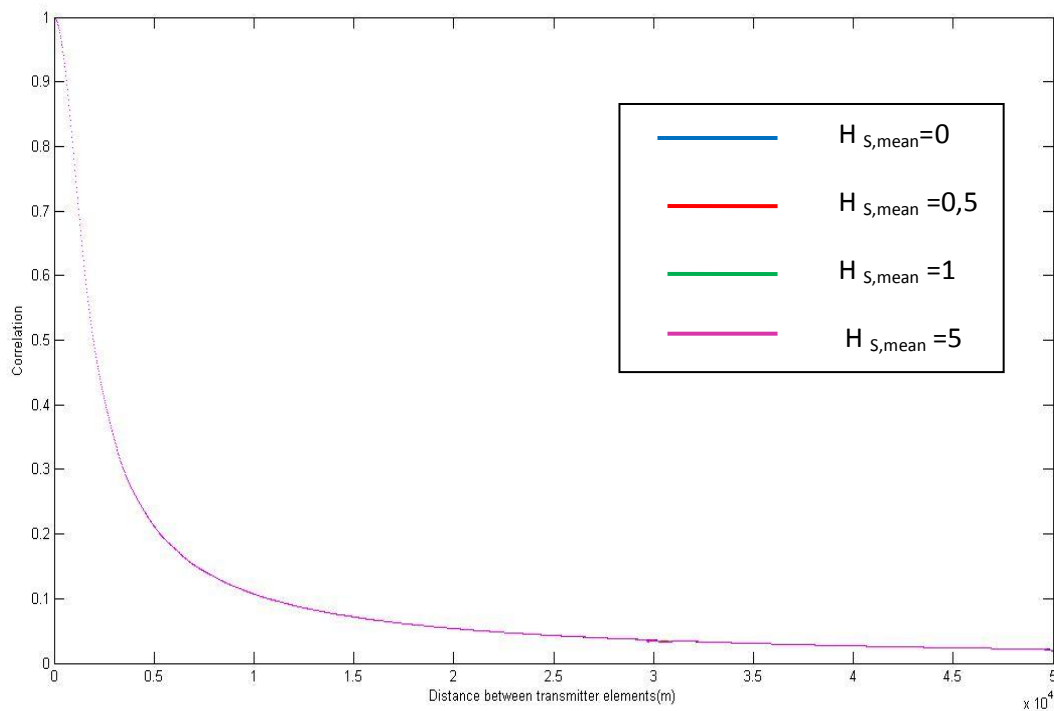
Εικόνα 14. Απεικόνιση της συσχέτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου a .

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι αυξανόμενης της τιμής της παραμέτρου a υπάρχει πολύ μεγάλη αύξηση της απαιτούμενης απόστασης για την αποσυσχέτιση των σημάτων των υποδιαύλων.

Ακολουθεί η μελέτη της επίδρασης της μεταβολής του μέσου ύψους των σκεδαστών στην συσχέτιση του συστήματος:

Απόσταση στοιχείων πομπού (σε χλμ.)	Μέσο ύψος σκεδαστών	Συνολική συσχέτιση
0,1	4	0,9973
0,2	5	0,9891
0,5	6	0,9352

1	7	0,7803
2	8	0,4924
5	9	0,2122
10	10	0,1073
50	15	0,0194
70	20	0,0154
100	25	0,0061
200	30	0,0062
300	40	0,0035
500	50	0,0018

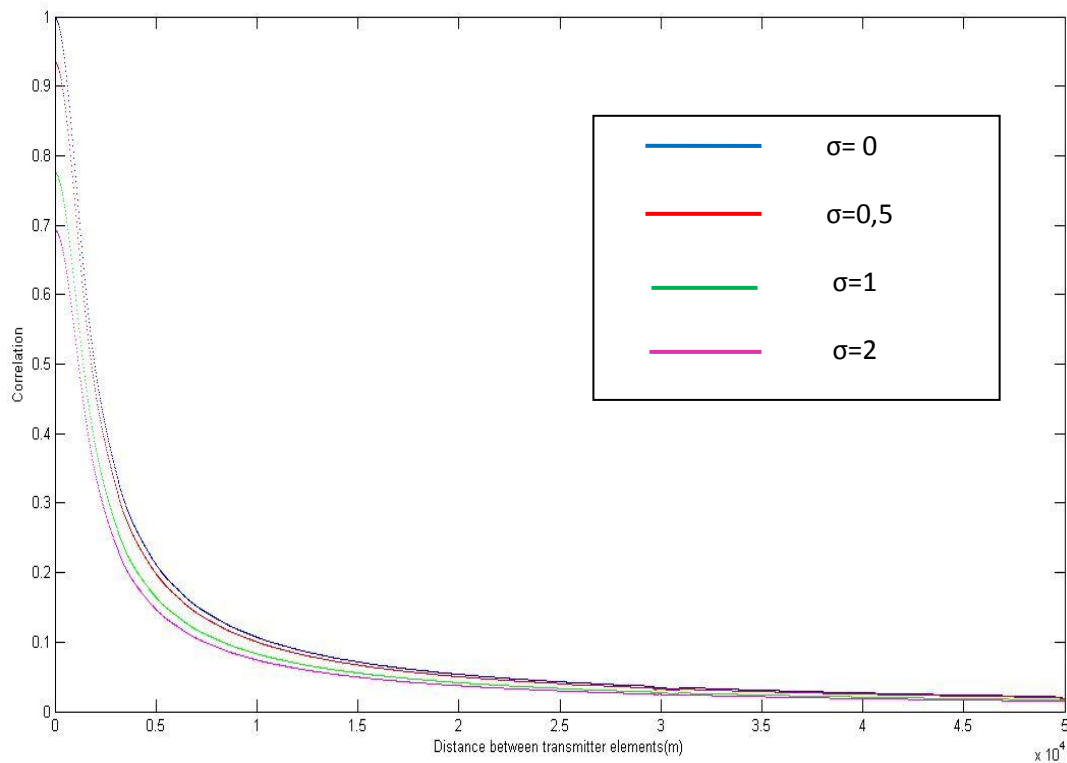


Εικόνα 15. Απεικόνιση της συσχέτισης για διαφορετικές τιμές του μέσου ύψους των σκεδαστών .

Είναι εμφανές από την γραφική παράσταση που προηγήθηκε ότι η συσχέτιση μεταξύ των υποδιαύλων παραμένει αμετάβλητη από την μεταβολή του μέσου ύψους των σκεδαστών στο περιβάλλον διάδοσης.

Στην συνέχεια, αναλύεται ο αντίκτυπος της αλλαγής της τυπικής απόκλισης του ύψους των σκεδαστών στη συσχέτιση:

Απόσταση στοιχείων πομπού (σε χλμ.)	Τυπική απόκλιση ύψους σκεδαστών	Συνολική συσχέτιση
0,1	0,1	0,9973
0,2	0,5	0,9879
0,5	1	0,8744
1	1,5	0,6583
2	2	0,3818
5	5	0,1313
10	8	0,0089
50	10	0,0061
70	15	0,0044
100	20	0,0037
200	30	0,0030
300	40	0,0027
500	50	0,0025



Εικόνα 16. Μεταβολή της συσχέτισης συναρτήσει της τυπικής απόκλισης του ύψους των σκεδαστών.

