



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Δίαυλοι Δορυφορικών Δικτύων Επόμενης Γενιάς με  
Πολλαπλές Εισόδους – Πολλαπλές Εξόδους (ΜΙΜΟ)**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Κωνσταντίνος Π. Λιώλης

Αθήνα, Δεκέμβριος 2011





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## Δίαυλοι Δορυφορικών Δικτύων Επόμενης Γενιάς με Πολλαπλές Εισόδους – Πολλαπλές Εξόδους (MIMO)

### ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Κωνσταντίνος Π. Λιώλης

**Συμβουλευτική Επιτροπή :** Παναγιώτης Γ. Κωττής, Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)  
Χρήστος Ν. Καψάλης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Γεώργιος Ι. Φικιώρης, Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 7<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 2011.

.....  
Παναγιώτης Γ. Κωττής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Χρήστος Ν. Καψάλης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεώργιος Ι. Φικιώρης  
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ιωάννης Δ. Κανελλόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....  
Μιχαήλ Ε. Θεολόγου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεώργιος Κ. Καραγιαννίδης  
Αναπλ. Καθηγητής Α.Π.Θ.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2011

.....  
Κωνσταντίνος Π. Λιώλης

Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κωνσταντίνος Π. Λιώλης, 2011  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

*ἄνθρωπος = ἄνω + θρώσκω*



---

# Περιεχόμενα

---

<b>Κατάλογος Σχημάτων .....</b>	<b>11</b>
<b>Κατάλογος Πινάκων.....</b>	<b>15</b>
<b>Κατάλογος Συντμήσεων.....</b>	<b>17</b>
<b>Πρόλογος .....</b>	<b>21</b>
<b>Περίληψη.....</b>	<b>25</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>27</b>
<b>Συνεισφορές στη Διεθνή Βιβλιογραφία .....</b>	<b>29</b>
<b>Κεφάλαιο 1. Δορυφορικές Επικοινωνίες και Τεχνολογία MIMO .....</b>	<b>33</b>
1.1. Εισαγωγή στις Δορυφορικές Επικοινωνίες .....	33
1.1.1. Δορυφορικές Τροχιές .....	35
1.1.2. Δορυφορικό Ραδιοφάσμα .....	37
1.1.3. Δορυφορικές Ζεύξεις.....	39
1.1.4. Αγορές Δορυφορικών Δικτύων .....	39
1.2. Σύγχρονα Πρότυπα Δορυφορικών Επικοινωνιών .....	41
1.2.1. DVB-S2.....	41
1.2.2. DVB-SH.....	43
1.2.3. DVB-NGH.....	45
1.3. Τεχνολογία MIMO στις Επίγειες Επικοινωνίες .....	46
1.3.1. Εισαγωγή στην Τεχνολογία MIMO.....	46
1.3.2. Πλεονεκτήματα Τεχνολογίας MIMO .....	46
1.3.3. Διείσδυση Τεχνολογίας MIMO στις Επίγειες Επικοινωνίες .....	49
1.4. Εφαρμοσιμότητα Τεχνολογίας MIMO στις Δορυφορικές Επικοινωνίες .....	50
1.4.1. Διαφορισμός Κεραίας.....	52
1.4.2. Διαφορισμός Θέσης.....	53
1.4.3. Διαφορισμός Δορυφόρου .....	53
1.4.4. Διαφορισμός Πόλωσης.....	55
1.4.5. Διαφορισμός Πολλαπλών Δεσμών .....	56
1.4.6. Διαφορισμός Δορυφόρου – Επίγειων Επαναληπτών.....	57
<b>Κεφάλαιο 2. Μοντέλα SISO Δορυφορικών Διαύλων.....</b>	<b>61</b>
2.1. Φαινόμενα Διάδοσης σε SISO Δορυφορικούς Διαύλους.....	61
2.2. Είδη Διαλείψεων σε SISO Δορυφορικούς Διαύλους .....	70
2.3. Στατιστικά Μοντέλα SISO Δορυφορικών Διαύλων.....	73
2.3.1. Μοντέλα Διαλείψεων λόγω Βροχόπτωσης.....	75
2.3.2. Μοντέλο Διαλείψεων λόγω Σκίασης.....	77

2.3.3.	Μοντέλα Διαλείψεων για Διαύλους με Πολυδιαδρομική Διάδοση .....	77
2.3.3.1.	Μοντέλο Rayleigh .....	77
2.3.3.2.	Μοντέλο Rice .....	78
2.3.3.3.	Μοντέλο Loo .....	79
2.3.3.4.	Μοντέλο Perez-Fontan <i>et al.</i> .....	80
2.3.3.5.	Μοντέλο Prieto-Cerdeira <i>et al.</i> .....	83
2.3.3.6.	Σύνοψη Άλλων Στατιστικών Μοντέλων για Διαύλους με Πολυδιαδρομική Διάδοση ...	86
2.3.4.	Μοντέλο Συσχέτισης μεταξύ Διαλείψεων λόγω Βροχόπτωσης και λόγω Πολυδιαδρομικής Διάδοσης	87

### **Κεφάλαιο 3. Μοντέλα και Χωρητικότητα MIMO Επίγειων Ασυρμάτων Διαύλων 103**

3.1.	Διατάξεις Διαύλων MIMO .....	103
3.1.1.	Δίαυλος SISO (Απλής Εισόδου - Απλής Εξόδου) .....	103
3.1.2.	Δίαυλος SIMO (Απλής Εισόδου - Πολλαπλών Εξόδων) .....	103
3.1.3.	Δίαυλος MISO (Πολλαπλών Εισόδων - Απλής Εξόδου) .....	104
3.1.4.	Δίαυλος MIMO (Πολλαπλών Εισόδων - Πολλαπλών Εξόδων) .....	105
3.2.	Όριο Χωρητικότητας κατά Shannon .....	106
3.3.	Έκφραση Χωρητικότητας βάσει των Ιδιοτιμών του Πίνακα $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ .....	108
3.4.	Χωρητικότητα MIMO Ντετερμινιστικών Διαύλων .....	110
3.4.1.	Χωρητικότητα SISO Διαύλου .....	110
3.4.2.	Χωρητικότητα SIMO Διαύλου .....	110
3.4.3.	Χωρητικότητα MISO Διαύλου .....	111
3.4.3.1.	Δίαυλος Άγνωστος στον Πομπό .....	111
3.4.3.2.	Δίαυλος Γνωστός στον Πομπό .....	112
3.4.4.	Χωρητικότητα MIMO Διαύλου .....	112
3.4.4.1.	Δίαυλος Άγνωστος στον Πομπό .....	112
3.4.4.2.	Δίαυλος Γνωστός στον Πομπό .....	113
3.4.5.	Γενικός Τύπος Έκφρασης της Χωρητικότητας MIMO Ντετερμινιστικού Διαύλου .....	114
3.5.	Τρόποι Εκτίμησης Κατάστασης Διαύλου στον Πομπό .....	115
3.6.	Χωρητικότητα MIMO Στοχαστικών Διαύλων .....	116
3.6.1.	Εργοδική Χωρητικότητα .....	116
3.6.2.	Χωρητικότητα Διακοπής .....	117
3.7.	Χωρητικότητα Ειδικών Περιπτώσεων MIMO Επίγειων Ασυρμάτων Διαύλων .....	118
3.7.1.	Χωρητικότητα MIMO Διαύλου Rayleigh .....	118
3.7.2.	Χωρητικότητα MIMO Διαύλου Rice .....	119
3.7.3.	Χωρητικότητα MIMO Διαύλου Rayleigh με Χωρικά Συσχετισμένες Διαλείψεις Μικρής Κλίμακας	122
3.7.4.	Χωρητικότητα MIMO Διαύλου BFWA με Χωρικά Συσχετισμένες Διαλείψεις λόγω Βροχόπτωσης .....	124



<b>Κεφάλαιο 4. Μοντέλα και Επιδόσεις MIMO Σταθερών Δορυφορικών Διαύλων σε Συχνότητες άνω των 10GHz.....</b>	<b>133</b>
4.1. Μοντέλο και Χωρητικότητα MIMO Σταθερού Δορυφορικού Διαύλου με Διαφορισμό Δορυφόρου σε Συχνότητες άνω των 10GHz.....	133
4.1.1. Ανάλυση.....	133
4.1.2. Αριθμητικά Αποτελέσματα .....	139
4.2. Μοντέλο και Χωρητικότητα SIMO/MISO Σταθερού Δορυφορικού Διαύλου με Διαφορισμό Θέσης σε Συχνότητες άνω των 10GHz.....	141
4.2.1. Ανάλυση.....	142
4.2.2. Αριθμητικά Αποτελέσματα .....	145
4.3. Πιθανότητα Διακοπής λόγω Σφαλμάτων Μετάδοσης Ψηφίων σε SIMO Σταθερό Δορυφορικό Δίαυλο με Διαφορισμό Θέσης σε Συχνότητες άνω των 10GHz .....	149
4.3.1. Ανάλυση.....	149
4.3.2. Αριθμητικά Αποτελέσματα .....	152
<b>Κεφάλαιο 5. Μοντέλα και Επιδόσεις MIMO Κινητών Δορυφορικών Διαύλων σε Συχνότητες κάτω των 10GHz.....</b>	<b>157</b>
5.1. Μοντέλο και Χωρητικότητα MIMO Κινητού Δορυφορικού Διαύλου με Διαφορισμό Πόλωσης σε Συχνότητες κάτω των 10GHz .....	157
5.1.1. Ανάλυση.....	158
5.1.2. Αριθμητικά Αποτελέσματα .....	167
5.2. Μοντέλο και Χωρητικότητα MIMO Κινητού Δορυφορικού Διαύλου με Διαφορισμό Δορυφόρου σε Συχνότητες κάτω των 10GHz.....	172
5.2.1. Ανάλυση.....	172
5.2.2. Αριθμητικά Αποτελέσματα .....	181
5.3. Μοντέλο και Πιθανότητα Λάθους SIMO Κινητού Δορυφορικού Διαύλου με Διαφορισμό Κεραίας σε Συχνότητες κάτω των 10GHz .....	186
5.3.1. Ανάλυση.....	186
5.3.2. Αριθμητικά Αποτελέσματα .....	188
5.4. Μεθοδολογία Δημιουργίας Χρονοσειρών MIMO Κινητών Δορυφορικών Διαύλων σε Συχνότητες κάτω των 10GHz .....	191
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>195</b>
<b>Παράρτημα Ι. Φυσικο-Στατιστικό Μοντέλο Διαλείψεων λόγω Βροχόπτωσης .....</b>	<b>221</b>
<b>Παράρτημα ΙΙ. Μοντέλα Διαύλων Rayleigh, Rice, Loo, Perez-Fontan <i>et al.</i> και Prieto-Cerdeira <i>et al.</i></b>	<b>243</b>
<b>Παράρτημα ΙΙΙ. Λογαριθμοκανονική Κατανομή .....</b>	<b>259</b>
<b>Παράρτημα ΙV. Έκφραση Πίνακα Μεταβλητότητας για Χωρική Συσχέτιση Διαλείψεων Μικρής Κλίμακας.....</b>	<b>267</b>
<b>Παράρτημα V. Ορισμοί και Πράξεις Πινάκων.....</b>	<b>269</b>



---

## Κατάλογος Σχημάτων

---

Σχήμα 1.1: Εξώφυλλο πρώτου ιστορικού άρθρου περί δορυφορικών επικοινωνιών [Clarke 1945].....	33
Σχήμα 1.2: Είδη δορυφορικών ζεύξεων .....	39
Σχήμα 1.3: Αρχιτεκτονική δικτύου DVB-SH .....	44
Σχήμα 1.4: Διαφορισμός κεραίας (Antenna Diversity).....	52
Σχήμα 1.5: Διαφορισμός θέσης (Site Diversity) .....	53
Σχήμα 1.6: Διαφορισμός δορυφόρου (ή τροχιάς) (Satellite or Orbital Diversity) .....	54
Σχήμα 1.7: Διαφορισμός πόλωσης (Polarization Diversity) .....	56
Σχήμα 1.8: Διαφορισμός πολλαπλών δεσμών (Multi-Beam Diversity).....	57
Σχήμα 1.9: Διαφορισμός δορυφόρου – επίγειων επαναληπτών (Satellite-Terrestrial Gap Filler Diversity) .....	58
Σχήμα 2.1: Φαινόμενο σκίασης λόγω βλάστησης και κτιρίων στο περιβάλλον του επίγειου δέκτη.....	67
Σχήμα 2.2: Συνδυασμένη επίδραση μέσης εξασθένησης διάδοσης, διαλείψεων μεγάλης κλίμακας και διαλείψεων μικρής κλίμακας.....	72
Σχήμα 2.3: Κατηγοριοποίηση διαλείψεων για χαρακτηρισμό διαύλου .....	73
Σχήμα 2.4: Ισχύς λήψης σε δορυφορικό δίαυλο με επίπεδες διαλείψεις στη ζώνη συχνοτήτων $S$ , όπου προκύπτουν 3 διαφορετικές καταστάσεις.....	81
Σχήμα 2.5: Markov μοντέλο 3 καταστάσεων διαύλου.....	82
Σχήμα 2.6: Μοντέλο 2 καταστάσεων διαύλου βασισμένο σε αντίστοιχο με 3 καταστάσεις.....	84
Σχήμα 2.7: Markov μοντέλο 2 καταστάσεων διαύλου.....	85
Σχήμα 2.8: Διάταξη SISO κινητού δορυφορικού διαύλου που επηρεάζεται από διαλείψεις λόγω βροχόπτωσης και λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης.....	89
Σχήμα 2.9: Συνάρτηση δεσμευμένης αθροιστικής κατανομής του παράγοντα Rice $K$ για διαφορετικά ποσοστά πολυδιαδρομικής διάδοσης στο δίαυλο. Επίδραση της παραμέτρου $K_{mob}$ .....	97
Σχήμα 2.10: Συνάρτηση δεσμευμένης αθροιστικής κατανομής του παράγοντα Rice $K$ . Επίδραση της συχνότητας λειτουργίας, του εύρους δέσμης ημίσειας ισχύος της κεραίας δέκτη, της δορυφορικής γωνίας ανύψωσης και των κλιματικών συνθηκών βροχόπτωσης που επικρατούν στη δεδομένη περιοχή εξυπηρέτησης .....	98
Σχήμα 2.11: Στιγματικός BER συναρτήσει του SNR για υψίσυχο κινητό δορυφορικό σύστημα DVB-S2/RCS παροχής ευρυζωνικών υπηρεσιών σε τρένο που κινείται στην περιοχή του Παρισιού (QPSK, LDPC 1/3, $n_{ldpc}=16200$ bits, $v=300$ km/hr). Επίδραση των βραχυπρόθεσμων διακυμάνσεων του παράγοντα Rice $K$ λόγω των επιπτώσεων της βροχόπτωσης .....	100
Σχήμα 2.12: Μέσος BER συναρτήσει του SNR για υψίσυχο κινητό δορυφορικό δίαυλο με διαμόρφωση QPSK. Επίδραση των μακροπρόθεσμων διακυμάνσεων του παράγοντα Rice $K$ λόγω των επιπτώσεων της βροχόπτωσης για διαφορετικές κλιματικές συνθήκες βροχόπτωσης .....	101
Σχήμα 3.1: Διάταξη διαύλου SISO.....	103
Σχήμα 3.2: Διάταξη διαύλου SIMO .....	104
Σχήμα 3.3: Διάταξη διαύλου MISO .....	104
Σχήμα 3.4: Διάταξη διαύλου MIMO.....	105
Σχήμα 3.5: Εξάρτηση χωρητικότητας SISO διαύλου AWGN από σηματοθορυβικό λόγο.....	107
Σχήμα 3.6: Εξάρτηση χωρητικότητας SISO διαύλου από εύρος ζώνης υπό σταθερή ισχύ λήψης.....	107

Σχήμα 3.7: Εργοδική χωρητικότητα MIMO διαύλων με LOS συνιστώσα συναρτήσει του παράγοντα Rice $K$ .....	121
Σχήμα 3.8: Διάταξη 2x2 MIMO Διαύλου Ασύρματης Σταθερής Ευρυζωνικής Πρόσβασης (BFWA) που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz υπό διαλείψεις λόγω βροχόπτωσης .....	125
Σχήμα 3.9: 0.1% χωρητικότητα διακοπής 2x2 MIMO BFWA διαύλου συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR. Εξάρτηση από κλιματικές συνθήκες και συχνότητα λειτουργίας .....	130
Σχήμα 4.1: Διάταξη 2x2 MIMO δορυφορικού διαύλου με διπλό διαφορισμό δορυφόρου που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz υπό διαλείψεις λόγω βροχόπτωσης .....	134
Σχήμα 4.2: Κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας $G_R(\cdot)$ συμβατό με τις ITU-R συστάσεις [ITU580] έκαστης των κεραιών λήψης του σταθμού TS .....	135
Σχήμα 4.3: Χωρικός συντελεστής συσχέτισης λόγω βροχοπτώσεων συναρτήσει της γωνιακής απόστασης $\Delta\omega$ για 2x2 MIMO δορυφορικό δίαυλο με διπλό διαφορισμό δορυφόρου που λειτουργεί στην Ka ζώνη συχνοτήτων και με γωνίες ανύψωσης $\theta_1=45^\circ$ και $\theta_2=40^\circ$ .....	136
Σχήμα 4.4: 1% χωρητικότητα διακοπής 2x2 MIMO δορυφορικού διαύλου με διαφορισμό δορυφόρου στη Ka ζώνη συχνοτήτων συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR. Επαλήθευση αναλυτικής σχέσης (4.7) μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo .....	140
Σχήμα 4.5: Χωρητικότητα διακοπής 2x2 MIMO δορυφορικού διαύλου με διαφορισμό δορυφόρου συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR. Εξάρτηση από κλιματικές συνθήκες και συχνότητα λειτουργίας.....	141
Σχήμα 4.6: Διάταξη δορυφορικού διαύλου με διπλό διαφορισμό θέσης που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz υπό διαλείψεις λόγω βροχόπτωσης. Η κάτω ζεύξη αντιστοιχεί σε 2x1 SIMO ενώ η άνω ζεύξη αντιστοιχεί σε 1x2 MISO δορυφορικό δίαυλο. ....	142
Σχήμα 4.7: Συνάρτηση Αθροιστικής Κατανομής της χωρητικότητας σε 2x1 SIMO δορυφορικό δίαυλο με διαφορισμό θέσης που αντιστοιχεί στην κάτω ζεύξη. (Ζώνη συχνοτήτων: Ka, περιοχή εξυπηρέτησης: Αθήνα και απόσταση διαχωρισμού: D=2km)...	146
Σχήμα 4.8: Συνάρτηση Αθροιστικής Κατανομής της χωρητικότητας σε 1x2 MISO δορυφορικό δίαυλο με διαφορισμό θέσης που αντιστοιχεί στην άνω ζεύξη. (Ζώνη συχνοτήτων: Ka, περιοχή εξυπηρέτησης: Αθήνα και απόσταση διαχωρισμού: D=2km)...	146
Σχήμα 4.9: Συνάρτηση Αθροιστικής Κατανομής της χωρητικότητας σε 2x1 SIMO δορυφορικό δίαυλο με διαφορισμό θέσης που αντιστοιχεί στην κάτω ζεύξη. (Ζώνη συχνοτήτων: Ku, περιοχή εξυπηρέτησης: Αθήνα και απόσταση διαχωρισμού: D=2km) ..	147
Σχήμα 4.10: Συνάρτηση Αθροιστικής Κατανομής της χωρητικότητας σε 1x2 MISO δορυφορικό δίαυλο με διαφορισμό θέσης που αντιστοιχεί στην άνω ζεύξη. (Ζώνη συχνοτήτων: Ku, περιοχή εξυπηρέτησης: Αθήνα και απόσταση διαχωρισμού: D=2km) ..	148
Σχήμα 4.11: Συνάρτηση Αθροιστικής Κατανομής της χωρητικότητας σε 2x1 SIMO δορυφορικό δίαυλο με διαφορισμό θέσης που αντιστοιχεί στην κάτω ζεύξη. (Ζώνη συχνοτήτων: Ka, περιοχή εξυπηρέτησης: Μιλάνο και απόσταση διαχωρισμού: D=0.5km) .....	148
Σχήμα 4.12: Συνάρτηση Αθροιστικής Κατανομής της χωρητικότητας σε 1x2 MISO δορυφορικό δίαυλο με διαφορισμό θέσης που αντιστοιχεί στην άνω ζεύξη. (Ζώνη συχνοτήτων: Ka, περιοχή εξυπηρέτησης: Μιλάνο και απόσταση: διαχωρισμού D=0.5km) .....	149
Σχήμα 4.13: Γενική περίπτωση διάταξης διπλού διαφορισμού θέσης όπου $\theta_1 \neq \theta_2$ .....	150
Σχήμα 4.14: Συνάρτηση Αθροιστικής Κατανομής του ενεργού σηματοθορυβικού λόγου $\eta_{eff}$ στην είσοδο του MRC δέκτη για 1x2 SIMO δορυφορικό δίαυλο που λειτουργεί υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχής. Επαλήθευση μέσω προσομοιώσεων τύπου Monte Carlo για $\eta_2=10, 20$ και $30$ dB ( $\eta_1/\eta_2=2.25$ και $\rho_n=0.7$ ) .....	153

Σχήμα 4.15: Πιθανότητα BEOP σε 1x2 SIMO δορυφορικό δίαυλο που λειτουργεί υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχής για $\eta_1/\eta_2=1, 2.25$ και $9$ ( $n_2=10\text{dB}$ και $\rho_n=0.7$ ).....	154
Σχήμα 4.16: Πιθανότητα BEOP σε 1x2 SIMO δορυφορικό δίαυλο που λειτουργεί υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχής για $\rho_n=0.9, 0.7$ και $0.5$ ( $n_1/n_2=2.25$ και $n_2=10\text{dB}$ ).....	155
Σχήμα 4.17: Πιθανότητα BEOP σε 1x2 SIMO δορυφορικό δίαυλο που λειτουργεί υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχής για διαφορετικές κλιματικές συνθήκες βροχοπτώσης ( $n_1/n_2=2.25, n_2=10\text{dB}, \rho_n=0.7$ ).....	156
Σχήμα 5.1: Διάταξη 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό πόλωσης που λειτουργεί σε συχνότητες κάτω των 10GHz υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω σκίασης και πολυδιαδρομικής διάδοσης .....	158
Σχήμα 5.2: Χρονοσειρές 2x2 MIMO LMS διαύλων με διαφορισμό πόλωσης παραγόμενες με βάση το προτεινόμενο μοντέλο σε διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης: ανοικτό αγροτικό, προαστιακό και αστικό. ....	169
Σχήμα 5.3: 1% χωρητικότητα διακοπής 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό πόλωσης συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR σε ανοικτό αγροτικό περιβάλλον διάδοσης. Εξάρτηση από παράμετρο $XPD_{ant}$ .....	170
Σχήμα 5.4: 1% χωρητικότητα διακοπής 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό πόλωσης συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR σε προαστιακό περιβάλλον διάδοσης. Εξάρτηση από δορυφορική γωνία ανύψωσης $\theta$ .....	170
Σχήμα 5.5: 1% χωρητικότητα διακοπής 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό πόλωσης συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR σε αστικό περιβάλλον διάδοσης. Εξάρτηση από συσχέτιση λόγω πόλωσης για διαλείψεις μικρής κλίμακας (Ειδική περίπτωση όπου $\tilde{\rho}_{rx} = \tilde{\rho}_{tx}$ και μόνο η Κακή κατάσταση του διαύλου θεωρείται).....	171
Σχήμα 5.6: Διάταξη 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό δορυφόρου που λειτουργεί σε συχνότητες κάτω των 10GHz υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω σκίασης και πολυδιαδρομικής διάδοσης .....	173
Σχήμα 5.7: Συντελεστής χωρικής συσχέτισης για τις διαλείψεις μικρής κλίμακας στην πλευρά λήψης συναρτήσει της απόστασης $\Delta$ (κανονικοποιημένης ως προς το μήκος κύματος $\lambda$ ) και εξάρτηση από γωνιακή διασπορά $\delta\theta$ . Θεωρείται ομοιόμορφη γραμμική στοιχειοκεραία (ULA) και δορυφορική γωνία ανύψωσης $\theta=40^\circ$ . ....	178
Σχήμα 5.8: Markov μοντέλο 4 καταστάσεων διαύλου.....	180
Σχήμα 5.9: Χρονοσειρές 2x2 MIMO LMS διαύλων με διαφορισμό δορυφόρου παραγόμενες με βάση το προτεινόμενο μοντέλο σε διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης: ανοικτό αγροτικό, προαστιακό και αστικό. ....	183
Σχήμα 5.10: 1% χωρητικότητα διακοπής 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό δορυφόρου συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR σε ανοικτό αγροτικό περιβάλλον διάδοσης. Εξάρτηση από παράμετρο $XSD_{ant}$ .....	184
Σχήμα 5.11: 1% χωρητικότητα διακοπής 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό δορυφόρου συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR σε προαστιακό περιβάλλον διάδοσης. Εξάρτηση από συντελεστή χωρικής συσχέτισης για διαλείψεις μεγάλης κλίμακας, $\bar{\rho}_{LN}$ .....	184
Σχήμα 5.12: 1% χωρητικότητα διακοπής 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό δορυφόρου συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR σε αστικό περιβάλλον διάδοσης. Εξάρτηση από χωρική συσχέτιση διαλείψεων μικρής κλίμακας στην πλευρά λήψης (Ειδική περίπτωση όπου θεωρείται μόνο η (BAD,BAD) κατάσταση του διαύλου).....	185
Σχήμα 5.13: Διάταξη 2x1 SIMO LMS διαύλου με διαφορισμό κεραίας που λειτουργεί σε συχνότητες κάτω των 10GHz υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω σκίασης και πολυδιαδρομικής διάδοσης .....	187
Σχήμα 5.14: Μέση BEP για SIMO LMS δίαυλο με διαφορισμό κεραίας συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR σε αστικό περιβάλλον διάδοσης. Εξάρτηση από πλήθος $M_R$	

στοιχείων κεραίας λήψης και τεχνική συνδυασμού των σημάτων διαφορικής λήψης (MRC και SC).....	189
Σχήμα 5.15: Μέση BEP για SIMO LMS δίαυλο με διαφορισμό κεραίας και MRC συνδυασμό σημάτων διαφορικής λήψης συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR σε αστικό περιβάλλον διάδοσης. Εξάρτηση από πλήθος $M_R$ στοιχείων κεραίας λήψης και από χωρική συσχέτιση στις διαλείψεις μικρής κλίμακας.....	190
Σχήμα 5.16: Μπλοκ διάγραμμα προσομοίωσης σε H/Y δορυφορικού τηλεπικοινωνιακού συστήματος που εφαρμόζει MIMO τεχνικές μετάδοσης.....	191

---

## Κατάλογος Πινάκων

---

Πίνακας 1.1: Δορυφορικές ζώνες συχνότητων και οι υπηρεσίες τους.....	38
Πίνακας 1.2: Πρότυπα ασυρμάτων δικτύων που έχουν υιοθετήσει την τεχνολογία MIMO	49
Πίνακας 2.1: Κατηγοριοποίηση φαινομένων διάδοσης σε SISO δορυφορικές ζεύξεις ως προς τη συχνότητα λειτουργίας.....	68
Πίνακας 2.2: Διάφορα μονο-κατάστατα στατιστικά μοντέλα δορυφορικών διαύλων με διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης.....	86
Πίνακας 2.3: Διάφορα πολυ-κατάστατα στατιστικά μοντέλα δορυφορικών διαύλων με διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης.....	87
Πίνακας 2.4: Παράμετροι του υπό θεώρηση σεναρίου κινητού δορυφορικού διαύλου που λαμβάνονται υπόψη στα αριθμητικά αποτελέσματα της Ενότητας 2.3.4 .....	96
Πίνακας 3.1: Παράμετροι υπό θεώρηση MIMO BFWA διαύλων που λαμβάνονται υπόψη για τα αποτελέσματα στο Σχήμα 3.9 .....	131
Πίνακας 5.1: Παράμετροι των υπό θεώρηση σεναρίων 2x2 MIMO LMS διαύλων με διαφορισμό πόλωσης.....	168
Πίνακας 5.2: Παράμετροι των υπό θεώρηση σεναρίων 2x2 MIMO LMS διαύλων με διαφορισμό δορυφόρου .....	182





---

## Κατάλογος Συντμήσεων

---

2D:	Two Dimensional
3D:	Three Dimensional
3GPP:	Third Generation Partnership Project
3GPP2:	Third Generation Partnership Project (2 <sup>nd</sup> Generation)
ACM:	Adaptive Coding and Modulation
AWGN:	Additive White Gaussian Noise
BCH:	Bose Chaundhuri Hocquenghem
BEOP:	Bit Error Outage Probability
BER:	Bit Error Ratio
BFWA:	Broadband Fixed Wireless Access
BLAST:	Bell Laboratories Layered Space-Time
BPR:	Branch Power Ratio
bps:	bits per second
BPSK:	Binary Phase Shift Keying
BS:	Base Station
BSS:	Broadcast Satellite Service
BWA:	Broadband Wireless Access
CAGR:	Compound Annual Growth Rate
CCDF:	Conditional Cumulative Distribution Function
CDF:	Cumulative Distribution Function
CDN:	Content Delivery Network
CGC:	Complementary Ground Component
CK:	Channel Known
CNES:	Centre National d' Etudes Spatiales
CPR:	Co-Polar Ratio
CPU:	Central Processing Unit
CSI:	Channel State Information
CSIR:	Channel State Information at the Receiver
CSIT:	Channel State Information at the Transmitter
CU:	Channel Unknown
DLR:	German Aerospace Centre
DSL:	Digital Subscriber Line
DSNG:	Digital Satellite News Gathering
DSP:	Digital Signal Processing
DTH:	Direct To Home
DVB:	Digital Video Broadcasting
DVB-H:	Digital Video Broadcasting - Handheld
DVB-NGH:	Digital Video Broadcasting-Next Generation Handheld
DVB-RCS:	Digital Video Broadcasting - Return Channel via Satellite
DVB-RCS2:	Digital Video Broadcasting - Return Channel via Satellite (2 <sup>nd</sup> Generation)
DVB-S2:	Digital Video Broadcasting-Satellite (2 <sup>nd</sup> Generation)
DVB-SH:	Digital Video Broadcasting-Satellite Handheld
DVB-T:	Digital Video Broadcasting – Terrestrial
DVB-T2:	Digital Video Broadcasting – Terrestrial (2 <sup>nd</sup> Generation)
EC:	European Commission
ECMWF:	European Center of Medium-Range Weather Forecast
EHF:	Extremely High Frequency

EIRP:	Effective Isotropically Radiated Power
ESA:	European Space Agency
ETSI:	European Telecommunications Standards Institute
FEC:	Forward Error Correction
FFT:	Fast Fourier Transform
FI:	Future Internet
FMT:	Fade Mitigation Technique
FP7:	Seventh Framework Programme
FSL:	Free Space Loss
FSS:	Fixed Satellite Service
GEO:	Geostationary Orbit
GRLN:	Generalized Rice-Lognormal
GW:	Gateway
HEO:	Highly Elliptic Orbit
HP:	Horizontal Polarization
IEEE:	Institute of Electrical and Electronic Engineers
iid:	Independent and Identically Distributed
IIR:	Infinite Impulse Response
IP:	Internet Protocol
IS:	Interactive Services
ITU:	International Telecommunications Union
ITU-R:	International Telecommunications Union - Radiocommunications
LDPC:	Low Density Parity Check
LEO:	Low Earth Orbit
LHCP:	Left Hand Circular Polarization
LMS:	Land Mobile Satellite
LOS:	Line-of-Sight
LP:	Linear Polarization
LTE:	Long-Term Evolution
M2M:	Machine to Machine
MAC:	Multiple Access Channel
MEO:	Medium Earth Orbit
MIMO:	Multiple-Input Multiple-Output
MISO:	Multiple-Input Single-Output
MRC:	Maximum Ratio Combining
MSS:	Mobile Satellite Service
NLOS:	Non Line-of-Sight
OBP:	On-Board Processing
OFDM:	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSTBC:	Orthogonal Space-Time Block Codes
pdf:	probability density function
PHY:	PHYSical layer
PTC:	Polarization-Time Codes
QAM:	Quadrature Amplitude Modulation
QoS:	Quality-of-Service
QPSK:	Quadrature Phase Shift Keying
R&D:	Research & Development
RF:	Radio Frequency
RHCP:	Right Hand Circular Polarization
RLN:	Rice-Lognormal

SatCom:	Satellite Communications
SC:	Selection Combining
SDMA:	Space Division Multiple Access
SFN:	Single Frequency Network
SFTC:	Space-Frequency-Time Codes
SIMO:	Single-Input Multiple-Output
SISO:	Single-Input Single-Output
SNR:	Signal-to-Noise Ratio
SS:	Subscriber Station
STBC:	Space-Time Block Codes
STC:	Space-Time Codes
STTC:	Space-Time Trellis Codes
SVD:	Singular Value Decomposition
TDM:	Time Division Multiplexing
TR:	Terrestrial Repeater
TS:	Terminal Station
UHF:	Ultra High Frequency
ULA:	Uniform Linear Array
UMB:	Ultra Mobile Broadband
UT:	User Terminal
V-BLAST:	Vertical-Bell Laboratories Layered Space-Time
VHF:	Very High Frequency
VP:	Vertical Polarization
VPN:	Virtual Private Network
WiFi:	Wireless Fidelity
WiMAX:	Wireless Microwave Access
WLAN:	Wireless Local Area Network
XPD:	Cross-Polarization Discrimination
ZMCSCG:	Zero Mean Circularly Symmetric Complex Gaussian
σ.π.π.:	συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας
τ.μ.:	τυχαία μεταβλητή



---

## Πρόλογος

---

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο των ερευνητικών δραστηριοτήτων του Εργαστηρίου Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων, που ανήκει στον Τομέα Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, και εντάσσεται στις υποχρεώσεις που απορρέουν από το Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του ΕΜΠ. Αντικείμενο της Διατριβής είναι η έρευνα και ανάπτυξη πρωτότυπων μοντέλων για την περιγραφή διαύλων δορυφορικών δικτύων επόμενης γενιάς με πολλαπλές εισόδους – πολλαπλές εξόδους (Multiple Input – Multiple Output, MIMO) καθώς και η εκτίμηση της επίδοσής τους μέσω πρωτότυπων αναλυτικών μαθηματικών εκφράσεων και προσομοιώσεων. Δεδομένου ότι μέχρι σήμερα η τεχνολογία MIMO παρουσιάζει σημαντική διείσδυση κυρίως στα επίγεια δίκτυα, η μελέτη εφαρμογής της στα δορυφορικά δίκτυα καθιστά τη Διατριβή ιδιαίτερα πρωτότυπη. Πράγματι, τα ερευνητικά αποτελέσματα της Διατριβής έχουν ήδη δημοσιευτεί σε οκτώ (8) διεθνή έγκριτα επιστημονικά περιοδικά με κριτές (τρία (3) εκ των οποίων είναι IEEE Transactions) και στα πρακτικά επτά (7) διεθνών έγκριτων επιστημονικών συνεδρίων με κριτές.

Συγκεκριμένα, η δομή της Διατριβής έχει ως εξής: Στο Κεφάλαιο 1 δίδεται μια εισαγωγή στις πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις των δορυφορικών επικοινωνιών και της τεχνολογίας MIMO και στη συνέχεια εισάγεται η έννοια της εφαρμοσιμότητας της τεχνολογίας MIMO στις δορυφορικές επικοινωνίες. Στο Κεφάλαιο 2 αναλύονται τα φαινόμενα διάδοσης και οι αντίστοιχες διαλείψεις που χαρακτηρίζουν τους συμβατικούς δορυφορικούς διαύλους απλής εισόδου – απλής εξόδου (Single Input - Single Output, SISO) και λειτουργούν σε ζώνες συχνοτήτων τόσο κάτω όσο και άνω των 10GHz. Επίσης, αναλύεται εκτενώς προτεινόμενο πρωτότυπο αναλυτικό μοντέλο συσχέτισης των διαλείψεων λόγω βροχής και λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης σε SISO κινητό δορυφορικό διάυλο που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz. Στο Κεφάλαιο 3 μελετώνται οι MIMO επίγειοι ασύρματοι διάυλοι και εισάγονται θεμελιώδεις έννοιες που αφορούν τη χωρητικότητά τους με βάση τη θεωρία MIMO. Επίσης, αναλύονται ειδικές περιπτώσεις MIMO επίγειων ασυρμάτων διαύλων μεταξύ των οποίων και ο MIMO διάυλος που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχής. Στο Κεφάλαιο 4 μελετώνται MIMO σταθεροί δορυφορικοί διάυλοι που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχής. Για τη δημιουργία διαύλου MIMO εξετάζονται ο διαφορισμός δορυφόρου και ο διαφορισμός θέσης δίνοντας έμφαση στην έρευνα και

ανάπτυξη πρωτότυπων μοντέλων για την περιγραφή των αντιστοιχών διαύλων και στην εκτίμηση της επίδοσής τους μέσω πρωτότυπων αναλυτικών εκφράσεων. Στο Κεφάλαιο 5 μελετώνται MIMO κινητοί δορυφορικοί διάυλοι που λειτουργούν σε συχνότητες κάτω των 10GHz υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω σκίασης και πολυδιαδρομικής διάδοσης. Για τη δημιουργία διαύλου MIMO εξετάζονται ο διαφορισμός πόλωσης, ο διαφορισμός δορυφόρου και ο διαφορισμός κεραίας δίνοντας έμφαση στην έρευνα και ανάπτυξη πρωτότυπων μοντέλων για την περιγραφή των αντιστοιχών διαύλων και στην εκτίμηση της επίδοσής του μέσω προσομοιώσεων. Σημειώνεται ότι τα Κεφάλαια 4 και 5 αποτελούν τον πυρήνα της Διατριβής και τη βασική συνεισφορά της στη σχετική βιβλιογραφία.

Στο σημείο αυτό, με την ολοκλήρωση των προσπαθειών εκπόνησης της Διδακτορικής Διατριβής μου, νιώθω την ανάγκη να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου σε μια σειρά ανθρώπων που υπήρξαν σημαντικοί αρωγοί αυτών των προσπαθειών όλα αυτά τα χρόνια.

Καταρχήν, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον Επιβλέποντα τόσο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής όσο και της Διπλωματικής Εργασίας μου, κ. Παναγιώτη Γ. Κωττή, Καθηγητή ΕΜΠ. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο πρόσωπό μου όλα αυτά τα χρόνια, τη διαρκή ενθάρρυνσή του και τον ενθουσιασμό που μου ενέπνευσε αλλά και για την πολύτιμη επιστημονική καθοδήγησή του, που αποτελεί προϊόν βαθιάς ερευνητικής εμπειρίας. Θα ήθελα επίσης να τον ευχαριστήσω θερμά για την άριστη συνεργασία μας κατά την παραμονή μου στο εξωτερικό.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά το φίλο και συνεργάτη, κ. Αθανάσιο Δ. Παναγόπουλο, Λέκτορα ΕΜΠ, για την πολύτιμη συνεισφορά του στην επιτυχή περάτωσή της Διατριβής. Το ευρύ επιστημονικό υπόβαθρο, η συνεχής διαθεσιμότητα και ο διαρκής ζήλος του για έρευνα νέων καινοτόμων ιδεών υπήρξαν για μένα ανεξάντλητες πηγές έμπνευσης που έδωσαν αποτελεσματικές λύσεις σε καίρια σημεία της Διατριβής.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου προς τα υπόλοιπα Μέλη της Επταμελούς Επιτροπής, κ.κ. Χρήστο Ν. Καψάλη, Καθηγητή ΕΜΠ, Γεώργιο Ι. Φικιώρη, Επικ. Καθηγητή ΕΜΠ, Ιωάννη Δ. Κανελλόπουλο, Καθηγητή ΕΜΠ, Μιχαήλ Ε. Θεολόγου, Καθηγητή ΕΜΠ, και Γεώργιο Κ. Καραγιαννίδη, Αναπλ. Καθηγητή ΑΠΘ. Τους ευχαριστώ θερμά τόσο για την τιμή που μου έκαναν να συμμετέχουν στην Επταμελή Επιτροπή της Διατριβής μου όσο και για τη συνολική συμβολή τους στο κτίσιμο του υποβάθρου μου ως Μηχανικού Τηλεπικοινωνιών μέσω της παρακολούθησης των προπτυχιακών και μεταπτυχιακών μαθημάτων τους αλλά και μέσω της ανάγνωσης των επιστημονικών συγγραμμάτων και δημοσιεύσεών τους.

Εκτός από τους ανωτέρω Διδασκάλους μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά μια σειρά ατόμων από τη διεθνή και εγχώρια επιστημονική κοινότητα, με τους οποίους συνεργάστηκα κατά την επαγγελματική σταδιοδρομία μου και οι οποίοι υπήρξαν επίσης καθοριστικοί αρωγοί των ερευνητικών προσπαθειών μου όλα αυτά τα χρόνια. Συγκεκριμένα, ευχαριστώ θερμά τον Enrico Casini από ESA/ESTEC (Ολλανδία) και μετέπειτα NATO C3 Agency (Ολλανδία), τους Dr. Riccardo De Gaudenzi, Dr. Ana Bolea-Alamañac, Roberto Prieto-Cerdeira, Paolo Burzigotti, Dr. Massimo Bertinelli, Dr. Alberto Ginesi, Dr. Catherine Morlet και Dr. Nader Alagha από ESA/ESTEC (Ολλανδία), τους Prof. Ana Pérez-Neira και Dr. Jesús Gómez-Vilardebó από CTTC (Ισπανία), τον Dr. Sandro Scalise από DLR (Γερμανία), τους Prof. Bhaskar D. Rao και Dr. Zhongren Cao από UCSD (ΗΠΑ), τον Δρ. Παντελή-Δανιήλ Αράπογλου από ΕΜΠ και μετέπειτα Univ. Luxembourg (Λουξεμβούργο) και ESA/ESTEC (Ολλανδία), και τον Δρ. Ηλία Ανδρικόπουλο από Space Hellas ΑΕ. Η αρμονική συνεργασία μας με καθέναν εξ αυτών όλα αυτά τα χρόνια κατά την παραμονή και εργασία μου τόσο στο εξωτερικό (ΗΠΑ και Ολλανδία) όσο και στο εσωτερικό υπήρξε ιδιαίτερα εποικοδομητική, γεγονός που αντικατοπτρίζεται στη λίστα δημοσιεύσεων/συνεισφορών της Διατριβής στη σχετική βιβλιογραφία.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή ευγνωμοσύνη μου προς τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (European Space Agency, ESA) για την οικονομική στήριξη που μου παρείχε στο πλαίσιο των εξής ερευνητικών προγραμμάτων που άπτονται του αντικειμένου της Διατριβής: “MIMO Applicability to Satellite Networks” (ESA Contract No. AO/1-5146/06/NL/JD, 2007-2008) και “MIMO Technology in Satellite Communications for Interference Exploitation and Capacity Enhancement” (ESA Contract No. 21591/08/NL/AT, 2008-2011).

Τέλος, σε προσωπικό επίπεδο, θα ήθελα να εκφράσω τη βαθιά ευγνωμοσύνη μου προς τα αγαπημένα μου πρόσωπα, Παύλο, Ελένη, Ισμήνη, Δήμο, «μικρή» Έλενα και «μεγάλη» Έλενα. Τους ευχαριστώ για την αμέριστη αγάπη που μου προσφέρουν ο καθένας με τον τρόπο του, για την πίστη τους στο πρόσωπό μου, για τις όμορφες στιγμές χαράς και ευτυχίας που μου χαρίζουν, για την κατανόησή τους, για τη διαρκή στήριξή τους και για τη συνεχή ενθάρρυνσή τους σε όλη την πορεία μου μέχρι σήμερα, τα οποία αποτελούν συνολικά απαραίτητα εχέγγυα για την επιτυχή ολοκλήρωση των Σπουδών μου.

Κωνσταντίνος Π. Λιώλης  
Αθήνα, Οκτώβριος 2011





---

## Περίληψη

---

Αντικείμενο της Διατριβής είναι η έρευνα και ανάπτυξη μοντέλων για την περιγραφή MIMO δορυφορικών διαύλων με πολλαπλές εισόδους – πολλαπλές εξόδους και η εκτίμηση της επίδοσής τους μέσω αναλυτικών εκφράσεων και προσομοιώσεων.

Το Κεφάλαιο 1 παρέχει μια εισαγωγή στις πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις των δορυφορικών επικοινωνιών και της τεχνολογίας MIMO και στη συνέχεια εισάγει την έννοια της εφαρμοσιμότητας της τεχνολογίας MIMO στις δορυφορικές επικοινωνίες. Στο Κεφάλαιο 2 αναλύονται τα φαινόμενα διάδοσης και οι αντίστοιχες διαλείψεις που χαρακτηρίζουν τους συμβατικούς SISO δορυφορικούς διαύλους με απλή είσοδο – απλή έξοδο και λειτουργούν σε συχνότητες τόσο κάτω όσο και άνω των 10GHz. Επίσης, αναλύεται προτεινόμενο αναλυτικό μοντέλο συσχέτισης των διαλείψεων λόγω βροχής και πολυδιαδρομικής διάδοσης σε SISO κινητό δορυφορικό δίαυλο σε συχνότητες άνω των 10GHz. Στο Κεφάλαιο 3 μελετώνται διάφοροι MIMO επίγειοι ασύρματοι δίαυλοι και εισάγονται θεμελιώδεις έννοιες που αφορούν τη χωρητικότητά τους με βάση τη θεωρία MIMO. Επίσης, αναλύεται η χωρητικότητα σε διάφορες ειδικές περιπτώσεις MIMO επίγειων ασυρμάτων διαύλων μεταξύ των οποίων και ο προτεινόμενος MIMO ασύρματος δίαυλος σε συχνότητες άνω των 10GHz υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχής.

Στη συνέχεια, ενοποιούνται οι αναλύσεις των Κεφαλαίων 2 και 3 για τη σε βάθος μελέτη εφαρμογής της τεχνολογίας MIMO στους δορυφορικούς διαύλους. Συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 4 μελετώνται MIMO σταθεροί δορυφορικοί δίαυλοι που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχής και στους οποίους εφαρμόζονται οι τεχνικές διαφορισμού δορυφόρου και διαφορισμού θέσης. Στο Κεφάλαιο 5 μελετώνται MIMO κινητοί δορυφορικοί δίαυλοι που λειτουργούν σε συχνότητες κάτω των 10GHz υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω σκίασης και πολυδιαδρομικής διάδοσης και στους οποίους εφαρμόζονται οι τεχνικές διαφορισμού πόλωσης, διαφορισμού δορυφόρου και διαφορισμού κεραίας. Και στα δύο αυτά Κεφάλαια, έμφαση δίδεται στην έρευνα και ανάπτυξη μοντέλων για την αναλυτική περιγραφή των αντιστοίχων MIMO διαύλων και στην εκτίμηση της επίδοσής τους μέσω αναλυτικών εκφράσεων και προσομοιώσεων για τη χωρητικότητα διακοπής, την πιθανότητα διακοπής λόγω σφαλμάτων μετάδοσης ψηφίων και την πιθανότητα λάθους τους. Επιπλέον, στο Κεφάλαιο 5 δίδεται αναλυτική μεθοδολογία δημιουργίας χρονοσειρών των υπό μελέτη MIMO κινητών δορυφορικών διαύλων για την προσομοίωση επίδοσης των διαφόρων MIMO τεχνικών μετάδοσης σε σύγχρονα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών.



---

## Abstract

---

This PhD Thesis deals with the research and development of MIMO satellite channel models and their performance improvement estimation through analytical expressions and computer simulations.

Chapter 1 provides an introduction on the recent technological advances in the fields of satellite communications and MIMO technology and then outlines issues associated to the applicability of MIMO technology to satellite channels. Chapter 2 analyzes the propagation impairments and the respective fading effects which characterize the conventional SISO satellite channels operating at frequencies below and above 10GHz. An analytical model on the relation between rain fading and multipath fading effects in SISO land mobile satellite (LMS) channels operating at frequencies above 10GHz is also proposed. Chapter 3 addresses MIMO terrestrial wireless communications and analyzes some fundamentals on channel modeling and capacity evaluation based on the available vast MIMO theory. The channel capacity is evaluated in several special cases of MIMO terrestrial wireless channels among which a proposed MIMO millimeter-wave channel which operates under rain fading.

The analyses of Chapters 2 and 3 are then unified in Chapters 4 and 5 for an in-depth investigation of MIMO applicability to satellite communications. Specifically, Chapter 4 deals with MIMO fixed satellite channels which operate at frequencies above 10GHz under rain fading and to which satellite diversity and site diversity are separately assumed for the MIMO channel matrix generation. Chapter 5 deals with MIMO LMS channels which operate at frequencies below 10GHz under shadowing and multipath fading and to which polarization diversity, satellite diversity and antenna diversity are separately assumed for the MIMO channel matrix generation. In both Chapters 4 and 5, emphasis is put on channel modeling and performance evaluation issues for the respective MIMO satellite channels through analytical expressions and computer simulations. In this regard, performance measures employed refer to outage capacity, bit error outage probability (BEOP) and bit error probability (BEP). Moreover, specifically, in Chapter 5, a step-by-step methodology for the time-series generation of the proposed MIMO LMS channels is provided for the performance assessment of advanced MIMO-enabled satellite transmission systems.



---

## Συνεισφορές στη Διεθνή Βιβλιογραφία

---

Τα ερευνητικά αποτελέσματα που απορρέουν απευθείας από τη Διδακτορική Διατριβή έχουν δημοσιευτεί στα εξής διεθνή έγκριτα επιστημονικά περιοδικά με κριτές και πρακτικά διεθνών έγκριτων επιστημονικών συνεδρίων με κριτές:

### ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΔΙΕΘΝΗ ΕΓΚΡΙΤΑ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΜΕ ΚΡΙΤΕΣ:

- [Π1] A. Pérez-Neira, C. Ibars, J. Serra, A. del Coso, J. Gómez-Vilardebó, M. Caus, and **K.P. Liolis**, “MIMO Channel Modeling and Transmission Techniques for Multi-Satellite and Hybrid Satellite-Terrestrial Mobile Networks”, *Elsevier’s Physical Communication*, vol.4, no. 2, pp. 127-139, June 2011.
- [Π2] **K.P. Liolis**, A.D. Panagopoulos, and P.G. Cottis, “Bit Error Outage over SIMO Spatially Correlated Rain Fading Channels”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 53, no.3, pp. 204-209, June 2011.
- [Π3] **K.P. Liolis**, J. Gómez-Vilardebó, E. Casini, and A. Pérez-Neira, “Statistical Modeling of Dual-Polarized MIMO Land Mobile Satellite Channels”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 58, no. 11, pp. 3077-3083, November 2010.
- [Π4] P.-D.M. Arapoglou, **K.P. Liolis**, M. Bertinelli, A.D. Panagopoulos, P.G. Cottis, and R. De Gaudenzi, “MIMO over Satellite: A Review”, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol.13, no.1, 1<sup>st</sup> Quarter 2011.
- [Π5] **K.P. Liolis**, A.D. Panagopoulos, and S. Scalise, “On the Combination of Tropospheric and Local Environment Propagation Effects for Mobile Satellite Systems above 10GHz”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 3, pp. 1109–1120, March 2010.
- [Π6] **K.P. Liolis**, A.D. Panagopoulos, P.G. Cottis, and B.D. Rao, “On the Applicability of MIMO Principle to 10-66GHz BFWA Networks: Capacity Enhancement through Spatial Multiplexing and Interference Reduction through Selection Diversity”, *IEEE Transactions on Communications*, vol.57, no.2, February 2009.
- [Π7] **K.P. Liolis**, A.D. Panagopoulos, and P.G. Cottis, “Multi-Satellite MIMO Communications at Ku Band and Above: Investigations on Spatial Multiplexing for Capacity Improvement and Selection Diversity for Interference Mitigation”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Special Issue on Satellite Communications*, vol. 2007, doi:10.1155/2007/59608, 2007.
- [Π8] A.D. Panagopoulos, **K.P. Liolis**, and P.G. Cottis, “Rician  $K$ -Factor Distribution in Broadband Fixed Wireless Access Channels under Rain Fades”, *IEEE Communications Letters*, vol. 11, no. 4, pp. 301-303, April 2007.

### ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΔΙΕΘΝΗ ΕΓΚΡΙΤΑ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΜΕ ΚΡΙΤΕΣ:

- [Σ1] **K.P. Liolis**, A.D. Panagopoulos, P.-D.M. Arapoglou, and S. Scalise, “Rician  $K$ -Factor Statistics for Accurate Land Mobile Satellite Channel Modeling at Ku Band and Above in Temperate and Tropical Climatic Regions”, in Proc. *COST Action IC0802, MCM2*, Toulouse, France, November 2009.
- [Σ2] **K.P. Liolis**, J. Gómez-Vilardebó, E. Casini, and A. Pérez-Neira, “On the Statistical Modeling of MIMO Land Mobile Satellite Channels: A Consolidated Approach”, in

Proc. *27<sup>th</sup> AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC2009)*, Edinburgh, UK, June 2009.

- [Σ3] **K.P. Liolis**, A.D. Panagopoulos, and P.-D.M. Arapoglou, “An Analytical Unifying Approach for Outage Capacity Achieved in SIMO and MISO Broadband Satellite Channel Configurations”, in Proc. *3<sup>rd</sup> European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP2009)*, Berlin, Germany, March 2009.
- [Σ4] **K.P. Liolis**, I. Andrikopoulos, and P.G. Cottis, “On Statistical Modeling and Performance Evaluation of SIMO Land Mobile Satellite Channels”, in Proc. *4<sup>th</sup> Advanced Satellite Mobile Systems Conference (ASMS 2008)*, Bologna, Italy, August 2008.
- [Σ5] **K.P. Liolis**, A. Bolea-Alamanac, R. Prieto-Cerdeira, A.D. Panagopoulos, and A. Martellucci, “On the Relation between Mobility and Rainfall Effects in Ku/Ka-band Line-of-Sight Land Mobile Satellite Channels: An Analytical Statistical Approach”, in Proc. *2007 Int’l Workshop on Satellite and Space Communications (IWSSC2007)*, Salzburg, Austria, September 2007.
- [Σ6] **K.P. Liolis**, A.D. Panagopoulos, and P.G. Cottis, “Outage Capacity Statistics of MIMO Satellite Networks Operating at Ka Band and Above”, in Proc. *2006 Ka and Broadband Communications Conference*, Naples, Italy, September 2006.
- [Σ7] **K.P. Liolis**, A.D. Panagopoulos, and P.G. Cottis, “Rician K-Factor Statistics for Broadband Fixed Wireless Access Accurate Channel Modeling”, in Proc. *2006 IEEE Antennas and Propagation Society Int’l Symposium*, Albuquerque, USA, July 2006.

Συγκεκριμένα, τα ερευνητικά αποτελέσματα που έχουν δημοσιευτεί στα ανωτέρω επιστημονικά άρθρα αναλύονται αντίστοιχα στα εξής κεφάλαια της Διατριβής:

- Κεφάλαιο 1: [Π4]
- Κεφάλαιο 2: [Π5], [Π8], [Σ1], [Σ5], [Σ7]
- Κεφάλαιο 3: [Π6]
- Κεφάλαιο 4: [Π2], [Π7], [Σ3], [Σ6]
- Κεφάλαιο 5: [Π1], [Π3], [Σ2], [Σ4]

Επιπλέον, τα ερευνητικά αποτελέσματα της Διατριβής έχουν ήδη προσελκύσει το ενδιαφέρον της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας, τόσο από τον ακαδημαϊκό χώρο όσο και από το χώρο της βιομηχανίας. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 5 (άρθρα [Π3],[Σ2]) έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί εκτενώς μεταξύ άλλων στο πλαίσιο των εξής Ερευνητικών και Αναπτυξιακών (Research & Development, R&D) έργων που χρηματοδοτούνται από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (European Space Agency, ESA) και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (European Commission, EC):

- “MIMO Hardware Demonstrator” (ESA ARTES 5), όπου Κύριος Ανάδοχος του έργου είναι η εταιρία Elektrobit Wireless Communications Ltd (FI)

- “Study of Enhanced Multicarrier (OFDM) Digital Transmission Techniques for Broadband Satellites” (ESA ARTES 1), όπου Κύριος Ανάδοχος του έργου είναι η εταιρία Space Engineering SpA (IT)
- “MIMOSA: Characterisation of the MIMO Channel for Mobile Satellite Systems” (ESA ARTES 5), όπου Κύριος Ανάδοχος του έργου είναι το ερευνητικό ινστιτούτο Fraunhofer IIS (DE)
- “GRABEL: GNSS Reconfigurable Antenna Based Enhanced Localization” (EC FP7 SME), όπου Συντονιστής του έργου είναι η εταιρία ECLEXYS SAGL (CH).

Επιπλέον, λόγω της σχετικής πληρότητάς του, το προτεινόμενο μοντέλο MIMO κινητού δορυφορικού διαύλου, που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5 και έχει δημοσιευτεί στα άρθρα [Π3],[Σ2], χρησιμοποιείται ήδη εκτενώς ως μοντέλο αναφοράς στο πλαίσιο της νεοσύστατης διεθνούς δραστηριότητας προτυποποίησης DVB-NGH (Digital Video Broadcasting – Next Generation Handheld). Το πρότυπο DVB-NGH στοχεύει την επόμενη γενιά υβριδικών επίγειων/δορυφορικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων για την παροχή πολυμεσικών υπηρεσιών σε κινητές συσκευές χεριού.

Το ανωτέρω έντονο ενδιαφέρον στα αποτελέσματα της Διδακτορικής Διατριβής από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα αναδεικνύουν με ανάγλυφο τρόπο τις συνεισφορές της στη διεθνή βιβλιογραφία και τεχνολογική στάθμιση (state-of-the-art).

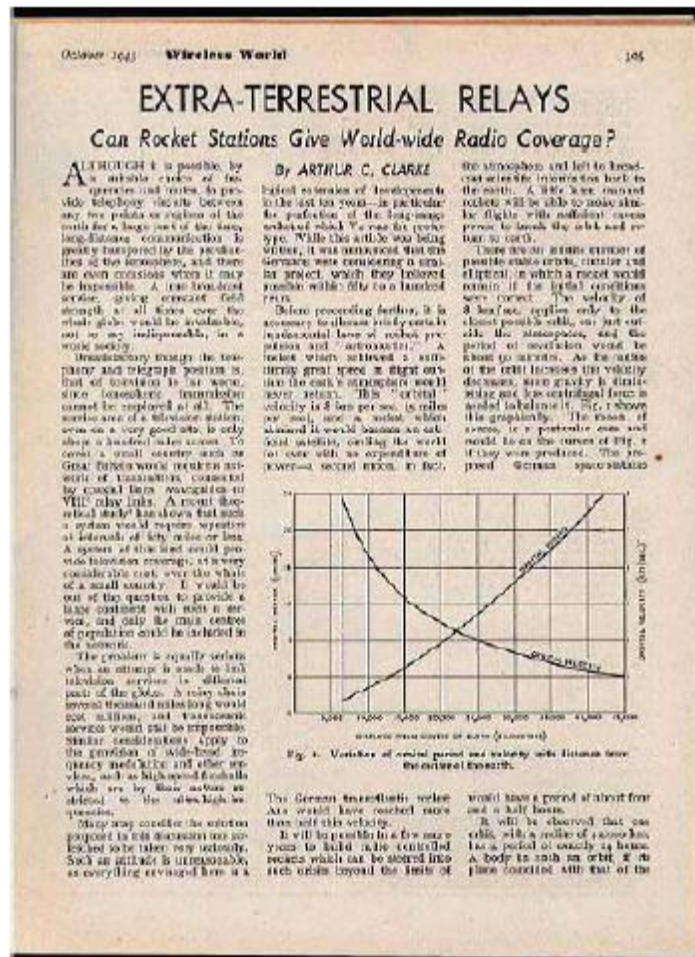




# Κεφάλαιο 1. Δορυφορικές Επικοινωνίες και Τεχνολογία MIMO

## 1.1. Εισαγωγή στις Δορυφορικές Επικοινωνίες

Με τον όρο «δορυφορικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα» ορίζεται κάθε σύστημα το οποίο παρέχει υπηρεσίες επικοινωνίας μεταξύ δύο ή περισσότερων σημείων μέσω δορυφόρου. Οι προσφερόμενες αυτές υπηρεσίες αφορούν κυρίως ευρυζωνικές υπηρεσίες (broadband services), υπηρεσίες στενής ζώνης (narrowband services) καθώς και υπηρεσίες ευρυεκπομπής (broadcast services) σε σταθερά, φορητά και κινητά τερματικά χρηστών.



Σχήμα 1.1: Εξώφυλλο πρώτου ιστορικού άρθρου περί δορυφορικών επικοινωνιών [Clarke 1945]

Η ιστορία των δορυφορικών επικοινωνιών (Satellite Communications, SatCom) φαίνεται να ξεκίνησε από το 1945 όταν ο Arthur Clarke, συγγραφέας πολλών έργων επιστημονικής

φαντασίας, δημοσίευσε τις ιδέες του για τη χρησιμοποίηση γεωστατικών δορυφόρων στις παγκόσμιες τηλεπικοινωνίες [Clarke 1945] (βλ. Σχήμα 1.1). Συγκεκριμένα, ο Clarke προέβλεψε τη δυνατότητα τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων από και προς οποιοδήποτε σημείο της επιφάνειας της γης μέσω της χρήσης των γεωστατικών δορυφόρων. Το όραμα του Clarke έγινε πραγματικότητα ύστερα από 20 χρόνια όταν ο διεθνής τηλεπικοινωνιακός οργανισμός INTELSAT έθεσε σε τροχιά για εμπορική χρήση τον πρώτο γεωστατικό δορυφόρο INTELSAT 1 (Early Bird). Το πρώτο αυτό δορυφορικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα χαρακτηρίστηκε από μικρή χρονική διάρκεια ζωής (1.5 χρόνο), χαμηλή χωρητικότητα (480 κανάλια φωνής) και υψηλό κόστος λειτουργίας (\$32500 ετήσιο κόστος ανά κανάλι). Έκτοτε, αλματώδης πρόοδος έχει σημειωθεί στις δορυφορικές επικοινωνίες όσον αφορά τη χρονική διάρκεια ζωής (15 χρόνια για ένα γεωστατικό δορυφόρο), τη χωρητικότητα και το κόστος λειτουργίας ενός τηλεπικοινωνιακού δορυφόρου (22500 κανάλια για το δορυφόρο INTELSAT VIII, που αντιστοιχούσε σε \$3000 ετήσιο κόστος ανά κανάλι στη δεκαετία του 1990) [Maral 2002].

Σήμερα, χιλιάδες δορυφόροι βρίσκονται σε τροχιά καλύπτοντας μεγάλες γεωγραφικές περιοχές και οι δορυφορικές επικοινωνίες αποτελούν πλέον ένα αναπόσπαστο τμήμα των περισσότερων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των δορυφορικών επικοινωνιών συνοψίζονται ως εξής:

- Ικανότητα κάλυψης μεγάλων γεωγραφικών περιοχών χωρίς να προαπαιτείται η ύπαρξη υποδομών, σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα. Συγκεκριμένα, τρεις γεωστατικοί δορυφόροι αρκούν να καλύψουν το σύνολο της επιφάνειας της Γης πλην των πόλων. Αυτό αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό, ιδιαίτερα για περιοχές μικρού πληθυσμού, δυσπρόσιτες ή απομακρυσμένες, όπου η επέκταση των ενσύρματων δικτύων είτε δεν είναι εφικτή ή είναι οικονομικά ασύμφορη.
- Εγγενής ιδιότητά για ευρυεκπομπή (broadcasting) και πολυεκπομπή (multicasting), που συνιστά αποδοτικότητα αξιοποίησης πόρων, καθώς το κόστος μετάδοσης ενός σήματος σε έναν επίγειο σταθμό είναι το ίδιο με το κόστος μετάδοσής του σε πολλαπλούς σταθμούς που βρίσκονται εντός της περιοχής κάλυψης του δορυφόρου.
- Υποστήριξης κινητικότητας: Ένας κινητός χρήστης που βρίσκεται εντός της περιοχής κάλυψης του δορυφόρου μπορεί να επικοινωνήσει με άλλους κινητούς ή σταθερούς χρήστες μέσω δορυφόρου.
- Μειωμένο σχετικά κόστος: Στις δορυφορικές επικοινωνίες το κόστος, συμπεριλαμβανομένου του αρχικού κόστους εγκατάστασης, είναι ανεξάρτητο της

απόστασης της ζεύξης. Επιπλέον, ένας δορυφόρος μπορεί να καλύψει μεγάλο τμήμα της Γης με λογικό κόστος και είναι σε θέση να εξυπηρετήσει μεγάλο αριθμό χρηστών, τόσο κινητούς όσο και σταθερούς.

- **Ποικιλία συνδέσεων:** Οι δορυφορικές επικοινωνίες είναι σε θέση να παρέχουν με απλό και οικονομικό τρόπο ευρυζωνικές υπηρεσίες, χωρίς πολύπλοκα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Σημαντική, επίσης, είναι και η δυνατότητα ενοποίησης υπηρεσιών από τα δορυφορικά δίκτυα.
- **Ταχεία ανάπτυξη και αναδιοργάνωση του δικτύου:** Από τη στιγμή που θα τεθεί σε τροχιά ένας δορυφόρος και για διάστημα όσο η χρονική διάρκεια ζωής του μπορεί να εξυπηρετήσει ένα μεγάλο πλήθος χρηστών. Οι διάφορες προσφερόμενες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες μπορούν εύκολα να παρασχεθούν σε μεγάλο πλήθος χρηστών σε διάφορες περιοχές με διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους και ταχύτερα σε σύγκριση με αντίστοιχα ενσύρματα δίκτυα.
- **Αποτελεσματική υποστήριξη καταστάσεων εκτάκτου ανάγκης:** Αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό των δορυφορικών δικτύων συνυφασμένο με την ταχεία ανάπτυξη και αναδιοργάνωσή τους καθώς μπορούν να παρέχουν αποτελεσματικά βασικές τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης, όπως π.χ. μετά από σεισμούς, πλημμύρες, κτλ, όταν τα επίγεια τηλεπικοινωνιακά μέσα έχουν ήδη καταρρεύσει.
- **Ευελιξία στη διάθεση εύρους ζώνης:** Είναι δυνατόν να παρέχεται εύρος ζώνης απλής ή διπλής κατεύθυνσης, στενής ή ευρείας ζώνης, συμμετρικό ή μη συμμετρικό. Επιπλέον, οι δορυφόροι επιτρέπουν ευρυζωνική πρόσβαση σε μεμονωμένους χρήστες, παρέχοντας λύση στο πρόβλημα τελικής πρόσβασης (last mile access). Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί η αποδοτικότητα ως προς το κόστος για ασύμμετρες συνδέσεις που προκύπτει από τη δυνατότητα ευρεκπομπής που διαθέτει ο δορυφόρος καθώς και η δυνατότητα μεταβλητής ταχύτητας προσφερόμενης υπηρεσίας κατά βούληση με το αντίστοιχο κόστος.

### 1.1.1. Δορυφορικές Τροχιές

Οι δορυφόροι τοποθετούνται σε τροχιές (orbits) γύρω από τη Γη. Ανάλογα με το ύψος της τροχιάς τους κατατάσσονται στις εξής κυρίως κατηγορίες:

- **Γεωστατικοί δορυφόροι (Geostationary Orbit, GEO):** Είναι εγκατεστημένοι στο επίπεδο που ορίζεται από τον Ισημερινό της Γης σε ύψος 35768km με περίοδο

περιφοράς γύρω από τη Γη 24h και ο χρόνος κατά τον οποίο ο δορυφόρος είναι ορατός είναι 24h. Το ύψος και η ισημερινή τροχιά των GEO δορυφόρων έχουν προσδιοριστεί με τέτοιο τρόπο ώστε οι GEO δορυφόροι να περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα όπως και η Γη. Συνεπώς, οι GEO δορυφόροι φαίνονται ακίνητοι από ένα σταθερό σημείο επί της επιφάνειας της Γης, χαρακτηριστικό που είναι ιδιαίτερα επιθυμητό στις δορυφορικές επικοινωνίες. Ένας δορυφόρος μπορεί να παρέχει κάλυψη σε επιφάνεια μιας ή δύο ηπείρων, ενώ τρεις GEO δορυφόροι μπορούν να παρέχουν παγκόσμια κάλυψη. Η πρώτη σειρά εμπορικών γεωστατικών δορυφόρων εμφανίστηκε το 1965 (Intelsat και Molnya) και παρείχε υπηρεσίες τηλεόρασης και τηλεφωνίας. Σήμερα, αναπτύσσονται δορυφορικά συστήματα σε γεωστατική τροχιά από πολύ μεγάλο αριθμό οργανισμών για μεγάλο πλήθος υπηρεσιών.

- Δορυφόροι χαμηλής τροχιάς (Low Earth Orbit, LEO): Οι δορυφόροι LEO τοποθετούνται σε ύψος μεταξύ 750km και 2000km και χαρακτηρίζονται από πολύ μικρότερη χρονική καθυστέρηση μετάδοσης και πολύ μικρότερες απώλειες διάδοσης σε σύγκριση με τους υπόλοιπους δορυφόρους. Για να επιτευχθεί παγκόσμια κάλυψη από δορυφόρους LEO απαιτούνται περισσότεροι από 30 δορυφόροι. Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες από το 1990 για τη μετάδοση υπηρεσιών φωνής και δεδομένων με τη χρήση δορυφόρων LEO. Ενδεικτικά αναφέρονται τα συστήματα Iridium, Globalstar και Orbcomm, τα οποία όμως δεν είχαν ιδιαίτερη επιτυχία λόγω της ταυτόχρονης εξέλιξης των επίγειων κινητών τηλεπικοινωνιών.
- Δορυφόροι μεσαίας τροχιάς (Medium Earth Orbit, MEO): Η χρήση 10 έως 20 δορυφορικών συστημάτων MEO σε ένα ύψος που κυμαίνεται μεταξύ των 10000km και των 20000km μπορεί να παρέχει παγκόσμια κάλυψη. Η χρονική καθυστέρηση μετάδοσης και οι απώλειες διάδοσης είναι μειωμένες σε σύγκριση με τους γεωστατικούς δορυφόρους. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα χρήσης δορυφόρων MEO είναι τα συστήματα πλοήγησης GPS (ΗΠΑ), Glonass (Ρωσία) και Galileo (Ευρώπη).
- Δορυφόροι ελλειπτικής τροχιάς (Highly Elliptic Orbit, HEO): Οι δορυφόροι HEO προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα για τις κινητές δορυφορικές επικοινωνίες. Το απόγειο, δηλαδή το πλέον απομακρυσμένο σημείο από την επιφάνεια της Γης, της τροχιάς τους κυμαίνεται από 40000km έως 50000km, ενώ το περίγειο, το πλησιέστερο σημείο προς την επιφάνεια της Γης, από 1000km έως 20000km. Η καθυστέρηση μετάδοσης είναι μεταβλητή. Στις ΗΠΑ, το πρόγραμμα Sirius Satellite

Radio και στην Ευρώπη το Ondas Media στοχεύουν να προσφέρουν ραδιοφωνικές υπηρεσίες χρησιμοποιώντας HEO δορυφόρους.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της γεωστατικής τροχιάς (GEO) έναντι της μη-γεωστατικής τροχιάς (LEO, MEO, HEO) είναι τα εξής:

- Ο δορυφορικός αναμεταδότης φαίνεται ακίνητος από τους επίγειους σταθμούς που βρίσκονται στην περιοχή κάλυψης και έτσι ελαχιστοποιούνται οι λειτουργικές απαιτήσεις αυτών (απλή παρακολούθηση της θέσης του δορυφόρου και αμετάβλητα χαρακτηριστικά μετάδοσης).
- Η κάλυψη της Γης που παρέχουν οι γεωστατικοί δορυφόροι είναι επαρκής και καλύπτει τις πλέον πυκνοκατοικημένες περιοχές του πλανήτη (σε γεωγραφικό πλάτος που κυμαίνεται μεταξύ  $+75^\circ$  και  $-75^\circ$ )
- Οι δορυφορικές ζεύξεις μέσω γεωστατικών δορυφόρων παρουσιάζουν ελάχιστη ολίσθηση συχνότητας Doppler και προβλέψιμες παρεμβολές με άλλα επίγεια τηλεπικοινωνιακά συστήματα λόγω της σταθερής γεωμετρίας.

Τα κύρια μειονεκτήματα της γεωστατικής τροχιάς (GEO) έναντι της μη-γεωστατικής τροχιάς (LEO, MEO, HEO) είναι τα εξής:

- Η χρονική καθυστέρηση της μετάδοσης είναι σημαντική λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ δορυφόρου και επίγειου σταθμού (πρακτικά κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 250ms και 280ms και εξαρτάται από το μήκος της διαδρομής που ακολουθεί το σήμα). Έτσι, οι δορυφόροι GEO δεν προσφέρονται για αμφίδρομες επικοινωνίες πραγματικού χρόνου.
- Οι GEO δεν καλύπτουν περιοχές της Γης με γεωγραφικό πλάτος μεγαλύτερο των  $75^\circ$ , οπότε πρέπει να χρησιμοποιηθούν και άλλοι δορυφόροι για να καλύψουν τις περιοχές αυτές.
- Όταν ο ήλιος βρίσκεται μέσα στο εύρος του κύριου λοβού ακτινοβολίας του επίγειου σταθμού παρατηρείται μείωση της ποιότητας υπηρεσίας λόγω αύξησης του θορύβου.

### 1.1.2. Δορυφορικό Ραδιοφάσμα

Το φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequencies, RF) αποτελεί κρίσιμο πόρο για τις τηλεπικοινωνίες αφού αποτελεί αγαθό σε ανεπάρκεια που πρέπει να μοιράζεται αποδοτικά μεταξύ όλων των τύπων ασύρματων υπηρεσιών τόσο επίγειων όσο και δορυφορικών. Προκειμένου να γίνεται βέλτιστη αξιοποίηση του ραδιοφάσματος, η Διεθνής Ένωση

Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union, ITU) έχει εκχωρήσει συχνότητες για όλες τις τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες.

**Πίνακας 1.1: Δορυφορικές ζώνες συχνοτήτων και οι υπηρεσίες τους**

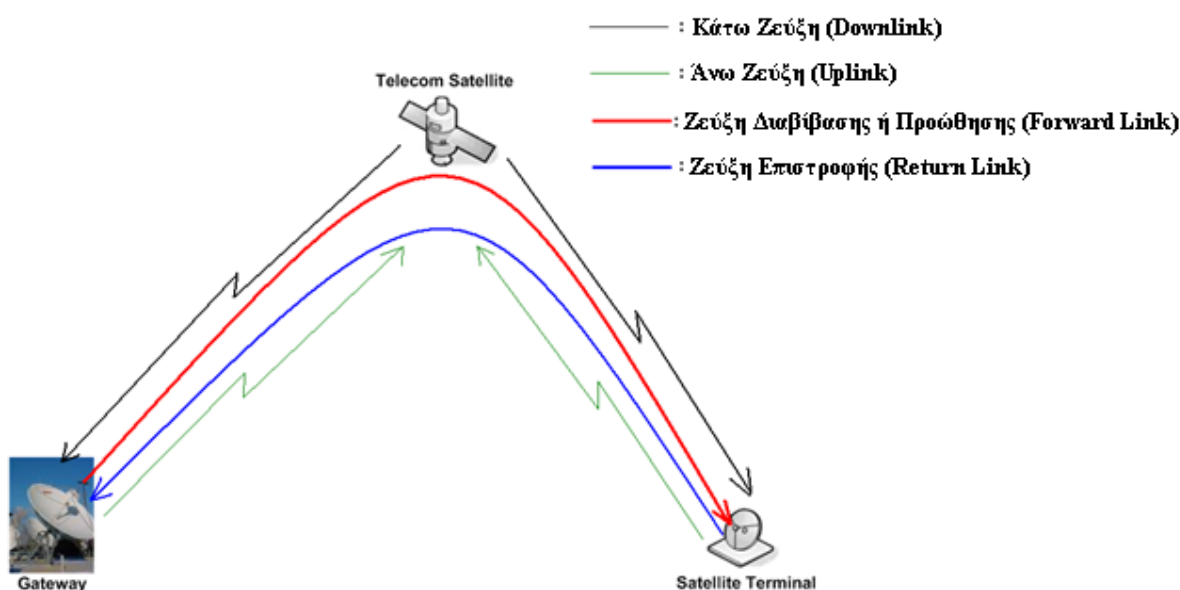
Ονομασία Ζώνης Συχνοτήτων	Συχνότητα Κάτω Ζεύξης	Συχνότητα Άνω Ζεύξης	Κατηγορίες Τηλεπικοινωνιακών Υπηρεσιών
L	1 GHz	2 GHz	Κινητή υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Mobile Satellite Service, MSS)
			Κινητή υπηρεσία ξηράς μέσω δορυφόρου (Land Mobile Satellite Service, LMSS)
S	2 GHz	4 GHz	Κινητή υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Mobile Satellite Service, MSS)
			Υπηρεσία έρευνας του διαστήματος (Space Research Service)
C	4 GHz	8 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS)
X	8 GHz	9 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου για στρατιωτικούς σκοπούς (Fixed Satellite Service military communication)
Ku	12 GHz	14 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS)
			Υπηρεσία εκπομπής μέσω δορυφόρου (Broadcast Satellite Service, BSS)
K	18 GHz	26.5 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS)
			Υπηρεσία εκπομπής μέσω δορυφόρου (Broadcast Satellite Service, BSS)
Ka	20 GHz	30 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS)
			Υπηρεσία εκπομπής μέσω δορυφόρου (Broadcast Satellite Service, BSS)

Οι ζώνες συχνοτήτων τις οποίες καταλαμβάνουν σήμερα οι δορυφορικές επικοινωνίες τόσο για τη ζεύξη επίγειου σταθμού-δορυφόρου (άνω ζεύξη, uplink), όσο και για τη ζεύξη δορυφόρου-επίγειου σταθμού (κάτω ζεύξη, downlink), παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1. Στον ίδιο πίνακα βρίσκει κανείς και τις βασικές κατηγορίες τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών μέσω δορυφόρου ανά ζώνη συχνοτήτων, όπως αυτές ορίζονται από το Διεθνή Κανονισμό Ραδιοεπικοινωνιών (World Radio Regulations).

### 1.1.3. Δορυφορικές Ζεύξεις

Με αναφορά στο Σχήμα 1.2, στις δορυφορικές επικοινωνίες διακρίνονται τα εξής είδη ζεύξεων:

- Κάτω Ζεύξη (Downlink): Ζεύξη από το δορυφόρο προς το δορυφορικό τερματικό.
- Άνω Ζεύξη (Uplink): Ζεύξη από το δορυφορικό τερματικό προς το δορυφόρο.
- Ζεύξη Διαβίβαση (ή Προώθησης) (Forward Link): Ζεύξη από τον επίγειο δορυφορικό σταθμό προς το δορυφορικό τερματικό μέσω του δορυφόρου.
- Ζεύξη Επιστροφής (Return Link): Ζεύξη από το δορυφορικό τερματικό προς τον επίγειο δορυφορικό σταθμό μέσω του δορυφόρου.



Σχήμα 1.2: Είδη δορυφορικών ζεύξεων

### 1.1.4. Αγορές Δορυφορικών Δικτύων

Οι κυριότερες εμπορικές δραστηριότητες και αγορές των δορυφορικών δικτύων έχουν σήμερα ως εξής:

- Υπηρεσίες μετάδοσης τηλεοπτικού σήματος απευθείας-στην-οικία (Direct To Home TV): Αναμφίβολα αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της αγοράς των δορυφορικών δικτύων. Αντιστοιχούν σε παγκόσμια έσοδα της τάξης των 33 δις. \$ λιανικής πώλησης με αναμενόμενη μέση ετησιοποιημένη αύξηση (Compound Annual Growth Rate, CAGR) της τάξης του 5-10% για τα επόμενα 5 χρόνια [FISI].
- Υπηρεσίες Backbone/Backhaul: Αναφέρονται σε δορυφορικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα που υποστηρίζουν Δίκτυα Παράδοσης Περιεχομένου (Content Delivery

Networks, CDN), ιδεατά ιδιωτικά δίκτυα (Virtual Private Networks, VPN) για τη σύνδεση εταιρικών σημείων, backhauling σε κυψελωτά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, διανομή τηλεοπτικού σήματος σε network head-ends, κτλ, και επομένως συμβάλλουν στη συνολική αποδοτικότητα του Διαδικτύου. Αποτελούν το δεύτερο κατά σειρά μερίδιο αγοράς των δορυφορικών δικτύων με παγκόσμια έσοδα περίπου της τάξης των 10 δις. \$ λιανικής πώλησης με αναμενόμενη μέση ετησιοποιημένη αύξηση της τάξης του 5-10% για τα επόμενα 5 χρόνια [FISI].

- Υπηρεσίες Ευρυζωνικής Πρόσβασης (Broadband access): Μέχρι πρόσφατα, η δορυφορική ευρυζωνική πρόσβαση αφορούσε κυρίως δορυφόρους που ήταν σχεδιασμένοι αποκλειστικά για υπηρεσίες ευρυεκπομπής και υπηρεσίες backbone, που λειτουργούσαν στην Ku ζώνη συχνοτήτων. Από το 2010, η ευρυζωνική πρόσβαση πρόκειται πλέον να επωφεληθεί των ειδικών δορυφόρων που πρόσφατα εκτοξεύτηκαν και τέθηκαν σε γεωστατική τροχιά στην Ευρώπη και οι οποίοι επιτρέπουν πραγματική προσφορά ευρυζωνικών υπηρεσιών στην Ka ζώνη συχνοτήτων. Μέχρι στιγμής, η αγορά έχει δημιουργήσει έσοδα της τάξης του 1 δις. \$ λιανικής πώλησης, κυρίως στις ΗΠΑ με αναμενόμενη μέση ετησιοποιημένη αύξηση της τάξεως του 20-30%, για τα επόμενα 5 έτη χάρη σε πολλά σχετικά έργα ανά τον κόσμο [FISI].
- Κινητές Δορυφορικές Υπηρεσίες (Mobile Satellite Services, MSS): Αφορούν υπηρεσίες δορυφορικών δικτύων που λειτουργούν κυρίως σε ζώνες συχνοτήτων κάτω των 3 GHz και υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις του ρυθμιστικού πλαισίου που επιτρέπει επικοινωνίες με συσκευές χεριού (handheld). Συνήθως αφορούν: υπηρεσίες επικοινωνίας συσκευών χεριού (handheld services) και οχημάτων (vehicular services) για χρήστες που περιάγονται πέραν της κυψελοειδούς κάλυψης (όπως π.χ., δημοσιογράφοι, επιχειρήσεις, ομάδες έρευνας και διάσωσης, κτλ), υπηρεσίες στενής ζώνης μεταξύ συσκευών (Machine to Machine, M2M) για τον εντοπισμό και την παρακολούθηση εμπορευμάτων, εφαρμογές SCADA, τη διαχείριση του ενεργειακού δικτύου, κτλ, υπηρεσίες στενής ζώνης (αρκετές εκατοντάδες kbps) για επικοινωνία στις θαλάσσιες και αεροναυτικές αγορές, καθώς και υπηρεσίες ευρυεκπομπής και πολυεκπομπής σε κινητούς χρήστες. Η αγορά MSS παράγει σε ετήσια βάση λιανικές πωλήσεις ύψους 1.4 δις. \$ για τη δορυφορική βιομηχανία με αναμενόμενη μέση ετησιοποιημένη αύξηση της τάξης του 7% για τα επόμενα 10 χρόνια [FISI].



- Υπηρεσίες Δορυφορικών Επικοινωνιών για Στρατιωτικούς Σκοπούς: Όσον αφορά την ευρωπαϊκή δορυφορική βιομηχανία, η αγορά αυτή παράγει ετήσια έσοδα της τάξης περίπου 0.5 δις. \$ λιανικής πώλησης που αντιστοιχούν σε περίπου 5% παραγγελιών από εθνικούς οργανισμούς άμυνας στην Ευρώπη και επιλεγμένες εξαγωγικές ευκαιρίες [FISI].

Προκειμένου να ικανοποιηθεί η ανάγκη για ευρυζωνική πρόσβαση σε τελικούς χρήστες, με στόχο να ενσωματωθεί αυτό το ραγδαία αυξανόμενο τμήμα της αγοράς στα σύγχρονα δορυφορικά συστήματα, κατέστη αναγκαία η ανάπτυξη μιας πλατφόρμας ικανής να παρέχει διαφορετικού τύπου υπηρεσίες. Στην κατεύθυνση αυτή αναπτύχθηκαν το πρότυπο Ψηφιακής Ευρυεκπομπής Βίντεο για Δορυφορικά Δίκτυα (Digital Video Broadcasting – Satellite, DVB-S) και, προσφάτως, η αναβαθμισμένη εκδοχή του, DVB-S2 [DVB-S2], [Morello 2006]. Σε συνδυασμό με τις τεχνολογικές εξελίξεις στο χώρο που κατέστησαν τους δορυφόρους από απλούς αναμεταδότες σημάτων σε εξελιγμένους τηλεπικοινωνιακούς κόμβους με δυνατότητες επεξεργασίας του σήματος (on-board processing, OBP), τα πρότυπα αυτά έδωσαν νέα ώθηση στα σύγχρονα δορυφορικά δίκτυα. Επίσης, το σύγχρονο πρότυπο DVB-SH (Satellite services to Handhelds), που αφορά παροχή πολυμεσικών εφαρμογών και δεδομένων βασισμένων στη δομή IP σε κινητούς δέκτες (όπως τα κινητά τηλέφωνα και τα PDAs) χρησιμοποιώντας υβριδική δορυφορική/επίγεια μετάδοση [DVB-SH], αποτελεί άλλη μια ένδειξη των σύγχρονων τάσεων των δορυφορικών δικτύων προς την ίδια κατεύθυνση.

## 1.2. Σύγχρονα Πρότυπα Δορυφορικών Επικοινωνιών

Στη συνέχεια αναλύονται σε συντομία ορισμένα βασικά σύγχρονα πρότυπα δορυφορικών επικοινωνιών που αφορούν κυρίως τη ζεύξη προώθησης (βλ. Σχήμα 1.2).

### 1.2.1. DVB-S2

Το πρότυπο DVB-S2 (Digital Video Broadcasting via Satellite – Second Generation) [DVB-S2],[Morello 2006] είναι η δεύτερη γενιά του ευρυζωνικού δορυφορικού προτύπου DVB-S, του οποίου η ανάπτυξη του ξεκίνησε το 2003 και εγκρίθηκε από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) το Μάρτιο του 2005. Το πρότυπο αυτό δημιουργήθηκε με σκοπό να επιτρέψει την επέκταση δορυφορικών εφαρμογών σε υπηρεσίες όπως η ευρυεκπομπή τηλεόρασης και ραδιοφώνου, η διαδραστική επικοινωνία (π.χ. πρόσβαση στο Διαδίκτυο), η

ψηφιακή συγκέντρωση ειδήσεων μέσω δορυφόρου DSNG (Digital Satellite News Gathering) και η διανομή τηλεοπτικού σήματος σε επιγείους πομπούς VHF/UHF.

Οι βασικοί άξονες της ανάπτυξης του προτύπου DVB-S2 ήταν οι εξής:

- Η βέλτιστη δυνατή ψηφιακή απόδοση του διαύλου, ώστε να προσεγγίζει το όριο του Shannon.
- Απόλυτη ευελιξία στην επιλογή κατάλληλης ψηφιακής διαμόρφωσης.
- Η ελάχιστη δυνατή πολυπλοκότητα του δέκτη και των λειτουργιών που αυτός επιτελεί.

Τα σημαντικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του προτύπου DVB-S2 είναι τα εξής :

- Χρησιμοποιούνται τέσσερα ισχυρά σχήματα ψηφιακής διαμόρφωσης. Συγκεκριμένα, τα σχήματα QPSK και 8PSK χρησιμοποιούνται για εφαρμογές ευρυεκπομπής μέσω μη γραμμικών αναμεταδοτών κοντά στην περιοχή κορεσμού, ενώ τα σχήματα 16APSK και 32APSK για επαγγελματικές εφαρμογές απαιτώντας, όμως, σχεδόν γραμμικούς (semi-linear) αναμεταδότες. Οι δυο τελευταίες τεχνικές απαιτούν μεγαλύτερο SNR για να επιτύχουν το ίδιο BER με τις δύο προηγούμενες.
- Για το φασματικό περιορισμό του RF εύρους ζώνης, το DVB-S2 επιβάλλει παράγοντα εξάπλωσης (roll-off factor) με τιμές  $a=0.25$ ,  $a=0.20$ , σε αντίθεση με το DVB-S, όπου  $a=0.35$ .
- Το DVB-S2 χρησιμοποιεί ένα πολύ ισχυρό σχήμα διόρθωσης λαθών (Forward Error Correction, FEC) που βασίζεται στην αλληλουχία εξωτερικού κυκλικού κώδικα BCH (Bose Chaundhuri Hocquenghem) και του εσωτερικού κώδικα LDPC (Low Density Parity Check). Το αποτέλεσμα είναι η φασματική απόδοση να απέχει μόλις 0.7dB από το θεωρητικό όριο του Shannon. Η επιλογή των παραμέτρων του FEC εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν στο διάυλο.
- Το DVB-S2 υποστηρίζει τη μετάδοση πολυμεσικών εφαρμογών που χρησιμοποιούν τις νέες τεχνικές κωδικοποίησης (όπως MPEG-4 Part10/AVC, Microsoft Windows Media 9).
- Οι υπηρεσίες διαδραστικής επικοινωνίας IS (Interactive Services) επιτυγχάνονται με τη χρήση της ζεύξης επιστροφής μέσω δορυφόρου DVB-RCS (Return Channel via Satellite), το οποίο μάλιστα πολύ πρόσφατα επικαιροποιήθηκε ώστε να συμπεριλάβει την παροχή διαδραστικών υπηρεσιών σε κινητούς χρήστες, όπως επίσης και να συμπεριλάβει άλλες καινοτόμες τεχνολογίες όπως, OBP και mesh διαδίκτυωση [DVB-RCS],[DVB-RCS2].

- Το DVB-S2 λειτουργεί στις ζώνες συχνοτήτων Ku (12.5/19GHz) και Ka (26.5/30GHz), οπότε επιβαρύνεται σημαντικά από τα προβλήματα διάδοσης των ραδιοκυμάτων στην τροπόσφαιρα.

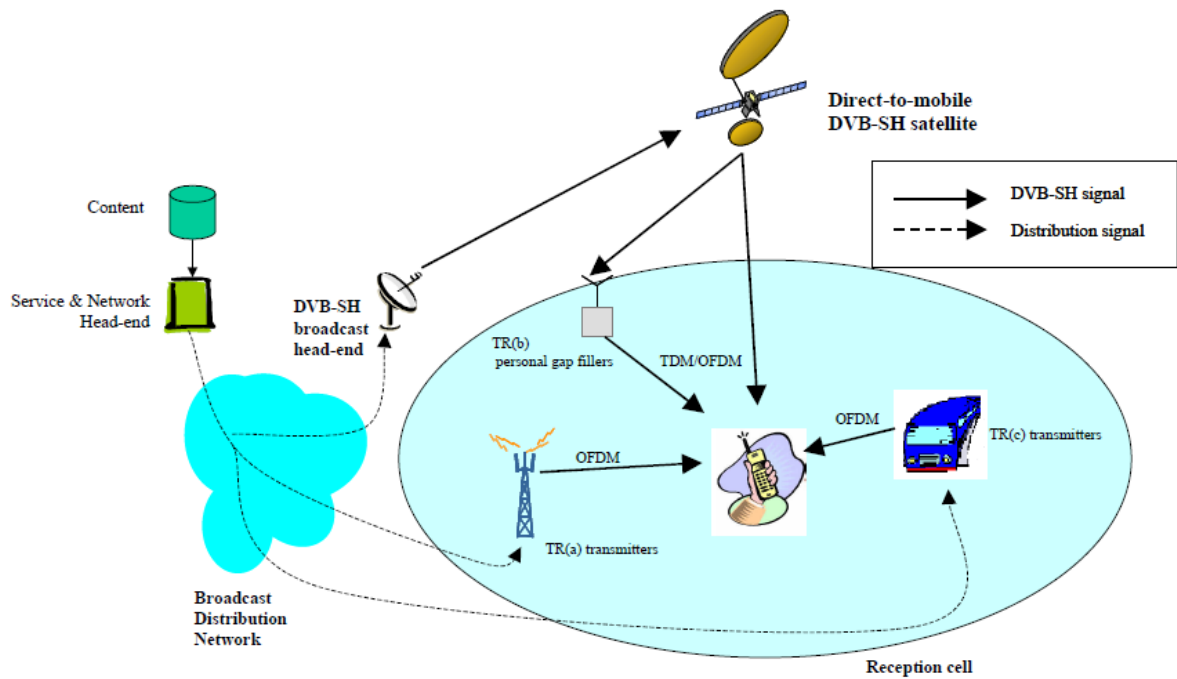
Συμπερασματικά, το DVB-S2 επιτυγχάνει γενικά :

- Φασματική απόδοση τουλάχιστον 30% υψηλότερη σε σχέση με το DVB-S (σε ορισμένες εφαρμογές πολλαπλάσια).
- Πληθώρα υπηρεσιών και εφαρμογών συνδυάζοντας την αποτελεσματικότητα και τη λειτουργικότητα του DVB-S για εφαρμογές απευθείας-στην-οικία DTH (Direct To Home) και του DVB-DSNG για επαγγελματικές εφαρμογές.
- Προσαρμοστικές τεχνικές μετάδοσης ώστε να βελτιστοποιηθεί η χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης.
- Προσιτότητα από οικονομικής άποψης και ανταγωνιστικότητα ως προς τις υπόλοιπες ευρυζωνικές τεχνολογίες.
- Συμβατότητα με το προγενέστερο πρότυπο δορυφορικών επικοινωνιών DVB-S.

### 1.2.2. **DVB-SH**

Το πρότυπο DVB-SH (Satellite services to Handhelds) προδιαγράφει ένα σύστημα που μπορεί να παρέχει πολυμεσικές εφαρμογές και IP δεδομένα σε κινητούς δέκτες (όπως κινητά τηλέφωνα και PDA) χρησιμοποιώντας υβριδική δορυφορική/επίγεια μετάδοση [DVB-SH]. Το πρότυπο DVB-SH σχεδιάστηκε για τηλεπικοινωνιακά συστήματα που λειτουργούν σε συχνότητες κάτω των 3 GHz, τυπικά στις ζώνες συχνοτήτων L και S. Συμπληρώνει το φυσικό στρώμα του προτύπου DVB-H και χρησιμοποιεί τις εφαρμογές του προτύπου DVB-IPDC.

Το πρότυπο DVB-SH παρέχει ολοκληρωμένη κάλυψη συνδυάζοντας μια δορυφορική συνιστώσα (Satellite Component) και μια συμπληρωματική επίγεια συνιστώσα CGC (Complementary Ground Component). Έτσι, η δορυφορική συνιστώσα διασφαλίζει παγκόσμια γεωγραφική κάλυψη σε περιοχές όπου η συνιστώσα οπτικής επαφής LOS (Line-Of-Sight) μεταξύ δορυφόρου και κινητού τερματικού δέκτη είναι ισχυρή. Συμπληρωματικά, ακολουθώντας τις βασικές αρχές του κυψελωτού δικτύου η συμπληρωματική επίγεια συνιστώσα καλύπτει τις υπόλοιπες περιοχές όπου η LOS εμποδίζεται, όπως για παράδειγμα σε μεγάλες πόλεις και σε εσωτερικούς χώρους (indoor environment). Εξαιτίας της δομής αυτής, το DVB-SH καλείται υβριδικό πρότυπο δορυφορικής και επίγειας μετάδοσης και απεικονίζεται παραστατικά στο Σχήμα 1.3.



**Σχήμα 1.3: Αρχιτεκτονική δικτύου DVB-SH**

Το περιεχόμενο που πρόκειται να μεταδοθεί μπορεί να αποσταλεί με διάφορους τρόπους (π.χ. μέσω οπτικών ινών ή xDSL) στον επίγειο πομπό. Με τη σειρά του, αυτός το αποστέλλει στο δορυφόρο, ο οποίος το επανεκπέμπει προς την περιοχή κάλυψής του. Αυτή είναι η δορυφορική συνιστώσα. Η συμπληρωματική επίγεια συνιστώσα CGC εκπέμπεται από τα εξής τρία είδη επίγειων επαναληπτών (repeaters), τα οποία με βάση το Σχήμα 1.3 [DVB-SH] είναι:

- TR(a) είναι οι επίγειες κεραιές ευρυεκπομπής, που βοηθούν στη λήψη του σήματος σε περιοχές που η δορυφορική λήψη είναι δύσκολη, ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές. Οι κεραιές αυτές παίρνουν το περιεχόμενο απευθείας από το επίγειο δίκτυο (Service & Network Head-end).
- TR(b) είναι οι προσωπικοί δορυφορικοί δέκτες (gap-fillers) που προσφέρουν περιορισμένη κάλυψη και αναμεταδίδουν το σήμα από το δορυφόρο. Χρησιμοποιούνται κυρίως για εσωτερικούς χώρους περιοχών που έχουν δορυφορική κάλυψη.
- TR(c) είναι κινούμενοι πομποί ευρυεκπομπής και δημιουργούν μια “κινητή συμπληρωματική υποδομή”, η οποία λαμβάνει το σήμα απευθείας από το επίγειο δίκτυο (Service & Network Head-end).