Από την προηγούμενη γραφική απεικόνιση της συσχέτισης συναρτήσει της τυπικής απόκλισης, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η αύξηση της απόκλισης μειώνει την ετεροσυσχέτιση μεταξύ των υποδιαύλων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΔΟΥΦΟΡΙΚΟΥ

ΜΙΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις έχουν υιοθετηθεί για την προσομοίωση επίγειων καναλιών με διαλείψεις. Μεταξύ αυτών, το άθροισμα των ημιτονοειδών (sum of sinusoids SoS) το οποίο έχει προταθεί από τον Rice [39] είναι ευρέως αποδεκτό ως μια επαρκής βάση για τον σχεδιασμό μοντέλων προσομοίωσης λόγω του μικρού υπολογιστικού κόστους, που απαιτείται για την υλοποίησή τους. Σύμφωνα με αυτήν την παραδοχή, το συνολικό σήμα του καναλιού είναι το άθροισμα μιγαδικών ημιτονοειδών με πλάτος, συχνότητα και φάση που επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα τις επιθυμητές στατιστικές ιδιότητες. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες μοντέλων προσομοίωσης βασισμένων στο άθροισμα ημιτονοειδών που συναντώνται στην βιβλιογραφία. Η πρώτη είναι τα ντετερμινιστικά μοντέλα και η δεύτερη τα στατιστικά. Τα ντετερμινιστικά (εργοδικά στατιστικά) είναι εύκολο να υλοποιηθούν και έχουν μικρούς χρόνους προσομοίωσης, που οδηγούν σε ντετερμινιστικές στατιστικές ιδιότητες για όλες τις προσομοιώσεις. Απεναντίας, τα στατιστικά (Monte Carlo) μοντέλα έχουν τουλάχιστον μια από τις παραμέτρους τους ως τυχαία μεταβλητή για κάθε προσπάθεια προσομοίωσης και οι στατιστικές τους ιδιότητες συγκλίνουν με τις επιθυμητές κατά την στατιστική έννοια, δηλαδή όταν πάρουν την μέση τιμή μετά από έναν συγκεκριμένο αριθμό προσομοιώσεων. Η παρούσα εργασία υλοποιεί δύο 3D μοντέλα βασισμένα σε SoS, ένα στατιστικό και ένα ντετερμινιστικό. Τα θεωρητικά και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατίθενται με σκοπό να επαληθεύσουν την αποδοτικότητα, την αξιοπιστία και την χρησιμότητα του προτεινόμενου μοντέλου. Το μοντέλο που έχει ήδη περιγραφεί στις προηγούμενες παραγράφους υποθέτει άπειρο αριθμό σκεδαστών, κάτι το οποίο δεν αποτελεί ρεαλιστικό σενάριο και κατ' αυτόν τον τρόπο δεν είναι εφικτή η υλοποίηση του με τη βοήθεια υλικού και λογισμικού. Ωστόσο, μπορεί να αποτελέσει μια καλή αρχή για τον σχεδιασμό μοντέλων που περιλαμβάνουν έναν πεπερασμένο αριθμό σκεδαστών που έχουν παρόμοιες στατιστικές ιδιότητες.

Σε αυτήν την παράγραφο θα μελετηθεί ένα μη αποδοτικό (και μη εργοδικό) στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης και στην συνέχεια ένα αποδοτικό στατιστικό .

- 7.1 Στοχαστικό μοντέλο

Μπορούμε απ' ευθείας να δημιουργήσουμε ένα στοχαστικό (μη εργοδικό) μοντέλο προσομοίωσης θεωρώντας έναν πεπερασμένο αριθμό σκεδαστών. Έτσι, η κρουστική απόκριση στον υποδιάυλο p -1 παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\hat{h}_{pl}(t) = h_{pl,LoS}(t) + \hat{h}_{pl,NLoS}(t), \quad (43)$$

Όπου

$$\hat{h}_{pl,NLoS}(t) = \sqrt{\frac{\Omega_{pl}}{K_{pl}+1}} \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} [d_{p,S}^{(n)} + d_{p,l}^{(n)}]} e^{j\varphi^{(n)}} e^{j2\pi t (F_{T,NLoS} + F_{R,NLoS})} \quad (44)$$

είναι η NLOS συνιστώσα της κρουστικής απόκρισης, το σύμβολο $\hat{\cdot}$ υποδεικνύει την στοχαστική φύση του μοντέλου και η LOS συνιστώσα δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$h_{pl,LoS}(t) = \sqrt{\frac{K_{pl}\Omega_{pl}}{K_{pl}+1}} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d_{p,l}} e^{j2\pi t (F_{T,LoS} + F_{R,LoS})}, \quad (45)$$

Οι μεταβλητές $\alpha_R^{(n)}, \mathbf{R}_S^{(n)}, \mathbf{H}_S^{(n)}$, δημιουργούνται βάσει των κατανομών που έχουν περιγραφεί προηγουμένως, ενώ η φάση $\varphi(n)$ δημιουργείται ως τυχαία μεταβλητή ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα $[-\pi, \pi]$. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι είναι ίδιες με αυτές του μοντέλου αναφοράς.

Η αζιμούθια γωνία αναχώρησης των κυμάτων από τον κάθε σκεδαστή προσδιορίζεται με βάση την προαναφερθείσα κατανομή Von Mises και μπορεί να δημιουργηθεί ως εξής:

$$a_R^n = F^{-1} \delta , \quad (46)$$

όπου δ είναι μια τυχαία μεταβλητή ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα $[0,1]$. Η συνάρτηση $F^{-1}(\cdot)$ είναι η αντίστροφη αθροιστική συνάρτηση κατανομής (inverse cumulative distribution function –cdf) της Von Mises. Επιπλέον, η $R_S^{(n)}$ μοντελοποιείται με την υπερβολική κατανομή και δημιουργείται από την παρακάτω σχέση:

$$R_S^n = Y^{-1} \zeta \quad (47)$$

όπου ζ είναι ξανά μια τυχαία μεταβλητή επίσης ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα $[0,1]$. Η συνάρτηση $Y(\cdot)$ υποδηλώνει την αθροιστική συνάρτηση κατανομής της υπερβολικής κατανομής:

$$Y(R_S) = \tanh(aR_S) / \tanh(aR_{S,\max}) . \quad (48)$$

Πιο συγκεκριμένα, η μεταβλητή $R_S^{(n)}$ παράγεται ως ακολούθως:

$$R_S^n = \tanh^{-1} \left(\zeta \tanh(aR_{S,\max}) / a \right) \quad (49)$$

Τελειώνοντας, η $H_S^{(n)}$ μοντελοποιείται κάνοντας χρήση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της λογαριθμοκανονικής κατανομής και παράγεται ως εξής:

$$H_S^n = L^{-1} \xi \quad (50)$$

όπου ξ είναι πάλι μια τυχαία μεταβλητή ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα $[0,1]$. Η συνάρτηση $L(\cdot)$ δείχνει την cdf της log-normal κατανομής, η οποία δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$L H_S = 0.5 \operatorname{erfc} \left[-\ln H_S / H_{S,\text{mean}} / \sigma \sqrt{2} \right] \quad (51)$$

όπου erfc είναι η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος που ορίζεται ως $\operatorname{erfc} x = 2 / \sqrt{\pi} \int_x^\infty e^{-u^2} du$. Προκειμένου να προσομοιωθεί ένα τέτοιο MIMO κανάλι, το προαναφερθέν στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης μπορεί να εφαρμοστεί με την δημιουργία των μεταβλητών $\alpha_R^{(n)}, \mathbf{R}_S^{(n)}, H_S^{(n)}$ και $\varphi(n)$. Παρ' όλα αυτά, εξαιτίας της μεγάλης τυχαιότητας κατά τον υπολογισμό των τεσσάρων παραμέτρων, το μοντέλο δεν περιγράφει με αρκετή ακρίβεια το σύστημα. Έτσι, ο προκαθορισμός των τιμών τους είναι απαραίτητος. Αυτή η διαδικασία καλείται μέθοδος υπολογισμού παραμέτρων. Η κατηγοριοποίηση των μοντέλων προσομοίωσης γίνεται ανάλογα με το αν υπάρχει αυτός ο προκαθορισμός των μεταβλητών, δηλαδή ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι τυχαιότητας στους υπολογισμούς.

- 7.2 Στατιστικό μοντέλο

Τα στατιστικά μοντέλα έχουν τουλάχιστον μια από τις παραμέτρους τους ως τυχαία μεταβλητή για κάθε εκτέλεση προσομοίωσης. Έτσι, οι ιδιότητές τους πρέπει να περιγραφούν με στατιστικές μέσες τιμές. Θεωρούμε N_1 σκεδαστές μη ομοιόμορφα κατανεμημένους σε έναν κυκλικό σχηματισμό τυχαίας ακτίνας γύρω από τον κινητό σταθμό. Επιπλέον, θεωρούμε N_2 σκεδαστές επίσης μη ομοιόμορφα τοποθετημένους σε σχηματισμό γραμμής με μήκος ίσο με την ακτίνα του κυλίνδρου και N_3 σκεδαστές σε σχηματισμό γραμμής μήκους $H_{S,\text{MAX}}$. Κατ' αυτόν τον τρόπο, $N=N_1N_2N_3$ είναι ο συνολικός αριθμός των διακριτών μη ομοιόμορφα κατανεμημένων σκεδαστών. Ο τύπος που ακολουθεί δίνει την κρουστική απόκριση του υποκαναλιού p-l:

$$\hat{h}'_{pl} t = h_{pl,LoS} t + \hat{h}'_{pl,NLoS} t, \quad (52)$$

όπου

$$\hat{h}'_{pl,NLoS} t = \sqrt{\frac{\Omega_{pl}}{K_{pl}+1}} \frac{1}{\sqrt{N_1 N_2 N_3}} \sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} \sum_{n_3=1}^{N_3} e^{j\varphi^{n_1, n_2, n_3}} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} [d' p, S^{n_1} + d' S^{n_2}, l]} e^{j2\pi t (F'_{T,NLoS} + F'_{R,NLoS})} \quad (53)$$

είναι η NLOS συνιστώσα της απόκρισης, $n_1 \in 1, N_1$, $n_2 \in 1, N_2$, και $n_3 \in 1, N_3$.

Οι υπόλοιπες παράμετροι του τύπου υπολογίζονται ως εξής:

$$d(p, S^{(n)}) \approx d = \sqrt{r_e^2 + r_s^2 - 2r_e r_s \cos \gamma} \quad (54)$$

$$d' S^{n_1}, l \approx R_S^{n_2} / \cos \left[\arctan H_S^{n_3} / R_S^{n_2} \right] - D_{R_1} \cos \alpha_R^{n_1} \cos \left[\arctan H_S^{n_3} / R_S^{n_2} \right] - D_{R_2} \sin \left[\arctan H_S^{n_3} / R_S^{n_2} \right] - D_{R_3} \sin \alpha_R^{n_1} \cos \left[\arctan H_S^{n_3} / R_S^{n_2} \right], \quad (55)$$

$$F'_{T,NLoS} = f_{T,\max} R_S^{n_2} \sin \gamma_T \sin \alpha_R^{n_1} / D + \cos \gamma_T, \quad (56)$$

$$F'_{R,NLoS} = f_{R,\max} \cos \alpha_R^{n_1} - \gamma_R \cos \left[\arctan H_S^{n_3} / R_S^{n_2} \right]. \quad (57)$$

Με την προϋπόθεση ότι χρησιμοποιείται ένας επαρκώς μεγάλος αριθμός σκεδαστών, η κρουστική απόκριση για την NLOS συνιστώσα προσεγγίζει μια βαθυπερατή μιγαδική Gaussian διαδικασία με μηδενική μέση τιμή. Έτσι η χωροχρονική συσχέτιση μεταξύ των δύο υποδιαύλων, παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\hat{R}'_{pl,qm} \delta_T, \delta_R, \tau = R_{pl,qm}^{LoS} \delta_T, \delta_R, \tau + \hat{R}'_{pl,qm}^{NLoS} \delta_T, \delta_R, \tau, \quad (58)$$

Όπου

$$\begin{aligned}
\hat{R}_{pl,qm}^{NLoS} \delta_T, \delta_R, \tau &:= E \left[\hat{h}'_{pl,NLoS}(t) \hat{h}'_{qm,NLoS}^*(t+\tau) \right] / \sqrt{\Omega_{pl} \Omega_{qm}} \\
&\approx \frac{1}{\sqrt{K_{pl}+1} K_{qm}+1}} \frac{1}{N_1 N_2 N_3} \sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} \sum_{n_3=1}^{N_3} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{q-p}{\cos \beta_T} \delta_T \cos \theta_T} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{q-p}{\cos \beta_T} \delta_T \sin \theta_T R_S^{n_2} \sin a_R^{n_1}} \\
&\times e^{\frac{j2\pi}{\lambda} \frac{m-l}{\lambda} \delta_R \sin \psi_R \sin \left[\arctan \left(H_S^{n_3} / R_S^{n_2} \right) \right]} e^{\frac{j2\pi}{\lambda} \frac{m-l}{\lambda} \delta_R \cos \theta_R \cos \psi_R \cos a_R^{n_1} \cos \left[\arctan \left(H_S^{n_3} / R_S^{n_2} \right) \right]} \\
&\times e^{\frac{j2\pi}{\lambda} \frac{m-l}{\lambda} \delta_R \sin \theta_R \cos \psi_R \sin a_R^{n_1} \cos \left[\arctan \left(H_S^{n_3} / R_S^{n_2} \right) \right]} e^{-j2\pi \tau (F_{T,NLoS}' + F_{R,NLoS}')}. \quad (59)
\end{aligned}$$

Από την τελευταία σχέση είναι φανερό ότι οι παράμετροι $a_R^{n_1}$, $R_S^{n_2}$, $H_S^{n_3}$ για τις παραμέτρους $a_R^{n_1}$, $R_S^{n_2}$, και $H_S^{n_3}$ του μοντέλου προσομοίωσης πρέπει να προσδιοριστούν, κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την καλή προσέγγιση των στατιστικών ιδιοτήτων του μοντέλου αναφοράς. Παρ' όλα αυτά, δεν θα εφαρμόσουμε καμία μέθοδο υπολογισμού παραμέτρων για τις φάσεις, καθώς η συνάρτηση συσχέτισης δεν εξαρτάται από αυτές. Κατόπιν, δημιουργούμε τις τρεις τελευταίες παραμέτρους ως τυχαίες μεταβλητές βάσει των παρακάτω τύπων:

$$a_R^{n_1} = F^{-1} \left(\frac{n_1 + \delta - 1}{N_1} \right) \quad (60)$$

$$R_S^{n_2} = Y^{-1} \left(\frac{n_2 + \zeta - 1}{N_2} \right) \quad (61)$$

$$H_S^{n_3} = L^{-1} \left(\frac{n_3 + \xi - 1}{N_3} \right) \quad (62)$$

Όπου δ , ζ και ξ είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές ομοιόμορφα κατανομημένες στο διάστημα $[0,1]$. Παρόλο που οι στατιστικές ιδιότητες διαφέρουν

σε κάθε προσομοίωση, υπάρχει σύγκλιση με τις στατιστικές ιδιότητες του μοντέλου αναφοράς μετά από έναν μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων, για τυχαίο αριθμό σκεδαστών. Η συνάρτηση συσχέτισης που σχετίζεται με το προτεινόμενο στατιστικό μοντέλο προσομοίωσης είναι η παρακάτω:

$$\bar{R}_{pl,qm} \delta_T, \delta_R, \tau = \frac{1}{N_{trials}} \sum_{n_{trials}=1}^{N_{trials}} \hat{R}'_{pl,qm} \delta_T, \delta_R, \tau \quad (63)$$

για $n=1, \dots, N_{trials}$, όπου N_{trials} είναι ο αριθμός των προσομοιώσεων και το σύμβολο ‘-’ δείχνει την μέση τιμή. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι η πολυπλοκότητα του στατιστικού μοντέλου προσομοίωσης ελέγχεται από τα N_1, N_2, N_3 και N_{trials} . Συνεπώς, πρέπει οι τιμές των N_1, N_2, N_3 να αποφασιστούν προσεκτικά με σκοπό να περιοριστεί κατά το δυνατόν ο αριθμός των προσομοιώσεων που απαιτούνται έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση τιμών.

- 7.3. Ντετερμινιστικό μοντέλο

Αυτή η κατηγορία μοντέλων προσομοίωσης διαφέρει από τις προαναφερθείσες στο ότι δεν περιλαμβάνει καμιάς μορφής τυχαιότητα. Οι υπόλοιπες παραδοχές του θεωρητικού και των δύο επόμενων μοντέλων ισχύουν και στην προκειμένη κατηγορία. Προκειμένου να εξαλειφθεί η τυχαιότητα από αυτό το μοντέλο είναι απαραίτητη η απόδοση σταθερών τιμών στις μεταβλητές δ, ξ και ζ καθώς μόνο αυτές εισάγουν τον παράγοντα τυχαιότητας στο στοχαστικό και το στατιστικό μοντέλο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Σ' αυτό το κεφάλαιο, αξιολογείται η απόδοση του στατιστικού και του ντετερμινιστικού μοντέλου που έχουν αναπτυχθεί. Οι τιμές που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό των γραφικών παραστάσεων που ακολουθούν στην συνέχεια, είναι οι παρακάτω: $K = 2dB$, $H_T = 35786km$, $\theta_T = \frac{\pi}{2}$, $\theta_R = \frac{\pi}{2}$, $\psi_R = 0$, $n_T = n_R = 2$, $\gamma_R = \frac{\pi}{3}$, $H_{S,MAX} = 80m$, $R_{S,MAX} = 200m$, $\alpha = 0,01$, $\mu = 0,5$, $\sigma = 0,13$, $k = 3$, $\beta_T = \frac{2\pi}{7}$ και $f_{R,MAX} = 100Hz$. Η πρώτη γραφική παράσταση απεικονίζει την χρονική συνάρτηση συσχέτισης TCF (Temporal Correlation Function), δηλαδή την συσχέτιση για μηδενικές αποστάσεις των κεραιοστοιχείων στα δύο τερματικά σημεία της ζεύξης για το μοντέλο αναφοράς και για το στατιστικό μοντέλο. Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν μετά την πραγματοποίηση 27 προσομοιώσεων. Η παράμετρος root mean square error (RMSE), που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας του μοντέλου, υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$e_{RMSE,TCF} = \sqrt{E \left[\left| \bar{R}_{pl,qm} \tau - R_{pl,qm} \tau \right|^2 \right]} \quad (64)$$