Για το DVB-SH ισχύουν δύο αρχιτεκτονικές μετάδοσης:

- SH-A χρησιμοποιώντας διαμόρφωση OFDM τόσο στην επίγεια όσο και στη δορυφορική μετάδοση
- SH-B χρησιμοποιώντας διαμόρφωση OFDM στην επίγεια και πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου TDM (Time Division Multiplexing) για τη δορυφορική μετάδοση

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά και οι βελτιώσεις που προσφέρει το DVB-SH σε σχέση με το υπάρχον πρότυπο DVB-H στο επίπεδο του φυσικού στρώματος (physical layer) είναι:

- Δυνατότητα επιλογής εκ μέρους των σχεδιαστών του δικτύου ανάμεσα σε διάφορα εύρη ζώνης (8,7,6,5,1.7 MHz) με μήκος FFT 8k, 4k, 2k και το επιπλέον 1k.
- Ανεξάρτητη λήψη του δορυφορικού και του επίγειου σήματος πραγματοποιώντας έτσι διαφορετική λήψη (receive diversity) σήματος. Αυτό γίνεται εφικτό είτε μέσω του δικτύου μοναδικής συχνότητας SFN (Single Frequency Network) είτε με μεγιστοποίηση του συνδυασμένου σήματος (Maximum Ratio Combining, MRC), είτε με τεχνικές διαφορισμού κώδικα (code diversity).
- Χρησιμοποίηση βελτιωμένου FEC που υποστηρίζει αρκετούς ρυθμούς κωδικοποίησης.
- Χρήση ευέλικτου αναδευτή ψηφίων (bit interleaver) που προσφέρει διαφορισμό στο πεδίο του χρόνου.
- Καλύτερη εκτίμηση της κατάστασης του διαύλου και ταχεία επανασύνδεση μετά από μεγάλη διάρκεια σκίασης ή παρεμπόδισης του σήματος.

### 1.2.3. DVB-NGH

Η διαδικασία προτυποποίησης DVB-NGH (Next Generation Handheld) ξεκίνησε το 2010 και είναι ακόμα σε εξέλιξη. Στόχος της είναι να έχει ολοκληρωθεί μέσα στο 2011 και οι πρώτες εμπορικά διαθέσιμες συσκευές να κυκλοφορήσουν το 2013. Αφορά το σχεδιασμό συστήματος επόμενης γενιάς για την παροχή κυρίως πολυμεσικών εφαρμογών σε κινητούς δέκτες (όπως κινητά τηλέφωνα και PDA) χρησιμοποιώντας υβριδική δορυφορική/επίγεια μετάδοση [DVB-NGH]. Ο σχεδιασμός αυτός καθίσταται αναγκαίος ώστε να συνοδευτεί επιτυχώς η μετάβαση στην ψηφιακή τηλεόραση και η σύγκλιση μεταξύ σταθερών, κινητών αλλά και γενικώς τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Όσον αφορά τη δορυφορική συνιστώσα του συστήματος, είναι υπό μελέτη διάφορες τεχνολογίες μετάδοσης οι οποίες είτε είναι πρωτότυπες στο πλαίσιο των δορυφορικών επικοινωνιών είτε έχουν ήδη εφαρμοστεί επιτυχώς στα πρότυπα δορυφορικών συστημάτων DVB-S2 και DVB-SH, όπως η τεχνική μετάδοσης OFDM, η τεχνική διαμόρφωσης APSK και η τεχνική κωδικοποίησης LDPC.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη Διατριβή παρουσιάζει η μελέτη της τεχνικής διαφορισμού πόλωσης για την εφαρμογή πρωτότυπων τεχνολογιών MIMO στις δορυφορικές ζεύξεις.

### **1.3. Τεχνολογία MIMO στις Επίγειες Επικοινωνίες**

#### **1.3.1. Εισαγωγή στην Τεχνολογία MIMO**

Οι βασικοί παράγοντες που χαρακτηρίζουν ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα είναι η ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service, QoS) και το κόστος υλοποίησης. Η απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας εξαντικρύζεται στην ικανότητα μιας ζεύξης να επιτύχει τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης ικανοποιώντας ταυτόχρονα τις προδιαγραφές για το μέγιστο επιτρεπτό ποσοστό λαθών στο δέκτη. Οι αυξημένες απαιτήσεις ή επιδόσεις όσον αφορά τόσο το ρυθμό μετάδοσης όσο και την ελαχιστοποίηση του ποσοστού λαθών, καθιστούν τα συστήματα MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, πολλαπλών εισόδων-πολλαπλών εξόδων) μια ιδιαίτερα ελκυστική λύση. Ο όρος MIMO αναφέρεται στη χρήση πολλαπλών κεραιών στην εκπομπή και τη λήψη. Με την επιλογή αυτή καθίσταται δυνατή η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης ή/και η βελτίωση της αξιοπιστίας μιας ζεύξης. Με βάση την έρευνα που έχει γίνει μέχρι σήμερα προκύπτει ότι τα συστήματα MIMO μπορούν να βελτιώσουν τις ανωτέρω παραμέτρους σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα που διαθέτουν μία κεραία εκπομπής και μία κεραία λήψης, SISO (Single Input Single Output). Σημαντικές είναι, όμως, και οι περιπτώσεις συστημάτων που διαθέτουν μια κεραία εκπομπής και πολλαπλές κεραιές λήψης, SIMO (Single Input Multiple Output), καθώς και συστημάτων που διαθέτουν πολλαπλές κεραιές εκπομπής και μιας κεραιάς λήψης, MISO (Multiple Input Single Output).

#### **1.3.2. Πλεονεκτήματα Τεχνολογίας MIMO**

Τα συστήματα MIMO προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των αντίστοιχων συμβατικών συστημάτων SISO, όπως το κέρδος πίνακα (array gain), το διαφορικό κέρδος (diversity gain), το κέρδος χωρικής πολυπλεξίας (spatial multiplexing gain) και η μείωση των παρεμβολών (interference reduction) [Paulraj 1997],[Paulraj 2003],[Paulraj 2004],[Biglieri 2007a],[Tse 2005],[Gesbert 2003]. Παρά το γεγονός ότι και τα συστήματα MISO και SIMO παρέχουν παρόμοια πλεονεκτήματα, μόνο τα MIMO μπορούν να δώσουν κέρδος χωρικής πολυπλεξίας και να αυξήσουν τη χωρητικότητα του διαύλου πάνω από το όριο του Shannon. Η χωρο-χρονική κωδικοποίηση (space-time coding) και οι διάφοροι αλγόριθμοι

λήψης του σήματος μπορούν να ανταλλάξουν αυτά τα κέρδη με ικανοποιητικό ποσοστό λαθών BER (Bit Error Ratio) στην περίπτωση όπου το σύστημα περιορίζεται από θόρυβο και παρεμβολές. Διαφορετικά, υπό ευνοϊκές συνθήκες διάδοσης μεγιστοποιείται η απόδοση του διαύλου. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα των συστημάτων MIMO θεωρώντας ένα σύστημα με  $M_R$  δέκτες και  $M_T$  πομπούς.

- **Κέρδος Πίνακα (Array Gain):** Το κέρδος πίνακα μπορεί να επιτευχθεί μετά από επεξεργασία στον πομπό και το δέκτη και έχει ως συνέπεια την αύξηση του μέσου σηματοθορυβικού λόγου λήψης (coherent combining). Το κέρδος πίνακα του πομπού ή του δέκτη απαιτεί γνώση της κατάστασης του διαύλου από τον πομπό ή το δέκτη, αντίστοιχα, και εξαρτάται από το πλήθος των κεραιών εκπομπής και λήψης. Η κατάσταση του διαύλου στη γενική περίπτωση είναι γνωστή στην πλευρά του δέκτη χωρίς, όμως, να ισχύει το ίδιο και για την πλευρά του πομπού, όπου είναι δύσκολη η εκτίμησή της. Το κέρδος πίνακα έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας τα τελευταία είκοσι χρόνια λόγω της ανάπτυξης των ευφυών κεραιών (smart antennas).
- **Διαφορικό Κέρδος (Diversity Gain):** Η ισχύς λήψης σε ένα ασύρματο δίαυλο αυξομειώνεται τυχαία, ανάλογα με τις διαλείψεις που εμφανίζονται στο διαρκώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον διάδοσης. Η επίτευξη διαφορισμού βασίζεται στη μετάδοση του σήματος σε πολλαπλές διαδρομές, ανεξάρτητες στην ιδανική περίπτωση, ως προς τις διαλείψεις. Οι πολλαπλές αυτές διαδρομές μπορούν να αφορούν είτε το πεδίο του χρόνου είτε το πεδίο της συχνότητας είτε το πεδίο του χώρου είτε το πεδίο της πόλωσης. Ο διαφορισμός στο πεδίο του χρόνου (time diversity) απαιτεί την αναμετάδοση των δεδομένων μετά από χρονική καθυστέρηση τουλάχιστον ίση με το χρόνο συνοχής  $T_C$  (coherence time). Αυτό έχει ως συνέπεια την ελάττωση του ρυθμού μετάδοσης, καθώς αποστέλλονται αντίγραφα της ίδιας πληροφορίας. Ο διαφορισμός στο πεδίο της συχνότητας (frequency diversity) απαιτεί τη μετάδοση των δεδομένων ταυτόχρονα σε διαφορετικές συχνότητες, που διαφέρουν μεταξύ τους τουλάχιστον κατά το εύρος ζώνης συνοχής  $B_C$  (coherence bandwidth). Η τεχνική αυτή οδηγεί σε ανεπιθύμητη σπατάλη εύρους ζώνης. Ο διαφορισμός στο πεδίο του χώρου (spatial diversity) απαιτεί τη μετάδοση των δεδομένων ταυτόχρονα σε διαφορετικές χωρικές θέσεις, δηλαδή κεραιές. Αντίστοιχα, ο διαφορισμός στο πεδίο της πόλωσης (polarization diversity) απαιτεί τη μετάδοση των δεδομένων ταυτόχρονα σε διαφορετικές πολώσεις. Οι δύο αυτές τελευταίες τεχνικές διαφορισμού προτιμώνται από τους διαφορισμούς χρόνου και συχνότητας, καθώς αυτοί δεν σπαταλούν τηλεπικοινωνιακούς πόρους, όπως ο

χρόνος μετάδοσης και το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Αν οι  $M_R \times M_T$  υποδιαύλοι, που αποτελούν το διάυλο MIMO, υφίστανται ανεξάρτητες μεταξύ τους διαλείψεις και το μεταδιδόμενο σήμα έχει σχεδιαστεί κατάλληλα, ο δέκτης μπορεί να συνδυάσει τα αντίστοιχα σήματα λήψης με τέτοιο τρόπο ώστε το τελικό σήμα να παρουσιάζει μικρότερη διασπορά πλατών σε σύγκριση με τη SISO περίπτωση. Έτσι, επιτυγχάνεται διαφορισμός τάξης  $M_R \times M_T$  κατά μέγιστο. Αν ο πομπός δεν γνωρίζει την κατάσταση του διαύλου είναι δύσκολο να εξαχθεί διαφορικό κέρδος. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται κατάλληλα σχεδιασμένα σήματα μετάδοσης και η τεχνική αναφέρεται ως χωρο-χρονική κωδικοποίηση (space-time coding) ή, αντίστοιχα, κωδικοποίηση στα πεδία της πόλωσης και του χρόνου (polarization-time coding).

- **Κέρδος Χωρικής Πολυπλεξίας (Spatial Multiplexing Gain):** Ο διάυλος MIMO προσφέρει γραμμική αύξηση (ανάλογη προς το  $\min(M_R, M_T)$ ) στη χωρητικότητα χωρίς να χρειάζεται αύξηση της ισχύος εκπομπής ή του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Αυτό το κέρδος, που αναφέρεται ως κέρδος χωρικής πολυπλεξίας, υλοποιείται μεταδίδοντας ανεξάρτητα μεταξύ τους σήματα από διαφορετικές κεραίες. Υπό ευνοϊκές συνθήκες διάδοσης, όπως όταν υφίσταται περιβάλλον διάδοσης πλούσιο σε σκεδαστές, ο δέκτης μπορεί να διαχωρίσει τις διαφορετικές αυτές ροές δεδομένων, επιτυγχάνοντας έτσι γραμμική αύξηση της χωρητικότητας.
- **Μείωση Παρεμβολών (Interference Reduction):** Οι παρεμβολές προκαλούνται λόγω της αναχρησιμοποίησης συχνότητας που γίνεται στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες. Όταν χρησιμοποιούνται πολλαπλές κεραίες, οι εκδοχές του επιθυμητού σήματος και των υπολοίπων σημάτων φθάνουν στο δέκτη έχοντας υποστεί χωρική διαφοροποίηση η οποία μπορεί να βοηθήσει στη μείωση των παρεμβολών. Για τη μείωση των παρεμβολών απαιτείται γνώση του διαύλου του επιθυμητού σήματος, χωρίς να χρειάζεται να είναι γνωστός ο διάυλος παρεμβολής. Η μείωση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί και από την πλευρά του πομπού, ελαττώνοντας την ισχύ των παρεμβολών σε σχέση με την ισχύ του επιθυμητού σήματος. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτρέπεται η αναχρησιμοποίηση συχνότητας και επιτυγχάνεται αύξηση της χωρητικότητας κάθε κυψέλης.

Τονίζεται ότι τα ανωτέρω πλεονεκτήματα που απορρέουν από την εφαρμογή της τεχνολογίας MIMO επιτυγχάνονται χωρίς πρόσθετη ισχύ εκπομπής και χωρίς πρόσθετο εύρος ζώνης.



### 1.3.3. Διείσδυση Τεχνολογίας MIMO στις Επίγειες Επικοινωνίες

Η τεχνολογία MIMO στις ασύρματες επικοινωνίες έχει προσελκύσει σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον σε παγκόσμια κλίμακα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μια απλή αναζήτηση για τη λέξη κλειδί «MIMO» στην παγκόσμια βάση ερευνητικών δημοσιευμένων εργασιών *IEEE Xplore* επιστρέφει περισσότερα από 16000 αποτελέσματα, γεγονός πολύ σημαντικό δεδομένου ότι η εισαγωγή της τεχνολογίας MIMO έγινε μόλις στα τέλη της δεκαετίας του 1990.

Ωστόσο, πέρα από το καθαρά ερευνητικό ενδιαφέρον, η τεχνολογία MIMO παρουσιάζει και πολύ μεγάλο πρακτικό ενδιαφέρον για την παγκόσμια βιομηχανία. Ιδιαίτερα αξιοσημείωτο αποτελεί το γεγονός ότι, λίγα μόλις χρόνια μετά την εφεύρεσή της, η τεχνολογία MIMO έχει ήδη υιοθετηθεί από μεγάλης κλίμακας διεθνή πρότυπα ασυρμάτων τεχνολογιών που αφορούν εμπορικά ασύρματα προϊόντα και δίκτυα, όπως τα συστήματα ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης (Broadband Wireless Access, BWA) [IEEE-WiMAX],[IEEE-MBWA],[Intel 2004],[Biglieri 2007b], τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Area Network, WLAN) [WWiSE 2004],[Petre 2004], τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς και πέραν (3G+) [3GPP],[3GPP2],[CDMA2000],[UMB], τα δίκτυα δεύτερης γενιάς επίγειας ψηφιακής τηλεοπτικής μετάδοσης [DVB-T2], καθώς και άλλα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα [Gesbert 2003],[Hottinen 2006],[Freescale 2008].

**Πίνακας 1.2: Πρότυπα ασυρμάτων δικτύων που έχουν υιοθετήσει την τεχνολογία MIMO**

Πρότυπο	Φυσικό Στρώμα
WLAN IEEE 802.11n	OFDM
WiMAX IEEE 802.16-2004	OFDM/OFDMA
WiMAX IEEE 802.16e	OFDMA
WiMAX IEEE 802.16m	OFDMA
3GPP Release 99	WCDMA
3GPP Release 7	WCDMA
3GPP Release 8 (LTE)	OFDMA
3GPP2 UMB	OFDMA
MBWA IEEE 802.20	OFDMA
WRAN IEEE 802.22	OFDMA
DVB-T2	OFDM

Ο Πίνακας 1.2 προσφέρει μια επισκόπηση όλων των υπαρχόντων προτύπων ασυρμάτων δικτύων που υιοθετούν τη χρήση της τεχνολογίας MIMO καθώς επίσης και σχετικές

πληροφορίες για το φυσικό στρώμα (physical layer) τους. Είναι φανερό ότι τα περισσότερα από τα ασύρματα πρότυπα MIMO συνδυάζονται με την τεχνολογία μετάδοσης OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) και πολλά συστήματα χρησιμοποιούν την τεχνολογία MIMO-OFDM, συμπεριλαμβανομένων των IEEE 802.11n, IEEE 802.16, καθώς και τα επικείμενα συστήματα 3GPP2 UMB (Ultra Mobile Broadband) και 3GPP LTE (Long Term Evolution). Ως εκ τούτου, μπορεί να ειπωθεί ότι η MIMO-OFDM είναι η πλέον διαδεδομένη υλοποίηση της τεχνολογίας MIMO [Stuber 2004], [Mietzner 2009].

Εύκολα λοιπόν μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι η τεχνολογία MIMO είναι μια ανερχόμενη τεχνολογία που πρόκειται να αλλάξει τα δεδομένα στις ασύρματες επικοινωνίες τα επόμενα χρόνια. Έχει τις καλύτερες προοπτικές και είναι ένα αντικείμενο που χρήζει αυξημένης ερευνητικής μελέτης προκειμένου οι υπηρεσίες που μπορεί να προσφέρει να γίνουν όσο το δυνατόν γρηγορότερα υλοποιήσιμες και ευρέως εκμεταλλεύσιμες.

#### **1.4. Εφαρμοσιμότητα Τεχνολογίας MIMO στις Δορυφορικές Επικοινωνίες**

Τα ανωτέρω σημαντικά οφέλη απόδοσης που επιτυγχάνονται στα επίγεια δίκτυα μέσω της χρήσης της τεχνολογίας MIMO έχουν δημιουργήσει περαιτέρω ενδιαφέρον για τη λεπτομερή διερεύνηση της εφαρμογής τεχνικών MIMO σε δορυφορικά δίκτυα.

Προς την κατεύθυνση αυτή συντείνει και το γεγονός ότι, πλέον, η τεχνολογία δορυφορικών επικοινωνιών πρέπει να αναπτυχθεί – και αναπτύσσεται – δραστικά ώστε να παρακολουθήσει την εκρηκτική αύξηση της ζήτησης για μεγαλύτερη χωρητικότητα, βελτίωση της ποιότητας υπηρεσιών (QoS) και πανταχού συνδεσιμότητας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα ευρυζωνικά αμφίδρομα δορυφορικά συστήματα που λειτουργούν στις ζώνες συχνοτήτων Ku και Ka με βάση τα πρότυπα DVB-S2/RCS [DVB-S2], [DVB-RCS2] για την παροχή πολυμεσικού περιεχομένου σήμερα σε σταθερά τερματικά και, στο εγγύς μέλλον, σε κινητά τερματικά. Επίσης, τα αναδυόμενα υβριδικά δορυφορικά/επίγεια συστήματα, τα οποία λειτουργούν στις ζώνες συχνοτήτων L και S με βάση το πρότυπο DVB-SH [DVB-SH] και πραγματοποιούν μετάδοση πολυμεσικού περιεχομένου σε κινητούς χρήστες, είναι ένα άλλο παράδειγμα προς αυτή τη κατεύθυνση. Αυτά τα παραδείγματα αναφέρονται σε βραχυπρόθεσμες εμπορικές υπηρεσίες, αξιοποιώντας τα υφιστάμενα πρότυπα στην αρχική ή ελαφρώς τροποποιημένη μορφή τους. Εντούτοις, το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα περιορισμένες δυνατότητες απόδοσης των δορυφορικών δικτύων ιδιαίτερα όταν οι παρεμβολές, η απόδοση και η διαθεσιμότητα έχουν κυρίαρχο

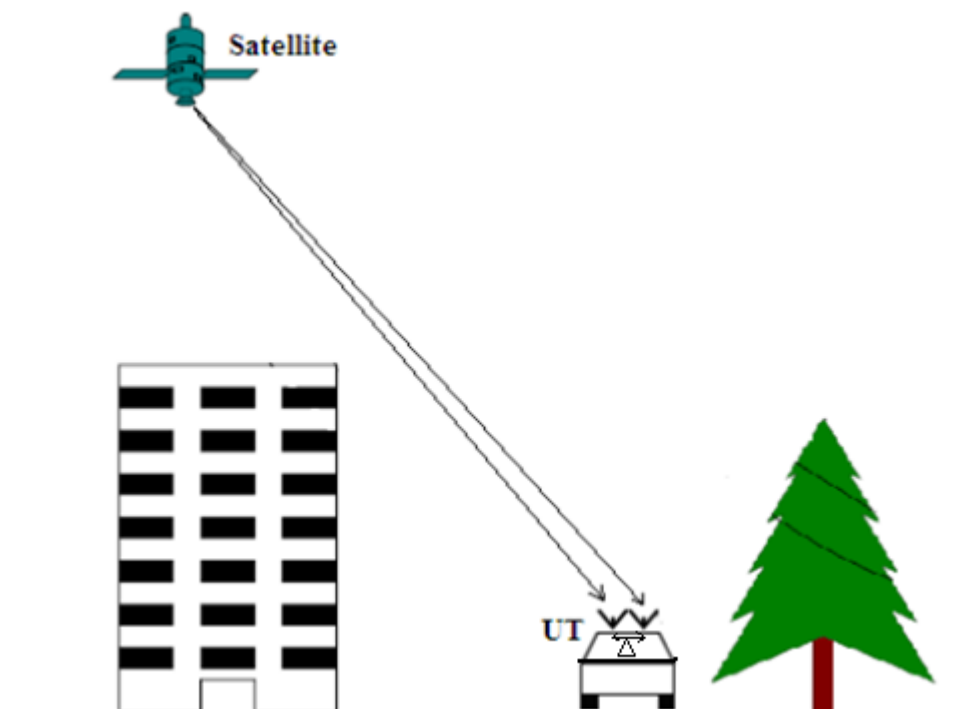
ρόλο. Επίσης, η βιομηχανία των δορυφορικών επικοινωνιών πρέπει να συμβαδίζει με αυτή των επίγειων επικοινωνιών, η οποία παρουσιάζει ισχυρή και ταχεία ανάπτυξη. Καίτοι προσφέρουν μεγάλη γεωγραφική κάλυψη, τα δορυφορικά δίκτυα υπόκεινται σε σειρά περιορισμών σε σύγκριση με τα επίγεια δίκτυα, οι οποίοι τα καθιστούν προτιμητέα κυρίως για τηλεοπτικές διαδραστικές υπηρεσίες προς αραιοκατοικημένες περιοχές. Ως εκ τούτου, απαιτούνται επειγόντως νέες προηγμένες τεχνικές για την ενίσχυση των δυνατοτήτων των δορυφορικών δικτύων αλλά και την αύξηση της χωρητικότητας και διαθεσιμότητας των δορυφορικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Από αυτή την άποψη, και δεδομένων των ελπιδοφόρων αποτελεσμάτων που έχει αποδώσει η τεχνολογία MIMO στα επίγεια ασύρματα δίκτυα μέχρι σήμερα, η εφαρμογή της σύγχρονης τεχνολογίας MIMO στα δορυφορικά δίκτυα αναμένεται να προσφέρει σημαντικά οφέλη και στα δορυφορικά δίκτυα. Ωστόσο, λόγω των θεμελιωδών διαφορών που υπάρχουν μεταξύ των επίγειων και των δορυφορικών συστημάτων, η αντίστοιχη μελέτη εφαρμογής δεν αποτελεί εύκολο έργο· αντίθετα, αποτελεί το βασικό κίνητρο και το κύριο αντικείμενο μελέτης της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής.

Ο δορυφορικός διάυλος παρουσιάζει σημαντικές διαφορές σε σύγκριση με τον επίγειο διάυλο, οπότε η εφαρμογή της τεχνολογίας MIMO στις δορυφορικές επικοινωνίες δεν αποτελεί μια απλή επέκταση. Ένα από τα θεμελιώδη προβλήματα είναι η έλλειψη πλήρως ανεξάρτητων μεταξύ τους διαύλων στο τμήμα της δορυφορικής ζεύξης μεταξύ δορυφόρου και επίγειου τερματικού. Επίσης, στις δορυφορικές ζεύξεις, λόγω των μεγάλων απωλειών ελευθέρου χώρου, είναι απαραίτητη η ύπαρξη οπτικής επαφής (LOS) του επίγειου τερματικού με το δορυφόρο. Αυτή η απαραίτητη προϋπόθεση δεν είναι συμβατή με τις συνθήκες που επικρατούν συνήθως στους επίγειους διαύλους, όπου συναντώνται συχνά περιβάλλοντα πλούσια σε σκεδαστές και επικοινωνία χωρίς οπτική επαφή (NLOS). Έτσι, η έλλειψη σκεδαστών στην περιοχή κοντά στο δορυφόρο οδηγεί σε μείωση του βαθμού του πίνακα διάδοσης του διαύλου MIMO (rank deficiency of channel matrix  $\mathbf{H}$ ) [Liolis 2007b]. Είναι φανερό ότι η απλή τοποθέτηση πολλαπλών κεραιών σε ένα δορυφόρο δεν οδηγεί σε άμεση εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων και των δυνατοτήτων της τεχνολογίας MIMO. Στη συνέχεια αυτής της ενότητας αναπτύσσονται όλες οι δυνατές μέθοδοι εφαρμογής της τεχνολογίας MIMO σε ένα δορυφορικό δίκτυο επικοινωνιών. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ο διαφορισμός κεραιάς (antenna diversity), ο διαφορισμός θέσης (site diversity), ο διαφορισμός δορυφόρου ή τροχιάς (satellite/orbital diversity), ο διαφορισμός πόλωσης (polarization diversity), ο διαφορισμός πολλαπλών δεσμών (multi-beam diversity) και ο διαφορισμός δορυφόρου και επίγειων επαναληπτών σε υβριδικό σύστημα (satellite-

terrestrial gap filler diversity). Ο διαφορισμός αναφέρεται τόσο στην εκπομπή όσο και στη λήψη του σήματος. Για κάθε μέθοδο ο διαφορισμού, αναλύονται τα σχετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

#### 1.4.1. Διαφορισμός Κεραίας

Στο διαφορισμό κεραίας, ένας δορυφόρος επικοινωνεί με επίγειο δορυφορικό τερματικό το οποίο είναι εξοπλισμένο με συστοιχία  $M_R$  κεραιών (Antenna Array). Συνεπώς, η διάταξη του συστήματος αναφέρεται σε  $M_R \times 1$  SIMO δορυφορικό δίαυλο. Η απόσταση ( $\Delta$ ) μεταξύ δύο διαδοχικών στοιχείων της κεραίας του επίγειου δορυφορικού τερματικού έχει ιδιαίτερη σημασία για τη συσχέτιση των σημάτων λήψης. Δεδομένων των χωρικών περιορισμών που υφίστανται συνήθως σε ένα επίγειο δορυφορικό τερματικό, η απόσταση  $\Delta$  είναι συνήθως αρκετά μικρή με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη χωρική συσχέτιση των σημάτων λήψης. Κατ' επέκταση, τα κέρδη από την τεχνολογία MIMO δεν είναι ιδιαίτερα υψηλά. Ωστόσο, πρόκειται για συμπαγή λύση που επιτρέπει τον εύκολο συνδυασμό των πολλαπλών σημάτων λήψης στον ίδιο δέκτη. Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζεται σχηματικά η διάταξη του διαφορισμού κεραίας.

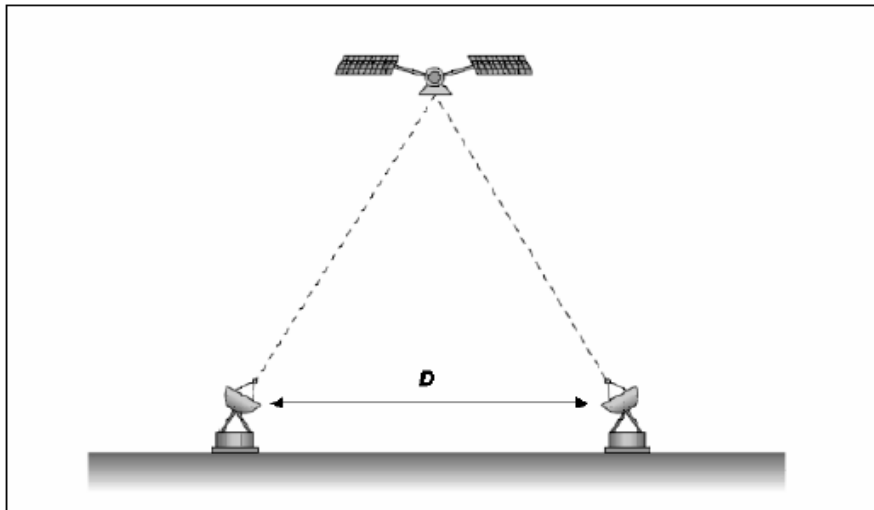


Σχήμα 1.4: Διαφορισμός κεραίας (Antenna Diversity)

Η εφαρμογή της τεχνικής διαφορισμού κεραίας στο πλαίσιο των MIMO δορυφορικών επικοινωνιών έχει μελετηθεί στις εργασίες [Liolis 2008], [Moraitis 2009].

### 1.4.2. Διαφορισμός Θέσης

Στο διαφορισμό θέσης πολλαπλοί  $M_R$  επίγειοι σταθμοί επικοινωνούν με ένα δορυφόρο. Συνεπώς, η διάταξη του συστήματος αναφέρεται σε  $M_R \times 1$  SIMO δορυφορικό δίαυλο. Οι σταθμοί αυτοί συνεργάζονται μεταξύ τους και απέχουν αρκετά ο ένας από τον άλλο. Η τεχνική αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως γενικευμένη επέκταση του διαφορισμού κεραίας και έχει μελετηθεί μέχρι σήμερα ως ένας αποτελεσματικός τρόπος εξάλειψης των αποσβέσεων λόγω βροχής που παρουσιάζονται στις ζώνες συχνοτήτων Ku, Ka και Q/V, εξαιτίας της αποσυσχέτισης των σχετικών ραδιοδρόμων [Panagoroulos 2004a],[Panagoroulos 2004b],[Panagoroulos 2005b],[Matricciani 2003],[Goldhirsh 1997]. Επειδή, όμως, η απόσταση δορυφόρου-επίγειου σταθμού είναι πολύ μεγάλη, η απαιτούμενη απόσταση ανάμεσα στους επίγειους σταθμούς ( $D$ ) πρέπει να είναι της τάξης των μερικών km, για να είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους οι αντίστοιχοι επιμέρους δίαυλοι. Στο Σχήμα 1.5 παρουσιάζεται σχηματικά η διάταξη του διαφορισμού θέσης.



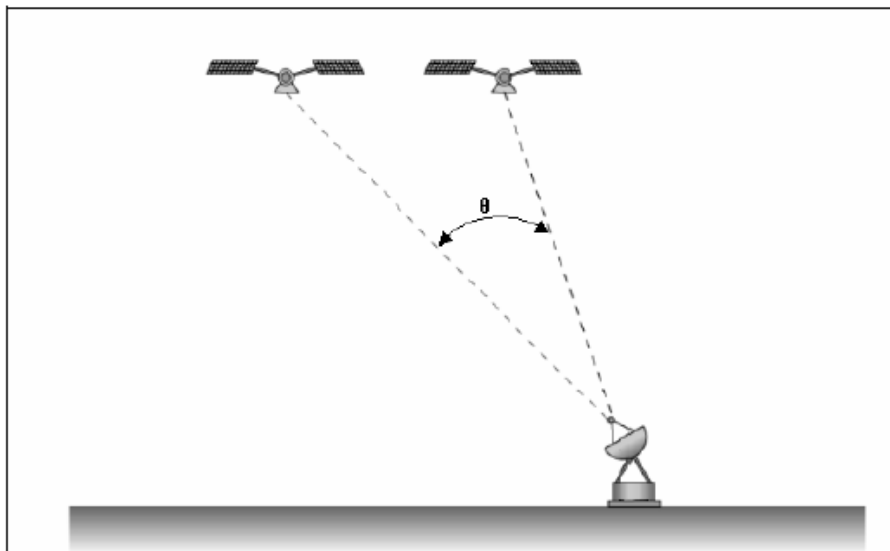
Σχήμα 1.5: Διαφορισμός θέσης (Site Diversity)

Η εφαρμογή της τεχνικής διαφορισμού θέσης στο πλαίσιο των MIMO δορυφορικών επικοινωνιών έχει μελετηθεί στις εργασίες [Liolis 2009a], [Cioni 2007a], [Cioni 2007b].

### 1.4.3. Διαφορισμός Δορυφόρου

Στο διαφορισμό δορυφόρου (ή δορυφορικής τροχιάς), πολλοί ( $M_T$  το πλήθος) δορυφόροι, των οποίων οι θέσεις επί της δορυφορικής τροχιάς απέχουν αρκετά ώστε να δημιουργούνται ανεξάρτητοι μεταξύ τους δίαυλοι, επικοινωνούν με επίγειο σταθμό εξοπλισμένο είτε με μία είτε με πολλές ( $M_R$  το πλήθος) κεραίες. Συνεπώς, η διάταξη του συστήματος αναφέρεται

είτε σε  $1 \times M_T$  MISO είτε σε  $M_R \times M_T$  MIMO δορυφορικό δίαυλο, αντίστοιχα. Η τεχνική αυτή έχει χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα για την αποτελεσματική μείωση των διαλείψεων λόγω βροχής στις ζώνες συχνοτήτων Ku, Ka και Q/V [Matricciani 1987], [Matricciani 1995], [Kanellopoulos 1991], [Kanellopoulos 1999], [Panagopoulos 2004a], [Panagopoulos 2002c], [Panagopoulos 2004b] αλλά και των διαλείψεων λόγω σκίασης στις ζώνες συχνοτήτων L και S [Briskman 2002],[Michalski 2002], [Akturan 2008], [King 2005a], [Hult 2005], [Martin 2004], [MILADY], [Vazquez-Castro 2002], [Heuberger 2008], [Arndt 2010]. Αποτελεί όμως και μια από τις πιθανότερες μεθόδους για τη δημιουργία δορυφορικού διαύλου MIMO. Το κυριότερο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η ανεκτή πολυπλοκότητα υλοποίησης, αφού τα σήματα λήψης στον επίγειο σταθμό μπορούν να συνδυαστούν εύκολα, δεδομένου ότι όλες οι κεραιές λήψης είναι εγκατεστημένες στον ίδιο δέκτη. Το κόστος της χρησιμοποίησης πολλών δορυφόρων αποτελεί μειονέκτημα. Επίσης, ένα σημαντικό πρόβλημα είναι η έλλειψη συγχρονισμού των σημάτων που φθάνουν στον επίγειο δέκτη. Αυτό οφείλεται στη διαφορετική καθυστέρηση διάδοσης. Στο Σχήμα 1.6 απεικονίζεται η διάταξη της τεχνικής διαφορισμού δορυφόρου. Ως προς την απόσταση μεταξύ δύο δορυφόρων, έχουν προσδιορισθεί [King 2007a] οι τιμές για τις οποίες ελαχιστοποιείται ο συντελεστής χωρικής συσχέτισης, με αποτέλεσμα η χρησιμοποίηση πολλών δορυφόρων σε συνδυασμό με τη χρησιμοποίηση πολλών κεραιών στο δέκτη να μπορεί να προσφέρει σημαντικά κέρδη ως προς τη χωρητικότητα του διαύλου.

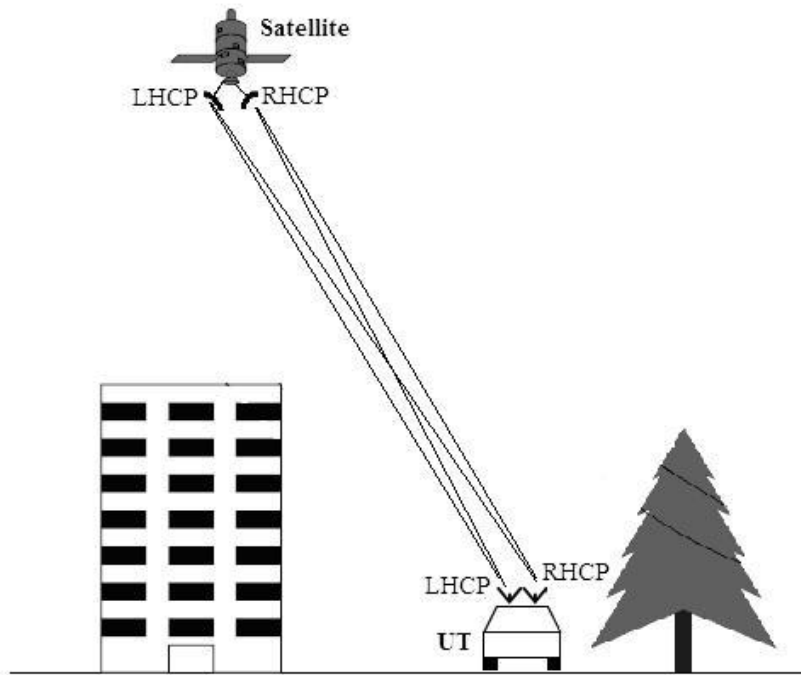


**Σχήμα 1.6: Διαφορισμός δορυφόρου (ή τροχιάς) (Satellite or Orbital Diversity)**

Η εφαρμογή της τεχνικής διαφορισμού δορυφόρου στο πλαίσιο των MIMO δορυφορικών επικοινωνιών έχει μελετηθεί στις εργασίες [Perez-Neira 2011], [Perez-Neira 2008], [King 2005a], [King 2005b], [King 2006a], [King 2007a], [Yamashita 2005].

#### 1.4.4. Διαφορισμός Πόλωσης

Στην περίπτωση αυτή ένας δορυφόρος εκπέμπει υπό δύο διαφορετικές ορθογώνιες μεταξύ τους πολώσεις και επικοινωνεί με ένα επίγειο δέκτη που λαμβάνει και τις δύο πολώσεις. Έτσι, δημιουργείται ένα 2x2 MIMO σύστημα, παρά το γεγονός ότι χρησιμοποιείται μόνο μια κεραία στο δορυφόρο. Οι δύο πολώσεις που χρησιμοποιούνται συνήθως στις κινητές δορυφορικές επικοινωνίες στις ζώνες συχνοτήτων L και S είναι η δεξιόστροφη RHCP (Right Hand Circular Polarization) και η αριστερόστροφη κυκλική πόλωση LHCP (Left Hand Circular Polarization). Αντίθετα, στις δορυφορικές επικοινωνίες στις ζώνες συχνοτήτων Ku και Ka, οι δύο πολώσεις που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι η οριζόντια HP (Horizontal Polarization) και η κατακόρυφη πόλωση VP (Vertical Polarization). Η βασική αρχή λειτουργίας της τεχνικής αυτής βασίζεται στην ευαισθησία της πόλωσης στα φαινόμενα της ανάκλασης και της διάθλασης. Αυτό το γεγονός δημιουργεί την απαραίτητη τυχαιότητα που είναι επιθυμητό να έχει το σήμα όταν φθάνει στον επίγειο δέκτη. Ένα από τα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με το διαφορισμό δορυφορικής τροχιάς είναι η εξάλειψη του κόστους λόγω χρησιμοποίησης πολλών δορυφόρων. Επιπλέον, με το διαφορισμό πόλωσης παρακάμπτεται το πρόβλημα της έλλειψης συγχρονισμού. Από την άλλη πλευρά, η τεχνική αυτή μπορεί να αυξήσει το ρυθμό μετάδοσης μόνο κατά δύο φορές, ενώ όταν χρησιμοποιούνται  $m$  δορυφόροι η χωρητικότητα μπορεί να αυξηθεί κατά ένα παράγοντα  $m$  [Horvath 2006]. Στο Σχήμα 1.7 απεικονίζεται η διάταξη του 2x2 συστήματος MIMO που προκύπτει από τη χρησιμοποίηση δύο διαφορετικών πολώσεων σε ζεύξη δορυφόρου και επίγειου δέκτη.



**Σχήμα 1.7: Διαφορισμός πόλωσης (Polarization Diversity)**

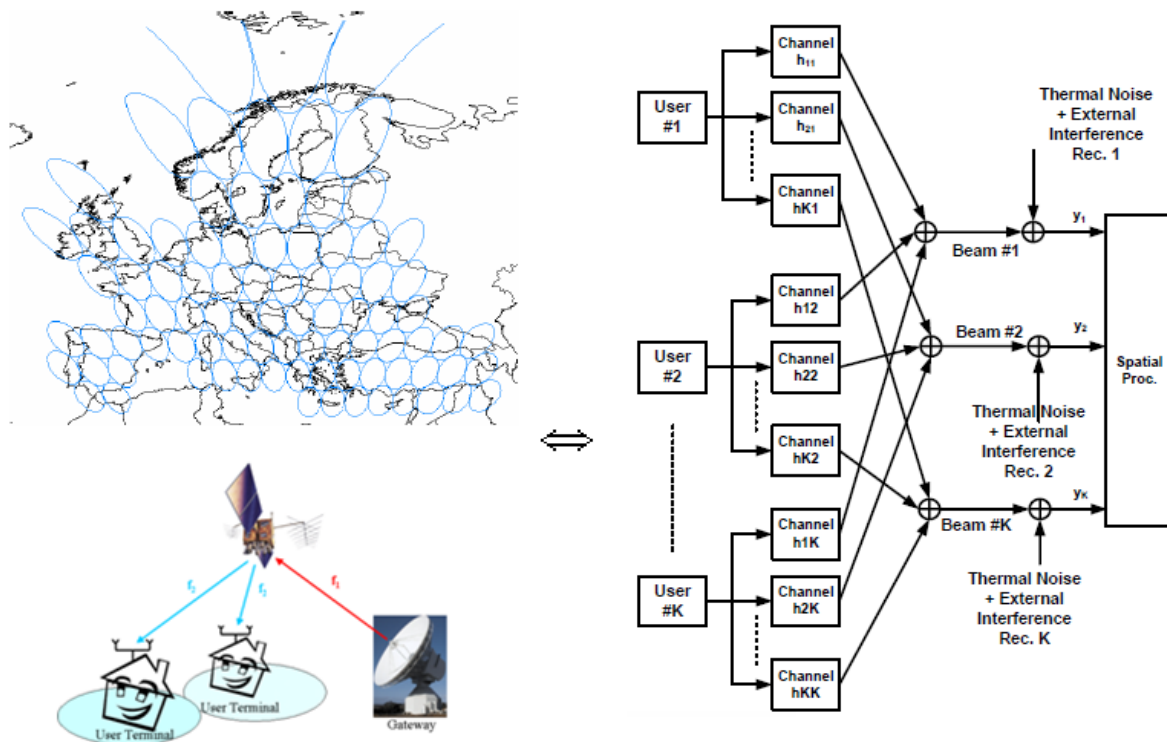
Η εφαρμογή της τεχνικής διαφορισμού πόλωσης στο πλαίσιο των MIMO δορυφορικών επικοινωνιών έχει μελετηθεί στις εργασίες [Liolis 2009d], [Liolis 2010b], [Perez-Neira 2011], [Arapoglou 2011b], [Arapoglou 2011c], [Hult 2005], [Frigyes 2005], [Horvath 2005], [Horvath 2006], [Horvath 2007], [King 2006b], [King 2006c], [King 2007a], [King 2007b], [Sellathurai 2006], [Taricco 2003], [Lacoste 2009], [MIMOSA], [Cheffena 2011].

#### 1.4.5. Διαφορισμός Πολλαπλών Δεσμών

Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται ένας δορυφόρος με πολλαπλές δέσμες (multi-beam), μπορούν να προκύψουν MIMO δορυφορικοί δίαυλοι όταν ο συντελεστής αναχρησιμοποίησης συχνότητας μειώνεται στη μονάδα. Στην περίπτωση αυτή, λόγω της μερικής επικάλυψης των διαγραμμάτων ακτινοβολίας της κεραίας, ένα δορυφορικό τερματικό μπορεί να λαμβάνει σήματα από διάφορες δορυφορικές κεραίες, όπως φαίνεται από το Σχήμα 1.8. Σε αυτήν την περίπτωση, είναι δυνατόν να καθοριστεί ένα σενάριο πολλαπλών χρηστών και, ως εκ τούτου, να προκύψει ένας ισοδύναμος πίνακας διαύλου MIMO πολλαπλών χρηστών, για τον οποίο μπορούν να εφαρμοστούν MIMO τεχνικές precoding στη ζεύξη διαβίβασης. Πρόκειται για μια κατηγορία MIMO τεχνικών που στόχο έχουν να μειώσουν τις ενδο-συστημικές παρεμβολές και οι οποίες έχουν μελετηθεί αρκετά για ευρυζωνικά δορυφορικά συστήματα πολλαπλών δεσμών που λειτουργούν στις ζώνες



συχνοτήτων Ku και Ka [Multibeam-IM],[Cottatellucci 2006], [Gallinaro 2005],[Debbah 2006],[Alvarez-Diaz 2005],[Alvarez-Diaz 2007]. Πρόσφατα, μάλιστα, συμπεριλήφθηκαν και στο νέο δορυφορικό πρότυπο DVB-RCS2 [DVB-RCS2].



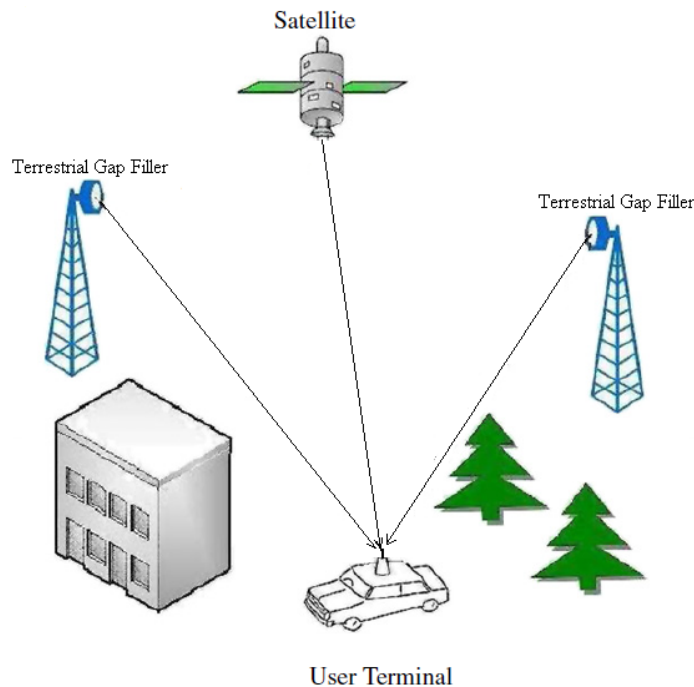
Σχήμα 1.8: Διαφορισμός πολλαπλών δεσμών (Multi-Beam Diversity)

Η εφαρμογή της τεχνικής διαφορισμού πολλαπλών δεσμών στο πλαίσιο των MIMO δορυφορικών επικοινωνιών έχει μελετηθεί στις εργασίες [Perez-Neira 2008], [Zorba 2008a], [Zorba 2008b].