ενώ η μέγιστη απόκλιση ισούται με:

$$dev_{max,TCF} = \max \left| \bar{R}_{pl,qm} \tau - R_{pl,qm} \tau \right| \quad (65)$$

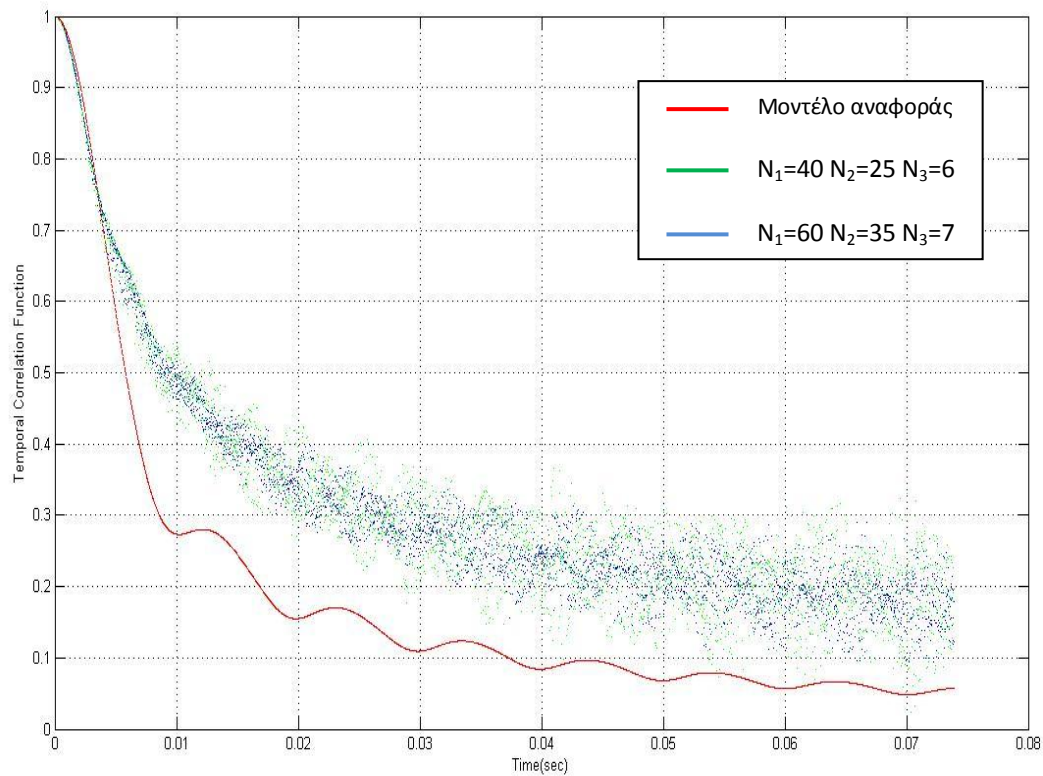
Από τον πίνακα που παρατίθεται στην συνέχεια μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η απόδοση του μοντέλου βελτιώνεται σε μεγάλο βαθμό με την αύξηση του αριθμού

των σκεδαστών. Κάτι τέτοιο έχει αρνητική επίδραση στην ανάλυση, καθώς αυξάνει την πολυπλοκότητα του μοντέλου. Οι χρησιμοποιούμενες τιμές για τις μεταβλητές N_1, N_2 και N_3 είναι 42, 21 και 5 αντίστοιχα, καθώς γι' αυτές τις τιμές υπάρχει καλή προσέγγιση του μοντέλου αναφοράς.

RMSE και μέγιστη απόκλιση στατιστικού μοντέλου

Αριθμός προσομοιώσεων	Temporal Correlation		Spatial Correlation	
	$e_{RMSE,TCF}$	$dev_{MAX,TCF}$	$e_{RMSE,SCF}$	$dev_{MAX,SCF}$
10	$7,8 \cdot 10^{-3}$	$16,9 \cdot 10^{-3}$	$6,1 \cdot 10^{-3}$	$14,8 \cdot 10^{-3}$
20	$6,2 \cdot 10^{-3}$	$13,9 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \cdot 10^{-3}$
30	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$12,4 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-3}$
40	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$11,3 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-3}$
50	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$10,2 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-3}$
60	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$9,6 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$
70	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$
80	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$
90	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$
100	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$

Η TCF του μοντέλου αναφοράς εμφανίζεται με την κόκκινη γραμμή, ενώ του στατιστικού με τα μπλε και πράσινα σημεία. Γίνεται χρήση δύο διαφορετικών συνδυασμών τιμών για τις μεταβλητές N_1, N_2 και N_3 προκειμένου να καταστεί εμφανής η διαφορά στην συσχέτιση από την χρήση διαφορετικού αριθμού σκεδαστών. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, τα μπλε σημεία έχουν υπολογιστεί για $N_1=60$, $N_2=35$ και $N_3=7$, ενώ τα πράσινα για $N_1=40$, $N_2=25$ και $N_3=6$.



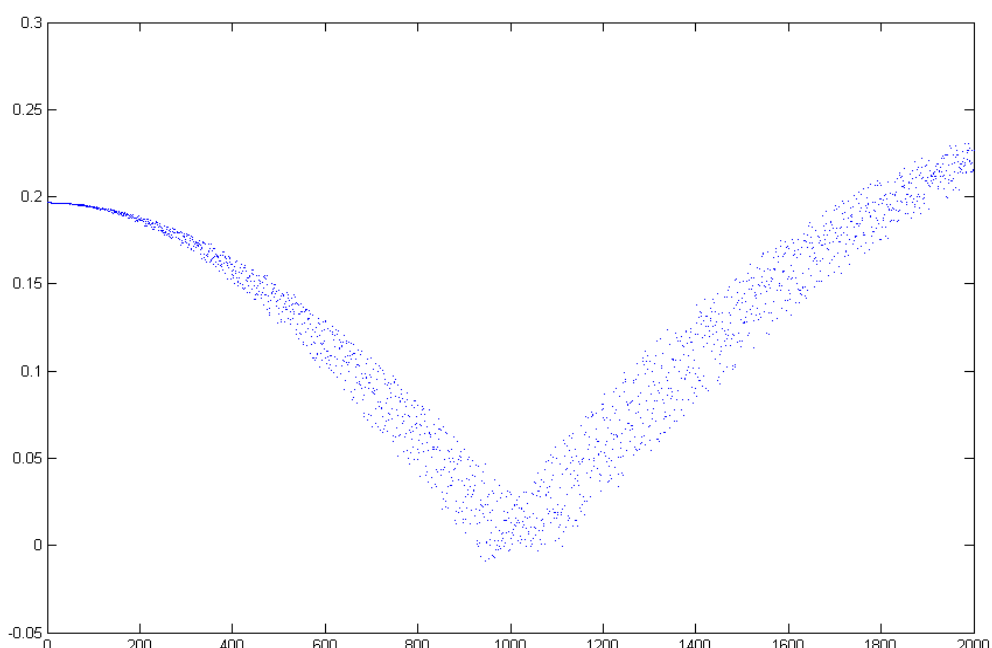
Εικόνα 17. TCF των μοντέλων αναφοράς και στατιστικού.

Το επόμενο βήμα είναι η απεικόνιση της διαφοράς του σφάλματος της χωρικής συσχέτισης (Spatial Correlation Function-SCF) μεταξύ του θεωρητικού και του στατιστικού μοντέλου. Οι εικόνες που παρατίθενται δείχνουν πως επηρεάζεται η διαφορά του απόλυτου σφάλματος συσχέτισης από την απόσταση μεταξύ των στοιχείων του πομπού και του δέκτη. Το σφάλμα αυτό δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$e_{SCF} = \left| \overline{R}_{pl,qm}(\delta_T, \delta_R) - R_{pl,qm}(\delta_T, \delta_R) \right| \quad (66)$$

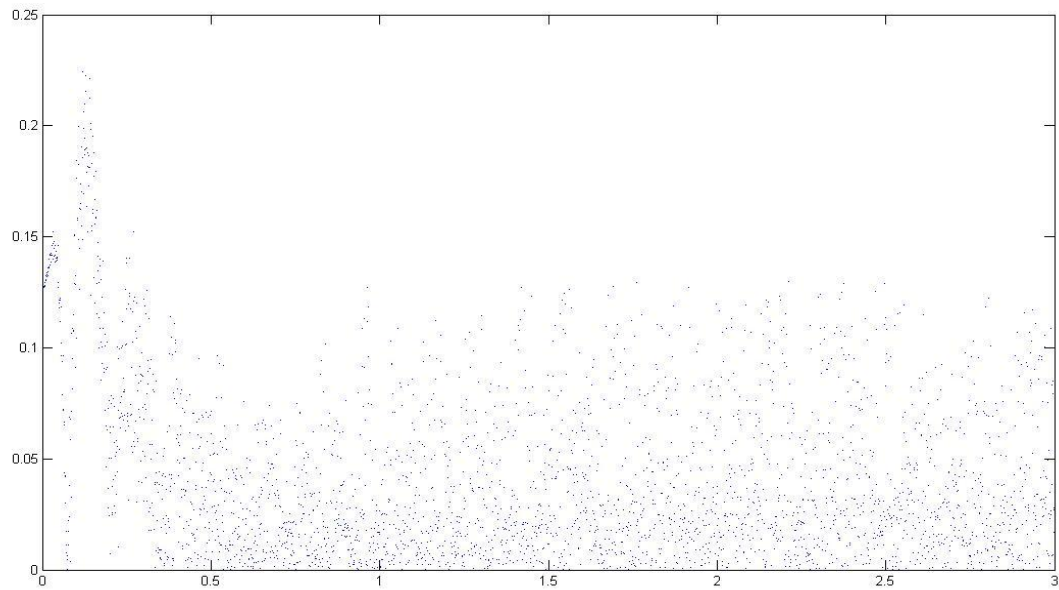
όπου $\bar{R}_{pl,qm}(\delta_T, \delta_R)$ και $R_{pl,qm}(\delta_T, \delta_R)$ υποδηλώνουν τις TCF των μοντέλων αναφοράς και στατιστικού, αντίστοιχα.

Στην συνέχεια, απεικονίζεται η γραφική παράσταση της διαφοράς του σφάλματος συσχέτισης του στατιστικού μοντέλου με αυτήν του μοντέλου αναφοράς για διαφορετικές αποστάσεις των στοιχείων του πομπού. Ξανά, ο άξονας x απεικονίζει τις αποστάσεις των στοιχείων πομπού, ενώ ο άξονας y έχει τις τιμές της διαφοράς του απόλυτου σφάλματος.



Εικόνα 18. Διαφορά σφάλματος συσχέτισης στατιστικού και θεωρητικού μοντέλου για μεταβολή της απόστασης των στοιχείων του πομπού.

Ακολουθεί η γραφική παράσταση που απεικονίζει τον αντίκτυπο της μεταβολής της απόστασης των στοιχείων του δέκτη στην διαφορά του απόλυτου σφάλματος συσχέτισης του θεωρητικού και του στατιστικού μοντέλου.



Εικόνα 19. Διαφορά σφάλματος συσχέτισης στατιστικού και θεωρητικού μοντέλου για μεταβολή της απόστασης των στοιχείων του δέκτη.

Η μορφή των δύο τελευταίων γραφικών παραστάσεων είναι τέτοια λόγω της τυχαιότητας των τιμών των μεταβλητών δ , ξ και ζ , που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των παραμέτρων $a_R^{n_1}$, $R_S^{n_2}$ και $H_S^{n_3}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η επιτυχής δημιουργία ενός ντετερμινιστικού μοντέλου, όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, απαιτεί την εξάλειψη κάθε μορφής τυχαιότητας από τους υπολογισμούς. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι τυχαίες μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στα προαναφερθέντα μοντέλα προσομοίωσης πρέπει να αντικατασταθούν από σταθερές τιμές. Ο κώδικας για τον υπολογισμό της συσχέτισης για συνθήκες NLOS διαφέρει από αυτόν του προηγούμενου μοντέλου στην απόδοση σταθερών τιμών στις μεταβλητές ζ, δ και ξ.

Παρατηρώντας τους πίνακες που ακολουθούν μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι η αύξηση του αριθμού των σκεδαστών μειώνει σημαντικά το RMSE και την μέγιστη απόκλιση από την μέση τιμή. Αυτή η αύξηση, βέβαια, έχει ως αποτέλεσμα και την αύξηση της πολυπλοκότητας του μοντέλου, γεγονός ανεπιθύμητο για την ανάλυση. Οι τιμές που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση είναι της τάξης $N_1=42$, $N_2=21$ και $N_3=5$. Από τα αποτελέσματα, η τιμή του σφάλματος είναι περίπου $17,6 \cdot 10^{-3}$ ενώ η τιμή της μέγιστης απόκλισης είναι $26,5 \cdot 10^{-3}$.