#### 1.4.6. Διαφορισμός Δορυφόρου – Επίγειων Επαναληπτών

Η περίπτωση αυτή διαφορισμού συναντάται σε υβριδικά συστήματα επικοινωνιών, όπως τα βασισμένα στο σύγχρονο πρότυπο DVB-SH που λειτουργούν στις ζώνες συχνοτήτων L και S και όπου το κινητό τερματικό εξυπηρετείται τόσο από ένα δορυφόρο όσο και από ένα δίκτυο επίγειων επαναληπτών [DVB-SH IG],[De Gaudenzi 1994],[Eberlein 2001]. Η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση τόσο από τη δορυφορική συνιστώσα όσο και από τη συμπληρωματική επίγεια συνιστώσα CGC απαντάται κυρίως σε ημιαστικές περιοχές (suburban areas). Στην περίπτωση αυτή, το κινητό τερματικό είναι εξοπλισμένο με πολλές ( $M_R$  το πλήθος) κεραιές και επικοινωνεί με πολλούς ( $M_T$  το πλήθος) επίγειους επαναλήπτες (terrestrial gap fillers) καθώς επίσης και με ένα δορυφόρο. Συνεπώς, η διάταξη του συστήματος αναφέρεται σε  $M_R \times (M_T + 1)$  MIMO δορυφορικό δίαυλο. Η διαφορετική πόλωση

που χρησιμοποιείται συνήθως στη δορυφορική συνιστώσα (συνήθως R/L-HCP) σε σχέση με τη συμπληρωματική επίγεια συνιστώσα CGC (συνήθως V/H-P) όπως επίσης και ενδεχόμενη διαφορετική τεχνική μετάδοσης (συνήθως TDM στη δορυφορική συνιστώσα και OFDM στη CGC) δημιουργεί περαιτέρω προβλήματα στο συνδυασμό των σημάτων στο δέκτη του κινητού τερματικού. Επίσης, ένα σημαντικό πρόβλημα είναι η έλλειψη συγχρονισμού των σημάτων που φθάνουν στο δέκτη του κινητού τερματικού, η οποία οφείλεται στη διαφορετική καθυστέρηση διάδοσης. Ωστόσο, η τεχνική αυτή αποτελεί μια ελπιδοφόρα τεχνική MIMO στις δορυφορικές επικοινωνίες που φέρει τα δορυφορικά δίκτυα εγγύτερα στην επίτευξη ενοποιημένων (integrated) επίγειων-δορυφορικών δικτύων. Στο Σχήμα 1.9 απεικονίζεται η διάταξη της τεχνικής διαφορισμού δορυφόρου – επίγειων επαναληπτών.



**Σχήμα 1.9: Διαφορισμός δορυφόρου – επίγειων επαναληπτών (Satellite-Terrestrial Gap Filler Diversity)**

Η εφαρμογή της τεχνικής διαφορισμού δορυφόρου – επίγειων επαναληπτών στο πλαίσιο των MIMO δορυφορικών επικοινωνιών έχει μελετηθεί στις εργασίες [Perez-Neira 2011], [Shankar 2011], [Miller 2008], [Kim 2007].

Από τις ανωτέρω τεχνικές διαφορισμού, εκείνες που θα απασχολήσουν περαιτέρω στη συνέχεια της Διατριβής για τη δημιουργία MIMO διαύλων στις δορυφορικές επικοινωνίες είναι οι:

- Διαφορισμός κεραίας
- Διαφορισμός θέσης
- Διαφορισμός δορυφόρου
- Διαφορισμός πόλωσης

Στη συνέχεια της Διατριβής και για χάρη συντομίας, ο όρος «SISO Δορυφορικός Δίαυλος» θα αναφέρεται στον παραδοσιακό συμβατικό δορυφορικό δίαυλο που διαθέτει μία κεραία εκπομπής και μία κεραία λήψης, ενώ ο όρος «MIMO Δορυφορικός Δίαυλος» θα αναφέρεται σε δορυφορικό δίαυλο όπου εφαρμόζεται μια (θα διευκρινίζεται κάθε φορά ποια συγκεκριμένη) από τις ανωτέρω τεχνικές διαφορισμού.



## Κεφάλαιο 2. Μοντέλα SISO Δορυφορικών Διαύλων

Στο κεφάλαιο αυτό δίδεται έμφαση στους συμβατικούς δορυφορικούς διαύλους SISO. Αρχικά, αναφέρονται τα φαινόμενα διάδοσης σε ζώνες συχνοτήτων τόσο κάτω όσο και άνω των 10GHz και, στη συνέχεια, αναλύονται οι αντίστοιχες διαλείψεις που υπεισέρχονται στους δορυφορικούς διαύλους. Επίσης, δίδονται διάφορα στατιστικά μοντέλα διαλείψεων που αφορούν SISO δορυφορικούς διαύλους. Τέλος, αναλύεται εκτενώς η συνεισφορά της Διατριβής στη διεθνή βιβλιογραφία, που αφορά μοντέλο συσχέτισης των διαλείψεων λόγω βροχόπτωσης και λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης σε δορυφορικό δίαυλο SISO που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz [Π5, Π8, Σ1, Σ5, Σ7].

### 2.1. Φαινόμενα Διάδοσης σε SISO Δορυφορικούς Διαύλους

Η μετάδοση του σήματος στα δορυφορικά συστήματα πραγματοποιείται με τη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω της ατμόσφαιρας που αποτελεί ένα ανομοιογενές και απορροφητικό μέσο διάδοσης, με αποτέλεσμα μία σειρά μηχανισμών να επιδρά δυσμενώς στη διάδοση των ραδιοκυμάτων. Τα στρώματα της ατμόσφαιρας τα οποία συμβάλλουν κατά κύριο λόγο στην υποβάθμιση της δορυφορικής ζεύξης είναι η τροπόσφαιρα (το εγγύτερο στην επιφάνεια της Γης στρώμα της ατμόσφαιρας) και η ιονόσφαιρα (το πλέον απομακρυσμένο από τη Γη στρώμα). Επηρεάζονται δυσμενώς τόσο η στάθμη της ισχύος λήψης όσο και η πόλωση του μεταδιδόμενου κύματος. Εξάλλου, τα ατμοσφαιρικά αυτά φαινόμενα δεν είναι κοινά για όλες τις περιπτώσεις αλλά παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις που σχετίζονται με τη συχνότητα λειτουργίας του συστήματος, το μήκος της διαδρομής μέσα από την ατμόσφαιρα και τη γωνία ανύψωσης του κεκλιμένου ραδιοδρόμου Γης-δορυφόρου. Ειδικά όσον αφορά τη συχνότητα λειτουργίας, επισημαίνεται ότι τα χαρακτηριστικά διάδοσης στους SISO δορυφορικούς διαύλους διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με το αν η συχνότητα λειτουργίας είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη των 10GHz. Ο διαχωρισμός αυτός των δορυφορικών διαύλων ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας αποτελεί σημαντική ειδοποιό διαφορά και λαμβάνεται υπόψη σε όλη τη Διατριβή.

Λόγω της τεράστιας απόστασης μεταξύ δορυφόρου και επίγειου σταθμού στις δορυφορικές ζεύξεις, οι *απώλειες διάδοσης* (Path Loss) είναι τεράστιες. Η υπόθεση διάδοσης σε ελεύθερο χώρο δημιουργεί το απλούστερο μοντέλο για τις απώλειες διάδοσης (Free Space Loss, FSL), όπου μεταξύ πομπού και δέκτη υπάρχει μόνο η απευθείας συνιστώσα και δεν υπάρχουν φυσικά ή τεχνικά αντικείμενα που προκαλούν ανακλάσεις ή εξασθενούν το

διαδιδόμενο σήμα. Σε αυτήν την περίπτωση η ισχύς του σήματος λήψης είναι ανάλογη της ισχύος εκπομπής, του κέρδους των κεραιών και αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης μεταξύ πομπού – δέκτη. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι οι απώλειες ελεύθερου χώρου για GEO δορυφόρους κυμαίνονται μεταξύ 190-210dB ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας. Οι απώλειες ελεύθερου χώρου, όντας η χαμηλότερη δυνατή απόσβεση την οποία αναμένεται να έχει οποιαδήποτε ασύρματη ζεύξη, μπορεί να θεωρηθεί ως στάθμη αναφοράς για τη συνολική απώλεια διάδοσης.

Ωστόσο, εκτός από τις απώλειες διάδοσης, μια σειρά σημαντικών φαινομένων επηρεάζει τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στις δορυφορικές μεταδόσεις. Αναλυτικότερα, οι δυσμενείς επιδράσεις στις οποίες υπόκεινται τα δορυφορικά σήματα εξαιτίας των ανωτέρω φαινομένων διάδοσης έχουν ως εξής:

- **Διάδοση ραδιοκυμάτων στην τροπόσφαιρα:**

- **Απόσβεση λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων (βροχοπτώση, χιόνι, χαλάζι):** Πρόκειται για επιβαρυντικό μηχανισμό που οφείλεται σε τροποσφαιρικά φαινόμενα και ενδιαφέρει κυρίως τα δορυφορικά συστήματα που λειτουργούν σε ζώνες συχνοτήτων άνω των 10GHz. Η απόσβεση (εξασθένηση) αντιπροσωπεύει μία σταθερή ως προς το χρόνο απώλεια διάδοσης της ισχύος του σήματος. Προκαλείται από την απώλεια ενέργειας που υφίσταται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα όταν κατά τη διάδοσή του συναντά βροχή, χαλάζι, χιόνι, παγοκρυστάλλους, δηλαδή το σύνολο των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων που παράγονται στην τροπόσφαιρα. Από τους παράγοντες αυτούς, σε συχνότητες άνω των 10GHz, όπου το μήκος κύματος γίνεται συγκρίσιμο με το μέγεθος της σταγόνας βροχής, ισχυρότερη είναι η επίδραση των βροχοπτώσεων. Μάλιστα, η απόσβεση λόγω βροχής αυξάνει σημαντικά με την αύξηση της συχνότητας (σε dB ανάλογα προς το τετράγωνο της συχνότητας [Stutzman 1993]). Το χιόνι και το χαλάζι έχουν σαφώς μικρότερη επίδραση στα ραδιοκύματα σε σχέση με τη βροχοπτώση, με εξαίρεση την περίπτωση νιφάδων χιονιού οι οποίες κατά την πτώση τους λιώνουν και λαμβάνουν μορφή πολύ μεγαλύτερων σταγόνων συγκριτικά με την απλή βροχή [Κανελλόπουλος 1999]. Επιπλέον, παράγοντες απόσβεσης, με μικρότερη όμως βαρύτητα, είναι οι νεφώσεις (σύννεφα) και η ομίχλη.
- **Διαλείψεις λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων, κυρίως βροχοπτώσεων (Rain Fading):** Πρόκειται για επιβαρυντικό μηχανισμό που οφείλεται σε τροποσφαιρικά φαινόμενα και ενδιαφέρει κυρίως τα

δορυφορικά συστήματα που λειτουργούν σε ζώνες συχνοτήτων άνω των 10GHz. Το φαινόμενο αυτό είναι παρόμοιο με εκείνο της απόσβεσης (στη βιβλιογραφία πολύ συχνά ταυτίζονται), αφού και για τις διαλείψεις σε συχνότητες που υπερβαίνουν τα 10GHz κυρίαρχο αίτιο είναι οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις. Η διαφορά των διαλείψεων από την απόσβεση είναι ότι χαρακτηρίζονται από μικρές και τυχαίες χρονικές διάρκειες και εμφανίζουν μεγάλη ποικιλία όσον αφορά το βάθος τους (δηλαδή το μέγεθος πτώσης στην ισχύ του σήματος). Μεγαλύτερο πρόβλημα δημιουργούν οι λεγόμενες βαθιές διαλείψεις (deep fading), όταν η γωνία ανύψωσης των επίγειων σταθμών είναι μικρή οπότε η βροχή επηρεάζει μεγαλύτερο τμήμα της κεκλιμένης διαδρομής προς το δορυφόρο.

- **Απορρόφηση από αέρια της ατμόσφαιρας (Gaseous Absorption):** Πρόκειται για επιβαρυντικό μηχανισμό που οφείλεται σε τροποσφαιρικά φαινόμενα και ενδιαφέρει κυρίως τα δορυφορικά συστήματα που λειτουργούν σε ζώνες συχνοτήτων άνω των 10GHz. Εκτός από τις γνωστές παραμέτρους (συχνότητα, γωνία ανύψωσης) η απορρόφηση την οποία εισάγουν στο ραδιοκύμα τα αέρια της ατμόσφαιρας και οι υδρατμοί εξαρτάται και από το ύψος του επίγειου σταθμού από την επιφάνεια της θάλασσας, τη θερμοκρασία, την πίεση, καθώς και από την υγρασία της περιοχής. Αν και σε συχνότητες κάτω από τα 10GHz η επίδραση του φαινομένου αυτού είναι συνήθως αμελητέα, για συχνότητες πάνω από το όριο αυτό η απορρόφηση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο μόνο σε συγκεκριμένες περιοχές συχνοτήτων, όπου και μεγιστοποιείται. Για τους υδρατμούς η μέγιστη απορρόφηση εντοπίζεται στις περιοχές συχνοτήτων περί τα 22.5GHz, 183GHz και 320GHz, ενώ το οξυγόνο απορροφά έντονα την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια στις περιοχές των 60GHz και 119GHz. Από φυσικής σκοπιάς εξάλλου, το οξυγόνο απορροφά ενέργεια από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εξαιτίας της ηλεκτρικής διπολικής ροπής, σε αντιδιαστολή με τους υδρατμούς όπου υπεύθυνη είναι η μαγνητική διπολική ροπή. Η προηγούμενη φράση ερμηνεύει το γεγονός της εμφάνισης σε διαφορετικές συχνότητες της απορρόφησης με αίτιο τους υδρατμούς και της απορρόφησης με αίτιο το οξυγόνο.
- **Τροποσφαιρικοί Σπινθηρισμοί (Tropospheric Scintillations):** Πρόκειται για επιβαρυντικό μηχανισμό που οφείλεται σε τροποσφαιρικά φαινόμενα και

ενδιαφέρει κυρίως τα δορυφορικά συστήματα που λειτουργούν σε ζώνες συχνοτήτων άνω των 10GHz. Το πλάτος των σπινθηρισμών (δηλαδή των διακυμάνσεων στην ισχύ του σήματος) που συντελούνται στην τροπόσφαιρα εξαρτάται άμεσα από το προφίλ (τα χαρακτηριστικά) του δείκτη διάθλασης στο στρώμα αυτό της ατμόσφαιρας. Οι τροποσφαιρικοί σπινθηρισμοί αυξάνονται καθώς αυξάνεται η συχνότητα, σε αντίθεση με τους ιονοσφαιρικούς σπινθηρισμούς όπου ισχύει το αντίστροφο. Η συμπεριφορά τους προβλέπεται δύσκολα, αφού μεταβάλλεται ανάλογα με την εποχή του έτους, την ηλιακή δραστηριότητα, την περιοχή (με σημαντικές διαλείψεις να παρουσιάζονται σε σταθμούς κατά μήκος του γεωμαγνητικού ισημερινού) και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δορυφορικής ζεύξης [ITU618]. Εντούτοις, η απόσβεση που εισάγει ο μηχανισμός των σπινθηρισμών προβλέπεται προσεγγιστικά από τους σχεδιαστές δορυφορικών συστημάτων με βάση εμπειρική σχέση, σύμφωνα με την οποία η ενεργός τιμή σε dB είναι ανάλογη της συχνότητας υψωμένης στον εκθέτη 7/12 [Stutzman 1993].

- **Αποπόλωση (Depolarization) λόγω βροχής, νεφών και πάγου:** Πρόκειται για επιβαρυντικό μηχανισμό που οφείλεται σε τροποσφαιρικά φαινόμενα και ενδιαφέρει κυρίως τα δορυφορικά συστήματα που λειτουργούν σε ζώνες συχνοτήτων άνω των 10GHz. Η ανάγκη για αύξηση του μέγιστου ρυθμού αξιόπιστης μετάδοσης πληροφορίας από δορυφορικούς διαύλους, δηλαδή η ανάγκη για αύξηση της χωρητικότητάς τους, έχει οδηγήσει πολλούς σχεδιαστές στην υιοθέτηση της τεχνικής της αναχρησιμοποίησης συχνότητας (frequency reuse). Εκτός της σύγχρονης τεχνολογίας πολλαπλών δεσμών (multi-beam), στις δορυφορικές επικοινωνίες η τεχνική αυτή συνίσταται στην εκπομπή δύο ορθογώνια πολωμένων μεταξύ τους σημάτων στην ίδια φέρουσα συχνότητα. Έτσι, το διαθέσιμο εύρος ζώνης διπλασιάζεται, ενώ ταυτόχρονα, το ραδιοφάσμα που καταλαμβάνει το σήμα διπλής πόλωσης είναι ίδιο με αυτό της απλής πόλωσης. Στην περίπτωση αυτή, ο περιοριστικός παράγοντας (αποπόλωση) προέρχεται και πάλι από τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις σε συχνότητες υψηλότερες των 10GHz. Η αποπόλωση, ιδιαίτερα αυτή λόγω βροχής, αναιρεί την κατά 90° απομόνωση μεταξύ των δύο πολώσεων, με αποτέλεσμα μέρος της ισχύος της μίας πόλωσης να δημιουργεί παρεμβολή στην ορθογώνιά της.

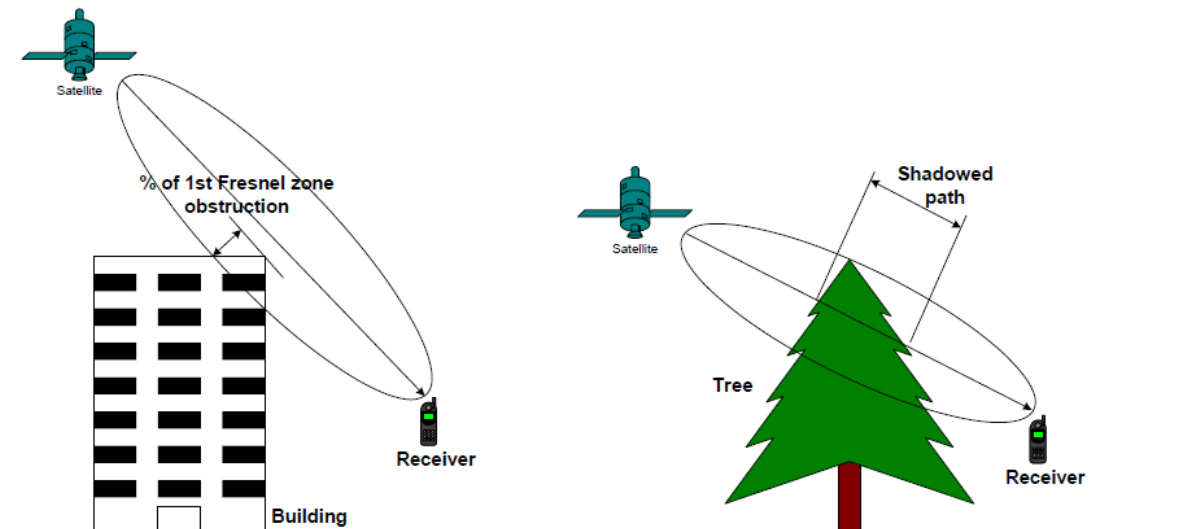


- **Διάδοση ραδιοκυμάτων στην ιονόσφαιρα:**
  - **Στροφή Faraday (Faraday Rotation):** Πρόκειται για επιβαρυντικό μηχανισμό που οφείλεται σε ιονοσφαιρικά φαινόμενα και ενδιαφέρει κυρίως τα δορυφορικά συστήματα που λειτουργούν σε ζώνες συχνοτήτων κάτω των 10GHz. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο της Γης αναγκάζει την ιονόσφαιρα να συμπεριφέρεται ως ανισοτροπικό μέσο διάδοσης. Κατά τη διάδοση ενός γραμμικά πολωμένου κύματος μέσω της ιονόσφαιρας, το επίπεδο της πόλωσής του στρέφεται προοδευτικά υπό την επίδραση του μαγνητικού πεδίου της γης (το οποίο είναι παράλληλο στη διεύθυνση διάδοσης). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι διαφορετικές πολώσεις του ραδιοκύματος που εισέρχονται στην ιονόσφαιρα υφίστανται διαφορετικές μεταβολές. Έτσι, όταν το ραδιοκύμα εξέρχεται της ιονόσφαιρας είναι διαφοροποιημένο σε σχέση με αυτό που εισήλθε. Π.χ., για τη ζώνη συχνοτήτων C, η στροφή της πόλωσης (στροφή Faraday) υπολογίζεται γύρω στις  $10^\circ$ . Σημειώνεται ότι η στροφή Faraday επηρεάζει κυρίως τα γραμμικά και όχι τα κυκλικά πολωμένα κύματα.
  - **Ιονοσφαιρική διάθλαση (Ionospheric refraction):** Πρόκειται για επιβαρυντικό μηχανισμό που οφείλεται σε ιονοσφαιρικά φαινόμενα και ενδιαφέρει κυρίως τα δορυφορικά συστήματα που λειτουργούν σε ζώνες συχνοτήτων κάτω των 10GHz. Οι μεταβολές στην πυκνότητα των ελευθέρων ηλεκτρονίων στην ιονόσφαιρα δημιουργούν μεταβολές στο δείκτη διάθλασης της ιονόσφαιρας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ταχείες αλλαγές του πλάτους, της φάσης πόλωσης και της γωνίας άφιξης των ραδιοκυμάτων.
  - **Διασπορά συχνοτήτων (frequency dispersion):** Πρόκειται για επιβαρυντικό μηχανισμό που οφείλεται σε ιονοσφαιρικά φαινόμενα και ενδιαφέρει κυρίως τα δορυφορικά συστήματα που λειτουργούν σε ζώνες συχνοτήτων κάτω των 10GHz. Στο στρώμα της ιονόσφαιρας συντελείται διασπορά συχνοτήτων. Διαφορετικές φασματικές συνιστώσες οδεύουν με διαφορετική ταχύτητα προκαλώντας τη χρονική διαπλάτυνση του σήματος. Η διαπλάτυνση, η οποία στα 4GHz λαμβάνει τιμές περί τα  $10^{-5}$  psec/Hz, μειώνεται σε ασήμαντα επίπεδα στις υψηλές ζώνες συχνοτήτων.
  - **Ιονοσφαιρικοί σπινθηρισμοί (Ionospheric scintillation):** Πρόκειται για επιβαρυντικό μηχανισμό που οφείλεται σε ιονοσφαιρικά φαινόμενα και ενδιαφέρει κυρίως τα δορυφορικά συστήματα που λειτουργούν σε ζώνες

συχνοτήτων κάτω των 10GHz. Το πλάτος των σπινθηρισμών (δηλαδή των διακυμάνσεων στην ισχύ του σήματος) που συντελούνται στην ιονόσφαιρα εξαρτάται άμεσα από το προφίλ (τα χαρακτηριστικά) του δείκτη διάθλασης της ιονόσφαιρας. Οι ανομοιογένειες της πυκνότητας ηλεκτρονίων έχουν ως συνέπεια διακυμάνσεις στο πλάτος, τη φάση και τη γωνία άφιξης των ραδιοκυμάτων. Οι σπινθηρισμοί αυτού του είδους μειώνονται καθώς αυξάνεται η συχνότητα.

- **Διάδοση ραδιοκυμάτων στην περιοχή του δέκτη:**

- **Σκίαση (Shadowing):** Πρόκειται για επιβαρυντικό μηχανισμό που οφείλεται στο τοπικό περιβάλλον στην περιοχή του δέκτη και ενδιαφέρει τα δορυφορικά συστήματα που λειτουργούν σε ζώνες συχνοτήτων τόσο άνω όσο και κάτω των 10GHz. Η σκίαση αναφέρεται στην ύπαρξη εμποδίων στην πρώτη ζώνη *Fresnel* μεταξύ του δορυφόρου και του επίγειου τερματικού τα οποία είτε επιτρέπουν σε ένα κλάσμα μόνο της ισχύος του σήματος να τα διαπεράσει χωρίς να υποστεί σκέδαση είτε το περιθλούν. Συνεπώς, σκεδαστές όπως π.χ., κτίρια, δέντρα, λόφοι, βουνά, κτλ, επιφέρουν το φαινόμενο της σκίασης που έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική εξασθένηση της απευθείας συνιστώσας του σήματος. Η σκίαση εξαρτάται σημαντικά από τη θέση των σκεδαστών αυτών και της ζώνης *Fresnel*, δηλαδή από παράγοντες όπως το μήκος της διαδρομής του σήματος μέσω του εμποδίου, τον τύπο του εμποδίου, τη συχνότητα του σήματος και τη γωνία ανύψωσης του δορυφόρου. Η σκίαση προκαλεί μεγαλύτερη εξασθένηση σε μικρές γωνίες ανύψωσης, όπου το εμπόδιο δημιουργεί μεγαλύτερη σκίαση. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται το φαινόμενο της σκίασης εξαιτίας της ύπαρξης βλάστησης και κτιρίων στο τοπικό περιβάλλον ενός επίγειου δέκτη.



**Σχήμα 2.1:** Φαινόμενο σκίασης λόγω βλάστησης και κτιρίων στο περιβάλλον του επίγειου δέκτη

- **Πολυδιαδρομική διάδοση (Multipath Propagation):** Πρόκειται για μηχανισμό που οφείλεται στο τοπικό περιβάλλον στην περιοχή του δέκτη και ενδιαφέρει τα δορυφορικά συστήματα που λειτουργούν σε ζώνες συχνοτήτων τόσο άνω όσο και κάτω των 10GHz, με μεγαλύτερη ωστόσο βαρύτητα κυρίως στις χαμηλές ζώνες συχνοτήτων [Xu 2000]. Το περιβάλλον που υφίσταται μεταξύ του πομπού και του δέκτη περιλαμβάνει αντικείμενα, κτίρια, αυτοκίνητα και ανθρώπους. Μερικά από αυτά, συμπεριλαμβανομένου και του επίγειου δέκτη, ενδέχεται να αλλάζουν θέση κατά τη διάρκεια της δορυφορικής σύνδεσης δημιουργώντας ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον, που περιλαμβάνει κινητά εμπόδια και σκεδαστές. Έτσι, το δορυφορικό σήμα φθάνει στο δέκτη από πολλές διαφορετικές διευθύνσεις, έχοντας ακολουθήσει διαφορετικές διαδρομές. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται *πολυδιαδρομική διάδοση*. Στην πολυδιαδρομική διάδοση συμβάλλουν τα φαινόμενα της ανάκλασης, της περίθλασης και της σκέδασης. Εξαιτίας των διαφορετικών γωνιών άφιξης και χρόνων, τα πολυδιαδρομικά κύματα φθάνουν στην πλευρά του δέκτη με διαφορετικές φάσεις. Το άθροισμα αυτών των κυμάτων δημιουργεί ένα χωρικά μεταβαλλόμενο σήμα λήψης. Οι πολυδιαδρομικές συνιστώσες που φθάνουν στο δέκτη διαφέρουν ως προς το πλάτος, τη φάση, τη γωνία άφιξης και το χρόνο άφιξης σε σχέση με την απευθείας συνιστώσα. Η πολυδιαδρομική διάδοση έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένηση ή την

ενίσχυση του σήματος ανάλογα με τον τρόπο συμβολής των πολυδιαδρομικών συνιστωσών στο δέκτη.

Τα ανωτέρω φαινόμενα διάδοσης στις δορυφορικές ζεύξεις κατηγοριοποιούνται συνοπτικά στον Πίνακα 2.1 με κριτήριο τη συχνότητα λειτουργίας του δορυφορικού διαύλου.

**Πίνακας 2.1: Κατηγοριοποίηση φαινομένων διάδοσης σε SISO δορυφορικές ζεύξεις ως προς τη συχνότητα λειτουργίας**

Φαινόμενα Διάδοσης		SISO Δορυφορικοί Δίαυλοι σε Συχνότητες κάτω των 10GHz	SISO Δορυφορικοί Δίαυλοι σε Συχνότητες άνω των 10GHz
<b>Απώλειες Διάδοσης</b>	Απώλειες Ελευθέρου Χώρου	✓	✓
<b>Τροποσφαιρικά Φαινόμενα Διάδοσης</b>	Διαλείψεις (Απόσβεση) λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων (βροχόπτωση, χιόνι, χαλάζι)		✓
	Απορρόφηση από τα αέρια της ατμόσφαιρας		✓
	Εξασθένηση λόγω νεφώσεων		✓
	Εξασθένηση από το στρώμα τήξης του πάγου		✓
	Τροποσφαιρικοί σπινθηρισμοί		✓
	Αποπόλωση λόγω βροχής, νεφών και πάγου		✓
	<b>Ιονοσφαιρικά Φαινόμενα Διάδοσης</b>	Στροφή Faraday	✓
Ιονοσφαιρική διάθλαση		✓	
Ιονοσφαιρικοί σπινθηρισμοί		✓	
Διασπορά συχνοτήτων		✓	
<b>Φαινόμενα Διάδοσης Τοπικού Περιβάλλοντος στην Περιοχή του Δέκτη</b>	Σκίαση	✓	✓
	Πολυδιαδρομική διάδοση	✓	✓

Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι, μέχρι σήμερα, τα τροποσφαιρικά φαινόμενα διάδοσης εθεωρούντο γενικά ως *ασυσχέτιστα* με τα φαινόμενα διάδοσης τοπικού περιβάλλοντος στην περιοχή του δέκτη. Ωστόσο, όπως αναλύεται στην Ενότητα 2.3.4, συγκεκριμένα σε δορυφορικούς διαύλους με συχνότητα λειτουργίας κάτω των 10GHz, υφίσταται συσχέτιση μεταξύ των διαλείψεων λόγω βροχόπτωσης και λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης, για την οποία προτείνεται πρωτότυπο μοντέλο εκτίμησης.

Στη συνέχεια της Διατριβής, θα μελετηθούν κυρίως τα εξής φαινόμενα διάδοσης:

- *Απώλειες διάδοσης ελευθέρου χώρου*
- *Διαλείψεις λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων, κυρίως βροχόπτωσης*
- *Σκίαση*
- *Πολυδιαδρομική διάδοση*

Όσον αφορά τα υπόλοιπα φαινόμενα διάδοσης, η παρούσα Διατριβή δεν υπεισέρχεται σε ενδελεχή μελέτη τους για τους εξής λόγους:

- *Αποσβέσεις λόγω άλλων ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων, όπως χιόνι και χαλάζι:* Για τις περιπτώσεις δορυφορικών διαύλων στις ζώνες συχνοτήτων άνω των 10GHz που θα απασχολήσουν τη Διατριβή, έχουν σαφώς μικρότερη επίδραση στα ραδιοκύματα σε σχέση με τη βροχόπτωση.
- *Τροποσφαιρικοί σπινθηρισμοί:* ισχύει ότι και για τις αποσβέσεις λόγω άλλων ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων, όπως χιόνι και χαλάζι.
- *Απορρόφηση από ατμοσφαιρικά αέρια:* Για τις περιπτώσεις δορυφορικών διαύλων στις ζώνες συχνοτήτων άνω των 10GHz που θα απασχολήσουν τη Διατριβή, αποφεύγεται η λειτουργία στις περιοχές συχνοτήτων όπου η απορρόφηση μεγιστοποιείται και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο.
- *Αποπόλωση λόγω βροχής, νεφών και πάγου:* Για τις περιπτώσεις δορυφορικών διαύλων στις ζώνες συχνοτήτων άνω των 10GHz που θα απασχολήσουν τη Διατριβή, δεν μελετάται η χρήση διπλής πόλωσης.
- *Στροφή Faraday:* Για τις περιπτώσεις δορυφορικών διαύλων με συχνότητα λειτουργίας κάτω των 10GHz που θα απασχολήσουν τη Διατριβή, θεωρείται ότι το κύμα είναι κυκλικά πολωμένο, οπότε η επίδραση της στροφής Faraday δεν είναι σημαντική.
- *Λοιπά ιονοσφαιρικά φαινόμενα (Ιονοσφαιρική διάθλαση, Διασπορά συχνοτήτων, Ιονοσφαιρικοί σπινθηρισμοί):* Για τις περιπτώσεις δορυφορικών διαύλων με συχνότητα λειτουργίας κάτω των 10GHz που θα απασχολήσουν τη Διατριβή, η

επίδρασή τους λαμβάνεται υπόψη *μακροσκοπικά* μέσω των συνολικών διαλείψεων που προκύπτουν στο διάυλο (fading channel) και όχι *μικροσκοπικά* χωριστά για κάθε μηχανισμό.

## 2.2. Είδη Διαλείψεων σε SISO Δορυφορικούς Διαύλους

Εκτός των απωλειών διάδοσης, λόγω των φαινομένων διάδοσης σε ένα δορυφορικό σύστημα επικοινωνιών που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, η ισχύς λήψης παρουσιάζει διακύμανση περί τη μέση τιμή της. Ως διαλείψεις (fading) ορίζεται το φαινόμενο της διακύμανσης του πλάτους και της φάσης του σήματος λήψης λόγω μικρών μετατοπίσεων του σημείου λήψης ή για μικρές χρονικές μεταβολές. Η διακύμανση αυτή αναλύεται σε δύο βασικούς παράγοντες, τις *διαλείψεις μεγάλης κλίμακας* (large-scale fading) και τις *διαλείψεις μικρής κλίμακας* (small-scale fading).

- **Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας:** Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας εκφράζουν τη μέση εξασθένηση της ισχύος του σήματος λήψης εξαιτίας της απομάκρυνσης του δέκτη από τον πομπό και εμπεριέχουν τόσο τη μεταβολή της εξασθένησης σε σχέση με την απόσταση όσο και την τυχαία μεταβολή της εξασθένησης για δεδομένη απόσταση λόγω της ύπαρξης κάποιου εμποδίου. Συνέπεια αυτού του γεγονότος είναι ότι η μέση ισχύς που μετράται τοπικά σε αντίστοιχες αποστάσεις μεταβάλλεται ανάλογα με την ύπαρξη ή μη τέτοιων αντικειμένων μεγάλου μεγέθους. Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας μεταβάλλονται σχετικά αργά ως προς το χρόνο και για το λόγο αυτό εισάγουν αργές διαλείψεις στο διάυλο (slow fading). Τα φαινόμενα διάδοσης που επηρεάζουν κυρίως τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας στο δορυφορικό διάυλο είναι:

- Ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, κυρίως βροχόπτωση
- Σκίαση

Επίσης, καίτοι σταθερές ως προς το χρόνο, οι απώλειες διάδοσης μπορούν να ληφθούν υπόψη καταχρηστικά σε αυτή τη κατηγορία.

- **Διαλείψεις μικρής κλίμακας:** Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας αναφέρονται στο φαινόμενο της ταχύτατης και ισχυρής διακύμανσης της στιγμιαίας ισχύος λήψης συναρτήσει του χώρου, του χρόνου και της συχνότητας. Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας προκαλούνται από την ύπαρξη ενός μεγάλου αριθμού συνιστωσών του σήματος τα οποία φθάνουν στο δέκτη ταυτόχρονα, με διαφορετικό πλάτος, φάση και καθυστέρηση και προστίθενται διανυσματικά. Η μεταβλητή χρονικά φύση των

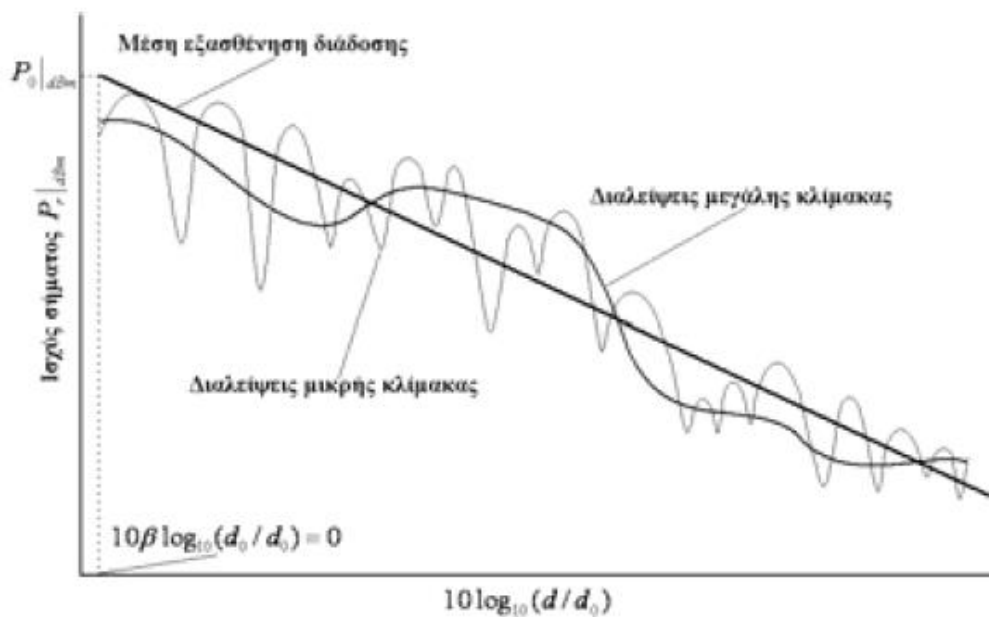
διαλείψεων μικρής κλίμακας οφείλεται στη σχετική κίνηση του πομπού ή/και του δέκτη ή/και των σκεδαστών γύρω από αυτούς. Στην περίπτωση όπου οι σκεδαστές είναι ακίνητοι, οι διαλείψεις είναι καθαρά χωρικό φαινόμενο. Ο μέσος όρος της στιγμιαίας ισχύος, όπως προκύπτει από τις διαλείψεις μικρής κλίμακας, είναι η τοπική μέση ισχύς του σήματος που αναφέρθηκε προηγουμένως. Οι φυσικοί μηχανισμοί οι οποίοι επηρεάζουν τις διαλείψεις μικρής κλίμακας στο δορυφορικό δίαυλο είναι:

- Πολυδιαδρομική διάδοση: Η παρουσία ανακλαστήρων και σκεδαστών στο δίαυλο δημιουργεί ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον το οποίο διασπείρει την ενέργεια του σήματος σε πλάτος, φάση και χρόνο (χρονική διασπορά σήματος, time spreading). Έτσι, πολλαπλές εκδόσεις του σήματος φθάνουν στο δέκτη, μετατοπισμένες η μια σε σχέση με την άλλη στο χώρο και το χρόνο. Οι φάσεις και τα πλάτη των διαφόρων πολυδιαδρομικών συνιστωσών προκαλούν διακυμάνσεις στην ισχύ του σήματος εισάγοντας έτσι διαλείψεις μικρής κλίμακας, παραμόρφωση ή και τα δύο. Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας που οφείλονται στη χρονική διασπορά του σήματος χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες, ανάλογα με τις τιμές του εύρους ζώνης συνοχής του διαύλου και του εύρους ζώνης του σήματος:
  - διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα (frequency selective fading)
  - επίπεδες διαλείψεις (frequency non-selective or flat fading)
- Χρονική μεταβολή του διαύλου: Αυτή οφείλεται αφενός στην κίνηση του δέκτη ή/και του πομπού και αφετέρου στην κίνηση των σκεδαστών που επηρεάζουν τη διάδοση. Άρα σημαντική σε αυτή την περίπτωση είναι τόσο η ταχύτητα του κινούμενου δέκτη και η ταχύτητα του δορυφόρου (σε περίπτωση μη γεωστατικού δορυφόρου) όσο και η ταχύτητα των σκεδαστών στο περιβάλλον διάδοσης. Η σχετική κίνηση μεταξύ του πομπού και του δέκτη έχει ως αποτέλεσμα την τυχαία διαμόρφωση συχνότητας (frequency modulation) λόγω της διαφορετικής ολίσθησης Doppler σε έκαστη των εκδοχών του σήματος. Η ολίσθηση Doppler μπορεί να είναι θετική ή αρνητική αντίστοιχα προς το αν ο δέκτης πλησιάζει η απομακρύνεται από το σταθμό βάσης. Επιπλέον, όταν οι σκεδαστές που υπάρχουν στο δίαυλο κινούνται, εισάγουν χρονικά μεταβαλλόμενη ολίσθηση Doppler στις διαφορετικές εκδοχές του σήματος. Όταν οι σκεδαστές κινούνται ταχύτερα

από το δέκτη, επικρατεί το φαινόμενο των διαλείψεων μικρής κλίμακας. Σε άλλη περίπτωση, η κίνησή τους μπορεί να αγνοηθεί και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη μόνο η ταχύτητα του δέκτη. Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας που οφείλονται στη χρονική μεταβολή του διαύλου χωρίζονται σε δυο υποκατηγορίες:

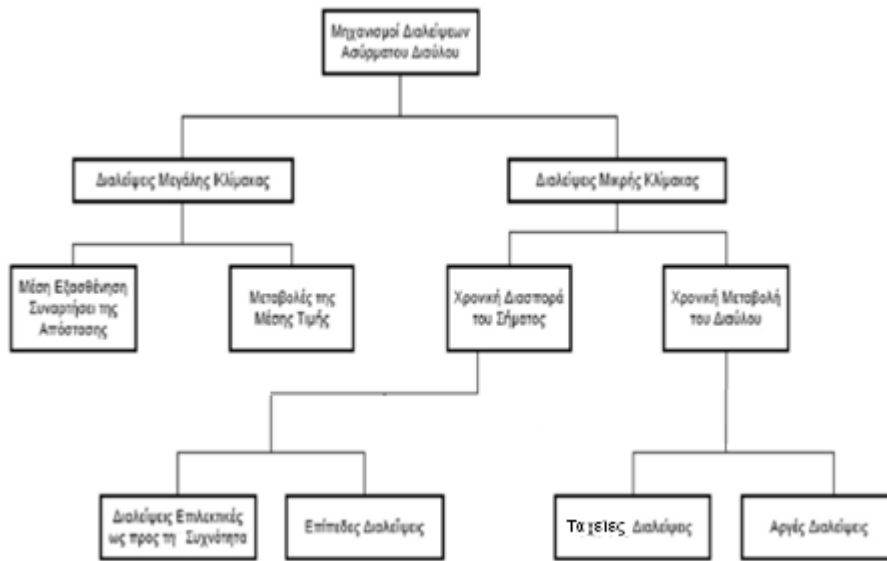
- ταχείες διαλείψεις (fast fading)
- αργές διαλείψεις (slow fading)

Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται εποπτικά η επίδραση της μέσης εξασθένησης διάδοσης, των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας και των διαλείψεων μικρής κλίμακας στην ισχύ του λαμβανόμενου σήματος. Επίσης, στο Σχήμα 2.3 απεικονίζεται η κατηγοριοποίηση όλων των διαλείψεων ενός ασύρματου διαύλου ανάλογα με το μηχανισμό στον οποίο οφείλονται [Proakis 2001].



**Σχήμα 2.2:** Συνδυασμένη επίδραση μέσης εξασθένησης διάδοσης, διαλείψεων μεγάλης κλίμακας και διαλείψεων μικρής κλίμακας





**Σχήμα 2.3: Κατηγοριοποίηση διαλείψεων για χαρακτηρισμό διαύλου**

### 2.3. Στατιστικά Μοντέλα SISO Δορυφορικών Διαύλων

Τα διάφορα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στις δορυφορικές επικοινωνίες για το χαρακτηρισμό και την αξιολόγηση της επίδοσης ενός διαύλου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις εξής βασικές κατηγορίες:

- Εμπειρικά μοντέλα
- Στατιστικά (Στοχαστικά) μοντέλα
- Ντετερμινιστικά (Φυσικά) μοντέλα
- Υβριδικά μοντέλα

Τα εμπειρικά μοντέλα βασίζονται σε μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε ένα δεδομένο περιβάλλον διάδοσης και διαμορφώνονται μετά από παρατήρηση των μετρήσεων. Είναι ακριβή μόνο παρόμοια για περιβάλλοντα διάδοσης.

Τα στατιστικά μοντέλα περιγράφουν τη συμπεριφορά διαύλου ως προς τη διάδοση με χρήση μαθηματικών στατιστικών κατανομών. Έτσι, κάθε κατανομή εμπεριέχει συγκεκριμένη φυσική σημασία. Οι παράμετροι των στατιστικών μοντέλων προέρχονται από μετρήσεις προσδιορίζοντας τη θεωρητική συνάρτηση αθροιστικής κατανομής (Cumulative Distribution Function, CDF) που ταιριάζει καλύτερα στις δεδομένες μετρήσεις.

Ενώ άλλες προσεγγίσεις μοντέλων προσπαθούν να περιγράψουν γενικές καταστάσεις και σενάρια, τα ντετερμινιστικά (φυσικά) μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τους κυρίως το περιβάλλον σκέδασης και τα φαινόμενα που συμβαίνουν σε αυτό. Είναι περισσότερο

ακριβή από τα εμπειρικά καθώς συμμορφώνονται με τους νόμους που διέπουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, υιοθετώντας παραδοχές και προσεγγίσεις που δεν επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα. Μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν ως βάση για τη μελέτη των στοχαστικών μοντέλων. Ένα παράδειγμα ντετερμινιστικού μοντέλου είναι η τεχνική «ray-tracing» σύμφωνα με την οποία γίνεται αναλυτική περιγραφή της πορείας του σήματος, καθώς κατά τη διαδρομή του προς τον πομπό, υφίσταται την επίδραση φαινομένων όπως σκέδαση, ανάκλαση και σκίαση.

Οι ανωτέρω βασικές προσεγγίσεις είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν με συνδυαστικό τρόπο (υβριδικά μοντέλα). Ένα παράδειγμα αυτού του τύπου ονομάζεται φυσικό-στατιστικό μοντέλο όπου φυσικές/ντετερμινιστικές τεχνικές εφαρμόζονται συνθετικά σε περιβάλλοντα διάδοσης που ακολουθούν δεδομένες κατανομές, που προέρχονται από μετρήσεις. Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιούν συνήθως τη στατιστική θεωρία για να παραγάγουν μια λογική αναλυτική μορφή για τη κατανομή του σήματος και έπειτα χρησιμοποιούν τις μετρήσεις για να βρουν τις κατάλληλες τιμές των παραμέτρων στη κατανομή. Από την άλλη πλευρά, ένα φυσικό-στατιστικό μοντέλο αποτελεί υβριδική προσέγγιση, η οποία ενσωματώνει τα πλεονεκτήματα των εμπειρικών και φυσικών μοντέλων αποφεύγοντας πολλά από τα μειονεκτήματά τους. Τα φυσικά-στατιστικά μοντέλα λαμβάνουν τις κατανομές για την εξασθένιση άμεσα από τις κατανομές των φυσικών παραμέτρων. Η αρχική γνώση προέρχεται κυρίως από την ηλεκτρομαγνητική θεωρία και τη φυσική κατανόηση. Ως εκ τούτου, τα φυσικά-στατιστικά μοντέλα απαιτούν μόνο απλά δεδομένα εισόδου όπως π.χ. το μέσο ύψος των κτιρίων, τη διακύμανση του ύψους των κτιρίων κ.λ.π.

Η περιγραφή του διαύλου διάδοσης είναι εξ ολοκλήρου αντικειμενική. Στη Διατριβή μελετώνται εκτενώς στατιστικά και φυσικά-στατιστικά (υβριδικά) μοντέλα για την περιγραφή των διαλείψεων σε δορυφορικούς διαύλους. Επίσης, επισημαίνεται ότι θα μελετηθούν εκτενώς οι επίπεδες διαλείψεις (frequency non-selective ή flat fading) όσον αφορά τη χρονική διασπορά που προκαλεί η πολυδιαδρομική διάδοση. Αυτό οφείλεται στο ότι ενδιαφέρουν κυρίως περιπτώσεις δορυφορικών διαύλων των οποίων το εύρος ζώνης συνοχής είναι κατά πολύ μεγαλύτερο του εύρους ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος, οπότε το τελευταίο δεν παραμορφώνεται με το χρόνο. Αντίστοιχα, η διασπορά καθυστέρησης (delay spread) είναι κατά πολύ μικρότερη σε σύγκριση με εκείνη που παρατηρείται σε επίγεια κυψελωτά συστήματα λόγω της υψηλής κατευθυντικότητας των κεραιών που χρησιμοποιούνται στις δορυφορικές επικοινωνίες. Η θεώρηση αυτή επιτρέπει την απαλοιφή της χρονικά μεταβαλλόμενης φύσης του διαύλου. Έτσι, αν κατά τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $x(t)$

και  $y(t)$  συμβολίζουν το εκπεμπόμενο και λαμβανόμενο σήμα, αντίστοιχα,  $n(t)$  το θόρυβο στο διάλυο και  $a(t)$  περιγράφει τη συμπεριφορά του διαλύου διαλείψεων, ισχύουν τα εξής:

$$\begin{aligned} y(t) &= a(t)x(t) + n(t) \Rightarrow \\ y &= ax + t \end{aligned} \quad (2.1)$$

Η ανωτέρω θεώρηση είναι γνωστή στη διεθνή βιβλιογραφία και ως «narrowband assumption» και χρησιμοποιείται εκτενώς στη Διατριβή [Proakis 2001],[Rappaport 1999], [Tse 2005].