RMSE και μέγιστη απόκλιση χωρικής συσχέτισης ντετερμινιστικού μοντέλου

Αριθμός	N_1	N_2	N_3
---------	-------	-------	-------

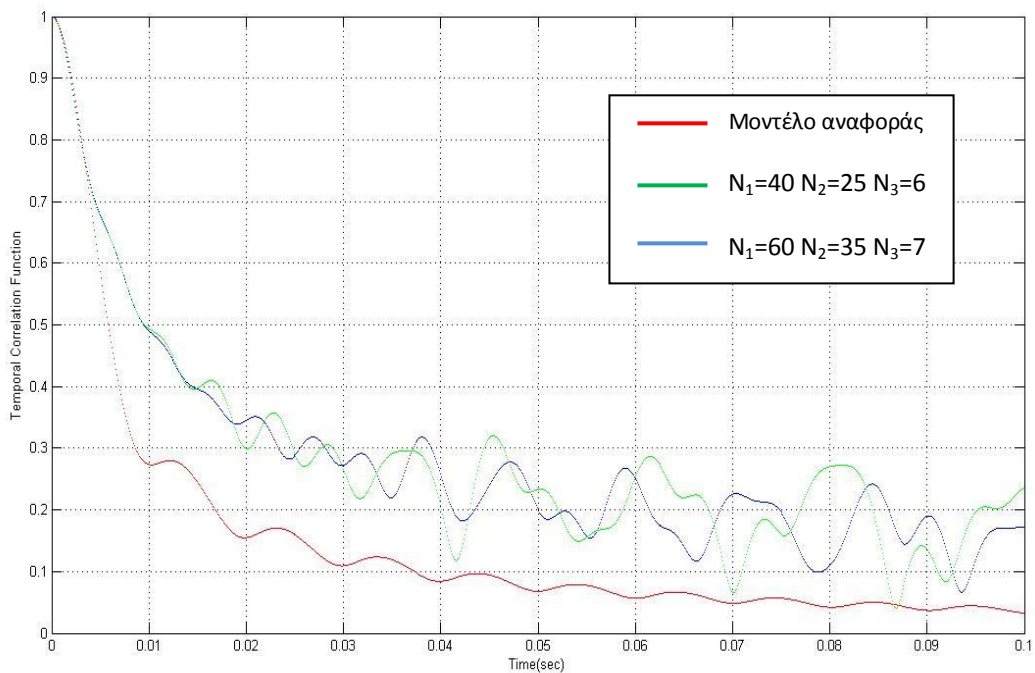
σκεδαστών	$e_{RMSE,SCF}$	$dev_{MAX,SCF}$	$e_{RMSE,SCF}$	$dev_{MAX,SCF}$	$e_{RMSE,SCF}$	$dev_{MAX,SCF}$
1	$5,55 \cdot 10^{-17}$	$1,11 \cdot 10^{-16}$	$5,55 \cdot 10^{-17}$	$1,11 \cdot 10^{-16}$	$5,55 \cdot 10^{-17}$	$1,11 \cdot 10^{-16}$
2	$1048 \cdot 10^{-4}$	$1756 \cdot 10^{-4}$	$14 \cdot 10^{-4}$	$27 \cdot 10^{-4}$	$8,66 \cdot 10^{-6}$	$1,64 \cdot 10^{-5}$
3	$805 \cdot 10^{-4}$	$1260 \cdot 10^{-4}$	$68 \cdot 10^{-4}$	$129 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^{-5}$	$1,99 \cdot 10^{-5}$
4	$644 \cdot 10^{-4}$	$998 \cdot 10^{-4}$	$180 \cdot 10^{-4}$	$336 \cdot 10^{-4}$	$1,11 \cdot 10^{-5}$	$2,11 \cdot 10^{-5}$
5	$581 \cdot 10^{-4}$	$804 \cdot 10^{-4}$	$329 \cdot 10^{-4}$	$578 \cdot 10^{-4}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$	$2,14 \cdot 10^{-5}$
6	$573 \cdot 10^{-4}$	$567 \cdot 10^{-4}$	$407 \cdot 10^{-4}$	$563 \cdot 10^{-4}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$	$2,15 \cdot 10^{-5}$
7	$548 \cdot 10^{-4}$	$678 \cdot 10^{-4}$	$335 \cdot 10^{-4}$	$367 \cdot 10^{-4}$	$1,133 \cdot 10^{-5}$	$2,15 \cdot 10^{-5}$
8	$467 \cdot 10^{-4}$	$924 \cdot 10^{-4}$	$271 \cdot 10^{-4}$	$368 \cdot 10^{-4}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$	$2,14 \cdot 10^{-5}$
9	$496 \cdot 10^{-4}$	$650 \cdot 10^{-4}$	$232 \cdot 10^{-4}$	$356 \cdot 10^{-4}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$	$2,12 \cdot 10^{-5}$
10	$402 \cdot 10^{-4}$	$730 \cdot 10^{-4}$	$232 \cdot 10^{-4}$	$406 \cdot 10^{-4}$	$1,11 \cdot 10^{-5}$	$2,11 \cdot 10^{-5}$
15	$326 \cdot 10^{-4}$	$591 \cdot 10^{-4}$	$245 \cdot 10^{-4}$	$409 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-5}$	$2,05 \cdot 10^{-5}$
20	$377 \cdot 10^{-4}$	$471 \cdot 10^{-4}$	$188 \cdot 10^{-4}$	$259 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-5}$	$2,01 \cdot 10^{-5}$
30	$249 \cdot 10^{-4}$	$284 \cdot 10^{-4}$	$167 \cdot 10^{-4}$	$122 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$1,95 \cdot 10^{-5}$
40	$301 \cdot 10^{-4}$	$391 \cdot 10^{-4}$	$198 \cdot 10^{-4}$	$426 \cdot 10^{-4}$	10^{-5}	$1,95 \cdot 10^{-5}$
50	$182 \cdot 10^{-4}$	$298 \cdot 10^{-4}$	$150 \cdot 10^{-4}$	$167 \cdot 10^{-4}$	$9,94 \cdot 10^{-6}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$
60	$147 \cdot 10^{-4}$	$184 \cdot 10^{-4}$	$178 \cdot 10^{-4}$	$290 \cdot 10^{-4}$	$9,84 \cdot 10^{-6}$	$1,86 \cdot 10^{-5}$
80	$191 \cdot 10^{-4}$	$277 \cdot 10^{-4}$	$153 \cdot 10^{-4}$	$187 \cdot 10^{-4}$	$9,7 \cdot 10^{-6}$	$1,84 \cdot 10^{-5}$

RMSE και μέγιστη απόκλιση χρονικής συσχέτισης ντετερμινιστικού μοντέλου

Αριθμός σκεδαστών	N ₁		N ₂		N ₃	
	$e_{RMSE,TCF}$	$dev_{MAX,TCF}$	$e_{RMSE,TCF}$	$dev_{MAX,TCF}$	$e_{RMSE,TCF}$	$dev_{MAX,TCF}$
1	$1,08 \cdot 10^{-16}$	$2,22 \cdot 10^{-16}$	$1,08 \cdot 10^{-16}$	$2,22 \cdot 10^{-16}$	$1,08 \cdot 10^{-16}$	$2,22 \cdot 10^{-16}$
2	$102,6 \cdot 10^{-3}$	$212,3 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$	$15,9 \cdot 10^{-3}$	$4,64 \cdot 10^{-5}$	$1,03 \cdot 10^{-4}$
3	$80,3 \cdot 10^{-3}$	$164,6 \cdot 10^{-3}$	$33,5 \cdot 10^{-3}$	$72 \cdot 10^{-3}$	$5,65 \cdot 10^{-5}$	$1,26 \cdot 10^{-4}$

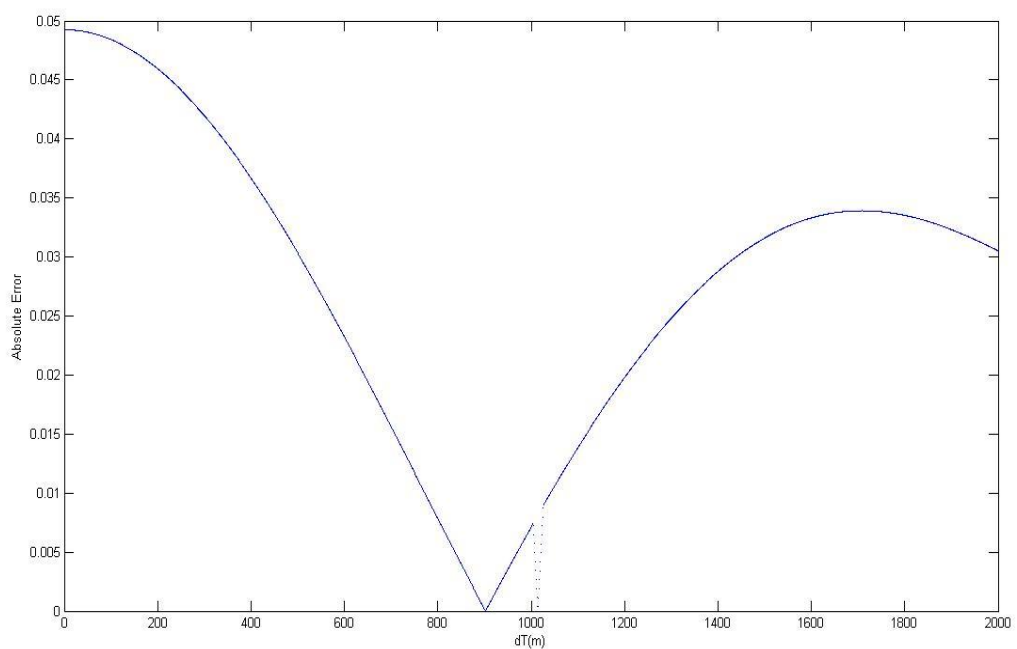
4	$72,8 \cdot 10^{-3}$	$147 \cdot 10^{-3}$	$61,6 \cdot 10^{-3}$	$89,5 \cdot 10^{-3}$	$5,97 \cdot 10^{-5}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$
5	$65,9 \cdot 10^{-3}$	$124,5 \cdot 10^{-3}$	$45,6 \cdot 10^{-3}$	$60,8 \cdot 10^{-3}$	$6,07 \cdot 10^{-5}$	$1,35 \cdot 10^{-4}$
6	$59,6 \cdot 10^{-3}$	$120,1 \cdot 10^{-3}$	$36,3 \cdot 10^{-3}$	$60,8 \cdot 10^{-3}$	$6,09 \cdot 10^{-5}$	$1,36 \cdot 10^{-4}$
7	$56 \cdot 10^{-3}$	$109,7 \cdot 10^{-3}$	$40,8 \cdot 10^{-3}$	$70,8 \cdot 10^{-3}$	$6,08 \cdot 10^{-5}$	$1,35 \cdot 10^{-4}$
8	$54 \cdot 10^{-3}$	$102,8 \cdot 10^{-3}$	$33,3 \cdot 10^{-3}$	$59,4 \cdot 10^{-3}$	$6,05 \cdot 10^{-5}$	$1,35 \cdot 10^{-4}$
9	$53,3 \cdot 10^{-3}$	$98,2 \cdot 10^{-3}$	$41,1 \cdot 10^{-3}$	$80,9 \cdot 10^{-3}$	$6,02 \cdot 10^{-5}$	$1,34 \cdot 10^{-4}$
10	$50,2 \cdot 10^{-3}$	$90,5 \cdot 10^{-3}$	$37,7 \cdot 10^{-3}$	$69,7 \cdot 10^{-3}$	$5,98 \cdot 10^{-5}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$
15	$46,9 \cdot 10^{-3}$	$86,6 \cdot 10^{-3}$	$28 \cdot 10^{-3}$	$51,2 \cdot 10^{-3}$	$5,81 \cdot 10^{-5}$	$1,29 \cdot 10^{-4}$
20	$36,1 \cdot 10^{-3}$	$65,5 \cdot 10^{-3}$	$29,8 \cdot 10^{-3}$	$56,6 \cdot 10^{-3}$	$5,69 \cdot 10^{-5}$	$1,27 \cdot 10^{-4}$
30	$34,5 \cdot 10^{-3}$	$56,5 \cdot 10^{-3}$	$27,7 \cdot 10^{-3}$	$51,8 \cdot 10^{-3}$	$5,52 \cdot 10^{-5}$	$1,23 \cdot 10^{-4}$
40	$32,8 \cdot 10^{-3}$	$54,8 \cdot 10^{-3}$	$27,6 \cdot 10^{-3}$	$46,8 \cdot 10^{-3}$	$5,41 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
50	$32,4 \cdot 10^{-3}$	$44,8 \cdot 10^{-3}$	$27,3 \cdot 10^{-3}$	$51,9 \cdot 10^{-3}$	$5,33 \cdot 10^{-5}$	$1,19 \cdot 10^{-4}$
60	$31,3 \cdot 10^{-3}$	$47,1 \cdot 10^{-3}$	$27,3 \cdot 10^{-3}$	$45,1 \cdot 10^{-3}$	$5,28 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$
80	$31,4 \cdot 10^{-3}$	$39,7 \cdot 10^{-3}$	$26,3 \cdot 10^{-3}$	$43,5 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$	$1,16 \cdot 10^{-4}$

Κατόπιν, παρατίθεται η γραφική παράσταση της χρονικής συνάρτησης συσχέτισης του ντετερμινιστικού μοντέλου. Για μια ακόμη φορά γίνεται χρήση δύο διαφορετικών συνδυασμών τιμών για τις μεταβλητές N_1, N_2 και N_3 . Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η κόκκινη γραμμή απεικονίζει την TCF του μοντέλου αναφοράς, η μπλε την συνάρτηση για $N_1=60, N_2=35$ και $N_3=7$, ενώ η πράσινη για $N_1=40, N_2=25$ και $N_3=6$.



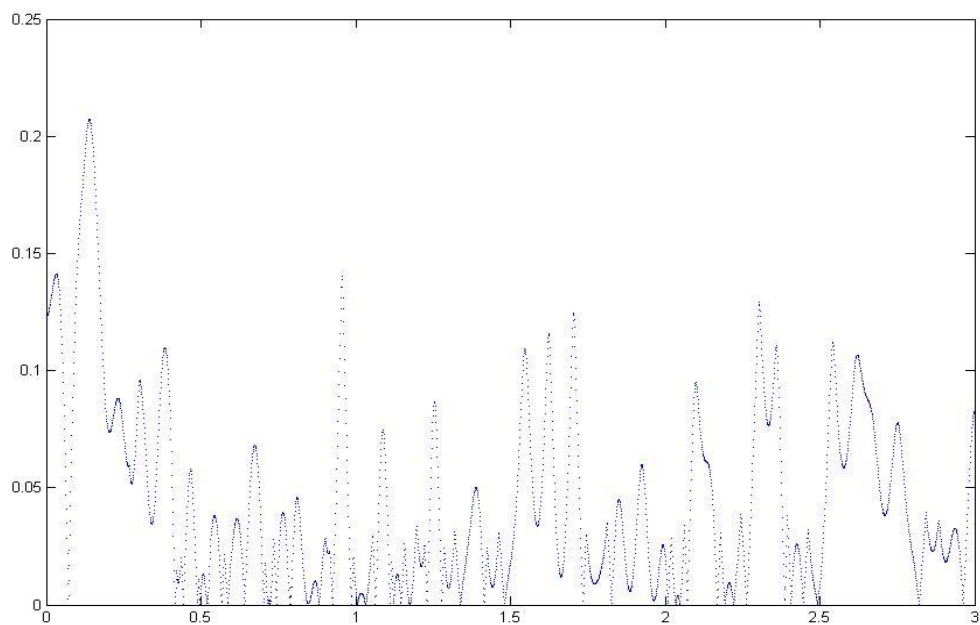
Εικόνα 20. Χρονικές συναρτήσεις συσχέτισης (TCF) των μοντέλων θεωρητικού και ντετερμινιστικού.

Το επόμενο γράφημα απεικονίζει την επίδραση της μεταβολής της απόστασης των στοιχείων του πομπού στην διαφορά του απόλυτου σφάλματος συσχέτισης μεταξύ του θεωρητικού και του ντετερμινιστικού μοντέλου.



Εικόνα 21. Διαφορά σφάλματος συσχέτισης ντετερμινιστικού και θεωρητικού μοντέλου για μεταβολή της απόστασης των στοιχείων πομπού.

Ακολουθεί η γραφική παράσταση της διαφοράς του σφάλματος συσχέτισης του ντετερμινιστικού μοντέλου με του θεωρητικού συναρτήσει της απόστασης των στοιχείων του δέκτη.



Εικόνα 22. Διαφορά σφάλματος συσχέτισης ντετερμινιστικού και θεωρητικού μοντέλου για μεταβολή της απόστασης των στοιχείων δέκτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κλείνοντας, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων. Διαπιστώνεται λοιπόν ότι για $N=12600$ και τιμές $N_1=60$, $N_2=35$ και $N_3=6$ υπάρχει σχετική σύγκλιση των τιμών των παραμέτρων του θεωρητικού μοντέλου με αυτές των μοντέλων προσομοίωσης.

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι τιμές της χρονικής συσχέτισης του στατιστικού μοντέλου, που φαίνονται στην εικόνα 17 προσεγγίζουν με σχετικά καλή ακρίβεια τις τιμές συσχέτισης του θεωρητικού. Επιπροσθέτως, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η προσέγγιση του θεωρητικού μοντέλου γίνεται πολύ καλύτερη με την αύξηση του αριθμού των ενεργών σκεδαστών.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό από το γράφημα της εικόνας 18, ότι η διαφορά του σφάλματος συσχέτισης μεταξύ των δύο μοντέλων μειώνεται σταδιακά μέχρι να μηδενιστεί από τα 0 μέχρι τα 1000 μέτρα απόσταση μεταξύ των στοιχείων του πομπού, ενώ για μεγαλύτερες αποστάσεις αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό με την μέγιστη τιμή να ξεπερνά το 0,2.

Η γραφική παράσταση της εικόνας 19 δείχνει ότι η μεγαλύτερη τιμή του σφάλματος υπάρχει για απόσταση 0,2 μέτρα μεταξύ των στοιχείων του δέκτη. Για αποστάσεις μέχρι 0,75 μέτρα το εύρος τιμών του σφάλματος μειώνεται από 0 έως 0,075, ενώ για μεγαλύτερες αποστάσεις το εύρος αυτό κυμαίνεται από 0 έως 0,15 περίπου.

Από την γραφική παράσταση της εικόνας 20, γίνεται εμφανής η σύγκλιση τιμών μεταξύ των δύο μοντέλων καθώς και η βελτίωση της προσέγγισης του μοντέλου αναφοράς από την χρήση μεγαλύτερου αριθμού σκεδαστών.

Από την γραφική παράσταση που απεικονίζεται στην εικόνα 21 φαίνεται ότι για αποστάσεις των στοιχείων του πομπού από 0 έως 900 μέτρα υπάρχει σημαντική μείωση της διαφοράς του σφάλματος συσχέτισης. Για αποστάσεις μεγαλύτερες από 900 μέτρα υπάρχει αύξηση του σφάλματος αυτού με την μέγιστη τιμή του να κυμαίνεται στο 0,03.