Στη (2.1), ο παράγοντας διαλύου  $a$  μπορεί να εκφραστεί περαιτέρω ως εξής

$$a(t) = |a(t)| \cdot \exp[j\phi(t)] \Rightarrow a = |a| \cdot \exp(j\phi) \quad (2.2)$$

όπου  $|a|$  είναι η περιβάλλουσα (πλάτος) και  $\phi$  η φάση του διαλύου διαλείψεων.

Στη συνέχεια, μελετώνται διάφορα μοντέλα διαλείψεων διαλύου που θα απασχολήσουν ιδιαίτερα τη Διατριβή, δηλαδή:

- Διαλείψεις λόγω βροχόπτωσης
- Διαλείψεις λόγω σκίασης
- Διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης

Τα μοντέλα αυτά πρακτικά προβλέπουν την κατανομή της περιβάλλουσας  $|a|$  του διαλύου διαλείψεων ενώ, για τη φάση  $\phi$  λαμβάνεται υπόψη η ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα  $[0, 2\pi)$ .

### 2.3.1. Μοντέλα Διαλείψεων λόγω Βροχόπτωσης

Η στατιστική των διαλείψεων λόγω βροχής καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη στατιστική του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης  $R$  (σε mm/hr), η οποία ενσωματώνει την εξάρτηση του φαινομένου βροχόπτωσης από τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν εκάστοτε στην περιοχή λειτουργίας του δορυφορικού συστήματος. Προκειμένου για περιοχές της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής, είναι γενικά αποδεκτό ότι τα πειραματικά δεδομένα του ρυθμού βροχόπτωσης προσεγγίζονται από τη λογαριθμοκανονική (lognormal) κατανομή [Lin 1975] που περιγράφεται μέσω της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (σ.π.π.) (probability density function, pdf)

$$f_R(R) = \frac{1}{S_r \cdot R \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln R - \ln R_m)^2}{2 \cdot S_r^2}\right] \quad (2.3)$$

όπου  $\ln R_m$  και  $S_r$  η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της τυχαίας μεταβλητής (τ.μ.) (random variable)  $\ln R$ , οι οποίες εξαρτώνται από το φυσικό μέσο βροχόπτωσης.

Προκειμένου για περιοχές με τροπικό και υποτροπικό κλίμα, όπως π.χ., Νότια Αμερική, Άπω Ανατολή, Νότια Ασία κι Αφρική, τα πειραματικά δεδομένα του ρυθμού βροχόπτωσης προσεγγίζονται καλύτερα από την κατανομή γάμμα (gamma) [Morita 1978] που περιγράφεται μέσω της σ.π.π.

$$f_R(R) = \frac{\beta_R^{\nu_R}}{\Gamma(\nu_R)} \cdot R^{\nu_R-1} \cdot e^{-\beta_R \cdot R} \quad (2.4)$$

όπου  $\nu_R$  και  $\beta_R$  οι παράμετροι της κατανομής γάμμα που εξαρτώνται από το φυσικό μέσο βροχόπτωσης.

Σε όλη την έκταση της Διατριβής ακολουθείται αποκλειστικά η λογαριθμοκανονική κατανομή για την περιγραφή του ρυθμού βροχόπτωσης  $R$ . Με βάση το φυσικό-στατιστικό μοντέλο που περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα I, που περιλαμβάνει το φυσικό μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων στο οποίο λαμβάνεται υπόψη η χωρική δομή του μέσου βροχής, η σ.π.π. της τ.μ.  $A$  (σε dB) για τις διαλείψεις λόγω βροχόπτωσης γράφεται

$$f_A(A) = \frac{1}{S_a \cdot A \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln A - \ln A_m)^2}{2 \cdot S_a^2}\right] \quad (2.5)$$

όπου  $A_m$ ,  $S_a$  είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της τμ  $\ln A$ , αντίστοιχα, που προκύπτουν από τις σχέσεις

$$S_a^2 = \ln\left[1 + \frac{H_1}{L_D^2} \cdot [\exp(b^2 S_r^2) - 1]\right] \quad (2.6)$$

$$A_m = a \cdot R_m^b \cdot L_D \cdot \exp\left(\frac{b^2 S_r^2 - S_a^2}{2}\right) \quad (2.7)$$

Δεδομένου ότι η τ.μ.  $A$  ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή, η τ.μ.

$$U = \frac{\ln A - \ln A_m}{S_a} \quad (2.8)$$

ακολουθεί την κανονική (Gaussian) κατανομή, δηλαδή  $U \sim N(0,1)$ .

Στο σημείο αυτό τονίζεται η χωρική ανομοιογένεια του φυσικού μέσου βροχόπτωσης, η οποία περιγράφεται μέσω του μοντέλου των συνεκτικών βροχοπυρήνων και στην οποία οφείλεται η χωρική συσχέτιση μεταξύ δύο διαφορετικών σημείων του μέσου βροχόπτωσης. Συγκεκριμένα, οι βροχοπυρήνες είναι υπεύθυνοι για τις υψηλές τιμές απόσβεσης στις οποίες υπόκεινται τα ραδιοκύματα για ορισμένες χρονικές περιόδους κατά τη διάρκεια του έτους. Στο εσωτερικό των βροχοπυρήνων η αυτοσυσχέτιση της βροχόπτωσης παύει να είναι πολύ υψηλή, με αποτέλεσμα η συμπεριφορά της βροχόπτωσης σε κάποιο σημείο του

βροχοπυρήνα να ακολουθεί μόνο μερικώς τις μεταβολές στη βροχόπτωση γειτονικών του σημείων. Το γεγονός αυτό έχει μεγάλη σημασία για τις τεχνικές διαφορισμού που εξετάζονται στα επόμενα κεφάλαια. Επίσης, επισημαίνεται ότι οι διαλείψεις λόγω βροχόπτωσης, ως διαλείψεις μεγάλης κλίμακας, μεταβάλλονται πολύ αργά ως προς το χρόνο (slow time dynamic) σε σχέση με τις διαλείψεις μικρής κλίμακας. Για το λόγο αυτό, θεωρείται ότι εισάγουν αργές διαλείψεις στο δίαυλο.

### 2.3.2. Μοντέλο Διαλείψεων λόγω Σκίασης

Η στατιστική κατανομή της τοπικής μέσης ισχύος έχει μελετηθεί πειραματικά. Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί ότι η τοπική μέση τιμή της στιγμιαίας ισχύος λήψης υπό συνθήκες διαλείψεων μικρής κλίμακας τύπου Rayleigh προσεγγίζει τη λογαριθμοκανονική κατανομή [Proakis 2001]. Για το λόγο αυτό οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας αναφέρονται πολύ συχνά στη βιβλιογραφία και ως λογαριθμοκανονική σκίαση [Rappaport 1999]. Συγκεκριμένα, η τοπική μέση ισχύς στην περίπτωση αυτή ακολουθεί την κατανομή

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma_s \cdot x \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma_s^2}\right] \quad (2.9)$$

όπου  $x = 10 \log_{10}(P_r)$  εκφράζει τη διακύμανση μεγάλης κλίμακας της τοπικής μέσης ισχύος σε dB, ενώ οι παράμετροι  $\mu$  και  $\sigma_s$  αποδίδουν τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της κανονικής τ.μ.  $\ln x$ , αντίστοιχα [Paroulis 2002].

Όπως και στην περίπτωση των διαλείψεων λόγω βροχής, έτσι και στην περίπτωση της σκίασης, οι αντίστοιχες διαλείψεις μεταβάλλονται πολύ αργά ως προς το χρόνο (slow time dynamic) σε σχέση με τις διαλείψεις μικρής κλίμακας. Για το λόγο αυτό, θεωρείται ότι εισάγουν αργές διαλείψεις στο δίαυλο.

### 2.3.3. Μοντέλα Διαλείψεων για Διαύλους με Πολυδιαδρομική Διάδοση

#### 2.3.3.1. Μοντέλο Rayleigh

Το μοντέλο Rayleigh χρησιμοποιείται για τη στατιστική περιγραφή του διαύλου διάδοσης όταν δεν υπάρχει κυρίαρχη συνιστώσα, δηλαδή όταν ο πομπός δεν έχει οπτική επαφή με το δέκτη (Non Line Of Sight, NLOS) και το περιβάλλον είναι πλούσιο σε σκεδαστές. Οπότε, ο τύπος διαύλων που ενδιαφέρει κυρίως είναι οι χρονικά μεταβλητοί που εμφανίζουν πολυδιαδρομική διάδοση.

Στην περίπτωση του διαύλου που περιγράφεται μέσω της κατανομής Rayleigh, ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα II, η σ.π.π. της περιβάλλουσας  $a(t)$  του διαύλου διαλείψεων δίδεται από τη σχέση

$$f_A(a) = \frac{a}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{a^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2.10)$$

όπου η διασπορά  $\sigma^2$  αποτελεί τη μοναδική παράμετρο της κατανομής Rayleigh και περιγράφει την ισχύ των πολυδιαδρομικών συνιστωσών.

Λόγω των σημαντικών αποκλίσεων που παρουσιάζει, το μοντέλο Rayleigh δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με απόλυτη ακρίβεια στις ακόλουθες περιπτώσεις [Theologou 2002]:

- i) Όταν το πλήθος των διαφορετικών και ανεξάρτητων πολυδιαδρομικών συνιστωσών είναι μικρό οπότε δεν ισχύει η προσέγγιση του Κεντρικού Οριακού Θεωρήματος<sup>4</sup>.
- ii) Όταν η διάταξη των σκεδαστών στο περιβάλλον διάδοσης δημιουργεί συνθήκες κυματοδήγησης.
- iii) Όταν στο σήμα λήψης υπάρχει ισχυρή σταθερή συνιστώσα LOS. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται το μοντέλο Rice.

#### 2.3.3.2. Μοντέλο Rice

Το μοντέλο Rice χρησιμοποιείται στην περίπτωση όπου η διάδοση περιλαμβάνει εκτός από τις ανακλώμενες συνιστώσες και ισχυρή συνιστώσα οπτικής επαφής (Line Of Sight, LOS). Η συνιστώσα οπτικής επαφής είναι ισχυρότερη από όλες τις υπόλοιπες που οφείλονται στο φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης.

Στην περίπτωση διαύλου που περιγράφεται μέσω της κατανομής Rice, ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα II, η σ.π.π. της περιβάλλουσας  $a(t)$  του διαύλου διαλείψεων δίδεται από τη σχέση

$$f_A(a) = \frac{a}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{(a^2 + \beta^2)}{2\sigma^2}\right] I_0\left[\frac{a\beta}{\sigma^2}\right] \quad (2.11)$$

όπου  $I_0(\cdot)$  η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου είδους μηδενικής τάξης,  $\beta$  το πλάτος της απευθείας LOS συνιστώσας και  $2\sigma^2$  είναι η συνολική ισχύς των πολυδιαδρομικών συνιστωσών.

Ο λόγος της ισχύος της απευθείας LOS συνιστώσας προς τη συνολική ισχύ των πολυδιαδρομικών συνιστωσών ονομάζεται παράγοντας Rice  $K$  (Ricean  $K$ -factor) και δίδεται από τη σχέση

$$K = \frac{\beta^2}{2\sigma^2} \quad (2.12)$$

Συνήθως, ο παράγοντας  $K$  εκφράζεται σε dB δηλαδή

$$K_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\beta^2}{2\sigma^2} \quad (2.13)$$

και αποτελεί χρήσιμο πρακτικό μέτρο του εύρους της πολυδιαδρομικής διάδοσης που υφίσταται σε ένα δίαυλο. Οι δυο ακραίες περιπτώσεις για τον παράγοντα Rice  $K$  είναι  $K = \infty$  και  $K = 0$ , εκ των οποίων, η πρώτη αντιστοιχεί σε AWGN δίαυλο ενώ η δεύτερη σε δίαυλο Rayleigh. Έτσι, η μετάδοση Rayleigh μπορεί να θεωρηθεί ως ειδική περίπτωση της μετάδοσης Rice.

### 2.3.3.3. Μοντέλο Loo

Επειδή η εξασθένηση που υφίσταται το απευθείας σήμα λόγω εμποδίων σκίασης εμπεριέχει τυχαιότητα, η ισχύς που φθάνει στο δέκτη μέσω της απευθείας συνιστώσας ( $P_{LOS}$ ) αποτελεί τυχαία μεταβλητή, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με ό,τι θεωρήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στην ενότητα αυτή περιγράφεται το στοχαστικό μοντέλο του Loo για κινητές δορυφορικές επικοινωνίες LMS [Loo 1985] που λειτουργούν στις ζώνες συχνοτήτων  $L$  και  $S$ . Το μοντέλο αυτό υποθέτει ότι ο επίγειος δέκτης βρίσκεται σε τέτοιο περιβάλλον (π.χ. αγροτική περιοχή, rural environment), ώστε κατά το μεγαλύτερο ποσοστό της διάρκειας μιας τηλεπικοινωνιακής σύνδεσης να υπάρχει ισχυρή LOS συνιστώσα μεταξύ δορυφόρου και επίγειου δέκτη. Η ενδεχόμενη βλάστηση και το περιβάλλον σκεδαστών περί τη LOS διαδρομή προκαλεί εξασθένηση και σκέδαση του σήματος. Η εξασθένηση της LOS συνιστώσας επηρεάζεται από τη βλάστηση λόγω του φαινομένου της σκίασης και περιγράφεται μέσω της λογαριθμοκανονικής κατανομής. Επιπλέον, το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης περιγράφεται μέσω της κατανομής Rayleigh. Οι δύο τυχαίες διαδικασίες που προκύπτουν με βάση τις προηγούμενες θεωρήσεις λαμβάνονται υπόψη μεταξύ τους συσχετισμένες. Σημειώνεται ότι η κατανομή Loo συναντάται συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία και ως σκιασμένη κατανομή Rice (shadowed-Ricean).

Στην περίπτωση του διαύλου που περιγράφεται μέσω της κατανομής Loo, ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα II, η σ.π.π. της περιβάλλουσας  $a(t)$  του διαύλου διαλείψεων δίδεται από τη σχέση

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2 \sqrt{2\pi d_0}} \int_0^\infty \frac{1}{\beta} \exp \left[ -\frac{(\ln \beta - \mu)^2}{2d_0} - \frac{(r^2 + \beta^2)}{2\sigma^2} \right] I_0 \left( \frac{r\beta}{\sigma^2} \right) d\beta \quad (2.14)$$

Από την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι το μοντέλο Loo εξαρτάται από τις εξής τρεις παραμέτρους: τη μέση ισχύ της πολυδιαδρομικής διάδοσης  $\sigma^2$  που σχετίζεται με τις πολυδιαδρομικές συνιστώσες, τη μέση τιμή  $\mu$  και τη διασπορά  $d_0$  της λογαριθμοκανονικής κατανομής που σχετίζεται με το φαινόμενο της σκίασης.

Για να επαληθεύσει το μοντέλο του, ο Loo έκανε πολλούς υπολογισμούς με διάφορες τιμές των παραμέτρων  $\sigma^2$ ,  $\mu$  και  $d_0$ , μέχρι να προσδιορίσει τις τιμές που έδιναν αποτελέσματα σύμφωνα με τις υπάρχουσες μετρήσεις. Οι τιμές των παραμέτρων στις οποίες κατέληξε τελικά ο Loo παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα II.

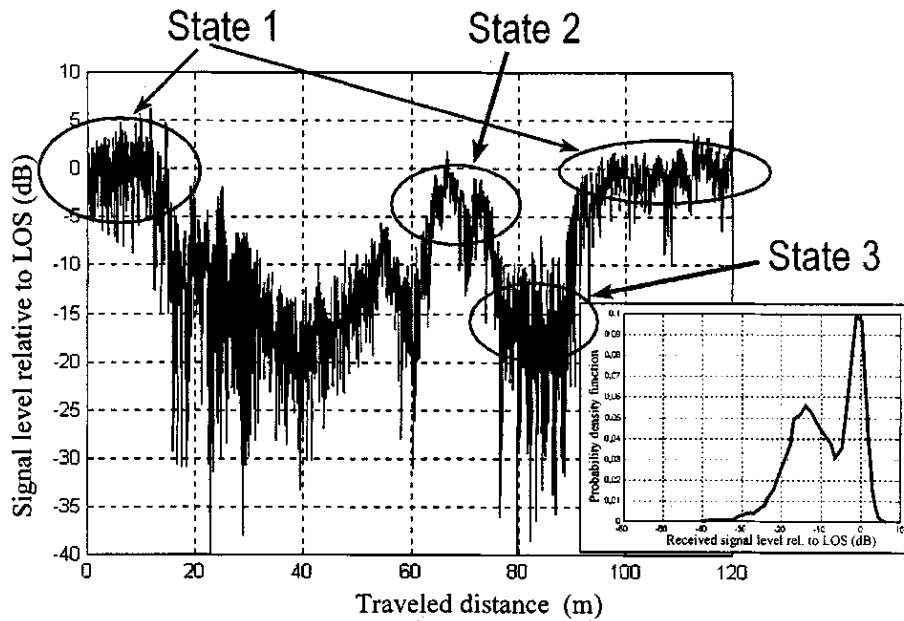
Ωστόσο, μοντέλα διάδοσης όπως τα Rayleigh, Rice και Loo που περιγράφηκαν προηγουμένως, αδυνατούν πολλές φορές να περιγράψουν με ακρίβεια τις διακυμάνσεις ενός δορυφορικού διαύλου λόγω των πολύ μεγάλων αλλαγών που παρατηρούνται συχνά στην ισχύ λήψης του μεταδιδόμενου σήματος, όπως π.χ. λόγω φαινομένων σκίασης. Το γεγονός αυτό εγείρει την ανάγκη για χρήση μοντέλων διάδοσης πολλαπλών καταστάσεων, όπως αυτά που αναλύονται στη συνέχεια.

#### 2.3.3.4. Μοντέλο Perez-Fontan *et al.*

Η κατανομή της περιβάλλουσας της απευθείας συνιστώσας εξαρτάται από τις συνθήκες σκίασης που επικρατούν στο δορυφορικό δίαυλο κοντά στην περιοχή του δέκτη. Ανάλογα με τις συνθήκες σκίασης που επικρατούν στο δίαυλο υιοθετείται ένα μοντέλο τριών καταστάσεων (βλ. Σχήμα 2.4):

- S1: συνθήκες καθαρής οπτικής επαφής (LOS)
- S2: συνθήκες μέτριας σκίασης
- S3: συνθήκες έντονης σκίασης





**Σχήμα 2.4:** Ισχύς λήψης σε δορυφορικό διάυλο με επίπεδες διαλείψεις στη ζώνη συχνότητων S, όπου προκύπτουν 3 διαφορετικές καταστάσεις

Η μέση τιμή της ισχύος  $P_{LOS}$  σε κάθε κατάσταση σκίασης  $S_i$ ,  $i = 1,2,3$ , εξαρτάται από τη γωνία ανύψωσης υπό την οποία το τερματικό βλέπει το δορυφόρο. Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία ανύψωσης τόσο η νοητή ευθεία που ενώνει το δορυφόρο με το τερματικό τείνει προς την κατακόρυφο στην επιφάνεια της γης με συνέπεια να μειώνεται η πιθανότητα παρεμπόδισης της απευθείας συνιστώσας από κτίρια και βλάστηση που αποτελούν παράγοντες σκίασης. Συνεπώς, προκειμένου για γεωστατικούς δορυφόρους (GEO), η χαμηλή γωνία ανύψωσης καθιστά τερματικά που κινούνται σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από μεγάλα γεωγραφικά πλάτη ευάλωτα στο φαινόμενο της σκίασης. Το ίδιο πρόβλημα δεν αντιμετωπίζεται από δορυφόρους μέσης τροχιάς (MEO) ή χαμηλής τροχιάς (LEO) των οποίων το ίχνος παύει να είναι σταθερό σημείο στην επιφάνεια της γης ενώ η τροχιά τους δεν είναι απαραίτητα στο ύψος του ισημερινού.

Οι μεταπηδήσεις μεταξύ των καταστάσεων  $S_i$  χαρακτηρίζονται ως πολύ αργές (very slow) μεταβολές της περιβάλλουσας. Για την περιγραφή τους υιοθετείται το μοντέλο της αλυσίδας Markov πρώτης τάξης με βάση το οποίο η πιθανότητα να κινείται το τερματικό σε περιοχή που χαρακτηρίζεται από κατάσταση σκίασης  $S_i$  εξαρτάται μόνο από την κατάσταση σκίασης της αμέσως προηγούμενης περιοχής.

Έστω ότι για δεδομένη διαδρομή καταγράφονται σε  $N_t$  ισαπέχοντα σημεία οι διαδοχικές καταστάσεις σκίασης  $S_i$  στις οποίες βρίσκεται το τερματικό. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων ονομάζεται μήκος παρατήρησης. Ως πίνακας πιθανοτήτων κατάστασης

**W** (state probability matrix) ορίζεται ο πίνακας διαστάσεων 3x1 του οποίου τα στοιχεία δίδονται από τη σχέση

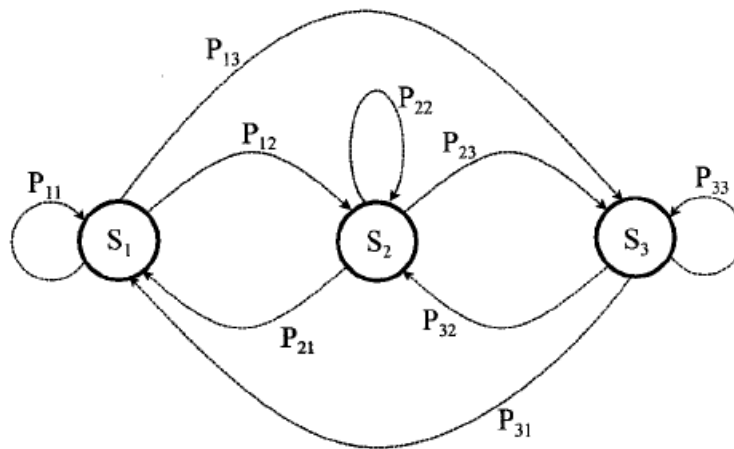
$$W_i = \frac{N_i}{N_t} \quad (i=1,2,3) \quad (2.15)$$

όπου  $N_i$  το πλήθος των σημείων της συνολικής διαδρομής όπου το τερματικό κινείται σε περιοχή κατάστασης σκίασης  $S_i$ . Το μέγεθος  $W_i$  εκφράζει την πιθανότητα να βρεθεί το τερματικό σε περιοχή που χαρακτηρίζεται από κατάσταση σκίασης  $S_i$ .

Ως πίνακας μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων **P** (state transition matrix) ορίζεται ο πίνακας διαστάσεων 3x3 με στοιχεία:

$$P_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_i} \quad (i, j=1,2,3) \quad (2.16)$$

όπου  $N_{ij}$  το πλήθος των σημείων της συνολικής διαδρομής όπου το τερματικό κινείται σε περιοχή που χαρακτηρίζεται από κατάσταση σκίασης  $S_j$  όταν στο προηγούμενο σημείο παρατήρησης η περιοχή χαρακτηρίζονταν από κατάσταση σκίασης  $S_i$ . Το στοιχείο  $P_{ij}$  εκφράζει την πιθανότητα ενώ το κινητό κινείται σε περιοχή κατάστασης σκίασης  $S_i$ , σε απόσταση ίση με το μήκος παρατήρησης να βρεθεί σε περιοχή κατάστασης σκίασης  $S_j$ .



**Σχήμα 2.5: Markov μοντέλο 3 καταστάσεων διαύλου**

Το μοντέλο διάδοσης που προτάθηκε από τους Perez-Fontan *et al.* [Perez-Fontan 2001] υποθέτει ένα μοντέλο τριών καταστάσεων  $S_1$ ,  $S_2$  και  $S_3$  όπως το ανωτέρω. Επιπλέον, σε κάθε κατάσταση χωριστά, για τον από κοινού χαρακτηρισμό της απευθείας συνιστώσας σκίασης και της πολυδιαδρομικής διάδοσης, υιοθετείται το μοντέλο Loo [Loo 1985] που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Για διάφορα περιβάλλοντα διάδοσης, διάφορες ζώνες συχνοτήτων, διάφορες γωνίες ανύψωσης από  $10^\circ$  έως  $80^\circ$ , και διάφορα κινητά

τερματικά χρήστη, έχει πραγματοποιηθεί σειρά μετρήσεων από τις οποίες προέκυψαν αντίστοιχοι πίνακες παραμέτρων για την κατανομή Loo, δηλαδή για τη μέση τιμή και τυπική απόκλιση της λογαριθμοκανονικής συνιστώσας σκίασης καθώς και για τη διασπορά της Rayleigh συνιστώσας πολυδιαδρομικής διάδοσης. Επίσης, για κάθε τέτοιο σύνολο παραμέτρων δίδονται αντίστοιχοι πίνακες πιθανοτήτων κατάστασης **W** και πίνακες μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων **P**. Το σύνολο των ανωτέρω πινάκων που έχουν προκύψει από τις διάφορες μετρήσεις και αφορούν το μοντέλο Perez-Fontan δίδονται στο Παράρτημα II.

Στο σημείο αυτό τονίζεται η σχέση μεταξύ των στατιστικών παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\psi$ ,  $MP$  του μοντέλου Perez-Fontan και των αντιστοιχών  $\mu$ ,  $d_0$  και  $\sigma$  του μοντέλου Loo:

$$\alpha = 20 \log_{10} (e^{\mu}) \quad (2.17)$$

$$\psi = 20 \log_{10} (e^{\sqrt{d_0}}) \quad (2.18)$$

$$MP = 10 \log_{10} (2b_0) \quad (2.19)$$

Το ανωτέρω μοντέλο Perez-Fontan χρησιμοποιήθηκε εκτενώς ως μοντέλο αναφοράς για τις διάφορες προσομοιώσεις φυσικού στρώματος του συστήματος DVB-SH κατά το στάδιο της προτυποποίησής του στο πλαίσιο της ομάδας εργασίας DVB TM SSP. Ωστόσο, παρά την ευκολία στη χρήση του και τη δυνατότητα προσομοίωσής του, βασικοί περιορισμοί του μοντέλου αυτού είναι:

- Η κατηγοριοποίηση σε 3 καταστάσεις δεν αντιστοιχεί κατ' ανάγκη στην πραγματικότητα
- Οι στατιστικές παράμετροι  $\alpha$ ,  $\psi$ ,  $MP$  για κάθε κατάσταση έχουν καθοριστεί και θεωρούνται σταθερές για συγκεκριμένο σενάριο και γωνία ανύψωσης.

Οι ανωτέρω περιορισμοί επηρέασαν κατά ένα σημαντικό ποσοστό την επιλογή των παραμέτρων φυσικού υποστρώματος του προτύπου DVB-SH. Ωστόσο, έδωσαν το έναυσμα για έρευνα και ανάπτυξη νέων μοντέλων ικανών να περιγράψουν τον κινητό δορυφορικό διάυλο με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ένα τέτοιο μοντέλο περιγράφεται στην αμέσως επόμενη ενότητα.

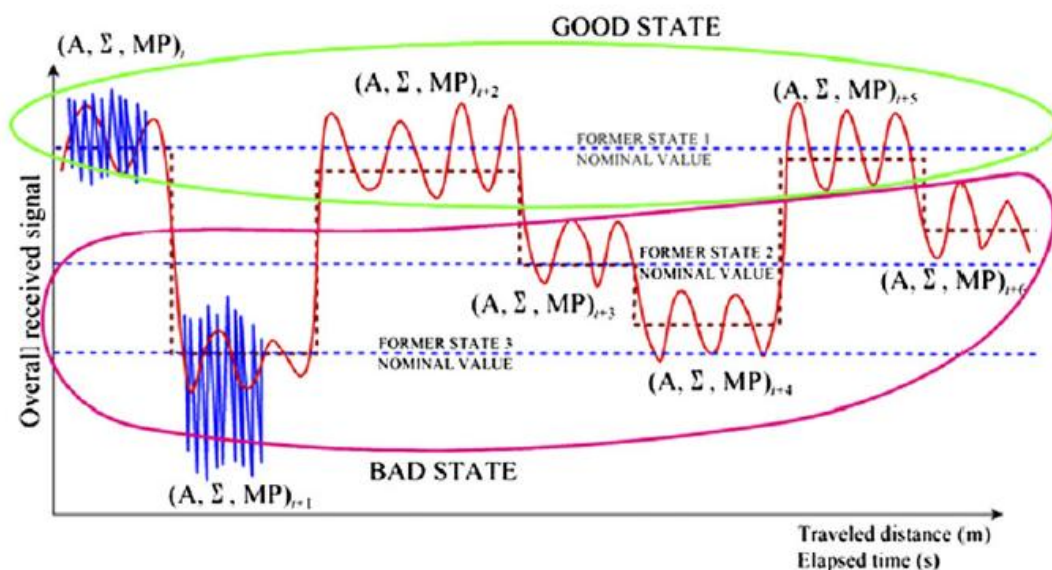
#### 2.3.3.5. Μοντέλο Prieto-Cerdeira *et al.*

Το μοντέλο που προτείνεται από τους Prieto-Cerdeira *et al.* [Prieto-Cerdeira 2010] και περιγράφεται συνοπτικά σε αυτή την ενότητα αναπτύχθηκε έχοντας ως βάση το αρχικό

μοντέλο Perez-Fontan *et al.* που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα [Perez-Fontan 2001]. Περιλαμβάνει τις εξής σημαντικές τροποποιήσεις:

- Μείωση του αριθμού των καταστάσεων από 3 σε 2.
- Εισαγωγή ενός ευέλικτου μηχανισμού επιλογής στατιστικών παραμέτρων που περιγράφουν κάθε κατάσταση.
- Κάθε κατάσταση περιγράφεται είτε από αλυσίδες Markov ή από αλυσίδες semi-Markov.

Συγκεκριμένα, η νέα προτεινόμενη κατηγοριοποίηση των καταστάσεων δεν αντιστοιχεί κατ' ανάγκη σε διαισθητικούς φυσικούς ορισμούς των καταστάσεων όπως στην περίπτωση του μοντέλου των Perez-Fontan *et al.* (δηλαδή LOS, μέτρια σκίαση, έντονη σκίαση) αλλά, αντ' αυτού, αντιστοιχεί στις διακυμάνσεις του διαύλου που χαρακτηρίζονται παρόμοια στατιστικά χαρακτηριστικά. Οι δύο καταστάσεις ονομάζονται για ευκολία *Καλή Κατάσταση* (GOOD state) και *Κακή Κατάσταση* (BAD state) και αντιπροσωπεύουν, αντίστοιχα, ένα φάσμα διακυμάνσεων από LOS έως μέτρια σκίαση και από μέτρια έως βαθιά σκίαση. Για την επιλογή των στατιστικών παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\psi$ , MP του μοντέλου αυτού έγινε ενδελεχής ανάλυση διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων από μετρήσεις που αφορούν δορυφορικούς διαύλους στις L και S ζώνες συχνότητας χρησιμοποιώντας έναν επαναληπτικό αλγόριθμο που περιλαμβάνει αυτόματη ταξινόμηση των δεδομένων και εξαγωγή παραμέτρων. Το προτεινόμενο μοντέλο των Prieto *et al.* θεωρείται καταλληλότερο για την ανάλυση του φυσικού στρώματος του προτύπου DVB-SH.



Σχήμα 2.6: Μοντέλο 2 καταστάσεων διαύλου βασισμένο σε αντίστοιχο με 3 καταστάσεις

Συγκεκριμένα, για έκαστη των δύο καταστάσεων του διαύλου, GOOD και BAD, υιοθετείται και πάλι το μοντέλο κατανομής Loo [Loo 1985]. Ωστόσο, οι στατιστικές παράμετροι Loo δεν είναι σταθερές. Αντίθετα, προτείνεται ένας ευέλικτος μηχανισμός επιλογής στατιστικών παραμέτρων που περιγράφουν κάθε κατάσταση με βάση τον οποίο κάθε κατάσταση μπορεί να χαρακτηριστεί από ένα μεγάλο εύρος πιθανών στατιστικών παραμέτρων. Δηλαδή, για κάθε εμφάνιση κατάστασης, για έκαστη των δύο δυνατών επιτρεπτών καταστάσεων το νέο μοντέλο θεωρεί την κατανομή Loo με διαφορετικές στατιστικές παραμέτρους προερχόμενες από μια τριάδα στατιστικών παραμέτρων ( $M_A, \Sigma_A, MP$ ). Σε κάθε κατάσταση του διαύλου, αντιστοιχεί ένας χώρος στατιστικών παραμέτρων (parameter space) οι οποίες ακολουθούν δεδομένη από κοινού κατανομή  $f(M_A, \Sigma_A, MP)$ . Επομένως, κατά την προσομοίωση του μοντέλου αυτού, κάθε φορά που ο δίαυλος φθάνει σε μια νέα κατάσταση από τις δυνατές δύο, μια τριάδα στατιστικών παραμέτρων Loo ( $M_A, \Sigma_A, MP$ ) επιλέγεται με βάση τη δεδομένη από κοινού κατανομή  $f(M_A, \Sigma_A, MP)$ , όπου:

$$f(M_A) \sim \text{Gaussian}(\mu_1, \sigma_1) \quad (2.20)$$

$$f(\Sigma_A | M_A) \sim \text{Gaussian}(\mu_2, \sigma_2) \quad (2.21)$$

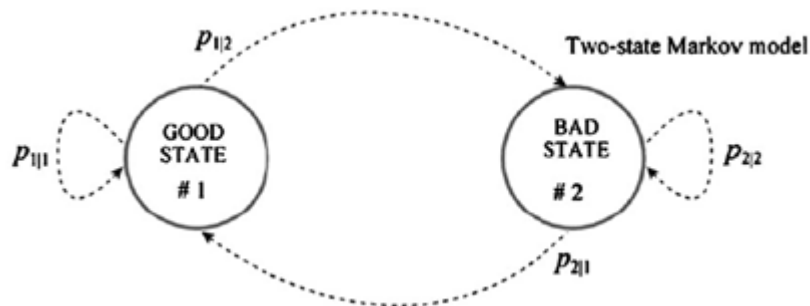
$$f(M_{MP}) \sim \text{Gaussian}(\mu_3, \sigma_3) \quad (2.22)$$

$$\mu_2 = \alpha_1 \cdot M_A^2 + \alpha_2 \cdot M_A + \alpha_3 \quad (2.23)$$

$$\sigma_2 = b_1 \cdot M_A^2 + b_2 \cdot M_A + b_3 \quad (2.24)$$

όπου  $(a_i, b_i, \mu_i, \sigma_i)$  ( $i = 1, 2, 3$ ) δίδονται σε καθαρούς αριθμούς ενώ  $(M_A, \Sigma_A, MP)$  σε dB.

Όσον αφορά τη χρονική διάρκεια κάθε κατάστασης, θεωρούνται αλυσίδες Markov (βλ. Σχήμα 2.6) με σταθερούς πίνακες πιθανοτήτων κατάστασης  $\mathbf{W}$  και μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων  $\mathbf{P}$  [Prieto-Cerdeira 2010].



Σχήμα 2.7: Markov μοντέλο 2 καταστάσεων διαύλου

Πίνακες τιμών για τις ανωτέρω στατιστικές παραμέτρους και πίνακες **W,P** για διάφορα περιβάλλοντα διάδοσης, διάφορες ζώνες συχνοτήτων, διάφορες γωνίες ανύψωσης από 10° έως 80°, και κινητό τερματικό χρήστη οροφής αυτοκινήτου, δίδονται στο Παράρτημα Π, ενώ για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το εν λόγω μοντέλο, ο αναγνώστης παραπέμπεται στο [Prieto-Cerdeira 2010].

### 2.3.3.6. Σύνοψη Άλλων Στατιστικών Μοντέλων για Διαύλους με Πολυδιαδρομική Διάδοση

Στην ενότητα αυτή απλώς αναφέρονται για λόγους πληρότητας διάφορα άλλα στατιστικά μοντέλα δορυφορικών διαύλων με διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης που συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία. Ωστόσο, τα μοντέλα αυτά δεν πρόκειται να απασχολήσουν περαιτέρω τη Διατριβή. Συγκεκριμένα, ο Πίνακας 2.2 παραθέτει διάφορα στατιστικά μοντέλα μονής κατάστασης διαύλου ενώ ο Πίνακας 2.3 διάφορα στατιστικά μοντέλα πολλαπλών καταστάσεων διαύλου που έχουν προταθεί κατά καιρούς στη σχετική διεθνή βιβλιογραφία.

**Πίνακας 2.2: Διάφορα μονο-κατάστατα στατιστικά μοντέλα δορυφορικών διαύλων με διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης**

Μοντέλο	Αναφορά	Απευθείας Συνιστώσα	Πολυδιαδρομική Συνιστώσα	Συσχέτιση Απευθείας/ Πολυδιαδρομικής Συνιστώσας
Suzuki	[Suzuki 1977]	-	Lognormal-Rayleigh	-
Corazza-Vatalaro (ή Rice-Lognormal, RLN)	[Corazza 1994]	Lognormal	Lognormal-Rayleigh	Πλήρης
Generalized RLN (GRLN)	[Vatalaro 2002]	Lognormal	Μέρος 1: Rayleigh Μέρος 2: Rayleigh-Lognormal	Μεταβλητή
Xie <i>et al.</i>	[Xie 2000]	Lognormal	Lognormal-generalized Rayleigh	Πλήρης
Patzold <i>et al.</i>	[Patzold 1998]	Lognormal	Lognormal - Rayleigh	Πλήρης
Hwang <i>et al.</i>	[Hwang 1997]	Lognormal	Lognormal - Rayleigh	Μηδενική
Tjhung <i>et al.</i>	[Tjhung 1999]	Lognormal	Lognormal - Nakagami	Πλήρης
Abdi <i>et al.</i>	[Abdi 2003]	Nakagami	Rayleigh	Μηδενική

**Πίνακας 2.3: Διάφορα πολυ-κατάστατα στατιστικά μοντέλα δορυφορικών διαύλων με διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης**

Μοντέλο	Αναφορά	Πλήθος Καταστάσεων	Κατανομή Ανά Κατάσταση
Lutz <i>et al.</i>	[Lutz 1991]	2	Rice, Suzuki
Lutz	[Lutz 1996]	4 (με διαφορισμό)	Rice, Suzuki, Rice, Suzuki
Barts-Stutzman	[Barts 1994]	2	Rice, Loo
Vucetic <i>et al.</i>	[Vucetic 1992]	M	Rayleigh, Rice, Loo
Rice <i>et al.</i>	[Rice 1997]	3	Rice, Rice, Suzuki
Karasawa <i>et al.</i>	[Karasawa 1997]	3	Rice, Loo, Rayleigh
Akturan-Vogel	[Akturan 1997]	3	Rice, Loo, Loo

#### 2.3.4. Μοντέλο Συσχέτισης μεταξύ Διαλείψεων λόγω Βροχόπτωσης και λόγω Πολυδιαδρομικής Διάδοσης

Μέχρι σήμερα, στους δορυφορικούς διαύλους που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz οι διαλείψεις λόγω βροχόπτωσης που οφείλονται στα τροποσφαιρικά φαινόμενα διάδοσης και οι διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης που οφείλονται στα φαινόμενα διάδοσης τοπικού περιβάλλοντος στην περιοχή του δέκτη εθεωρούντο ασυσχέτιστες μεταξύ τους [Perez-Fontan 2001],[Kubista 2000],[Scalise 2002],[Scalise 2008]. Ωστόσο, πρόσφατα έχουν δημοσιευτεί επιστημονικές εργασίες που υποδεικνύουν την ύπαρξη κάποιας μορφής συσχέτισης μεταξύ των δύο αυτών διαλείψεων. Συγκεκριμένα, στο επιστημονικό πεδίο των *Ασυρμάτων Επικοινωνιών*, οι μοναδικές εργασίες μέχρι τώρα όπου τα τροποσφαιρικά φαινόμενα διάδοσης έχουν συσχετιστεί με αυτά που δημιουργούνται στο τοπικό περιβάλλον της περιοχής του δέκτη έχουν δημοσιευτεί στις [Xu 2000],[Cheffena 2006],[Cheffena 2010],[Li 2001],[Loo 1998] κι αφορούν επίγεια χιλιοστομετρικά συστήματα σταθερής ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης (Broadband Fixed Wireless Access, BFWA). Επίσης, η πρωτότυπη αυτή θεώρηση ενισχύεται ακόμα περισσότερο από πρόσφατες σχετικές δημοσιεύσεις σε ένα διαφορετικό επιστημονικό πεδίο, αυτό της *Τηλεπισκόπησης και Υδρολογίας*, με βάση τις οποίες φαίνεται ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των φαινομένων βροχόπτωσης και πολυδιαδρομικής διάδοσης [Larson 2008],[Masters 2004],[Katzberg 2006]. Συγκεκριμένα, στη [Xu 2000], μια σειρά μετρήσεων ευρείας ζώνης 200MHz έγινε σε χώρο πανεπιστημίου για επίγειες BFWA ζεύξεις μικρού μήκους στα 38GHz, όπου ίσχυαν συνθήκες οπτικής επαφής (LOS), σταθερός δέκτης, υψηλή κατευθυντικότητα κεραίας δέκτη και κατακόρυφη πόλωση. Ένα σημαντικό συμπέρασμα που προέκυψε από αυτό το πείραμα ήταν ότι πολυδιαδρομική διάδοση παρατηρήθηκε

ακόμη και σε ανεμπόδιστες ζεύξεις LOS κατά τη διάρκεια βροχόπτωσης αλλά δεν παρατηρήθηκε υπό συνθήκες καθαρού ουρανού. Επιπλέον, προτάθηκε η ακόλουθη εμπειρική σχέση μεταξύ του παράγοντα Rice  $K$  (σε dB) και του ρυθμού βροχόπτωσης  $R$  (σε mm/hr) [Xu 2000]

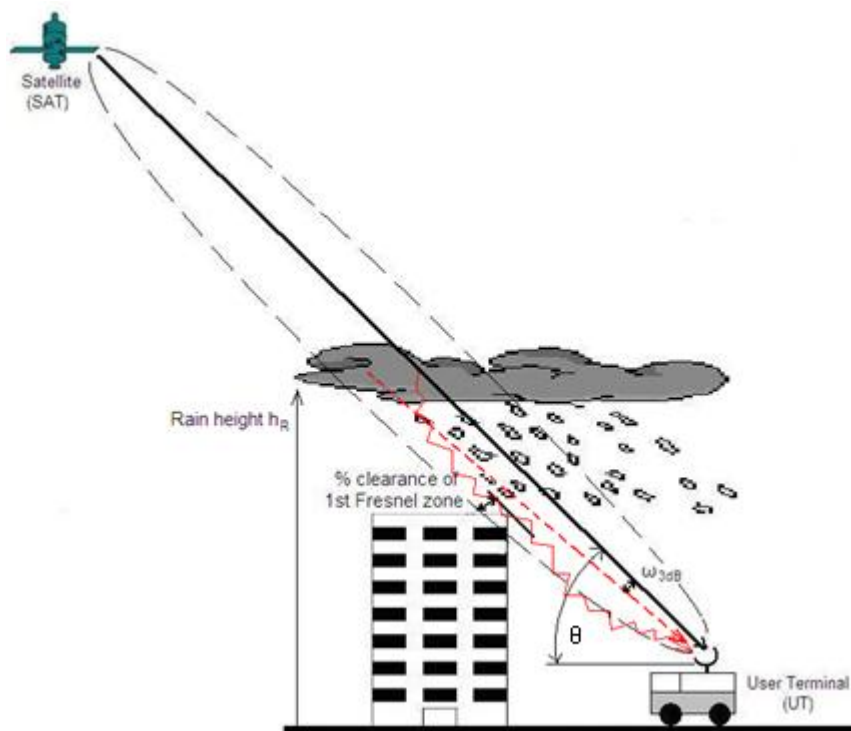
$$K = 16.88 - 0.04 \cdot R \quad (2.25)$$

Ως πιθανές αιτίες για τη συγκεκριμένη συμπεριφορά του διαύλου BFWA, προτάθηκαν δύο βασικοί φυσικοί μηχανισμοί [Xu 2000]:

- Ατμοσφαιρικές ανομοιογένειες, συμπεριλαμβανομένων των άκρων πολύ έντονων και συμπαγών βροχοπυρήνων [De Wolf 1993].
- Αλλαγές στις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες των επιφανειών του περιβάλλοντος σκέδασης (π.χ. ανακλαστικότητα).

Με βάση τα ανωτέρω, είναι σαφές ότι η ακριβής περιγραφή ενός διαύλου πρέπει να λαμβάνει υπόψη την ενδεχόμενη συσχέτιση μεταξύ των διαλείψεων λόγω βροχόπτωσης και αυτών λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης. Ωστόσο, η (2.25) δεν μπορεί να εφαρμοστεί αυτούσια στη περίπτωση δορυφορικών διαύλων που ενδιαφέρουν τη Διατριβή δεδομένου ότι πρόκειται για διαφορετικό σενάριο συστήματος (επίγεια BFWA έναντι δορυφορικών συστημάτων) με διαφορετικά εγγενή χαρακτηριστικά, όπως π.χ., η επίδραση της γωνίας ανύψωσης στις δορυφορικές επικοινωνίες που προσθέτει μια τρίτη διάσταση στη δισδιάστατη (2D) περίπτωση των επίγειων διαύλων. Επιπλέον, η (2.25) αναφέρεται σε εμπειρικό μοντέλο και, ως εκ τούτου, η ακριβής εφαρμογή της περιορίζεται στη δεδομένη γωνία ανύψωσης, συχνότητα λειτουργίας, πόλωση, κλιματικές συνθήκες και στο συγκεκριμένο περιβάλλον μετρήσεων. Αυτό αποτέλεσε και το βασικό κίνητρο της έρευνας που παρουσιάζεται στην παρούσα ενότητα.





**Σχήμα 2.8:** Διάταξη SISO κινητού δορυφορικού διαύλου που επηρεάζεται από διαλείψεις λόγω βροχόπτωσης και λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης

Το σενάριο που μελετάται στην παρούσα ενότητα απεικονίζεται στο Σχήμα 2.8, όπου η μαύρη έντονη ευθεία γραμμή, η κόκκινη τεθλασμένη και η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύουν, αντίστοιχα, την απευθείας συνιστώσα LOS, την πραγματική συνιστώσα πολυδιαδρομικής διάδοσης και την προσέγγιση της συνιστώσας πολυδιαδρομικής διάδοσης. Συγκεκριμένα, λαμβάνεται υπόψη κινητός δορυφορικός διάυλος που λειτουργεί σε ζώνη συχνοτήτων άνω των 10GHz (π.χ., Ku, Ka) όπου υφίσταται οπτική επαφή μεταξύ δορυφόρου και κινητού δέκτη, η οποία είναι είτε καθαρή είτε σκιασμένη από εμπόδια. Παρόμοια πρακτικά σενάρια απαντώνται στις δορυφορικές επικοινωνίες μεταξύ δορυφόρου-τρένου (railway scenario) καθώς και δορυφόρου-οχήματος (vehicular scenario). Υπό αυτή την έννοια, η ανάλυση που παρουσιάζεται βρίσκει εφαρμογή τόσο σε μονο-κατάστατα όσο και σε πολύ-κατάστατα μοντέλα διάδοσης όπως αυτά που παρουσιάστηκαν στις ανωτέρω ενότητες. Υπό συνθήκες καθαρού ουρανού, η σκέδαση σήματος από τα γειτονικά εμπόδια εισάγει πολυδιαδρομική διάδοση που προκαλεί χρονικές διακυμάνσεις στο λαμβανόμενο σήμα. Υπό συνθήκες βροχής, τα δυναμικά χαρακτηριστικά του διαύλου επηρεάζονται από τα τροποσφαιρικά φαινόμενα διάδοσης και η πολυδιαδρομική διάδοση μπορεί να καταστεί σημαντική [Xu 2000],[Larson 2008],[Masters 2004],[Katzberg 2006]. Στην περίπτωση όπου οι διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης προκαλούνται από

αρκετά μεγάλο αριθμό ανεξάρτητων σκεδαστών, σύμφωνα με το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα<sup>4</sup> [Proakis 2001], το άθροισμα αυτών των τυχαία κατανομημένων συνιστωσών μπορεί να προσεγγιστεί από μια μιγαδική κανονική τ.μ., της οποίας η συμφασική (in-phase) και η ορθογωνική (quadrature) συνιστώσα (συμβολίζονται με  $X$  και  $Y$ , αντίστοιχα) είναι ανεξάρτητες κανονικές τυχαίες διαδικασίες με μηδενική μέση τιμή και κοινή διασπορά  $\sigma^2$ . Ως εκ τούτου, το συνολικό σήμα  $x$  μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα της απευθείας συνιστώσας LOS, που λαμβάνει πραγματικές τιμές και μιας μιγαδικής κανονικής συνιστώσας πολυδιαδρομικής διάδοσης, δηλαδή

$$x = x_{LOS} + x_{MP} = a + (X + jY) \quad (2.26)$$

όπου  $x_{LOS}=a$  και  $X, Y \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ . Συνεπώς, με βάση και την ανάλυση της Ενότητας 2.3.3.2, η ισχύς του σήματος  $x_{LOS}$  είναι  $a^2$  (coherent power) ενώ η ισχύς του σήματος  $x_{MP}$  είναι  $2\sigma^2$  (incoherent power). Με βάση τα ανωτέρω, η στατιστική συμπεριφορά της περιβάλλουσας  $|x|$  του συνολικού σήματος χαρακτηρίζεται από την κατανομή Rice, η σ.π.π. της οποίας έχει οριστεί στην (2.11) και επαναλαμβάνεται εδώ για λόγους πληρότητας

$$f(x) = \frac{|x|}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{|x|^2 + a^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{a|x|}{\sigma^2}\right) \quad (2.27)$$

Μια βασική θεώρηση αφορά το ότι η βροχόπτωση επηρεάζει τόσο τη LOS συνιστώσα  $x_{LOS}$  όσο και τη συνιστώσα πολυδιαδρομικής διάδοσης  $x_{MP}$ , αλλά κατά ξεχωριστό τρόπο. Έτσι, η απόσβεση λόγω βροχοπτώσεων σε κάθε συνιστώσα σήματος  $x_j$  ( $j=LOS, MP$ ) θεωρείται διαφορετική τ.μ., που λαμβάνει πραγματικές τιμές και συμβολίζεται (σε dB) από  $A_j$  ( $j=LOS, MP$ ), αντίστοιχα. Με βάση αυτή τη θεμελιώδη θεώρηση, οι δύο βασικές συνιστώσες του σήματος  $x_j$  ( $j=LOS, MP$ ) λαμβάνουν τη μορφή

$$x_{LOS} = a_{mob} \cdot 10^{-A_{LOS}/20} \quad (2.28)$$

$$x_{MP} = (X_{mob} + jY_{mob}) \cdot 10^{-A_{MP}/20} \quad (2.29)$$

όπου  $a_{mob}$  είναι η ονομαστική τιμή της συνιστώσας  $x_{LOS}$  και  $X_{mob}, Y_{mob}$  είναι οι ονομαστικές τιμές της συμφασικής και ορθογωνικής συνιστώσας του  $x_{MP}$ , αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι οι  $X_{mob}, Y_{mob}$  εξαρτώνται κυρίως από τα φαινόμενα διάδοσης τοπικού περιβάλλοντος στην περιοχή του δέκτη. Αναφορικά με τις (2.28) και (2.29), τονίζεται ότι η διακύμανση των διαλείψεων λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης (fast fading) είναι πολύ ταχύτερη χρονικά σε σχέση με τις διαλείψεις λόγω βροχοπτώσεων (slow fading). Συνεπώς, ο χρονικός μέσος

όρος για μεγάλο χρονικό διάστημα δίδει ως αποτέλεσμα ένα τοπικά σταθερό αποτέλεσμα για τις διαλείψεις λόγω βροχοπτώσεων. Επιπλέον, η στοχαστική διαδικασία πολυδιαδρομικής διάδοσης είναι εργοδική, οπότε ο χρονικός μέσος όρος της ταυτίζεται με το στατιστικό μέσο όρο αυτής. Με βάση τα ανωτέρω, αν ληφθεί υπόψη ο στατιστικός μέσος όρος  $E[\cdot]$  για τις συνιστώσες του σήματος  $x_j$  ( $j=LOS,MP$ ) όπως αυτές εκφράζονται στις (2.28) και (2.29), ο ορισμός του παράγοντα Rice  $K$  τροποποιείται και με βάση τη (2.12) γράφεται ως εξής

$$K = \frac{E\left[|x_{LOS}|^2\right]}{E\left[|x_{MP}|^2\right]} = \frac{a_{mob}^2 \cdot 10^{-A_{LOS}/10}}{2\sigma_{mob}^2 \cdot 10^{-A_{MP}/10}} = \left(\frac{a_{mob}^2}{2\sigma_{mob}^2}\right) \cdot 10^{-(A_{LOS}-A_{MP})/10} \quad (2.30)$$

Εκφράζοντας τη (2.30) σε κλίμακα dB

$$K = K_{mob} - K_{rain} \quad (2.31)$$

όπου

$$K_{mob} = 10 \cdot \log_{10} \left[ \frac{a_{mob}^2}{2\sigma_{mob}^2} \right] \quad (2.32)$$

$$K_{rain} = A_{LOS} - A_{MP} \quad (2.33)$$

Στις (2.32), (2.33),  $a_{mob}^2$  και  $2\sigma_{mob}^2$  είναι οι ονομαστικές τιμές της σύμφωνης (coherent power) και μη σύμφωνης ισχύος λήψης (incoherent power), αντίστοιχα, οι οποίες εξαρτώνται κυρίως από τα φαινόμενα διάδοσης τοπικού περιβάλλοντος στην περιοχή του δέκτη.

Επίσης, όπως εμπειρικά προτείνεται στη [Xu 2000] και περαιτέρω επιβεβαιώνεται στις [Larson 2008],[Masters 2004],[Katzberg 2006], μια πιθανή αιτία για τις επιπτώσεις των βροχοπτώσεων στη συμπεριφορά πολυδιαδρομικής διάδοσης του διαύλου είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το νερό που προέρχεται από βροχή παραμένει στην επιφάνεια σκέδασης των παρακείμενων εμποδίων (π.χ., κτιρίων και βλάστησης) προκαλώντας υγρές συνθήκες. Αυτό επηρεάζει την ανακλαστικότητα της επιφάνειας σκέδασης και, αντίστοιχα, το μέγεθος της πολυδιαδρομικής διάδοσης που εισάγεται στο δίαυλο. Μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν αρκετά διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα στη διεθνή βιβλιογραφία που μελετούν τη συμπεριφορά αυτού του φυσικού φαινομένου. Εκτός από τους κινητούς δορυφορικούς διαύλους που λειτουργούν σε ζώνες συχνοτήτων άνω των 10GHz υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχοπτώσεων, ο ίδιος φυσικός μηχανισμός επηρεάζει επίσης τους συμβατικούς

κινητούς δορυφορικούς διαύλους, που λειτουργούν σε χαμηλότερες ζώνες συχνοτήτων, όπως L και S [Larson 2008],[Masters 2004],[Katzberg 2006], οι οποίοι, όμως, δεν επηρεάζονται από τις διαλείψεις λόγω βροχοπτώσεων [Panagoroulos 2004a]. Στην πραγματικότητα αυτό δεν σχετίζεται άμεσα με τη βροχή αλλά έμμεσα με την υγρασία που προέρχεται από τη βροχή και παραμένει στην επιφάνεια σκέδασης επηρεάζοντας έτσι την ανακλαστικότητά της. Επομένως, ο κρίσιμος αυτός φυσικός μηχανισμός μπορεί να ομαδοποιηθεί μαζί με τα φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης που συμβαίνουν στο τοπικό περιβάλλον του δέκτη, τα οποία είναι επίσης εμφανή στις χαμηλές ζώνες συχνοτήτων κάτω των 10GHz, και μπορεί να διαχωριστεί από τις άμεσες επιδράσεις της βροχής κατά την πολυδιαδρομική διάδοση σε δορυφορικό δίαυλο που λειτουργεί σε ζώνες συχνοτήτων άνω των 10GHz.

Η (2.33) επιτρέπει την αναλυτική αποσύνθεση (decomposition) της συμπεριφοράς πολυδιαδρομικής διάδοσης ενός κινητού δορυφορικού διαύλου που λειτουργεί σε ζώνες συχνοτήτων άνω των 10GHz, στους δύο βασικούς μηχανισμούς συμβολής,  $K_{mob}$  και  $K_{rain}$ :

- $K_{mob}$  είναι η ονομαστική τιμή του παράγοντα Rice  $K$  που αντιπροσωπεύει τις δυναμικές μεταβολές του διαύλου εξαιτίας των φαινομένων διάδοσης τοπικού περιβάλλοντος στην περιοχή του δέκτη, όπως πολυδιαδρομική διάδοση και σκίαση. Τα φαινόμενα αυτά συμβαίνουν σε συχνότητες τόσο άνω όσο και κάτω από τα 10GHz. Ενσωματώνει τις έμμεσες επιδράσεις των βροχοπτώσεων στη συμπεριφορά πολυδιαδρομικής διάδοσης του διαύλου, δηλαδή τις επιδράσεις της υγρασίας που προέρχεται από τη βροχή και παραμένει στην επιφάνεια σκέδασης επηρεάζοντας έτσι την ανακλαστικότητά της. Υπό αυτή την έννοια, ο παράγοντας  $K_{mob}$  ουσιαστικά αντιπροσωπεύει το συμβατικό παράγοντα Rice  $K$  που έχει καθοριστεί μέχρι σήμερα σε διάφορες εργασίες [Perez-Fontan 2001],[Kubista 2000],[Scalise 2002],[Scalise 2008],[Arbesser-Rastburg 1997] και αφορά συχνότητες τόσο άνω όσο και κάτω από 10GHz. Η τιμή του εξαρτάται από παραμέτρους όπως η καθαρότητα της πρώτης ζώνης Fresnel, η κατανομή των σκεδαστών στην περιοχή του δέκτη, η συχνότητα λειτουργίας και το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας λήψης. Επιπλέον, η υπόθεση χαμηλής τιμής για το  $K_{mob}$  επιτρέπει τη γενίκευση της ανάλυσης ώστε να είναι σε θέση να ενσωματώσει όχι μόνο την κατάσταση καθαρής οπτικής επαφής σε ένα δίαυλο αλλά και τη μερικώς εμποδιζόμενη (σκιασμένη) κατάσταση του διαύλου [Scalise 2002],[Scalise 2008]. Δηλαδή, όσο περισσότερο σκιασμένη είναι ζεύξη LOS του διαύλου, τόσο χαμηλότερη είναι η τιμή του  $K_{mob}$ .

- $K_{rain}$  είναι ο προσθετικός όρος του παράγοντα Rice  $K$  που αναφέρεται απευθείας στις συνθήκες βροχόπτωσης στο δορυφορικό δίαυλο και δεν έχει ληφθεί υπόψη μέχρι σήμερα. Ενσωματώνει τις δυναμικές μεταβολές του διαύλου εξαιτίας των τροποσφαιρικών φαινομένων διάδοσης του σήματος μέσα από το χωρικά ανομοιογενές φυσικό μέσο της βροχής, τα οποία συναντώνται μόνο σε συχνότητες άνω των 10GHz. Η επίδραση ατμοσφαιρικών ανομοιογενειών όπως αυτές που προτάθηκαν στην [De Wolf 1993] ενσωματώνεται σε αυτό τον όρο. Έτσι, λόγω των ατμοσφαιρικών ανομοιογενειών και ειδικότερα λόγω της υψηλής χωρικής ανομοιογένειας του φυσικού μέσου της βροχής [Panagopoulos 2004a], [COST 255], [Castanet 2003], [Kanellopoulos 1993], [Kanellopoulos 1999], [Kanellopoulos 2000], [Panagopoulos 2002a], [Panagopoulos 2003a], [Panagopoulos 2003b],[Lin 1975],[ITU1815],[Morita 1978],[Cho 2004] τα φαινόμενα βροχόπτωσης έχουν απευθείας επιδράσεις στη συμπεριφορά πολυδιαδρομικής διάδοσης του δορυφορικού διαύλου που λειτουργεί σε ζώνες συχνοτήτων άνω των 10GHz, η οποία αποτιμάται μακροσκοπικά μέσω της παραμέτρου  $K_{rain}$ . Με βάση τη (2.33), ο όρος  $K_{rain}$  χαρακτηρίζεται από στοχαστική συμπεριφορά που μελετάται αναλυτικά στη συνέχεια.

Επιπλέον, λόγω του σχετικά μικρού εύρους δέσμης (beamwidth) της κεραίας του επίγειου δέκτη, όπως συμβαίνει στις ζώνες συχνοτήτων Ku, Ka, θεωρείται ότι και οι δύο συνιστώσες του σήματος  $x_j$  ( $j=LOS,MP$ ) χαρακτηρίζονται από το ίδιο μήκος τμήματος του κεκλιμένου ραδιοδρόμου προς το δορυφόρο (συμβολιζόμενο ως  $L$ ) καθώς και ότι διαδίδονται μέσα από το ίδιο φυσικό μέσο βροχόπτωσης. Δηλαδή, οι τ.μ.  $A_j$  ( $j=LOS,MP$ ) υποτίθεται ότι έχουν τις ίδιες στατιστικές παραμέτρους και είναι ιδιαίτερα χωρικά συσχετισμένες μεταξύ τους (βλ. Παράρτημα Ι). Επιπλέον, θεωρείται το χειρότερο σενάριο όπου και οι δύο συνιστώσες του σήματος  $x_j$  ( $j=LOS,MP$ ) λαμβάνονται εντός του κυρίου λοβού ακτινοβολίας της κεραίας του επίγειου δέκτη, οπότε η μέγιστη γωνία διαχωρισμού μεταξύ των συνιστωσών LOS και πολυδιαδρομικής διάδοσης είναι ίση με το εύρος δέσμης ημίσειας ισχύος (3dB beamwidth) της κεραίας του επίγειου δέκτη, που συμβολίζεται με  $\omega_{3dB}$  (βλ. Σχήμα 2.8).

Όσον αφορά το χαρακτηρισμό των τ.μ.  $A_j$  ( $j=LOS,MP$ ) και της χωρικής ανομοιογένειας του φυσικού μέσου βροχής, λαμβάνεται υπόψη το φυσικο-στατιστικό μοντέλο που περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα Ι. Σε αυτή τη περίπτωση, οι τ.μ.  $A_j$  ( $j=LOS,MP$ ) ακολουθούν τη διδιάστατη από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή με κοινές στατιστικές παραμέτρους  $A_m, S_a$ , της οποίας η σ.π.π.  $f_{A_{LOS}A_{MP}}(x, y)$  δίδεται στο

Παράρτημα III. Οι κανονικές τ.μ.  $\ln(A_j)$  ( $j=LOS,MP$ ) είναι χωρικά συσχετισμένες μεταξύ τους με συντελεστή συσχέτισης  $\rho_n$ .

Επιπλέον, θεωρούνται κυρίως γεωστατικοί (GEO) δορυφόροι επειδή υλοποιούν το βασικό σενάριο για πρακτικά δορυφορικά ευρυζωνικά συστήματα με βάση τα πρότυπα DVB-S2/RCS [DVB-S2],[DVB-RCS],[Morlet 2007]. Αυτή η θεώρηση επιτρέπει την παραδοχή ότι η διακύμανση της δορυφορικής γωνίας ανύψωσης  $\theta$  που οφείλεται στην κίνηση του επίγειου δέκτη είναι πολύ μικρή και ως εκ τούτου το μοντέλο διαλείψεων λόγω βροχής (που περιγράφεται στο Παράρτημα I και είχε αρχικά προταθεί για σταθερές δορυφορικές ζεύξεις) εξακολουθεί να ισχύει και στην περίπτωση του υπό μελέτη κινητού δορυφορικού διαύλου. Επιπλέον, ο διάυλος θεωρείται ότι χαρακτηρίζεται από επίπεδες διαλείψεις ως προς τη συχνότητα (frequency flat fading - narrowband assumption) λόγω του χωρικού φιλτραρίσματος που εκτελείται από την κατευθυντική κεραία του επίγειου δέκτη.

Με βάση τις (2.31) και (2.33), η συνάρτηση δεσμευμένης αθροιστικής κατανομής (Conditional CDF) του παράγοντα Rice  $K$  εκφράζεται ως εξής

$$\begin{aligned}
 F_K(k | K_{mob}) &= P[K \leq k | K_{mob}] \\
 &= P[K_{rain} \geq K_{mob} - k | K_{mob}] \\
 &= P[A_{LOS} - A_{MP} \geq K_{mob} - k | K_{mob}] \\
 &= P[A_{LOS} - A_{MP} \geq K_{mob} - k, A_{LOS} \geq K_{mob} - k | K_{mob}] \\
 &= P[A_{LOS} \geq K_{mob} - k, A_{MP} \leq A_{LOS} - K_{mob} + k | K_{mob}]
 \end{aligned} \tag{2.34}$$

Όπως προαναφέρθηκε, μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν αρκετά διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα στη διεθνή βιβλιογραφία που μελετούν την επίδραση της υγρασίας προερχόμενης από βροχή στην επιφάνεια σκέδασης, που επηρεάζει την ανακλαστικότητα της επιφάνειας σκέδασης καθώς και το μέγεθος της πολυδιαδρομικής διάδοσης που εισάγεται στο διάυλο. Άρα, η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής του  $K_{mob}$ ,  $F_{K_{mob}}(k_{mob})$ , δεν είναι γνωστή μέχρι σήμερα. Αν η  $F_{K_{mob}}(k_{mob})$  ήταν γνωστή, η συνολική (αδέσμευτη) συνάρτηση αθροιστικής κατανομής (Total/Unconditional CDF) του παράγοντα Rice  $K$  θα εκφραζόταν ως εξής

$$F_K(k) = F_K(k | K_{mob}) \cdot F_{K_{mob}}(k_{mob}) \tag{2.35}$$

Ωστόσο, στη Διατριβή και δεδομένης της μη διαθεσιμότητας ακριβών πειραματικών δεδομένων για τον προσδιορισμό της  $F_{K_{mob}}(k_{mob})$ , έμφαση δίδεται στην ανάλυση της συσχέτισης μεταξύ των φαινομένων της βροχόπτωσης (άμεσες επιδράσεις) και της

πολυδιαδρομικής διάδοσης (έμμεσες επιδράσεις). Έτσι, η συμπεριφορά του  $K_{mob}$  θεωρείται ντετερμινιστική και η δεσμευμένη αθροιστική κατανομή του παράγοντα Rice  $K$  υπολογίζεται αναλυτικά για δεδομένη ονομαστική τιμή του  $K_{mob}$ .

Λαμβάνοντας υπόψη τις θεωρήσεις φυσικο-στατιστικού χαρακτηρισμού των τ.μ. απόσβεσης λόγω βροχής  $A_j$  ( $j=LOS,MP$ ) που αναφέρθηκαν ανωτέρω, το μετασχηματισμό της (2.8) για τις τ.μ.  $u_j$  ( $j=LOS,MP$ ) που ακολουθούν την τυπική κανονική κατανομή, και ακολουθώντας τις διαδικασίες μετασχηματισμού ολοκληρωμάτων που αναπτύσσονται στο Παράρτημα III, η συνάρτηση δεσμευμένης αθροιστικής κατανομής του παράγοντα Rice  $K$  στη (2.34) εκφράζεται περαιτέρω ως εξής

$$F_K(k | K_{mob}) = \int_{K_{mob}-k}^{\infty} \int_0^{A_{LOS}-K_{mob}-k} f_{A_{LOS}A_{MP}}(x, y) dx dy$$

$$= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{\lambda(k)}{\sqrt{2}} \right] - \frac{1}{2} \int_{\lambda(k)}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left( -\frac{y^2}{2} \right) \operatorname{erfc} \left[ \frac{\mu(k, y) - \rho y}{\sqrt{2(1-\rho^2)}} \right] dy \quad (2.36)$$

όπου

$$\lambda(k) = \left[ \ln(K_{mob} \cdot \cos \theta - k \cdot \cos \theta) - \ln(A_m) \right] / S_a \quad (2.37)$$

$$\mu(k, y) = \left[ \ln(A_m \cdot \exp(S_a \cdot y) - K_{mob} \cdot \cos \theta + k \cdot \cos \theta) - \ln(A_m) \right] / S_a \quad (2.38)$$

$$\rho = \frac{\ln \left[ 1 + \frac{H_{2s}}{H_1} \left( \exp(S_a^2) - 1 \right) \right]}{S_a^2} \quad (2.39)$$

$$H_{2s} = \int_0^{L \cos \theta} \int_0^{L \cos \theta} \frac{G}{\sqrt{G^2 + d^2(z_1, z_2)}} dz_1 dz_2 \quad (2.40)$$

$$H_1 = 2L \cos \theta G \sinh^{-1} \left( \frac{L \cos \theta}{G} \right) + 2G^2 \left[ 1 - \sqrt{\left( \frac{L \cos \theta}{G} \right)^2 + 1} \right] \quad (2.41)$$

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις φυσικές παραμέτρους  $G$ ,  $L$ ,  $H_1$ ,  $H_{2s}$ ,  $A_m$ ,  $S_a$ ,  $\rho_n$ , και  $d(z_1, z_2) = \sqrt{z_1^2 + z_2^2 - 2z_1 z_2 \cos \omega_{3dB}}$ , που αφορούν στο σύνολό τους το φυσικο-στατιστικό μοντέλο περιγραφής των διαλείψεων λόγω βροχόπτωσης και του φυσικού μέσου βροχής, ο αναγνώστης παραπέμπεται στο Παράρτημα I.

Στη συνέχεια, παρατίθενται διάφορα αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούν υλοποιήσεις της συνάρτησης δεσμευμένης αθροιστικής κατανομής του παράγοντα Rice  $K$  που προτείνεται στη (2.36). Συγκεκριμένα, λαμβάνεται υπόψη SISO κινητός δορυφορικός διάυλος που λειτουργεί σε συχνότητα άνω των 10GHz υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχόπτωσης και λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης. Όλες οι σχετικές παράμετροι που υπεισέρχονται στην ανάλυση δίδονται στον Πίνακα 2.4.

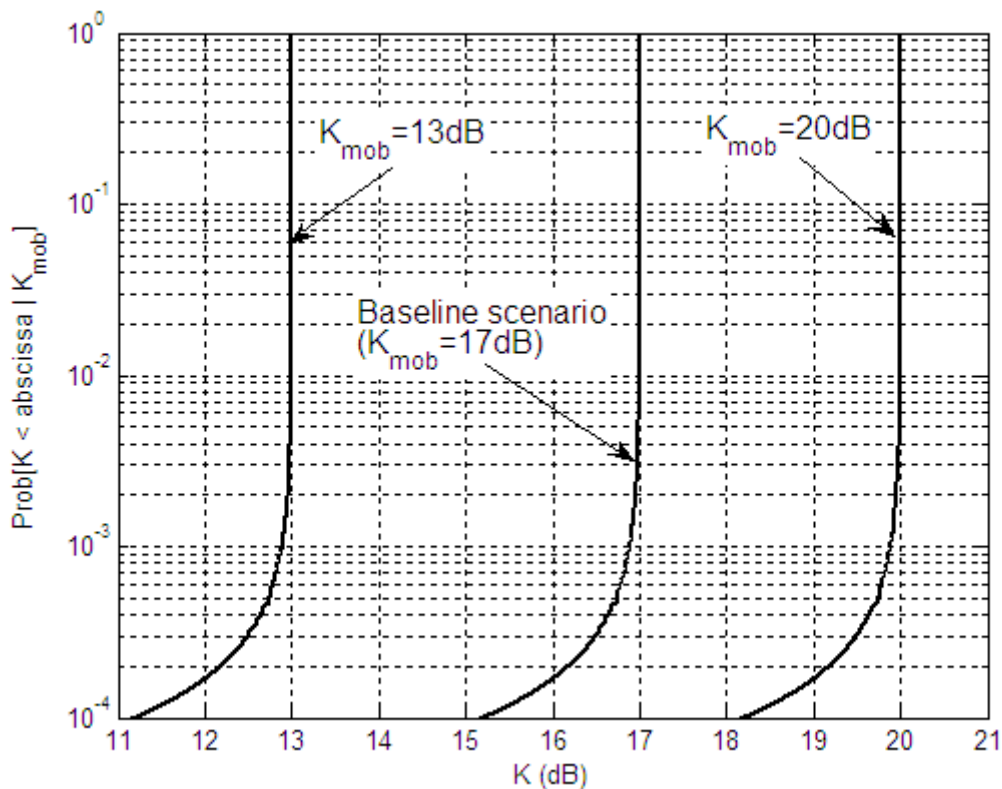
**Πίνακας 2.4: Παράμετροι του υπό θεώρηση σεναρίου κινητού δορυφορικού διαύλου που λαμβάνονται υπόψη στα αριθμητικά αποτελέσματα της Ενότητας 2.3.4**

Παράμετρος	Τιμή
Κλιματική Περιοχή	Εύκρατο Κλίμα
Κλιματικές Συνθήκες Βροχόπτωσης	Ήπιες
Γεωγραφική Περιοχή Επίγειου Δέκτη	Παρίσι
Κατανομή τ.μ. Διαλείψεων λόγω Βροχής	Λογαριθμοκανονική
Ύψος Βροχής, $h_R$	2.5 km
Δορυφορική Τροχιά	GEO
Δορυφορική Γωνία Ανύψωσης, $\theta$	40°
Ζώνη Συχνοτήτων Λειτουργίας	Ka (20 GHz)
Εύρος Δέσμης Ημίσειας Ισχύος Κεραίας Δέκτη, $\omega_{3dB}$	2.4°
Πόλωση	Κατακόρυφη
Ονομαστική Τιμή Παράγοντα Rice $K_{mob}$	17dB
Στατιστικές Παράμετροι Βροχόπτωσης	$A_m = 1.9764e-5,$ $S_a = 4.0781$
Χωρικός Συντελεστής Συσχέτισης του Φυσικού Μέσου Βροχόπτωσης	$\rho_n = 0.9988$

Σημειώνεται ότι ο όρος  $K_{mob}$  χρησιμοποιείται εδώ κυρίως ως ονομαστικό ποιοτικό μέγεθος (figure of merit) όσον αφορά τη καθαρότητα της πρώτης ζώνης Fresnel και τη κατανομή των σκεδαστών στην περιοχή του δέκτη, δηλαδή όσο υψηλότερος θεωρείται ο  $K_{mob}$  τόσο περισσότερο σκιασμένη είναι η ζεύξη LOS και τόσο περισσότερο έντονο είναι το φαινόμενο πολυδιαδρομικής διάδοσης στο διάυλο. Επιπλέον, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.4, λόγω της υψηλής κατευθυντικότητας της κεραίας του επίγειου δέκτη στις θεωρούμενες ζώνες συχνοτήτων Ku/Ka ( $\omega_{3dB}=2.4^\circ$ ) καθώς και λόγω της διάδοσης των ραδιοκυμάτων μέσα από το ίδιο μέσο βροχής, τα σήματα  $x_j$  ( $j=LOS,MP$ ) είναι ιδιαίτερα χωρικά συσχετισμένα, γεγονός που εξαντικρύζεται στην πολύ υψηλή τιμή του συντελεστή χωρικής



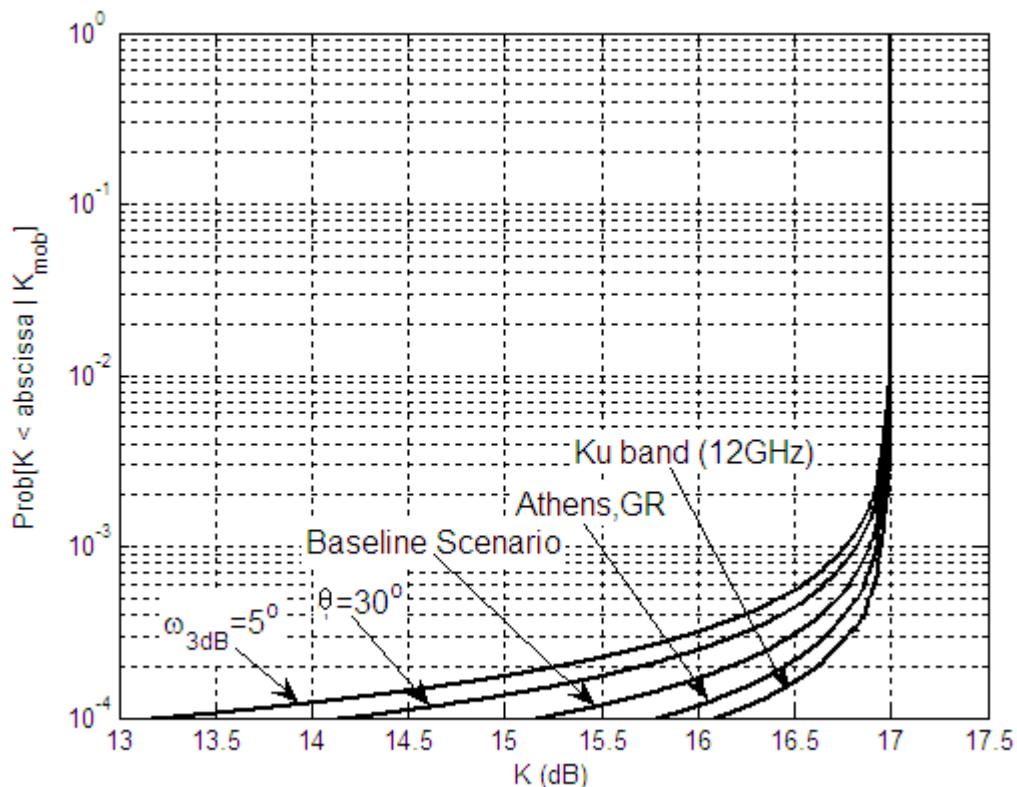
συσχέτισης  $\rho_n$ . Συγκεκριμένα, η θεωρούμενη κεραία δέκτη αναφέρεται σε τυπική κεραία διαμέτρου 50cm τύπου Cassergrain, η οποία τοποθετείται σε κινητά οχήματα τύπου van [Kubista 2000],[Arbesser-Rastburg 1997]. Σε αυτό το σημείο, παρά την υπόθεση της πολύ στενής δέσμης της κεραίας δέκτη, σημειώνεται ότι η ανάλυση (λόγω της υπόθεσης του Κεντρικού Οριακού Θεωρήματος<sup>4</sup>) είναι ορθή καθότι μπορεί επίσης να εφαρμοστεί για κεραίες ευρύτερης δέσμης, δηλαδή κεραίες μικρότερου μεγέθους, οι οποίες θα επέτρεπαν μεγαλύτερο ποσοστό πολυδιαδρομικότητας στο διάυλο (άρα, μικρότερο  $K_{mob}$ ). Τέτοιες κεραίες παρουσιάζουν εμπορικό ενδιαφέρον λόγω της ευκολότερης τοποθέτησής τους και της ικανότητάς τους να αντιμετωπίσουν προβλήματα σκόπευσης που εμφανίζονται στους κινητούς δορυφορικούς διαύλους.



**Σχήμα 2.9:** Συνάρτηση δεσμευμένης αθροιστικής κατανομής του παράγοντα Rice  $K$  για διαφορετικά ποσοστά πολυδιαδρομικής διάδοσης στο διάυλο. Επίδραση της παραμέτρου  $K_{mob}$

Στο Σχήμα 2.9, απεικονίζεται το προτεινόμενο αναλυτικό μοντέλο της συνάρτησης δεσμευμένης αθροιστικής κατανομής του παράγοντα Rice  $K$  για διαφορετικά ποσοστά πολυδιαδρομικής διάδοσης που υφίστανται στο διάυλο. Για το σκοπό αυτό, λαμβάνεται υπόψη το βασικό σενάριο του οποίου οι παράμετροι δίδονται στον Πίνακα 2.4 μαζί με δύο ακόμη υποθετικά σενάρια που αφορούν διαφορετικές ονομαστικές τιμές του  $K_{mob}$ , δηλαδή,

$K_{mob}=13\text{dB}$  και  $20\text{dB}$ , αντιστοίχως (όλες οι υπόλοιπες παράμετροι του Πίνακα 2.4 θεωρούνται σταθερές). Από το Σχήμα 2.9 είναι φανερό ότι όσο υψηλότερη η τιμή του  $K_{mob}$  τόσο μεγαλύτερη γίνεται η τιμή του παράγοντα Rice  $K$ . Επίσης, για δεδομένη τιμή του  $K_{mob}$ , παρατηρείται μια υποβάθμιση του παράγοντα Rice  $K$  λόγω της βροχής που υποδεικνύει ότι η πολυδιαδρομική διάδοση εντείνεται σε ένα κινητό δορυφορικό δίαυλο υψηλών συχνοτήτων λόγω της βροχοπτώσης. Αυτή η υποβάθμιση οφείλεται στις μεταβολές του προσθετικού όρου  $K_{rain}$  που αντιπροσωπεύει την άμεση επίδραση των βροχοπτώσεων, και είναι ιδιαίτερα σημαντική σε χαμηλά ποσοστά του χρόνου, όπου οι βροχοπτώσεις έχουν μεγάλη επίπτωση στην υψηλή διαθεσιμότητα των υψίσυχων ευρυζωνικών δορυφορικών συστημάτων. Σημειώνεται επίσης ότι, αν η  $F_{K_{mob}}(k_{mob})$  ήταν γνωστή μέσω διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων και απεικονιζόταν η καμπύλη για την  $F_K(k)$  μέσω της (2.35), η αντίστοιχη υποβάθμιση της τιμής του παράγοντα Rice  $K$  αναμένεται να ήταν μεγαλύτερη λόγω των πρόσθετων επιπτώσεων της υγρασίας στην ανακλαστικότητα της επιφάνειας σκέδασης. Ωστόσο, οι επιπτώσεις αυτές δεν έχουν ληφθεί υπόψη στη Διατριβή.

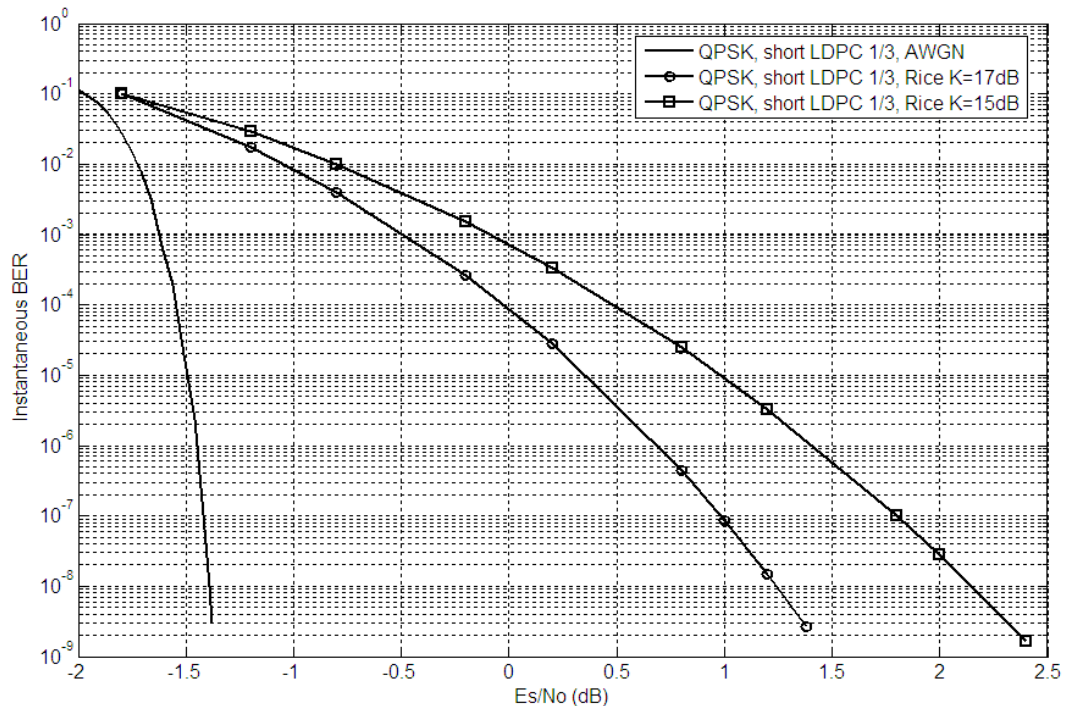


**Σχήμα 2.10:** Συνάρτηση δεσμευμένης αθροιστικής κατανομής του παράγοντα Rice  $K$ . Επίδραση της συχνότητας λειτουργίας, του εύρους δέσμης ημίσειας ισχύος της κεραίας δέκτη, της δορυφορικής γωνίας ανύψωσης και των κλιματικών συνθηκών βροχοπτώσης που επικρατούν στη δεδομένη περιοχή εξυπηρέτησης

Στο Σχήμα 2.10, αποδίδεται το προτεινόμενο αναλυτικό μοντέλο της συνάρτησης δεσμευμένης αθροιστικής κατανομής του παράγοντα Rice  $K$  όπου εξετάζεται η επίδραση της συχνότητας λειτουργίας, του εύρους δέσμης ημίσειας ισχύος της κεραίας δέκτη, της δορυφορικής γωνίας ανύψωσης και των κλιματικών συνθηκών βροχόπτωσης που επικρατούν στη δεδομένη περιοχή εξυπηρέτησης στην κατανομή του παράγοντα Rice  $K$ . Για το σκοπό αυτό, λαμβάνεται υπόψη το βασικό σενάριο του οποίου οι παράμετροι δίδονται στον Πίνακα 2.4 μαζί με τέσσερα ακόμη υποθετικά σενάρια που αφορούν διαφορετικές τιμές των αντιστοίχων παραμέτρων (βλ. Σχήμα 2.10). Συγκεκριμένα, οι αποκλίσεις των αντιστοίχων τιμών των παραμέτρων των τεσσάρων υποθετικών σεναρίων σε σχέση με το βασικό σενάριο είναι:  $f=12\text{GHz}$ ,  $\omega_{3dB}=5^\circ$ ,  $\theta=30^\circ$ , και Γεωγραφική Περιοχή Δέκτη: Αθήνα (όλες οι υπόλοιπες παράμετροι του Πίνακα 2.4 θεωρούνται σταθερές). Από το Σχήμα 2.10 είναι φανερό ότι, είτε όταν τουλάχιστον ένα από τα μεγέθη  $f$ ,  $\omega_{3dB}$ ,  $\theta$  αυξάνεται, είτε όταν οι κλιματικές συνθήκες βροχόπτωσης που επικρατούν στη δεδομένη περιοχή εξυπηρέτησης γίνονται εντονότερες, οι διαλείψεις λόγω βροχόπτωσης στο δίαυλο αυξάνονται και ο παράγοντας Rice  $K$  αντίστοιχα μειώνεται. Έτσι, η πολυδιαδρομική διάδοση στο δίαυλο γίνεται περισσότερο έντονη. Αυτά τα αναλυτικά αποτελέσματα βρίσκονται σε συμφωνία με τα εμπειρικά που παρατηρήθηκαν και αναφέρονται στη [Xu 2000]. Σημειώνεται και πάλι ότι, αν η  $F_{K_{mob}}(k_{mob})$  ήταν γνωστή μέσω διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων και απεικονιζόταν η καμπύλη για την  $F_K(k)$  μέσω της (2.35), η αντίστοιχη υποβάθμιση της τιμής του παράγοντα Rice  $K$  αναμένεται να ήταν μεγαλύτερη λόγω των πρόσθετων επιπτώσεων της υγρασίας στην ανακλαστικότητα της επιφάνειας σκέδασης, οι οποίες, ωστόσο, δεν έχουν ληφθεί υπόψη στη Διατριβή. Επιπλέον, είναι σημαντικό να υπογραμμιστεί ότι η συγκεκριμένη υποβάθμιση του παράγοντα Rice  $K$  λόγω βροχοπτώσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωγραφική θέση της περιοχής εξυπηρέτησης, η οποία επηρεάζει τις κλιματικές συνθήκες. Καίτοι μπορεί να έχει σημασία κυρίως για χαμηλά ποσοστά του χρόνου, η υποβάθμιση του παράγοντα Rice  $K$  λόγω βροχοπτώσεων αναφέρεται σε μια προσθετική τροποποίηση της ονομαστικής τιμής του  $K$ , η οποία δεν έχει ληφθεί υπόψη μέχρι σήμερα.

Στο Σχήμα 2.11, απεικονίζεται η επίδραση των βραχυπρόθεσμων διακυμάνσεων του παράγοντα Rice  $K$  λόγω των επιπτώσεων της βροχόπτωσης στο στιγμιαίο ποσοστό λανθασμένων ψηφίων BER (Bit Error Ratio) ενός κινητού δορυφορικού ευρυζωνικού συστήματος τύπου DVB-S2/RCS που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz. Ειδικότερα, προσομοιώνεται το σενάριο δορυφορικής ζεύξης σε τρένο (railway scenario)

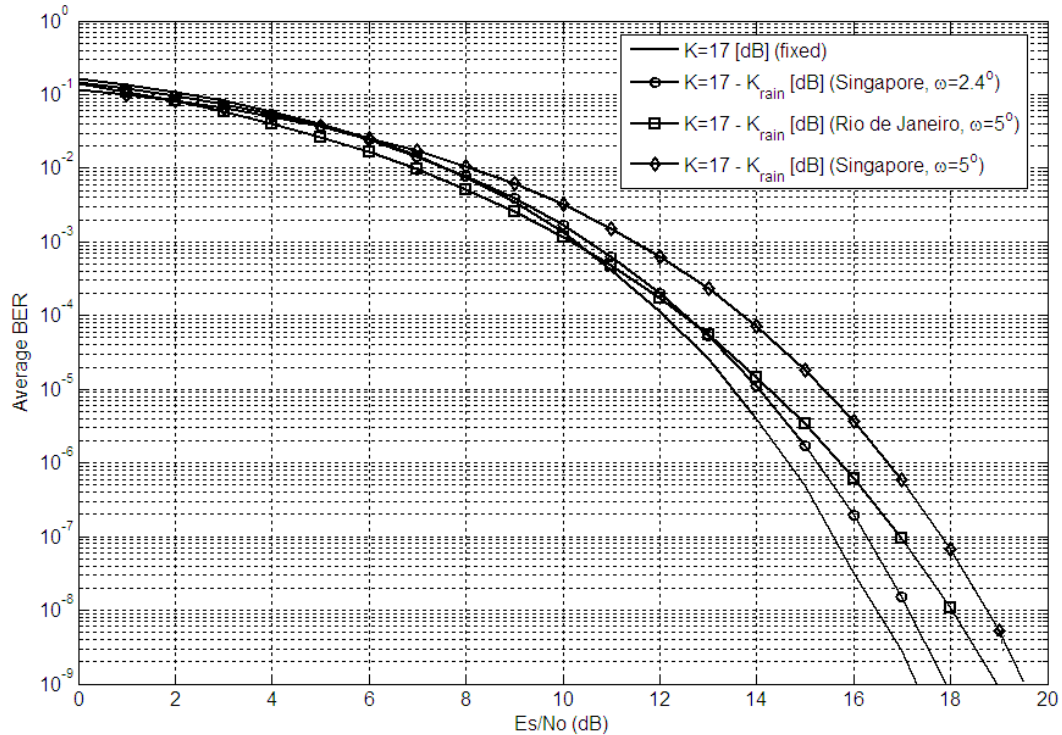
λαμβάνοντας υπόψη τις εξής παραμέτρους που αφορούν στο φυσικό στρώμα του συστήματος: διαμόρφωση QPSK με ρυθμό κωδικοποίησης LDPC 1/3 και κωδικοποιημένη λέξη (codeword) βραχέος πλαισίου  $n_{ldpc}=16200$  bits [DVB-S2]. Το τρένο θεωρείται ότι κινείται με ταχύτητα  $v=300$  km/hr σε ένα ανοικτό περιβάλλον LOS του Παρισιού, όπου η ονομαστική τιμή του παράγοντα Rice  $K$  είναι  $K_{mob}=17$ dB.



**Σχήμα 2.11: Στιγμιαίος BER συναρτήσει του SNR για υψίσυχο κινητό δορυφορικό σύστημα DVB-S2/RCS παροχής ευρυζωνικών υπηρεσιών σε τρένο που κινείται στην περιοχή του Παρισιού (QPSK, LDPC 1/3,  $n_{ldpc}=16200$  bits,  $v=300$  km/hr). Επίδραση των βραχυπρόθεσμων διακυμάνσεων του παράγοντα Rice  $K$  λόγω των επιπτώσεων της βροχόπτωσης**

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.11, υπό συνθήκες βροχής, αν ο συνδυασμός των τροποσφαιρικών φαινομένων διάδοσης και των φαινομένων διάδοσης τοπικού περιβάλλοντος στην περιοχή του δέκτη, που περιγράφεται μέσω της (2.36), επιφέρει ενδεικτικά υποβάθμιση του παράγοντα Rice  $K$  κατά 2dB επί συγκεκριμένη μικρή χρονική περίοδο (που αντιστοιχεί σε δεδομένο χαμηλό ποσοστό του χρόνου), τότε ο στιγμιαίος παράγοντας Rice  $K$  γίνεται  $K=15$ dB, προκύπτει πρόσθετη απώλεια SNR ίση με 0.8dB για  $BER=10^{-6}$  η οποία αυξάνεται για ακόμη χαμηλότερες τιμές BER, π.χ. , 1.0dB για  $BER=10^{-8}$ . Αυτό αναφέρεται στη στιγμιαία μείωση του SNR, η οποία μπορεί να λάβει μεγαλύτερες τιμές για ορισμένα χρονικά διαστήματα ανάλογα με τις συνθήκες βροχόπτωσης που επικρατούν στην περιοχή εξυπηρέτησης καθώς, επίσης, λαμβάνοντας υπόψη και την

επίδραση της υγρασίας στην ανακλαστικότητα της επιφάνειας σκέδασης. Ανάλογα με τις προδιαγραφές του κινητού δορυφορικού συστήματος, η μείωση του SNR λόγω της επίδρασης της βροχόπτωσης στον παράγοντα Rice  $K$  μπορεί να καταστεί κρίσιμη ώστε να οδηγήσει το σύστημα σε προσωρινές διακοπές λειτουργίας και απώλεια συγχρονισμού. Για το λόγο αυτό, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη φάση σχεδίασης του συστήματος.



**Σχήμα 2.12: Μέσος BER συναρτήσει του SNR για υψίσυγχο κινητό δορυφορικό διάυλο με διαμόρφωση QPSK. Επίδραση των μακροπρόθεσμων διακυμάνσεων του παράγοντα Rice  $K$  λόγω των επιπτώσεων της βροχόπτωσης για διαφορετικές κλιματικές συνθήκες βροχόπτωσης**

Τέλος, στο Σχήμα 2.12, απεικονίζεται η επίδραση των μακροπρόθεσμων διακυμάνσεων του παράγοντα Rice  $K$  λόγω των επιπτώσεων της βροχόπτωσης στο μέσο ποσοστό λανθασμένων ψηφίων BER για κινητό δορυφορικό διάυλο που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz και εφαρμόζει σχήμα διαμόρφωσης QPSK. Συγκεκριμένα, ο σταθμισμένος μέσος όρος της επίδοσης BER του διαύλου προσομοιώνεται για  $10^5$  στιγμιαίες υλοποιήσεις του διαύλου, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τη δεσμευμένη αθροιστική κατανομή του παράγοντα Rice  $K$  που προτείνεται στην (2.36). Επίσης, υποτίθεται χρονικά ασυσχέτιστος διάυλος Rice με διαλείψεις όπου η ονομαστική τιμή του παράγοντα Rice  $K$  είναι  $K_{mob}=17\text{dB}$ . Δύο βασικές περιπτώσεις εξετάζονται στο συγκεκριμένο σχήμα:

- Περίπτωση σταθερού παράγοντα Rice  $K$ , ανεξάρτητα από τις επιπτώσεις των βροχοπτώσεων του οποίου η τιμή έχει ρυθμιστεί σταθερή και ίση με  $K=K_{mob}=17\text{dB}$  (παραδοσιακός τρόπος θεώρησης μέχρι σήμερα)
- Περίπτωση διαφορετικού παράγοντα Rice  $K$  λόγω των επιπτώσεων των βροχοπτώσεων (προτεινόμενος τρόπος θεώρησης). Σε αυτή την περίπτωση, όπως αναφέρεται στο Σχήμα 2.12, θεωρούνται τρεις διαφορετικές υπο-περιπτώσεις που αντιστοιχούν σε διαφορετικές επιπτώσεις των βροχοπτώσεων στην περιοχή εξυπηρέτησης οι οποίες επηρεάζουν τις μακροπρόθεσμες διακυμάνσεις του παράγοντα Rice  $K$  μέσω του όρου  $K_{rain}$ .