Η εικόνα 22 δείχνει ότι η μέγιστη τιμή του σφάλματος συσχέτισης υπάρχει για απόσταση μεταξύ των στοιχείων του δέκτη 0,2 μέτρα. Για μεγαλύτερες αποστάσεις το εύρος των τιμών του σφάλματος κυμαίνεται από 0 έως 0,15.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. Salz and J.H. Winters, "Effect of fading correlation on adaptive arrays in digital mobile radio," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 43, no.4, pp. 1049-1057, November 1994.
- [2] D.-S. Shiu, G. J. Foschini, M. J. Gans, and J. M. Kahn, "Fading correlation and its effect on the capacity of multielement antenna systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 48, no. 3, March 2000, pp. 502-513.
- [3] T. Hult, A. Mohammed, Z. Yang, D. Grace, "Performance of a Multiple HAP System Employing Multiple Polarization," *International Journal of Wireless Personal Communications*, vol. 52, no. 1, January 2010.
- [4] A. Mohammed, T. Hult, "Capacity Evaluation of a High Altitude Platform Diversity System Equipped with Compact MIMO Antennas," *International Journal of Recent Trends in Engineering*, vol. 1, no. 3, May 2009.
- [5] P. R. King, B. G. Evans, and S. Stavrou, "Physical-statistical model for the land mobile-satellite channel applied to satellite/HAP MIMO," in *Proc. 11th European Wireless Conference 2005*, vol. 1, pp. 198-204, Nicosia, Cyprus, April 2005.
- [6] F. Dovis, R. Fantini, M. Mondin, and P. Savi, "Small-scale fading for high altitude platform (HAP) propagation channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 3, pp. 641-647, April 2002.
- [7] E. T. Michailidis and A. G. Kanatas, "Three-Dimensional HAP-MIMO Channels: Modeling and Analysis of Space-Time Correlation," *accepted for publication in IEEE Transactions on Vehicular Technology*.
- [8] E. T. Michailidis, and A. G. Kanatas, "A Three Dimensional Model for Land Mobile-HAP-MIMO Fading Channels," in *Proc. 10th International Workshop on Signal Processing for Space Communications (SPSC) 2008*, Rhodes Island, Greece, October 6-8, 2008.

- [9] E. T. Michailidis, G. Efthymoglou, and A. G. Kanatas, "Spatially Correlated 3-D HAP-MIMO Fading Channels," in *Proc. International Workshop on Aerial & Space Platforms: Research, Applications, Vision, IEEE Globecom Workshop 2008*, New Orleans, LA, USA, December 4, 2008.
- [10] E. T. Michailidis, and A. G. Kanatas, "On the Statistical Simulation Modelind of 3-D Ricean Faded HAP-MIMO Channels, submitted to IEEE Transactions on Vehicular Technology.
- [11] S.-Y. Leong, Y. R. Zheng, and C. Xiao, "Space-Time Fading Correlation Functions of a 3-D MIMO Channel Model," in *Proc. IEEE Wireless Communications Networking Conference (WCNC) 2004*, vol. 2, pp. 1127-1132, Atlanta, 2004.
- [12] G. Zajić, and G. L. Stüber, "Three-dimensional modeling, simulation, and capacity analysis of space-time correlated mobile-to-mobile channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 4, pp. 2042-2054, July 2008.
- [13] Alejandro Aragón-Zavala, José Luis Cuevas-Ruíz, and José Antonio Delgado-Penín, *High-Altitude Platforms for Wireless Communications*, 1st edition, Wiley, December 2008.
- [14] G. L. Stüber, *Principles of Mobile Communications*, 2nd edition. Norwell, MA: Kluwer, 2001.
- [15] W. C. Jakes, Jr., "Multipath interference," in *Microwave Mobile communications*, New York, Wiley, 1974, pp. 11-78.
- [16] A. Abdi, and M. Kaveh, "A space-time correlation model for multielement antenna systems in mobile fading channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, pp. 550-560, April 2002.
- [17] K. I. Pedersen, P. E. Mogensen, and B. H. Fleury, "Power azimuth spectrum in outdoor environments," *Electronics Letters*, vol. 33, no. 18, pp. 1583-1584, August 1997.
- [18] A. Abdi, J. A. Barger, and M. Kaveh, "A parametric model for the distribution of the angle of arrival and the associated correlation function and power spectrum at the mobile station," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 51, no. 3, pp. 425-434, 2002.
- [19] R. Von Mises, "Über die "Ganzzahligkeit" der Atomgewicht und verwandte Fragen," *Physikal. Z.*, vol. 19, pp. 490-500, 1918.
- [20] K. V. Mardia, *Statistics of Directional Data*, London: Academic, 1972.
- [21] M. K. Simon, S. M. Hinedi, and W. C. Lindsey, *Digital Communication Techniques-Signal Design and Detection*, Upper Saddle River, NJ: PTR Prentice Hall, 1995.
- [22] A. J. Viterbi, "Phase-locked loop dynamics in the presence of noise by Fokker-Planck techniques," in *Proc. of the IEEE*, vol. 51, no. 12, pp. 1737-1753, June 1963.

- [23] H. Leib and S. Pasupathy, "The phase of a vector perturbed by Gaussian noise and differentially coherent receivers", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 34, no. 6, pp. 1491-1501, 1988.
- [24] M. D. Austin and G. L. Stuber, "Velocity adaptive handoff algorithms for microcellular systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 43, no. 3, pp. 549-561, 1994.
- [25] S. S. Mahmoud, Z. M. Hussain, and P. O'Shea, "Space-time model for mobile radio channel with hyperbolically distributed scatterers," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 1, pp. 211-214.
- [26] S. S. Mahmoud, Z. M. Hussain, and P. O'Shea, P., "A geometrical-based microcell mobile radio channel model," *Wireless Networks*, vol. 12, no. 5, pp. 653-664, September 2006.
- [27] S. S. Mahmoud, F. S. Al-Qahtani, Z. M. Hussain, and A. Gopalakrishnan, "Spatial and temporal statistics for the geometrical-based hyperbolic macrocell channel model," *Digital Signal Processing*, vol. 18, no. 2, pp. 151-167, March 2008.
- [28] T. S. Rappaport, and J. C. Liberti, "A geometrical-based model for line-of sight multipath radio channel," in *Proc. IEEE 46th Vehicular Technology Conference (VTC) 1996*, Atlanta, GA, USA, 844-848, April/May 1996.
- [29] M.A. Vázquez-Castro, F. Perez-Fontan and S. R. Saunders, "Shadowing correlation assessment and modeling for satellite diversity in urban environments," *International Journal of Satellite Communications*, vol. 20, no. 2, March/April 2002, pp. 151-166.
- [30] M. A. Vázquez-Castro, D. Belay-Zeleke, A. Curieses-Guerrero, "Availability of systems based on satellites with spatial diversity and HAPS," *Electronics Letters*, vol. 38, no. 6, pp. 286-288, March 2002.
- [31] C. Tzaras, B.G. Evans and S.R. Saunders, "Physical-statistical analysis of land mobile-satellite channel," *Electronics Letters*, vol. 34, no. 13, pp. 1355-1357, June 1998.
- [32] S. R. Saunders and B. G. Evans, "Physical model of shadowing probability for land mobile satellite propagation," *Electronics Letters*, vol. 32, no. 17, pp. 1548-1549, August 1996.
- [33] I. S. Gradshteyn, and I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series and Products*, 5th edition, Edited by A. Jeffrey, New York, USA: Academic Press, 1994.
- [34] Ασύρματες Επικοινωνίες, Α. Κανάτας, Φ.Κωνσταντίνου, Γ.Πάντος
- [35] Δορυφορικές Επικοινωνίες, Π.Κωττής, Χ.Καψάλης, Εκδόσεις Τζιόλα.
- [36] Δορυφορικές Επικοινωνίες, Pratt, Bostian, Allnut Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- [37] Δορυφορικές Επικοινωνίες, Maral G., Bousquet M. Εκδόσεις Τζιόλα.

- [38] MIMO Wireless Communications From Real World Propagation to Space-Time Code design, C.Oestges ,B.Clerckx
- [39] M. S. Karaliopoulos and F.N Pavlidou “Modelling the land mobile satellite channel: a review”.
- [40] M. Vasquez-Castro F.Perez-Fontan B.Arbesser-Rastburg “Channel modeling for satellite and HAPS system design”.
- [41] Tsan-Ming Wu and Chia- Ming Kuo “3-D Space Time Frequency Correlation Functions of Mobile-to-Mobile Radio Channels”
- [42] C. Kasparis , P.King, B.G. Evans “Doppler Spectrum of the multipath fading channel of mobile satellite systems with directional terminal antennas”.