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12, ο μέσος BER όλων των υπό εξέταση περιπτώσεων είναι παρόμοιος για υψηλές τιμές BER (δηλαδή, υψηλές τιμές πιθανότητας της (2.36)). Καθώς η πιθανότητα μειώνεται, προκύπτει υποβάθμιση του SNR λόγω των σχετικών επιδράσεων των βροχοπτώσεων στις διακυμάνσεις του παράγοντα Rice  $K$ , η οποία είναι κρίσιμη σε χαμηλά ποσοστά του χρόνου, όπως επίσης φαίνεται στα προηγούμενα σχήματα. Αυτή η υποβάθμιση του SNR λόγω των επιπτώσεων των βροχοπτώσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωγραφική θέση της περιοχής εξυπηρέτησης, η οποία επηρεάζει τις συνθήκες βροχόπτωσης. Ως παράδειγμα, για  $\text{BER}=10^{-7}$ , ο SNR υποβαθμίζεται κατά 1.4dB στην περίπτωση του Ρίο ντε Τζανέιρο και  $\omega_{3dB}=5^\circ$  ενώ υποβαθμίζεται κατά 2.2dB στην περίπτωση της Σιγκαπούρης και  $\omega_{3dB}=5^\circ$  (και οι δύο περιπτώσεις αναφέρονται στον παραδοσιακό τρόπο θεώρησης μέχρι σήμερα). Επίσης, όπως ήδη σχολιάστηκε ανωτέρω, όταν είτε το  $\omega_{3dB}$  αυξάνεται ή οι κλιματικές συνθήκες είναι περισσότερο έντονες, οι διαλείψεις λόγω βροχόπτωσης στο δίαυλο αυξάνονται και ο παράγοντας Rice  $K$  αντίστοιχα μειώνεται. Συνεπώς, η πολυδιαδρομική διάδοση στο δίαυλο γίνεται εντονότερη, με απώτερο αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση του SNR καθώς επίσης και την υποβάθμιση της QoS.

# Κεφάλαιο 3. Μοντέλα και Χωρητικότητα MIMO Επίγειων Ασυρμάτων Διαύλων

Στο κεφάλαιο αυτό μελετώνται τα επίγεια συστήματα MIMO, όπου η τεχνολογία MIMO έχει διεισδύσει κατά πολύ τα τελευταία χρόνια. Αρχικά, αναφέρονται οι διάφορες διατάξεις των διαύλων MIMO και στη συνέχεια εισάγεται η έννοια της χωρητικότητας του διαύλου και παρατίθενται οι σχέσεις που δίδουν τη χωρητικότητα MIMO συστήματος τόσο σε ντετερμινιστικό διάυλο όσο και σε στοχαστικό διάυλο. Επίσης, αναφέρονται ειδικές περιπτώσεις MIMO επίγειων διαύλων και αναλύεται η χωρητικότητά τους σε κάθε περίπτωση. Τέλος, ως ειδική περίπτωση MIMO επίγειου διαύλου παρουσιάζεται η συνεισφορά της Διατριβής στη διεθνή βιβλιογραφία η οποία αφορά μοντέλο και χωρητικότητα MIMO επίγειου διαύλου με χωρικά συσχετισμένες διαλείψεις λόγω βροχής [Π6].

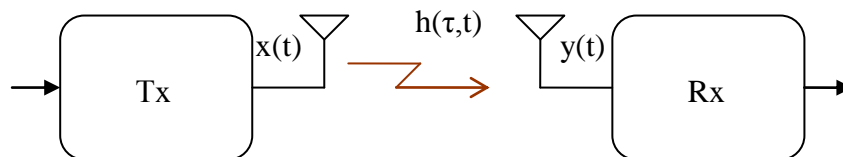
## 3.1. Διατάξεις Διαύλων MIMO

### 3.1.1. Δίαυλος SISO (Απλής Εισόδου - Απλής Εξόδου)

Οι δίαυλοι SISO αποτελούν την απλούστερη μορφή διαύλων και περιλαμβάνουν μια κεραία στον πομπό και μια κεραία στο δέκτη όπως στο Σχήμα 3.1. Η απόκριση του διαύλου τη χρονική στιγμή  $t$  σε κρουστικό παλμό που αποστέλλεται τη χρονική στιγμή  $t-\tau$  συμβολίζεται ως  $h(\tau, t)$ . Αν  $x(t)$  είναι το εκπεμπόμενο σήμα, το λαμβανόμενο σήμα δίδεται από

$$y(t) = h(\tau, t) \odot x(t) \quad (3.1)$$

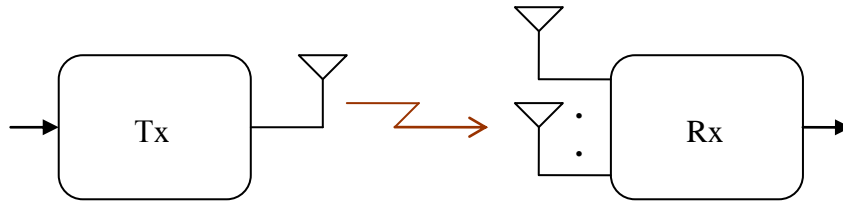
όπου  $\odot$  συμβολίζει τον τελεστή της συνέλιξης.



Σχήμα 3.1: Διάταξη διαύλου SISO

### 3.1.2. Δίαυλος SIMO (Απλής Εισόδου - Πολλαπλών Εξόδων)

Οι δίαυλοι SIMO αποτελούνται από μια κεραία στον πομπό και πολλαπλές,  $M_R$  το πλήθος, κεραίες στο δέκτη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.



**Σχήμα 3.2: Διάταξη διαύλου SIMO**

Ο πομπός αποστέλλει το σήμα μέσω της μοναδικής κεραίας του, ενώ ο δέκτης λαμβάνει το ίδιο σήμα κατά  $M_R$  εκδοχές. Στην περίπτωση αυτή, ο συνολικός διάυλος SIMO περιγράφεται από τον πίνακα στήλη, διαστάσεων  $M_R \times 1$

$$\mathbf{h}(\tau, t) = [h_1(\tau, t) \ h_2(\tau, t) \dots h_{M_R}(\tau, t)]^T \quad (3.2)$$

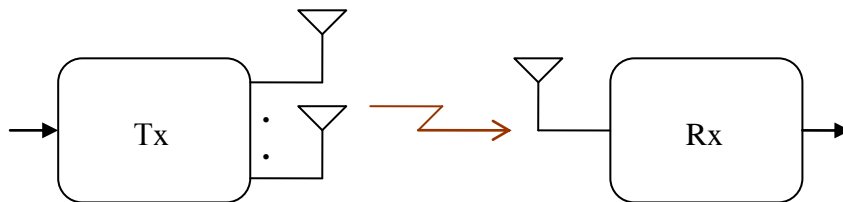
Αν  $x(t)$  το εκπεμπόμενο σήμα, ο δέκτης των  $M_R$  κεραιών λαμβάνει το  $M_R \times 1$  διάνυσμα της μορφής

$$\mathbf{y}(t) = [y_1(t) \ y_2(t) \dots y_{M_R}(t)]^T \quad (3.3)$$

όπου  $y_i(t)$  το σήμα που λαμβάνεται από την  $i$ -οστή κεραία του δέκτη.

### 3.1.3. Δίαυλος MISO (Πολλαπλών Εισόδων - Απλής Εξόδου)

Οι δίαυλοι MISO αποτελούνται από μια κεραία στο δέκτη και πολλαπλές,  $M_T$  το πλήθος, κεραίες στον πομπό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



**Σχήμα 3.3: Διάταξη διαύλου MISO**

Στην περίπτωση αυτή, το σήμα εκπέμπεται ταυτόχρονα και από τις  $M_T$  κεραίες του πομπού, ενώ ο δέκτης λαμβάνει μια υπέρθεση αυτών. Τότε, ο συνολικός διάυλος MISO περιγράφεται από τον εξής πίνακα διαστάσεων  $1 \times M_T$

$$\mathbf{h}(\tau, t) = [h_1(\tau, t) \ h_2(\tau, t) \dots h_{M_T}(\tau, t)] \quad (3.4)$$

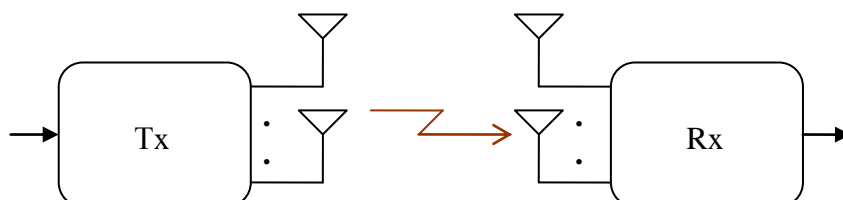
Αν  $x_j(t)$  είναι το σήμα που εκπέμπεται από τη  $j$ -οστή κεραία του πομπού, το λαμβανόμενο σήμα από το δέκτη είναι



$$y(t) = \sum_{j=1}^{M_T} h_j(\tau, t) \otimes x_j(t) \quad (3.5)$$

### 3.1.4. Δίαυλος MIMO (Πολλαπλών Εισόδων - Πολλαπλών Εξόδων)

Οι δίαυλοι MIMO αποτελούνται από πολλαπλές,  $M_T$  το πλήθος, κεραιές στον πομπό και πολλαπλές,  $M_R$  το πλήθος, κεραιές στο δέκτη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Διάταξη διαύλου MIMO

Ο πομπός εκπέμπει ταυτόχρονα  $M_T$  σήματα τα οποία λαμβάνονται από κάθε κεραιά του δέκτη. Άρα ο δέκτης λαμβάνει συνολικά  $M_T \times M_R$  σήματα προς περαιτέρω επεξεργασία. Ο δίαυλος στην περίπτωση αυτή χαρακτηρίζεται από τον πίνακα  $\mathbf{H}(\tau, t)$  διαστάσεων  $M_R \times M_T$

$$\mathbf{H}(\tau, t) = \begin{bmatrix} h_{1,1}(\tau, t) & h_{1,2}(\tau, t) & \cdots & h_{1,M_T}(\tau, t) \\ h_{2,1}(\tau, t) & h_{2,2}(\tau, t) & \cdots & h_{2,M_T}(\tau, t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_R,1}(\tau, t) & h_{M_R,2}(\tau, t) & \cdots & h_{M_R,M_T}(\tau, t) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Τα στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{H}(\tau, t)$  είναι μιγαδικοί αριθμοί που εκφράζουν την εξασθένηση και της ολίσθησης φάσης που εισάγει ο δίαυλος στο σήμα που φθάνει στο δέκτη με καθυστέρηση  $\tau$ . Το στοιχείο  $h_{i,j}$  του πίνακα αποτελεί τη συνάρτηση μεταφοράς από το  $j$ -οστό στοιχείο του πομπού στο  $i$ -οστό στοιχείο του δέκτη, ενώ ταυτόχρονα θεωρείται και ως ένας υποδίαυλος (subchannel) διάδοσης από τους  $M_T \times M_R$  υποδιαύλους που υπάρχουν συνολικά.

Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται η υπόθεση του στενού εύρους ζώνης (frequency flat fading - narrowband assumption) [Paulraj 1997],[Paulraj 2003],[Paulraj 2004], [Biglieri 2007a],[Tse 2005],[Gesbert 2003], που έγινε και στο Κεφάλαιο 2, υπό την οποία απαλείφεται η χρονική εξάρτηση του διαύλου από την καθυστέρηση  $\tau$ . Με βάση τη θεώρηση αυτή, ο πίνακας  $\mathbf{H}$  δεν περιέχει χρονική εξάρτηση και γράφεται υπό τη μορφή

$$\mathbf{H}(t) = \begin{bmatrix} h_{1,1}(t) & h_{1,2}(t) & \cdots & h_{1,M_T}(t) \\ h_{2,1}(t) & h_{2,2}(t) & \cdots & h_{2,M_T}(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{M_R,1}(t) & h_{M_R,2}(t) & \cdots & h_{M_R,M_T}(t) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

### 3.2. Όριο Χωρητικότητας κατά Shannon

Η έννοια της χωρητικότητας επινοήθηκε από το Shannon το 1948 για να χαρακτηρίσει τα όρια της αξιόπιστης επικοινωνίας [Shannon 1948]. Πριν από το Shannon, υπήρχε η πεποίθηση ότι ο μόνος τρόπος για να επιτευχθεί αξιόπιστη επικοινωνία σε ένα θορυβώδη δίαυλο ήταν να μειωθεί ο ρυθμός μετάδοσης. Αξιόπιστη θεωρείται η επικοινωνία όταν η πιθανότητα λάθους (error probability) μπορεί να γίνει όσο μικρή επιθυμεί ο σχεδιαστής του συστήματος. Ο Shannon έδειξε ότι με κατάλληλη κωδικοποίηση της πληροφορίας μπορεί να επιτευχθεί ρυθμός μετάδοσης με ταυτόχρονη μείωση της πιθανότητας λάθους σε όσο μικρά επίπεδα απαιτηθεί. Ωστόσο, υπάρχει ένας μέγιστος ρυθμός μετάδοσης, ο οποίος ονομάζεται *χωρητικότητα* (*capacity*) του διαύλου, πέρα από τον οποίο είναι αδύνατο να οδηγηθεί η πιθανότητα λάθους προς το μηδέν. Η σχέση, στην οποία τελικά κατέληξε, αναφέρεται σε δίαυλο που χαρακτηρίζεται από λευκό, αθροιστικό, κανονικής κατανομής θόρυβο AWGN (Additive White Gaussian Noise) και συσχετίζει τη χωρητικότητά του με την ισχύ λήψης  $P$  και το εύρος ζώνης του διαύλου  $W$

$$C = W \log \left( 1 + \frac{P}{N_0 W} \right) \quad (3.8)$$

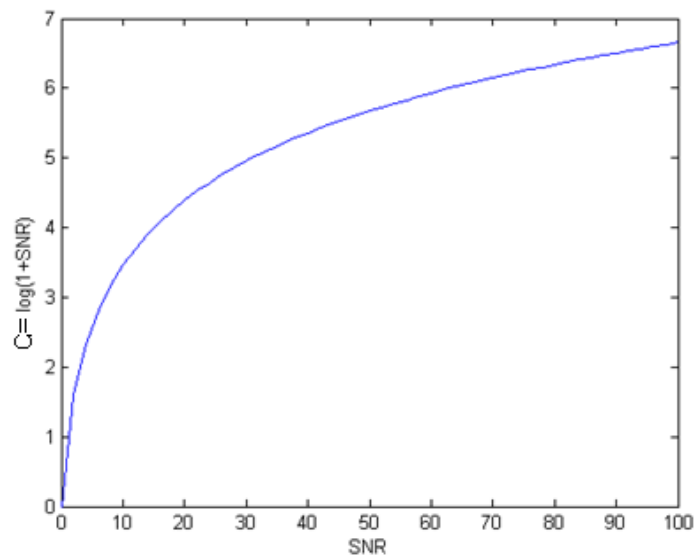
Στη (3.8), θεωρείται ότι ο δίαυλος είναι συνεχούς χρόνου AWGN με φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου  $N_0/2$ . Η χωρητικότητα μετράται σε bps, αλλά στη συνέχεια θα χρησιμοποιείται η ανηγμένη χωρητικότητα κανονικοποιημένη ως προς το εύρος ζώνης του διαύλου  $W$  που μετράται σε bps/Hz. Στην ανωτέρω σχέση, το κλάσμα που εμφανίζεται στο λογάριθμο είναι ο σηματοθορυβικός λόγος λήψης  $SNR=P/(N_0W)$ . Συνεπώς, η ανηγμένη χωρητικότητα γράφεται υπό τη μορφή

$$C = \log(1 + SNR) \quad (3.9)$$

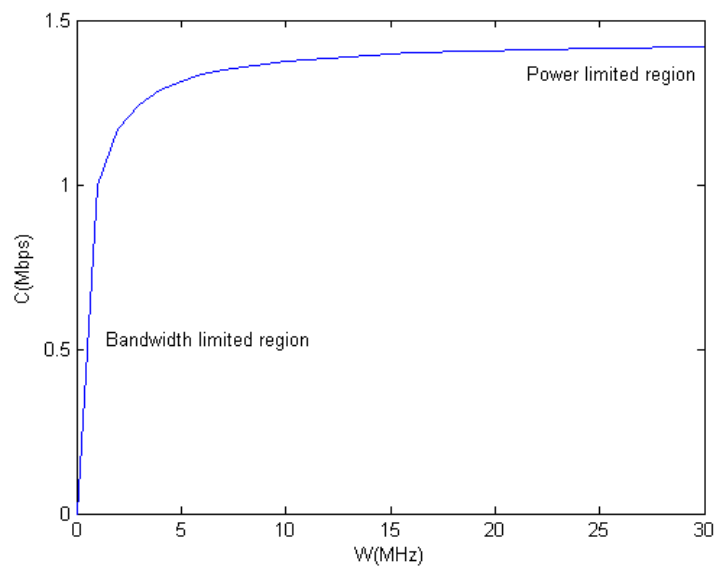
Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται η εξάρτηση της χωρητικότητας από την ισχύ λήψης, η οποία περιγράφεται μέσω της αντίστοιχης μεταβολής του SNR. Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι όταν το SNR είναι μικρό, η χωρητικότητα αυξάνεται γραμμικά με την ισχύ λήψης ενώ, όταν το SNR λαμβάνει μεγάλες τιμές, η χωρητικότητα αυξάνει λογαριθμικά με την ισχύ λήψης.

Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η εξάρτηση της χωρητικότητας από το εύρος ζώνης για  $P/N_0=10^{-6}$ . Υπό σταθερή ισχύ λήψης, το SNR μειώνεται με την αύξηση του εύρους ζώνης. Έτσι, όταν το εύρος ζώνης είναι μικρό, το SNR είναι μεγάλο και συνεπώς η χωρητικότητα δεν επηρεάζεται από μικρές μεταβολές του SNR. Αυξάνοντας το εύρος ζώνης προκαλείται ταχεία αύξηση της χωρητικότητας. Η περιοχή των μικρών τιμών του εύρους ζώνης

ονομάζεται περιοχή περιοριζόμενη από το εύρος ζώνης (bandwidth limited region). Όταν το εύρος ζώνης είναι μεγάλο και ο σηματοθορυβικός λόγος είναι μικρός, η χωρητικότητα δεν επηρεάζεται σημαντικά από τις μεταβολές του εύρους ζώνης. Σε αυτή την περιοχή του διαγράμματος η χωρητικότητα αυξάνεται γραμμικά με την ισχύ λήψης. Η περιοχή αυτή των μεγάλων τιμών εύρους ζώνης ονομάζεται περιοχή περιοριζόμενη από την ισχύ (power limited region). Επίσης, από το ίδιο σχήμα φαίνεται ότι η τιμή της χωρητικότητας τείνει προς μια πεπερασμένη τιμή ακόμα και για θεωρητικά άπειρο εύρος ζώνης [Tse 2005].



Σχήμα 3.5: Εξάρτηση χωρητικότητας SISO διαύλου AWGN από σηματοθορυβικό λόγο



Σχήμα 3.6: Εξάρτηση χωρητικότητας SISO διαύλου από εύρος ζώνης υπό σταθερή ισχύ λήψης

### 3.3. Έκφραση Χωρητικότητας βάσει των Ιδιοτιμών του Πίνακα $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$

Δεδομένης της υπόθεσης του στενού εύρους ζώνης, ο χρονικά αμετάβλητος διάυλος μπορεί να περιγραφεί από σχέση της μορφής

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{w} \quad (3.10)$$

όπου το  $\mathbf{x}$  ένα διάνυσμα  $M_T \times 1$ ,  $\mathbf{y}$  ένα διάνυσμα  $M_R \times 1$  και  $\mathbf{w}$  ένα διάνυσμα  $M_R \times 1$ . Τα διανύσματα αυτά συμβολίζουν το εκπεμπόμενο σήμα, το λαμβανόμενο σήμα και το θόρυβο, αντίστοιχα, σε μια χρονική στιγμή. Συγκεκριμένα, η φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου θεωρείται  $N_0/2$ . Ο πίνακας  $\mathbf{H}$  έχει διαστάσεις  $M_R \times M_T$  και χαρακτηρίζει το διάυλο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο διάυλος είναι ντετερμινιστικός και υποτίθεται σταθερός ως προς το χρόνο και γνωστός, τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη. Το κάθε στοιχείο  $h_{ij}$  του πίνακα αντιστοιχεί στο κέρδος του διαύλου από την κεραία εκπομπής  $j$  προς την κεραία λήψης  $i$ . Επίσης, υπάρχει περιορισμός στη συνολική ισχύ εκπομπής από όλες τις κεραίες, έστω  $P$ .

Η χωρητικότητα του διαύλου μπορεί να προσδιοριστεί, αν αυτός αποσυντεθεί σε μια ομάδα από παράλληλους και ανεξάρτητους μεταξύ τους βαθμωτούς Gaussian υποδιαύλους (subchannels). Από τη γραμμική άλγεβρα [Meyer 2000] είναι γνωστό ότι κάθε γραμμικός μετασχηματισμός μπορεί να περιγραφεί από τη σύνθεση τριών πράξεων: μιας περιστροφής (rotation), μιας μεγέθυνσης (scaling) και μιας ακόμη περιστροφής. Στη δεδομένη περίπτωση, με βάση τη μέθοδο SVD (Singular Value Decomposition) [Meyer 2000], ο πίνακας  $\mathbf{H}$  γράφεται

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^H \quad (3.11)$$

όπου οι πίνακες  $\mathbf{U}$  και  $\mathbf{V}$  είναι ορθομοναδιαίοι<sup>1</sup> με διαστάσεις  $M_R \times M_R$  και  $M_T \times M_T$ , αντίστοιχα, και ο  $\mathbf{V}^H$  είναι ο ανάστροφος συζυγής ή ερμιτιανός του  $\mathbf{V}$ . Ο πίνακας  $\mathbf{D}$  είναι διαγώνιος, με τα πρώτα στοιχεία της κυρίας διαγώνιου του να είναι μη αρνητικοί πραγματικοί αριθμοί και τα υπόλοιπα στοιχεία να είναι μηδενικά. Τα διαγώνια στοιχεία  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_k$  είναι οι ταξινομημένες μοναδικές τιμές (singular values) του πίνακα  $\mathbf{H}$ , όπου  $k = \min(M_R, M_T)$ . Οι τιμές  $\lambda_i$  αποτελούν τις ιδιοτιμές (eigenvalues) του πίνακα  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$

<sup>1</sup> Υπενθυμίζεται ότι η βασική ιδιότητα ενός ορθομοναδιαίου πίνακα  $\mathbf{U}$  είναι:  $\mathbf{U}\mathbf{U}^H = \mathbf{U}^H\mathbf{U} = \mathbf{I}$

(όταν  $M_R \leq M_T$ ), καθώς και του  $\mathbf{H}^H \mathbf{H}$  (όταν  $M_R > M_T$ ). Ο βαθμός του πίνακα  $\mathbf{H}$  είναι ίσος με το πλήθος των μη μηδενικών μοναδικών τιμών.

Μέσω των μετασχηματισμών

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{V}^H \mathbf{x} \quad (3.12)$$

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{U}^H \mathbf{y} \quad (3.13)$$

$$\tilde{\mathbf{w}} = \mathbf{U}^H \mathbf{w} \quad (3.14)$$

η (3.10) μπορεί να γραφεί υπό τη μορφή

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{D} \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{w}} \quad (3.15)$$

όπου το  $\tilde{\mathbf{w}}$  έχει τις ίδιες ιδιότητες με το  $\mathbf{w}$ . Έτσι, ο διάυλος μπορεί να περιγραφεί ισοδύναμα από ένα σύνολο παράλληλων Gaussian υποδιαύλων καθένας από τους οποίους για κάθε  $i=1,2,\dots,k$  περιγράφεται από τη βαθμωτή σχέση

$$\tilde{y}_i = \sqrt{\lambda_i} \tilde{x}_i + \tilde{w}_i \quad (3.16)$$

Από τη (3.16) προκύπτει ότι το αρχικό MIMO σύστημα με  $M_R$  δέκτες και  $M_T$  πομπούς, μετατράπηκε σε ένα ισοδύναμο σύστημα με  $k$  παραλλήλους και ανεξάρτητους μεταξύ τους Gaussian υποδιαύλους. Ο αριθμός  $k$  είναι ο βαθμός του πίνακα  $\mathbf{H}$  και είναι το πολύ ίσος με τον ελάχιστο από τους αριθμούς των κεραιών στο δέκτη και τον πομπό του αρχικού MIMO συστήματος ( $k = \text{rank}(\mathbf{H}) \leq \min(M_R, M_T)$ ).

Έτσι, αν  $P_i$  η ισχύς του  $i$ -οστού υποδιαύλου, η συνολική χωρητικότητα του συστήματος δίδεται από τη σχέση [Paulraj 1997],[Paulraj 2003],[Paulraj 2004], [Biglieri 2007a],[Tse 2005],[Gesbert 2003]

$$C = \sum_{i=1}^k \log_2 \left( 1 + \frac{P_i \lambda_i}{N_0} \right) \quad (3.17)$$

όπου  $N_0$  είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου, και οι τιμές των ισχύων  $P_i$  ικανοποιούν τη σχέση

$$\sum_i P_i = P \quad (3.18)$$

όπου  $P$  είναι η συνολική ισχύς εκπομπής από όλες τις κεραιές, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

### 3.4. Χωρητικότητα MIMO Ντετερμινιστικών Διαύλων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι σχέσεις που αποδίδουν ένα άνω όριο για τη χωρητικότητα σε κάθε μια από τις περιπτώσεις των επίγειων διαύλων SISO, SIMO, MISO και MIMO.

#### 3.4.1. Χωρητικότητα SISO Διαύλου

Σε ένα δίαυλο SISO ( $1 \times 1$ ), που αποτελεί και την απλούστερη περίπτωση, η χωρητικότητα δίδεται από τη σχέση [Foschini 1998],[Telatar 1999]

$$C = \log_2 \left( 1 + SNR |h|^2 \right) \quad (3.19)$$

όπου το  $h$  το κανονικοποιημένο ( $E[|h|^2] = 1$ ) μιγαδικό κέρδος ισχύος ενός σταθερού ασύρματου διαύλου ή μιας συγκεκριμένης εφαρμογής από ένα τυχαίο δίαυλο. Στην (3.19), SNR είναι ο σηματοθορυβικός λόγος στην είσοδο της κεραίας του δέκτη. Στην περίπτωση αυτή, αύξηση του SNR κατά 3dB αυξάνει κατά 1bps/Hz τη χωρητικότητα. Η γνώση της κατάστασης του διαύλου είτε στον πομπό είτε στο δέκτη δεν προσφέρει κάποιο επιπλέον κέρδος στη χωρητικότητα του διαύλου.

#### 3.4.2. Χωρητικότητα SIMO Διαύλου

Για ένα σύστημα SIMO με  $M_R$  κεραίες στο δέκτη και μια κεραία στον πομπό ( $M_R \times 1$ ), όπου ο δέκτης συνδυάζει με βέλτιστο τρόπο τα λαμβανόμενα σήματα (Maximum Ratio Combining, MRC), η χωρητικότητα δίδεται από τη σχέση [Foschini 1998],[Telatar 1999]

$$C = \log_2 \left( 1 + SNR \sum_{i=1}^{M_R} |h_i|^2 \right) \quad (3.20)$$

όπου το  $h_i$  είναι το κέρδος της κεραίας λήψης  $i$  και το SNR είναι ο σηματοθορυβικός λόγος στην είσοδο κάθε κεραίας του δέκτη. Από τη σχέση αυτή προκύπτει άμεσα ότι η αύξηση του πλήθους των κεραίων στο δέκτη οδηγεί σε λογαριθμική αύξηση της χωρητικότητας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, αλλά και στις ακόλουθες, θα θεωρείται ότι ο δέκτης έχει πλήρη γνώση της κατάστασης του διαύλου CSI (Channel State Information). Η υπόθεση αυτή δεν απέχει από την πραγματικότητα, αφού με διαδικασίες ανίχνευσης (training and tracking) ο δέκτης αποκτά τις επιθυμητές πληροφορίες.

Στην περίπτωση κατά την οποία ο δέκτης επιλέγει τον ισχυρότερο (Selection Combining, SC) από τους διαθέσιμους  $M_R$  το πλήθος υποδιαύλων, η χωρητικότητα δίδεται από τη σχέση [Sanayei 2004], [Foschini 1998],[Telatar 1999]

$$C = \max_{M_R} \log_2 \left( 1 + SNR |h_{M_R}|^2 \right) = \log_2 \left( 1 + SNR \max_{M_R} |h_{M_R}|^2 \right) \quad (3.21)$$

όπου  $\max_{M_R}$  συμβολίζει την εύρεση μεγίστου ως προς τους διαθέσιμους  $M_R$  το πλήθος υποδιαύλων.

Από τις ανωτέρω σχέσεις, δεδομένης της μοναδικής κεραίας του πομπού, γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι η γνώση της κατάστασης του διαύλου από τον πομπό δεν προσφέρει πρόσθετο κέρδος στη χωρητικότητα του διαύλου. Αυτό ισχύει διότι η συνολική ισχύς εκπομπής κατανέμεται αποκλειστικά στη μοναδική κεραία του πομπού.

### 3.4.3. Χωρητικότητα MISO Διαύλου

Ένας διάυλος MISO έχει  $M_T$  κεραίες στον πομπό και μια κεραία στο δέκτη ( $1 \times M_T$ ). Στους διαύλους αυτούς, όπως και στους MIMO, διακρίνονται οι εξής δύο υποπεριπτώσεις, οι οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια: ο πομπός έχει πλήρη γνώση της κατάστασης του διαύλου ή δεν έχει καθόλου γνώση. Όπως και προηγουμένως, θεωρείται ότι ο δέκτης γνωρίζει την κατάσταση του διαύλου.

#### 3.4.3.1. Δίαυλος Άγνωστος στον Πομπό

Η περίπτωση αυτή είναι η πλέον συνήθης, αφού τις περισσότερες φορές είναι δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να εκτιμηθεί ο διάυλος από την πλευρά του πομπού. Η χωρητικότητα του διαύλου εξαρτάται όχι μόνο από το πλήθος των ανεξάρτητων υποδιαύλων, αλλά και από τον τρόπο κατανομής της ισχύος εκπομπής στις κεραίες του πομπού. Όταν ο πομπός δεν γνωρίζει την κατάσταση του διαύλου, η ισχύς εκπομπής  $P$  ισοκατανέμεται στις κεραίες του, δηλαδή

$$P_k = \frac{P}{M_T} \quad (3.22)$$

για κάθε  $k = 1, 2, \dots, M_T$ .

Στην περίπτωση αυτή, η χωρητικότητα δίδεται από τη σχέση [Foschini 1998],[Telatar 1999]

$$C = \log_2 \left( 1 + \frac{SNR}{M_T} \sum_{i=1}^{M_T} |h_i|^2 \right) \quad (3.23)$$

όπου SNR είναι ο σηματοθορυβικός λόγος στην είσοδο της κεραίας του δέκτη. Από την (3.23) γίνεται φανερό ότι δεν υπάρχει κέρδος πίνακα στην περίπτωση αυτή, σε αντίθεση με το σύστημα SIMO, όπου υπήρχε κέρδος πίνακα στην πλευρά του δέκτη. Έτσι, η χωρητικότητα SIMO είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη MISO υπό τις ίδιες συνθήκες στο περιβάλλον διάδοσης. Η χωρητικότητα έχει λογαριθμική εξάρτηση από το πλήθος των κεραιών εκπομπής ( $M_T$ ).

#### 3.4.3.2. Δίαυλος Γνωστός στον Πομπό

Η γνώση της κατάστασης του διαύλου από τον πομπό αυξάνει το άνω όριο της χωρητικότητας. Αυτό συμβαίνει επειδή ο πομπός κατανέμει τη διαθέσιμη ισχύ στους υποδιαύλους με τα μεγαλύτερα κέρδη, εκμεταλλευόμενος έτσι το κέρδος πίνακα που του παρέχει η χρήση πολλών κεραιών. Η βέλτιστη κατανομή της ισχύος σε κάθε κεραία του πομπού γίνεται με χρήση της μεθόδου “waterfilling” [Cover 2006] (βλ. Ενότητα 3.4.4.2). Η χωρητικότητα σε αυτή την περίπτωση είναι ίση με την αντίστοιχη του συστήματος SIMO.

#### 3.4.4. Χωρητικότητα MIMO Διαύλου

Ένα σύστημα MIMO αποτελείται από  $M_R$  κεραίες στο δέκτη και  $M_T$  κεραίες στον πομπό ( $M_R \times M_T$ ), οι οποίες παρέχουν κέρδος πίνακα και διαφορικό κέρδος και στις δυο πλευρές του συστήματος. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, διακρίνονται δύο υποπεριπτώσεις ως προς την εκτίμηση της κατάστασης του διαύλου από τον πομπό, θεωρώντας δεδομένο ότι ο δέκτης διαθέτει πλήρη γνώση του διαύλου.

##### 3.4.4.1. Δίαυλος Άγνωστος στον Πομπό

Το άνω όριο για τη χωρητικότητα όταν ο πομπός δεν γνωρίζει το δίαυλο είναι [Foschini 1998],[Telatar 1999]

$$C = \log_2 \det \left[ \mathbf{I}_{M_R} + \left( \frac{SNR}{M_T} \right) \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right] \quad (3.24)$$

όπου  $\det$  συμβολίζει την ορίζουσα πίνακα,  $\mathbf{I}_{M_R}$  ο μοναδιαίος πίνακας διαστάσεων  $M_R \times M_R$ ,  $\mathbf{H}$  ο πίνακας του διαύλου διαστάσεων  $M_R \times M_T$ ,  $\mathbf{H}^H$  ο ανάστροφος συζυγής ή ερμιτιανός πίνακας του  $\mathbf{H}$ , και SNR ο σηματοθορυβικός λόγος στην είσοδο κάθε κεραίας του δέκτη. Η ανωτέρω σχέση ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι ο δίαυλος χαρακτηρίζεται από επίπεδες διαλείψεις ως προς τη συχνότητα.



Η ισχύς του πομπού ισοκατανέμεται σε όλες τις κεραιές. Έχει αποδειχθεί [Foschini 1996] ότι η χωρητικότητα της (3.24) αυξάνεται γραμμικά με το βαθμό  $k$  του πίνακα  $\mathbf{H}$ , όπου  $k = \text{rank}(\mathbf{H}) \leq \min(M_R, M_T)$ , σε σύγκριση με τις προηγούμενες περιπτώσεις όπου η αύξηση ήταν λογαριθμική. Το  $k$  υποδηλώνει, επίσης, το πλήθος των παράλληλων και ανεξαρτήτων μεταξύ τους υποδιαύλων. Το αποτέλεσμα αυτό προκύπτει από το ότι η ορίζουσα του πίνακα  $\mathbf{H}$  μπορεί να εκφραστεί ως γινόμενο  $k$  μη μηδενικών ιδιοτιμών. Λόγω της ιδιότητας των λογαρίθμων, η συνολική χωρητικότητα δίδεται από το άθροισμα των επιμέρους χωρητικοτήτων. Έτσι, καταδεικνύεται ότι η γραμμική αύξηση της χωρητικότητας εξαρτάται από τις ιδιότητες των ιδιοτιμών, οι οποίες εκτιμώνται με βάση τη μέθοδο αποσύνθεσης μοναδικής τιμής SVD. Χρησιμοποιώντας τις ιδιοτιμές του πίνακα  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$  ( $\lambda_i$ ) εξάγεται η σχέση της χωρητικότητας [Foschini 1998],[Telatar 1999]

$$C = \sum_{i=1}^k \log_2 \left[ 1 + \frac{SNR}{M_T} \lambda_i \right] \quad (3.25)$$

όπου  $k$  είναι ο βαθμός του πίνακα  $\mathbf{H}$ .

#### 3.4.4.2. Διάυλος Γνωστός στον Πομπό

Όταν ο πομπός γνωρίζει την κατάσταση του διαύλου, ο πίνακας  $\mathbf{H}$  είναι γνωστός, οπότε η χωρητικότητα μπορεί να βελτιστοποιηθεί με κατάλληλη κατανομή της ισχύος εκπομπής στις κεραιές του πομπού. Έτσι, αποδίδεται περισσότερη ισχύς στους ισχυρότερους υποδιαύλους και η χωρητικότητα δίδεται από τη σχέση [Paulraj 2003],[Paulraj 2004],[Biglieri 2007a],[Tse 2005],[Gesbert 2003]

$$C = \sum_{i=1}^k \log_2 \left( 1 + \frac{P_i}{N_0} \lambda_i \right) \quad (3.26)$$

όπου  $P_i$  είναι η ισχύς στον  $i$ -οστό υποδιάυλο,  $N_0/2$  είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου. Ο σηματοθορυβικός λόγος είναι  $SNR = P_T/N_0$ , όπου το  $P_T$  η συνολική ισχύς εκπομπής, για την οποία ισχύει

$$P_T = \sum_{i=1}^k P_i = \sum_{i=1}^k \left( v - \frac{1}{\lambda_i} \right)^+ \quad (3.27)$$

όπου το πρόσημο στον εκθέτη σημαίνει ότι λαμβάνονται υπόψη μόνο οι θετικοί όροι.

Αυτή η μέθοδος καταμερισμού της ισχύος εκπομπής (δηλαδή, τα διάφορα  $P_i$  που ικανοποιούν την (3.27)) προκύπτει ως λύση του αντιστοίχου προβλήματος βελτιστοποίησης με τη μέθοδο “waterfilling” [Cover 2006]. Η μέθοδος αυτή παρέχει σημαντικά κέρδη σε

σύγκριση με οποιαδήποτε τυχαία κατανομή της ισχύος στις κεραίες του πομπού. Μετά από πειραματικές μετρήσεις σε μεγάλο εύρος συστημάτων με διαφορετικούς αριθμούς κεραιών και διαφορετικά μοντέλα για το δίαυλο, το κέρδος χωρητικότητας από τη γνώση του διαύλου στον πομπό είναι μέχρι και 30% για SNR πάνω από τα 10dB. Για SNR μεταξύ του μηδενός και των 10dB τα κέρδη είναι μέχρι και 60%, ενώ για τιμές του SNR μικρότερες από 0dB παρατηρούνται κέρδη που φθάνουν και το 200%. Το γεγονός ότι το κέρδος από τη γνώση του διαύλου στον πομπό μειώνεται για μεγάλα SNR μπορεί να εξηγηθεί διαισθητικά ως εξής: Η γνώση της κατάστασης του διαύλου από τον πομπό του παρέχει κυρίως κέρδος πίνακα. Όμως, το διαφορεικό κέρδος και το κέρδος χωρικής πολυπλεξίας δεν απαιτούν αυτή τη γνώση, καθώς επιτυγχάνονται με τεχνικές «τυφλής» μετάδοσης (“blind” transmit schemes), όπως οι STC (Space Time Codes) [Alamouti 1998],[Tarokh 1998],[Tarokh 1999] και BLAST (Bell Laboratories–Layered–Space–Time) [Foschini 1996], [Foschini 1999], [Foschini 2003], [Sellathurai 2002]. Έτσι, καθώς η σχετική επίδραση του κέρδους πίνακα του πομπού μειώνεται για μεγάλα SNR και το κέρδος από τη γνώση του διαύλου στον πομπό μειώνεται και αυτό.

### 3.4.5. Γενικός Τύπος Έκφρασης της Χωρητικότητας MIMO Ντετερμινιστικού Διαύλου

Γενικότερα, θεωρώντας το σύστημα που περιγράφεται από τη (3.10) και υποθέτοντας ότι ο πίνακας μεταβλητότητας του  $x$  είναι ο  $\mathbf{Q}$ , η χωρητικότητα του MIMO διαύλου προκύπτει ότι μπορεί να εκφραστεί και ως [Foschini 1998],[Telatar 1999], [Paulraj 2003],[Paulraj 2004], [Biglieri 2007a],[Tse 2005],[Gesbert 2003]

$$C = \log_2[\det(\mathbf{I}_{M_R} + \mathbf{H}\mathbf{Q}\mathbf{H}^H)] \quad (3.28)$$

όπου το ίχνος του πίνακα  $\mathbf{Q}$  ( $\text{tr}(\mathbf{Q})$ ) είναι μικρότερο ή το πολύ ίσο με τη συνολική ισχύ που εκπέμπεται. Από την ανωτέρω σχέση για  $\mathbf{Q} = \left(\frac{SNR}{M_T}\right)\mathbf{I}_{M_R}$  λαμβάνονται οι τύποι για τη χωρητικότητα στις (3.24) και (3.25) που αναφέρονται σε δίαυλο άγνωστο στον πομπό, ενώ για  $\mathbf{Q}$  που βελτιστοποιείται με τη μέθοδο «waterfilling» λαμβάνεται η σχέση (3.26) που αναφέρεται σε δίαυλο γνωστό στον πομπό.

Για την ακρίβεια, η (3.28) αναφέρεται στην αμοιβαία πληροφορία που μπορεί να μεταφερθεί μέσω του διαύλου (mutual information), ενώ η μεγιστοποίηση αυτής της αμοιβαίας πληροφορίας για δεδομένο πίνακα μεταβλητότητας  $\mathbf{Q}$  αποκαλείται χωρητικότητα

(εξ ορισμού, ως άνω όριο). Συχνά, όμως, στη θεωρία MIMO, χωρίς απώλεια της γενικότητας, υπό τον όρο χωρητικότητα εννοείται το μέγεθος της αμοιβαίας πληροφορίας χωρίς να γίνεται περαιτέρω διευκρίνιση. Η διατύπωση αυτή υπονοείται σε όλη τη Διατριβή.

### 3.5. Τρόποι Εκτίμησης Κατάστασης Διαύλου στον Πομπό

Οι βασικοί τρόποι για να εκτιμήσει ο πομπός την κατάσταση του διαύλου είναι δύο [Paulraj 2003]:

- Με τη μέθοδο της **ανάδρασης** (feedback): Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η κατάσταση του διαύλου διαβίβασης από τον πομπό στο δέκτη υπολογίζεται στο δέκτη και αποστέλλεται υπό τη μορφή ανάδρασης στον πομπό μέσω του διαύλου επιστροφής, δηλαδή του διαύλου από το δέκτη στον πομπό. Έτσι ο πομπός για τη νέα μετάδοση γνωρίζει την κατάσταση του διαύλου διαβίβασης. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει δύο μειονεκτήματα: το πρόσθετο φορτίο επεξεργασίας με το οποίο επιβαρύνεται ο δέκτης και το χρονικό διάστημα,  $\delta_{lag}$ , που μεσολαβεί μέχρι η πληροφορία ανάδρασης να φθάσει στον πομπό. Το πρώτο πρόβλημα αφορά κυρίως την περίπτωση όπου το ρόλο του δέκτη έχει κινητό τερματικό χρήστη, το οποίο λόγω των μικρών δυνατοτήτων με τις οποίες έχει εφοδιαστεί, καθιστά απαγορευτικούς επιπλέον υπολογισμούς και στάδια επεξεργασίας. Το δεύτερο μειονέκτημα παρουσιάζεται όταν ο διάυλος είναι ταχέως μεταβαλλόμενος. Σε αυτή την περίπτωση, ο χρόνος συνοχής του διαύλου (Coherence Time) είναι μικρός, με αποτέλεσμα το  $\delta_{lag}$  να προκύπτει μεγαλύτερο και, κατ' επέκταση, ο πομπός να λαμβάνει λανθασμένη πληροφορία για το δίαυλο.
- Με την αρχή της **αμοιβαιότητας** (reciprocity): Η αρχή της αμοιβαιότητας ορίζει ότι οι διαδρομές μέσω των οποίων διέρχεται ένα σήμα κατά τη μετάδοσή του από τον πομπό στο δέκτη είναι ίδιες με τις διαδρομές που θα επιλέξει το σήμα αν μεταδοθεί από το δέκτη προς τον πομπό. Δηλαδή, με βάση την αρχή της αμοιβαιότητας, η κρουστική απόκριση του διαύλου από το σταθμό βάσης στο κινητό τερματικό είναι ίδια με την κρουστική απόκριση από το κινητό τερματικό στο σταθμό βάσης, για την ίδια συχνότητα, την ίδια χρονική στιγμή και με αμετάβλητες θέσεις κεραιών. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ο σταθμός βάσης μπορεί με επεξεργασία του σήματος που έλαβε από το δέκτη το οποίο σε αυτή την περίπτωση είναι το κινητό τερματικό, να μάθει την κατάσταση του αντίστροφου διαύλου, την κατάσταση δηλαδή που ισχύει για τη μετάδοση από το δέκτη προς τον πομπό. Λόγω όμως της αρχής της

αμοιβαιότητας, ο πομπός χρησιμοποιεί την πληροφορία αυτή και για την επόμενη μετάδοσή του στο διάυλο διαβίβασης. Το βασικό πρόβλημα αυτής της μεθόδου είναι ότι προκαλεί λάθη στην εκτίμηση του διαύλου από τον πομπό όταν η επικοινωνία είναι ταυτόχρονη, όταν δηλαδή σταθμός βάσης και κινητό τερματικό εκπέμπουν την ίδια χρονική στιγμή. Αυτό συμβαίνει διότι, για την αποφυγή παρεμβολών, οι ταυτόχρονες μεταδόσεις διαφοροποιούνται είτε χωρικά, είτε φασματικά, και, συνεπώς, ο διάυλος μεταξύ κινητού και σταθμού βάσης παύει να είναι ο ίδιος με τον αντίστοιχο μεταξύ σταθμού βάσης και κινητού.

### 3.6. Χωρητικότητα MIMO Στοχαστικών Διαύλων

Στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν ανωτέρω, ο διάυλος είχε υποτεθεί ντετερμινιστικός και τα στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{H}$  σταθερά και γνωστά. Σε αυτή την παράγραφο, θα παρουσιασθούν οι τρόποι εκτίμησης της χωρητικότητας όταν ο διάυλος μεταβάλλεται κατά τυχαίο τρόπο. Η υπόθεση αυτή ανταποκρίνεται περισσότερο στην πραγματικότητα, αφού το περιβάλλον διάδοσης μεταβάλλεται διαρκώς κατά τυχαίο τρόπο. Έτσι, ο διάυλος MIMO περιγράφεται από πίνακα  $\mathbf{H}$  με στοιχεία που είναι τυχαίες διαδικασίες (στοχαστικές ανελίξεις) με συνέπεια, η χωρητικότητά του να είναι μια τυχαία μεταβλητή. Τα μεγέθη που θα βοηθήσουν στην εκτίμησή της είναι η εργοδική χωρητικότητα (ergodic capacity) και η χωρητικότητα διακοπής (outage capacity) [Paulraj 2003],[Paulraj 2004], [Biglieri 2007a],[Tse 2005],[Gesbert 2003].

#### 3.6.1. Εργοδική Χωρητικότητα

Όταν η στοχαστική ανέλιξη που περιγράφει το κέρδος του διαύλου είναι εργοδική ανέλιξη, ο διάυλος αποκαλείται εργοδικός. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει στο διάυλο να υποστηρίζει ένα σταθερό ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας επί μεγάλο χρονικό διάστημα. Η εργοδική χωρητικότητα, που αντιστοιχεί στη χωρητικότητα Shannon, ορίζεται ως η μέση τιμή της αμοιβαία μεταδιδόμενης πληροφορίας [Telatar 1999]

$$C = E\{I\} \tag{3.29}$$

όπου  $I$  είναι η αμοιβαία πληροφορία. Ενδεικτικά, η εργοδική χωρητικότητα ενός συστήματος MIMO όταν ο πομπός δε γνωρίζει την κατάσταση του διαύλου δίδεται από τη σχέση [Telatar 1999]

$$C = E \left\{ \log_2 \det \left( \mathbf{I}_{M_R} + \frac{SNR}{M_T} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \right\} \quad (3.30)$$

Η εργοδική χωρητικότητα αυξάνεται όταν αυξάνεται είτε το SNR και είτε το πλήθος των κεραιών που χρησιμοποιούνται από το σύστημα MIMO. Όταν ο πομπός δεν γνωρίζει την κατάσταση του διαύλου, στα συστήματα SIMO η εργοδική χωρητικότητα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των συστημάτων MISO.

Η εργοδική χωρητικότητα χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της χωρητικότητας κυρίως σε ταχέως μεταβαλλόμενους διαύλους (fast fading).

### 3.6.2. Χωρητικότητα Διακοπής

Σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα των οποίων η επίδοση χαρακτηρίζεται κατά κύριο λόγο από την καθυστέρηση μετάδοσης (delay limited systems), όπως είναι η περίπτωση στα δορυφορικά συστήματα DVB-SH με μικρής διάρκειας κώδικα FEC [DVB-SH], η χωρητικότητα κατά Shannon μηδενίζεται. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει πάντα μη μηδενική πιθανότητα ο δίαυλος να μην είναι σε θέση να υποστηρίξει ένα ρυθμό μετάδοσης, όσο χαμηλός και αν είναι αυτός. Η πιθανότητα αυτή ονομάζεται πιθανότητα διακοπής (outage probability). Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα θεωρείται ότι βρίσκεται σε διακοπή (outage).

Ως χωρητικότητα διακοπής  $C_{out,q}$  ορίζεται η ελάχιστη χωρητικότητα που μπορεί να υποστηρίξει ο δίαυλος με πιθανότητα  $(1-q) \cdot 100\%$ . Εναλλακτικά, ορίζεται ως η μέγιστη χωρητικότητα που μπορεί να υποστηρίξει ο δίαυλος με πιθανότητα  $q \cdot 100\%$  και μαθηματικά εκφράζεται από τη σχέση [Ozarow 1994],[Biglieri 1998]

$$P(C \leq C_{out,q}) = q \quad (3.31)$$

Η χωρητικότητα διακοπής αυξάνεται όταν αυξάνεται είτε το SNR και είτε το πλήθος των κεραιών που χρησιμοποιούνται από το σύστημα MIMO. Όσο μεγαλύτερη είναι η  $C_{out,q}$  τόσο καλύτερη και πλέον αξιόπιστη είναι η επικοινωνία μέσω του διαύλου. Ανάμεσα στο ρυθμό μετάδοσης και την πιθανότητα διακοπής υπάρχει μια σχέση ανταλλαγής. Δηλαδή, όσος υψηλότερος είναι ο ρυθμός μετάδοσης τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να μη τον υποστηρίξει ο δίαυλος, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συχνότητα εμφάνισης λαθών και ο δίαυλος να βρίσκεται σε κατάσταση διακοπής.

Η χωρητικότητα διακοπής χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της χωρητικότητας κυρίως σε αργά μεταβαλλόμενους διαύλους.

### 3.7. Χωρητικότητα Ειδικών Περιπτώσεων MIMO Επίγειων Ασυρμάτων Διαύλων

Στην παράγραφο αυτή θα μελετηθεί θεωρητικά η χωρητικότητα βασικών τύπων διαύλων. Συγκεκριμένα, θα παρουσιασθούν οι εκφράσεις για τη χωρητικότητα διαύλου Rayleigh, που αντιπροσωπεύει διάυλο NLOS με διαλείψεις πολυδιαδρομικής διάδοσης, διαύλου Rice, που αντιπροσωπεύει διάυλο LOS με διαλείψεις πολυδιαδρομικής διάδοσης, καθώς και διαύλου Rayleigh στον οποίο οι διαλείψεις μικρής κλίμακας λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης είναι χωρικά συσχετισμένες λόγω ανεπαρκούς απόστασης των στοιχείων των κεραιών πομπού-δέκτη. Τέλος, ως ειδική περίπτωση MIMO επίγειου διαύλου, αναλύεται η συνεισφορά της Διατριβής στη διεθνή βιβλιογραφία η οποία αφορά μοντέλο εκτίμησης χωρητικότητας MIMO επίγειου διαύλου που λειτουργεί υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχής [Π6].

#### 3.7.1. Χωρητικότητα MIMO Διαύλου Rayleigh

Η απλούστερη μορφή του πίνακα  $\mathbf{H}$  για διάυλο Rayleigh προκύπτει όταν τα στοιχεία του θεωρηθούν μεταξύ τους ανεξάρτητα και ισόνομα, όταν δηλαδή οι υποδιάυλοι διάδοσης μεταξύ πομπού και δέκτη είναι μεταξύ τους ανεξάρτητα. Τότε ορίζεται ο πίνακας  $\mathbf{H}_w$  [Foschini 1998],[Telatar 1999], [Paulraj 2003],[Paulraj 2004], [Biglieri 2007a],[Tse 2005],[Gesbert 2003], διαστάσεων  $M_R \times M_T$  με στοιχεία ανεξάρτητες και ομοιόμορφα κατανεμημένες (iid, Independent and Identically Distributed) μεταβλητές που ακολουθούν την κυκλικά συμμετρική μιγαδική κανονική κατανομή με μέση τιμή μηδέν και διασπορά  $\sigma^2 = 1$  (ZMCSCG, Zero-Mean Circularly Symmetric Complex Gaussian). Συγκεκριμένα, μια μεταβλητή  $Z=X+jY$  ακολουθεί την κατανομή ZMCSCG όταν τα  $X,Y$  είναι ανεξάρτητες, πραγματικές τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την κανονική κατανομή με μηδενική μέση τιμή και διασπορά 1, δηλαδή  $X,Y \sim N(0,1)$ . Συνεπώς

$$\mathbf{H}_w = [\mathbf{H}_w]_{m,n} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{m,n} + j \mathbf{Y}_{m,n} \\ \sim N(0,1) & \sim N(0,1) \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Διάυλοι που περιγράφονται από πίνακες της μορφής  $\mathbf{H}_w$  διαθέτουν και τις εξής ιδιότητες:

$$E\{[\mathbf{H}_w]_{i,j}\} = 0 \quad (3.33)$$

$$E\{|[\mathbf{H}_w]_{i,j}|^2\} = 1 \quad (3.34)$$

$$E\{[H_W]_{i,j}[H_W]_{m,n}^*\} = 0 \quad (\text{αν } i \neq m \text{ ή } j \neq n) \quad (3.35)$$

Η ιδιότητα (3.33) αφορά τη μέση τιμή των στοιχείων του πίνακα που όπως προαναφέρθηκε είναι μηδενική. Η ιδιότητα (3.34) αφορά το είδος της κανονικοποίησης των στοιχείων ενώ η (3.35) αφορά τη συσχέτισή τους. Η τελευταία ιδιότητα προκύπτει από τη θεώρηση ότι τα στοιχεία των κεραιών πομπού και δέκτη απέχουν μεταξύ τους τόσο ώστε να μην αναιρούν την ανεξαρτησία των λαμβανόμενων-εκπεμπόμενων σημάτων που τους παρέχει το πλούσιο περιβάλλον σκέδασης. Τότε, ο πίνακας  $\mathbf{H}$  που περιγράφει το διάυλο έχει τη μορφή του  $\mathbf{H}_W$ . Έτσι, θεωρώντας ότι η κατάσταση του διαύλου είναι άγνωστη στον πομπό, αντικαθιστώντας  $\mathbf{H}_W \rightarrow \mathbf{H}$  στη (3.24) προκύπτει η κατωτέρω σχέση

$$C = \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I} + \frac{\text{SNR}}{M_T} \mathbf{H}_W (\mathbf{H}_W)^H \right) \right] \quad (3.36)$$

Ενδιαφέρον έχει το όριο της χωρητικότητας όταν το  $M_T$  παρουσιάζει μεγάλη αύξηση [Paulraj 2004]. Με βάση το νόμο των μεγάλων αριθμών αποδεικνύεται ότι όταν  $M_T \rightarrow \infty$

$$\frac{1}{M_T} \mathbf{H}_W (\mathbf{H}_W)^H \rightarrow \mathbf{I}_{M_R} \quad (3.37)$$

Επομένως, το όριο της (3.36) λόγω της (3.37) προκύπτει

$$\begin{aligned} C &\rightarrow \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I}_{M_R} + \text{SNR} \cdot \mathbf{I}_{M_R} \right) \right] = \log_2 \left[ (1 + \text{SNR})^{M_R} \right] = M_R \cdot \log_2 (1 + \text{SNR}) \Rightarrow \\ C &\rightarrow M_R \cdot \log_2 (1 + \text{SNR}) \end{aligned} \quad (3.38)$$

Από την τελευταία σχέση διαπιστώνεται ότι για μεγάλο αριθμό στοιχείων στην κεραία του πομπού, η χωρητικότητα αποκτά γραμμική εξάρτηση από τον αριθμό των στοιχείων του δέκτη.

### 3.7.2. Χωρητικότητα MIMO Διαύλου Rice

Στην προηγούμενη ενότητα όπου ο ασύρματος διάυλος θεωρήθηκε τύπου Rayleigh το MIMO σύστημα περιγράφηκε μέσω του πίνακα  $\mathbf{H}_W$  της μορφής της (3.32). Στην παρούσα ενότητα, το σήμα λήψης περιλαμβάνει μια LOS ισχυρή συνιστώσα εμφανίζοντας μη μηδενική μέση τιμή στην περιβάλλουσά του. Σε αυτή την περίπτωση ο πίνακας που περιγράφει τον MIMO διάυλο αποτελείται από δύο συνιστώσες. Μία συνιστώσα που αφορά την πολυδιαδρομική διάδοση και μια που αφορά τη LOS συνιστώσα. Αφού η LOS συνιστώσα δεν υπόκειται σε πρόσθετες εξασθενήσεις πέραν αυτής του ελεύθερου χώρου (αν αγνοηθούν οι διαλείψεις λόγω βροχόπτωσης) θεωρείται σταθερή, σε αντίθεση με τη

συνιστώσα της πολυδιαδρομικής διάδοσης που είναι χρονικά μεταβαλλόμενη. Άρα ο πίνακας του διαύλου αποτελείται από δύο συνιστώσες [Foschini 1998],[Telatar 1999], [Paulraj 2003],[Paulraj 2004], [Biglieri 2007a],[Tse 2005],[Gesbert 2003]

$$\mathbf{H}_{\text{Rice}} = \mathbf{H}_{\text{const}} + \mathbf{H}_{\text{random}} \quad (3.39)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τον παράγοντα Rice  $K$ , η ανωτέρω σχέση γράφεται

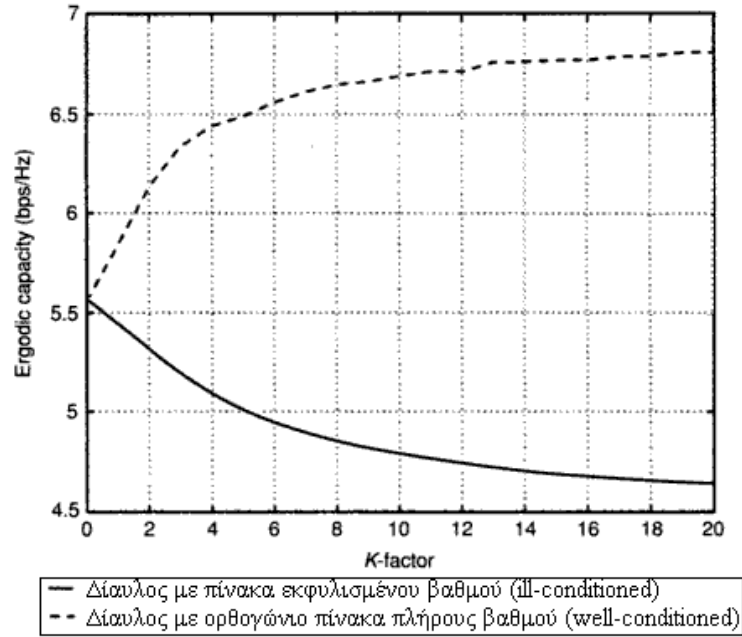
$$\mathbf{H}_{\text{Rice}} = \sqrt{\frac{K}{K+1}} e^{j\phi_0} \mathbf{H}_{\text{LOS}} + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \mathbf{H}_w \quad (3.40)$$

Στη (3.40), ο παράγοντας Rice  $K$  παίρνει τιμές που κυμαίνονται από 0, για αμιγή διάυλο Rayleigh, έως  $\infty$  για διάυλο όπου διαδίδεται μόνο η LOS συνιστώσα (AWGN διάυλος). Έτσι, θεωρώντας ότι η κατάσταση του διαύλου είναι άγνωστη στον πομπό, αντικαθιστώντας  $\mathbf{H}_{\text{Rice}} \rightarrow \mathbf{H}$  στη (3.24) προκύπτει η σχέση

$$C = \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I} + \frac{\text{SNR}}{M_T} \mathbf{H}_{\text{Rice}} \mathbf{H}_{\text{Rice}}^H \right) \right] \quad (3.37)$$

Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι, με κριτήριο τη γεωμετρία και τη χωροταξική τοποθέτηση των κεραιών, ο πίνακας  $\mathbf{H}_{\text{LOS}}$  που περιγράφει τη σταθερή LOS συνιστώσα λαμβάνει διαφορετική μορφή. Συγκεκριμένα, ο πλήρους βαθμού ορθογώνιος (well-conditioned) πίνακας  $\mathbf{H}_{\text{LOS}}$ , που προκύπτει όταν η απόσταση μεταξύ των στοιχείων της κεραίας πομπού-δέκτη είναι συγκρίσιμη ή/και μεγαλύτερη της απόστασης μεταξύ πομπού-δέκτη ( $R \ll D$ ), δρα ενισχυτικά στη συνολική χωρητικότητα του MIMO διαύλου. Αντίθετα, ο εκφυλισμένου βαθμού (ill-conditioned) πίνακας  $\mathbf{H}_{\text{LOS}}$ , που προκύπτει στη συνήθη περίπτωση όπου η απόσταση μεταξύ των στοιχείων της κεραίας πομπού-δέκτη είναι κατά πολύ μικρότερη της απόστασης μεταξύ πομπού-δέκτη ( $R \gg D$ ), οδηγεί σε μείωση της χωρητικότητας. Από το Σχήμα 3.7, το οποίο απεικονίζει την εργοδική χωρητικότητα MIMO διαύλων με LOS συνιστώσα συναρτήσει του παράγοντα Rice  $K$  για τις ανωτέρω δύο ειδικές περιπτώσεις πίνακα  $\mathbf{H}_{\text{LOS}}$ , είναι φανερό ότι η επίδραση της γεωμετρίας και της χωροταξικής τοποθέτησης των κεραιών γίνεται εντονότερη όσο αυξάνει ο παράγοντας Rice  $K$  [Paulraj 2004].





**Σχήμα 3.7:** Εργοδική χωρητικότητα MIMO διαύλων με LOS συνιστώσα συναρτήσει του παράγοντα Rice  $K$

Στην ειδική περίπτωση όπου  $K \rightarrow \infty$  και η απόσταση  $R$  των κεραιών πομπού-δέκτη είναι πολύ μεγαλύτερη της απόστασης  $D$  των στοιχείων τους, προκύπτει για τον πίνακα διαύλου ότι  $\mathbf{H}_{\text{Rice}} \rightarrow \mathbf{H}_{\text{LOS}}$ . Σε αυτή, λοιπόν, την περίπτωση ο πίνακας  $\mathbf{H}_{\text{LOS}} = \mathbf{H}(1)$  είναι πίνακας διαστάσεων  $M_R \times M_T$  με μοναδιαία στοιχεία και βαθμό μονάδα, δηλαδή:  $\text{rank}(\mathbf{H}_{\text{Rice}}) = \text{rank}(\mathbf{H}_{\text{LOS}}) = \text{rank}(\mathbf{H}(1)) = 1$ . Άρα, αφού ο βαθμός του πίνακα διαύλου είναι 1, θα υπάρχει μόνο μια ιδιοτιμή για τον πίνακα  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ , η  $\lambda_1$ , η οποία ισούται με  $\lambda_1 = M_R \cdot M_T$ . Με βάση τις τελευταίες παρατηρήσεις η (3.25) γράφεται

$$C = \sum_{k=1}^n \log_2 \left( 1 + \frac{\text{SNR}}{M_T} \lambda_k \right) \Bigg|_{\substack{n=\text{rank}(\mathbf{H})=1 \\ \lambda_1=M_R M_T}} \Rightarrow C = \log_2 \left( 1 + \frac{\text{SNR}}{M_T} M_R M_T \right) = \log_2 (1 + \text{SNR} \cdot M_R) \quad (3.41)$$

Από την τελευταία σχέση διαπιστώνεται ότι η χωρητικότητα λαμβάνει ντετερμινιστική τιμή και η παρουσία κεραιάς πολλαπλών στοιχείων εμφανίζεται μόνο ως πρόσθετο κέρδος σηματοθορυβικού λόγου στο δέκτη (κέρδος πίνακα). Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι, όταν μεταδίδεται μόνο η LOS συνιστώσα, δηλαδή, όταν  $K \rightarrow \infty$ , οπότε προκύπτει διάυλος AWGN χωρίς διαλείψεις, η χωρητικότητα του διαύλου δεν αυξάνεται με χρήση πολλαπλών κεραιών στον πομπό.

### 3.7.3. Χωρητικότητα MIMO Διαύλου Rayleigh με Χωρικά Συσχετισμένες Διαλείψεις Μικρής Κλίμακας

Με βάση την (3.25), ο διάυλος MIMO μπορεί να αντιστοιχισθεί με ένα ισοδύναμο σύστημα ανεξάρτητων SISO υποδιαύλων όπου η συνολική χωρητικότητα του διαύλου προκύπτει ως το άθροισμα των χωρητικοτήτων των SISO αυτών υποδιαύλων. Στην πραγματικότητα, ωστόσο, το αισιόδοξο αυτό σενάριο για τη χωρητικότητα δεν ισχύει συνήθως. Στην ενότητα αυτή αναλύεται η ύπαρξη χωρικής συσχέτισης (spatial fading correlation) στο διάυλο MIMO και συγκεκριμένα στις διαλείψεις μικρής κλίμακας αυτού, όπως επίσης και η επίδρασή της στη χωρητικότητα του διαύλου.

Η ύπαρξη χωρικής συσχέτισης στις διαλείψεις μικρής κλίμακας ενός MIMO διαύλου αποτελεί ίσως το σημαντικότερο παράγοντα που επηρεάζει δυσμενώς τη φασματική απόδοσή του. Έντονη παρουσία του φαινομένου μπορεί να οδηγήσει στον απόλυτο εκφυλισμό του MIMO διαύλου και να καταστήσει την παρουσία πολλαπλών κεραιών άσκοπη. Γενικά, η απόδοση ενός γραμμικού MIMO διαύλου βασίζεται στην ανεξαρτησία των σημάτων που φθάνουν στο δέκτη. Μαθηματικά, το φαινόμενο χωρικής συσχέτισης εξηγείται με τη βοήθεια των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων του πίνακα  $\mathbf{H}$ . Ανεξαρτησία των υποδιαύλων του MIMO συστήματος μεταφράζεται σε πίνακα  $\mathbf{H}$  πλήρους βαθμού, δηλαδή  $n = \text{rank}(\mathbf{H}) = \min(M_T, M_R)$  με  $n$  γραμμικώς ανεξάρτητα ιδιοδιανύσματα (όσοι και οι SISO υποδιαύλοι) που αντιστοιχούν σε  $n$  μη μηδενικές ιδιοτιμές. Όπως έχει αποδειχθεί προηγουμένως (βλ. (3.25)), έκαστος των υποδιαύλων διαθέτει κέρδος ισχύος ανάλογο της ιδιοτιμής του πίνακα  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ . Άρα, όταν λόγω χωρικής συσχέτισης (spatial correlation) ορισμένα ιδιοδιανύσματα του  $\mathbf{H}$  παύουν να είναι γραμμικώς ανεξάρτητα μεταξύ τους, οι αντίστοιχες ιδιοτιμές τείνουν στο μηδέν. Άρα, όσο εντονότερο είναι το φαινόμενο χωρικής συσχέτισης, τόσο περισσότερες ιδιοτιμές τείνουν στο μηδέν και, κατ' επέκταση, τόσο περισσότεροι υποδιαύλοι παύουν να μεταφέρουν χρήσιμη πληροφορία στο δέκτη.

Το φαινόμενο χωρικής συσχέτισης στις διαλείψεις μικρής κλίμακας ενός MIMO διαύλου εξαρτάται από δύο βασικούς παράγοντες:

- Διάταξη των στοιχείων των κεραιών
- Περιβάλλον σκέδασης

Οι παράγοντες αυτοί υπεισέρχονται συνήθως στη θεωρητική μελέτη μέσω της διασποράς γωνίας (angle spread) και της απόστασης των στοιχείων των κεραιών. Γενικά, όσο αυξάνεται η διασπορά γωνίας στο δέκτη και όσο μεγαλύτερο είναι το πηλίκο  $D/\lambda_c$ , όπου  $D$

η απόσταση μεταξύ των στοιχείων των κεραιών και  $\lambda_c$  το μήκος κύματος της φέρουσας του σήματος λήψης, τόσο περισσότερο εξασθενημένο εμφανίζεται το φαινόμενο χωρικής συσχέτισης στις διαλείψεις μικρής κλίμακας.

Όταν οι διάυλοι διάδοσης εμφανίζονται συσχετισμένοι, τα στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{H}$ , που αποτελείται μόνο από τις συνιστώσες πολυδιαδρομικής διάδοσης, εμφανίζουν χωρική συσχέτιση μεταξύ τους. Τότε, ισχύει η σχέση [Paulraj 2003],[Paulraj 2004], [Biglieri 2007a],[Tse 2005],[Gesbert 2003]

$$\text{vec}(\mathbf{H}) = \mathbf{R}^{1/2} \text{vec}(\mathbf{H}_w) \quad (3.42)$$

όπου  $\text{vec}(\mathbf{H})$  είναι το διάνυσμα στήλη που προκύπτει όταν όλες οι στήλες του  $\mathbf{H}$  παρατεθούν η μια κάτω από την άλλη, και  $\mathbf{R}$  ο πίνακας μεταβλητότητας του διαύλου διαστάσεων  $M_R M_T \times M_R M_T$  που ορίζεται μέσω της σχέσης<sup>2</sup>:

$$\mathbf{R} = \mathbf{E} \left\{ \text{vec}(\mathbf{H}) \text{vec}(\mathbf{H})^H \right\} \quad (3.43)$$

Αν και το μοντέλο της (3.42) είναι απόλυτα ακριβές και λαμβάνει υπόψη του οποιαδήποτε μορφή συσχέτισης, συνήθως χρησιμοποιείται το απλοποιημένο μοντέλο που βασίζεται στη σχέση [Chuah 2002], [Paulraj 2003],[Paulraj 2004], [Biglieri 2007a],[Tse 2005],[Gesbert 2003]

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}_R^{1/2} \mathbf{H}_w \mathbf{R}_T^{1/2} \quad (3.44)$$

όπου  $\mathbf{R}_T$  ο πίνακας μεταβλητότητας εκπομπής διαστάσεων  $M_T \times M_T$  και ορίζεται ως  $\mathbf{R}_T = \mathbf{E} \left\{ (\mathbf{h}_n)^H \cdot \mathbf{h}_n \right\}$ ,  $n = 2, \dots, M_R$ , όπου  $\mathbf{h}_n$  η n-οστή σειρά του  $\mathbf{H}$ .  $\mathbf{R}_R$  είναι ο πίνακας μεταβλητότητας λήψης διαστάσεων  $M_R \times M_R$  και ορίζεται ως  $\mathbf{R}_R = \mathbf{E} \left\{ \mathbf{h}_m (\mathbf{h}_m)^H \right\}$ ,  $m=2, \dots, M_T$ , όπου  $\mathbf{h}_m$  η m-οστή στήλη του  $\mathbf{H}$ .

Το απλοποιημένο μοντέλο που περιγράφεται στη (3.44) υποθέτει ότι ο πίνακας συσχέτισης  $\mathbf{R}_R$  στο δέκτη είναι ίδιος ανεξάρτητα από το ποιο στοιχείο της κεραιάς του πομπού μετέδωσε το σήμα το οποίο έλαβε. Υποθέτει, δηλαδή, ότι ο πίνακας  $\mathbf{R}_R$  είναι ίδιος για όλα τα στοιχεία της κεραιάς του πομπού. Η θεώρηση αυτή ισχύει όταν η κατανομή ισχύος στο δέκτη συναρτήσει των γωνιών άφιξης (angle power spectrum) είναι ίδια για όλα τα στοιχεία του πομπού. Πρακτικά, η θεώρηση αυτή ισχύει όταν τα στοιχεία της κεραιάς του πομπού απέχουν λίγο μεταξύ τους και διαθέτουν το ίδιο διάγραμμα ακτινοβολίας. Οι ίδιες ακριβώς

<sup>2</sup> Ο πίνακας  $\mathbf{R}$  είναι γνωστός στη διεθνή βιβλιογραφία και ως «positive semi-definite Hermitian covariance matrix».

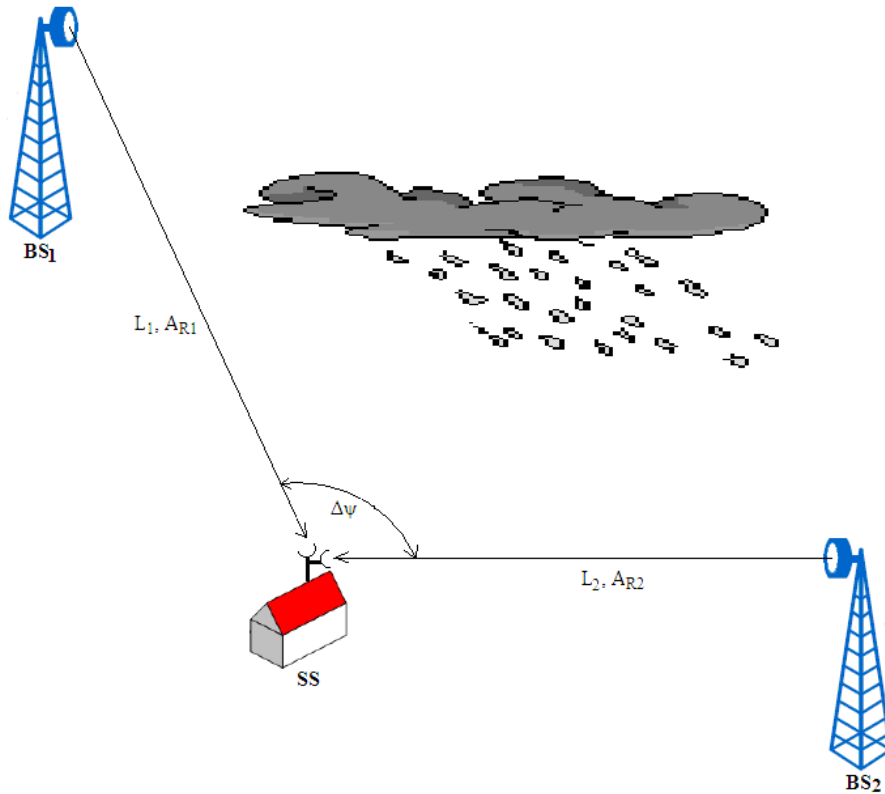
υποθέσεις γίνονται αντίστοιχα και για τον πίνακα συσχέτισης  $\mathbf{R}_T$  στον πομπό [Paulraj 2004].

Η έκφραση της χωρητικότητας του MIMO διαύλου σε αυτή την περίπτωση προκύπτει με αντικατάσταση της (3.42) (ή της (3.44)) στην (3.24).

#### 3.7.4. Χωρητικότητα MIMO Διαύλου BFWA με Χωρικά Συσχετισμένες Διαλείψεις λόγω Βροχόπτωσης

Στην ενότητα αυτή θεωρούνται επίγειοι ασύρματοι δίαυλοι που απαντώνται στα Ασύρματα Συστήματα Σταθερής Ευρυζωνικής Πρόσβασης (BFWA) τα οποία λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz και, συγκεκριμένα, σε χιλιοστομετρικές ζώνες συχνοτήτων [Liolis 2009c], [Arapoglou 2005], [Cheffena 2010], [Chu 2005], [Eklund 2002], [Hendratoro 2003], [Horvath 2004], [IEEE-WiMAX], [ITU1410], [Kanellopoulos 1999], [Maruyama 2008], [Panagopoulos 2002b], [Panagopoulos 2005a], [Panagopoulos 2007a], [Panagopoulos 2007b], [Xu 2000], [Papazian 1997]. Πρόκειται για ειδική περίπτωση επίγειων διαύλων που λειτουργούν υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχόπτωσης για τους οποίους προτείνεται η πρωτότυπη μελέτη εφαρμογής της τεχνολογίας MIMO της παρούσας ενότητας.

Στο Σχήμα 3.8 απεικονίζεται η διάταξη του υπό θεώρηση 2x2 MIMO BFWA διαύλου. Συγκεκριμένα, η κάτω ζεύξη λαμβάνεται υπόψη. Ο τερματικός σταθμός συνδρομητή SS (Subscriber Station) διατηρεί ταυτόχρονα συνδέσεις και εξυπηρετείται και από τους δύο σταθμούς βάσης, BS1 και BS2, διαθέτοντας δύο κατευθυντικές κεραιές. Η απόσταση της ζεύξης SS-BS1 είναι  $L_1$  και η απόσβεση που εισάγεται λόγω βροχής κατά μήκος αυτής είναι  $A_{R1}$ , ενώ, αντίστοιχα,  $L_2$  και  $A_{R2}$  είναι το μήκος της ζεύξης SS-BS2 και η απόσβεση λόγω βροχής που επιβαρύνει αυτήν. Η γωνιακή απόσταση μεταξύ των σταθμών BS1 και BS2 ως προς το SS είναι ίση με  $\Delta\psi$ . Όσον αφορά τις γωνίες ανύψωσης των διαφόρων ραδιοδρόμων που υπεισέρχονται κατά την ανάλυση του προβλήματος λαμβάνονται όλες ίσες με μηδέν. Η πόλωση του συστήματος θεωρείται απλή γραμμική.



**Σχήμα 3.8: Διάταξη 2x2 MIMO Διαύλου Ασύρματης Σταθερής Ευρυζωνικής Πρόσβασης (BFWA) που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz υπό διαλείψεις λόγω βροχοπτώσης**

Υποθέτοντας ότι υπάρχει καθαρή οπτική επαφή LOS και στις δύο ζεύξεις BS<sub>i</sub>-SS (*i*=1,2) καθώς και ότι οι διαλείψεις λόγω βροχής αποτελούν τον κυριότερο μηχανισμό διαλείψεων (οι διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης αγνοούνται λόγω της υψηλής κατευθυντικότητας των κεραιών του SS), για το κέρδος διαύλου  $g_i$  για κάθε ραδιοζεύξη BS<sub>i</sub>-SS (*i*=1,2) ισχύει

$$g_i \propto L_i^{-2} \cdot 10^{-A_{Ri}/10} \quad (i=1,2) \quad (3.45)$$

Δηλαδή, οι συνολικές αποσβέσεις που προκαλούν διαλείψεις μεγάλης κλίμακας σε κάθε ραδιοζεύξη BS<sub>i</sub>-SS (*i*=1,2) είναι (σε dB)

$$A_i = FSL_i + A_{Ri} \quad (i=1,2) \quad (3.46)$$

όπου

$$FSL_i = 10 \log_{10} (4\pi L_i f / c)^2 \quad (3.47)$$

είναι οι απώλειες ελευθέρου χώρου (FSL) σε κάθε ραδιοζεύξη,  $c$  η ταχύτητα του φωτός και  $f$  η συχνότητα λειτουργίας. Για το χαρακτηρισμό των τ.μ.  $A_{Ri}$  (*i*=1,2) και της χωρικής ανομοιογένειας του φυσικού μέσου βροχής, λαμβάνεται υπόψη το φυσικο-στατιστικό

μοντέλο που περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα Ι. Σε αυτή την περίπτωση, οι τ.μ.  $A_{Ri}$  ( $i=1,2$ ) ακολουθούν τη δισδιάστατη από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή [Liolis 2009c] με στατιστικές παραμέτρους  $A_{mRi}, S_{aRi}$  ( $i=1,2$ ), ενώ οι κανονικές τ.μ.  $\ln(A_{Ri})$  ( $i=1,2$ ) είναι χωρικά συσχετισμένες μεταξύ τους με συντελεστή συσχέτισης  $\rho_n$ .

Με βάση τις ανωτέρω παραδοχές και θεωρώντας δίαυλο με επίπεδες διαλείψεις ως προς τη συχνότητα (λόγω της υψηλής κατευθυντικότητας των κεραιών του SS), ο πίνακας  $\mathbf{H}$  που προκύπτει για το 2x2 MIMO BFWA δίαυλο περιγράφεται από τη σχέση

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{g_1} \exp(j\phi_1) & 0 \\ 0 & \sqrt{g_2} \exp(j\phi_2) \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

όπου οι φάσεις  $\phi_i$  ( $i=1,2$ ) θεωρούνται ομοιόμορφα κατανεμημένες στο διάστημα  $[0,2\pi)$ .

Στην (3.48), ο πίνακας  $\mathbf{H}$  είναι διαγώνιος λόγω της υψηλής κατευθυντικότητας των κεραιών του SS και της αρκετά μεγάλης γωνιακής απόστασης  $\Delta\psi$ . Έτσι, το πλήθος των διαθέσιμων διαδρομών μεταξύ των πλευρών εκπομπής και λήψης περιορίζεται σε  $m(=2)$  («παράλληλοι» υποδίαυλοι MIMO). Αντίθετα, στη συμβατική περίπτωση MIMO (βλ. Ενότητα 3.7.1), όπου ο SS είναι συνήθως εξοπλισμένος με ομοιοκατευθυντικές κεραιές και υφίσταται συνήθως περιβάλλον πλούσιο σε σκεδαστές, το αντίστοιχο πλήθος μπορεί να είναι το πολύ  $m^2$ , γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερο διαφορικό κέρδος [Foschini 1998],[Telatar 1999], [Paulraj 2003],[Paulraj 2004], [Biglieri 2007a],[Tse 2005],[Gesbert 2003]. Επιπλέον, η «iid» υπόθεση των ανεξάρτητων πανομοιότυπα κατανεμημένων στοιχείων του  $\mathbf{H}$ , που συναντάται συχνά (τουλάχιστον σε θεωρητικό επίπεδο) στη συμβατική περίπτωση MIMO (βλ. Ενότητα 3.7.1), δεν υφίσταται στην προκειμένη περίπτωση. Αντί αυτής, υπάρχει σχετικά υψηλή χωρική συσχέτιση που οφείλεται στο φυσικό μέσο της βροχής. Επιπλέον, δεδομένου ότι, σε γενικές γραμμές, BS1 και BS2 βρίσκονται σε διαφορετικές αποστάσεις  $L_i$  από το SS, οι συνολικές αποσβέσεις διαδρομής  $A_i$  ( $i=1,2$ ) κατά μήκος κάθε ραδιοζεύξης BS<sub>i</sub>-SS δεν είναι ίσες και ως εκ τούτου, ο πίνακας  $\mathbf{H}$  δεν μπορεί να κανονικοποιηθεί όπως συνήθως θεωρείται στην κλασική θεωρία MIMO [Foschini 1998],[Telatar 1999], [Paulraj 2003],[Paulraj 2004], [Biglieri 2007a],[Tse 2005],[Gesbert 2003]. Το σύστημα πολλαπλών κεραιών που προκύπτει στην τελευταία περίπτωση είναι γνωστό είτε ως διατεταγμένο σύστημα MIMO στη θεωρία MIMO είτε ως μη ισοσταθμισμένο διαφορικό σύστημα στη θεωρία Διάδοσης Ραδιοκυμάτων.

Στη συνέχεια, ο πίνακας διαύλου  $\mathbf{H}$  υποτίθεται ότι είναι απολύτως γνωστός στο δέκτη SS. Στην πλευρά εκπομπής, τόσο ο BS<sub>1</sub> όσο και ο BS<sub>2</sub> υποτίθεται ότι διαθέτουν γνώση μόνο για τη μακροπρόθεσμη (*long-term*) στατιστική κατανομή των διαλείψεων λόγω βροχής.

Δηλαδή, εφόσον ο πομπός δεν διαθέτει πλήρη γνώση του στιγμιαίου διαύλου (*instantaneous channel knowledge*), ο διάυλος στην περίπτωση αυτή είναι άγνωστος στον πομπό (*channel unknown, CU*) και δεν απαιτείται καμμία επικοινωνία μεταξύ των δύο σταθμών βάσης για τη βέλτιστη κατανομή της ισχύος εκπομπής στους δύο υποδιαύλους (ραδιοζεύξεις BS<sub>i</sub>-SS).

Αρχικά εξετάζεται η χωρητικότητα, για την ακρίβεια, η μέγιστη αμοιβαία πληροφορία που μπορεί να μεταδοθεί μέσω του διαύλου με ντετερμινιστικό πίνακα  $\mathbf{H}$ . Συνεπώς, η χωρητικότητα στην περίπτωση αυτή εκφράζεται με βάση την (3.28) ως εξής

$$C = \max_{\mathbf{R}_{SS}} \log_2 \det \left( \mathbf{I}_2 + \frac{P_T}{2N_0} \mathbf{H} \cdot \mathbf{R}_{SS} \cdot \mathbf{H}^H \right) \quad (3.49)$$

όπου  $\mathbf{R}_{SS}$  ο πίνακας μεταβλητότητας του μεταδιδόμενου σήματος και  $P_T$  η *συνολική* ισχύς εκπομπής που διαθέτουν από κοινού οι δύο σταθμοί βάσης BS<sub>i</sub> ( $i=1,2$ ). Στην (3.49), η βελτιστοποίηση γίνεται ως προς όλους τους πιθανούς πίνακες μεταβλητότητας που ικανοποιούν το κριτήριο

$$tr(\mathbf{R}_{SS}) = m = 2 \quad (3.50)$$

Στην περίπτωση αυτή, αντίθετα με τη συμβατική θεωρία MIMO που περιγράφεται στην Ενότητα 3.4.4.1 και σύμφωνα με την οποία θα ίσχυε  $\mathbf{R}_{SS} = \mathbf{I}_2$ , λόγω των διαφορετικών μηκών  $L_i$  ( $i=1,2$ ) στους υποδιαύλους BS<sub>i</sub>-SS, η συνολική ισχύς εκπομπής  $P_T$  δεν πρέπει να ισοκατανεμηθεί αλλά, αντίθετα, πρέπει να ληφθεί υπόψη ο αντίστοιχος SNR. Συνεπώς, μια λογική υπόθεση για τον πίνακα μεταβλητότητας είναι

$$\mathbf{R}_{SS} = \begin{bmatrix} p & 0 \\ 0 & 2-p \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

όπου  $p$  αντιπροσωπεύει την ισχύ εκπομπής στον ισχυρότερο υποδιάυλο (*strong eigenmode*) (π.χ., η ραδιοζεύξη BS<sub>1</sub>-SS εάν  $L_1 \leq L_2$ ) και αποτελεί συνάρτηση των ονομαστικών τιμών των λόγων SNR υπό συνθήκες καθαρού ουρανού,  $SNR_{CSi}$  ( $i=1,2$ ). Με βάση τη σχέση (3.45) για το κέρδος διαύλου  $g_i$ , οι λόγοι  $SNR_{CSi}$  ( $i=1,2$ ) σχετίζονται μεταξύ τους (σε dB) μέσω της σχέσης

$$SNR_{CS1} - SNR_{CS2} = 20 \log_{10}(L_2/L_1) \quad (3.52)$$

Τροποποιώντας κατάλληλα την (3.25), το μέγεθος  $p$  μπορεί να υπολογιστεί ως λύση του ακόλουθου προβλήματος βελτιστοποίησης για την εργοδική χωρητικότητα

$$C_{CU} = \max_{0 \leq p \leq 2} \left\{ E_{\lambda_1} \left[ \log_2 \left( 1 + p \cdot \frac{P_T}{2N_0} \lambda_1 \right) \right] + E_{\lambda_2} \left[ \log_2 \left( 1 + (2-p) \cdot \frac{P_T}{2N_0} \lambda_2 \right) \right] \right\} \quad (3.53)$$

όπου  $E_{\lambda_i} [\cdot]$  συμβολίζει τον τελεστή αναμενόμενου μέσου όρου αναφορικά με την τ.μ.  $\lambda_i$  ( $i=1,2$ ) για τις διάφορες στιγμιαίες υλοποιήσεις του διαύλου  $\mathbf{H}$  (channel realizations). Σημειώνεται ότι αυτός ο χρονικός μέσος όρος για μακροπρόθεσμο χρονικό διάστημα είναι επιτρεπτός διότι η μακροπρόθεσμη κατανομή των διαλείψεων λόγω βροχής είναι γνωστή στον πομπό. Επίσης, όπως τονίζεται στο Παράρτημα I, η λογαριθμοκανονική κατανομή που περιγράφει τις διαλείψεις λόγω βροχής περιλαμβάνει τόσο τα χρονικά διαστήματα καθαρού ουρανού όσο και τα χρονικά διαστήματα όπου σημειώνεται βροχόπτωση. Συνεπώς, οι χρονικοί μέσοι όροι στην (3.53) αφορούν τόσο βροχερές όσο και άνυδρες χρονικές περιόδους. Κατ' επέκταση, η εργοδική χωρητικότητα καλύπτει τόσο τις βροχερές όσο και τις άνυδρες καταστάσεις του διαύλου.

Στη γενική υπό θεώρηση περίπτωση διαφορετικών μηκών  $L_i$  ( $i=1,2$ ), το πρόβλημα μπορεί να λυθεί μόνο αριθμητικά σε όλο το εύρος τιμών του SNR. Αν  $p_{opt}$  η βέλτιστη λύση για το ανωτέρω πρόβλημα βελτιστοποίησης και ληφθούν υπόψη οι υποθέσεις για το χαρακτηρισμό διαύλου που αναφέρθηκαν προηγουμένως, η στιγμιαία χωρητικότητα διαύλου που επιτυγχάνεται δίδεται από

$$C_{CU} = \log_2 \left( 1 + 0.5 \cdot p_{opt} \cdot SNR_{CS1} \cdot 10^{-AR1/10} \right) + \log_2 \left( 1 + 0.5 \cdot (2 - p_{opt}) \cdot SNR_{CS2} \cdot 10^{-AR2/10} \right) \quad (3.54)$$

Για τις ειδικές περιπτώσεις ασυμπτωτικά μικρού και ασυμπτωτικά μεγάλου λόγου SNR, αναλυτικές λύσεις στο πρόβλημα βελτιστοποίησης της (3.53) είναι εφικτές όπως αποδεικνύεται κατωτέρω:

- **Ασυμπτωτικά μικρό SNR:**

Με βάση την προσεγγιστική σχέση  $\log_2(1+x) \approx x \log_2 e$  όταν  $x \approx 0$ , το πρόβλημα βελτιστοποίησης της (3.53) επιλύεται ως εξής

$$\begin{aligned} C_{CU} &\approx E_{AR1} \left[ p \cdot \log_2 e \cdot 0.5 \cdot SNR_{CS1} \cdot 10^{-AR1/10} \right] + E_{AR2} \left[ (2-p) \cdot \log_2 e \cdot 0.5 \cdot SNR_{CS2} \cdot 10^{-AR2/10} \right] \\ &= p \cdot \log_2 e \cdot 0.5 \cdot E_{AR1} \left[ SNR_{CS1} \cdot 10^{-AR1/10} \right] + (2-p) \cdot \log_2 e \cdot 0.5 \cdot E_{AR2} \left[ SNR_{CS2} \cdot 10^{-AR2/10} \right] \end{aligned} \quad (3.55)$$



$$\frac{\partial C_{CU}}{\partial p} = \log_2 e \cdot 0.5 \cdot E_{AR1} \left[ SNR_{CS1} \cdot 10^{-AR1/10} \right] - \log_2 e \cdot 0.5 \cdot E_{AR2} \left[ SNR_{CS2} \cdot 10^{-AR2/10} \right] = const > 0$$

$$(3.56)$$

$$\Rightarrow p_{opt} = 2$$

$$(3.57)$$

δεδομένου ότι  $0 \leq p \leq 2$ .

Δηλαδή αποδεικνύεται ότι για χαμηλές τιμές SNR, η συνολική ισχύς εκπομπής κατανέμεται αποκλειστικά στον ισχυρότερο υποδίαυλο.

- **Ασυμπτωτικά μεγάλο SNR:**

Με βάση την προσεγγιστική σχέση  $\log_2(1+x) \approx \log_2 x$  όταν  $x \gg 1$ , το πρόβλημα βελτιστοποίησης της (3.53) επιλύεται ως εξής

$$C_{CU} \approx E_{AR1} \left[ \log_2 \left( p \cdot 0.5 \cdot SNR_{CS1} \cdot 10^{-AR1/10} \right) \right] + E_{AR2} \left[ \log_2 \left( (2-p) \cdot 0.5 \cdot SNR_{CS2} \cdot 10^{-AR2/10} \right) \right]$$

$$(3.58)$$

$$\frac{\partial C_{CU}}{\partial p} = \frac{1}{p} - \frac{1}{2-p} = 0$$

$$(3.59)$$

$$\Rightarrow p_{opt} = 1$$

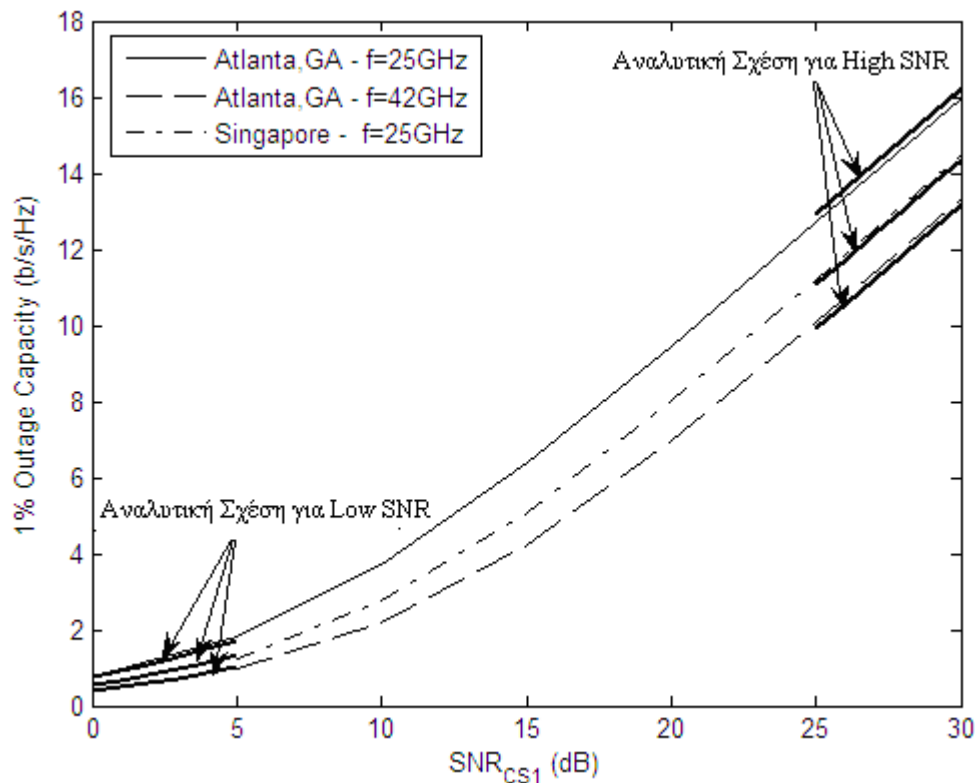
$$(3.60)$$

Δηλαδή αποδεικνύεται ότι για υψηλές τιμές του SNR, η συνολική ισχύς εκπομπής κατανέμεται ισομερώς σε κάθε υποδίαυλο.

Ωστόσο, δεδομένων των διαλείψεων λόγω βροχόπτωσης που είναι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας που προκαλούν αργές διαλείψεις στο δίαυλο, ο MIMO δίαυλος  $\mathbf{H}$  αποτελεί στοχαστικό δίαυλο. Στην περίπτωση αυτή, το καταλληλότερο στατιστικό μέτρο για την εκτίμηση της επίδοσης του διαύλου αποτελεί η *χωρητικότητα διακοπής* που ορίζεται μέσω της (3.31). Με βάση τις ανωτέρω αναλυτικές λύσεις για τις ειδικές περιπτώσεις ασυμπτωτικά μικρού και ασυμπτωτικά μεγάλου SNR καθώς και τις υποθέσεις για το χαρακτηρισμό διαύλου που αναφέρθηκαν προηγουμένως, χρήσιμες αναλυτικές εκφράσεις κλειστής μορφής μπορούν να προκύψουν για τη χωρητικότητα διακοπής του υπό θεώρηση 2x2 MIMO BFWA διαύλου, όπως αποδεικνύεται αναλυτικά στην εργασία [Liolis 2009c].

Στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζεται η εξάρτηση της 1% χωρητικότητας διακοπής που επιτυγχάνεται σε ένα 2x2 MIMO BFWA δίαυλο τόσο από τις κλιματικές συνθήκες όσο και από τη συχνότητα λειτουργίας. Η περιοχή εξυπηρέτησης του SS αναφέρεται στην

Ατλάντα, ΗΠΑ ή στη Σιγκαπούρη και η συχνότητα λειτουργίας του διαύλου είναι 25GHz ή 42GHz. Τα μήκη των ραδιοζεύξεων και η γωνιακή απόσταση είναι  $L_1=3\text{km}$ ,  $L_2=4\text{km}$ , και  $\Delta\psi=100^\circ$  (οπότε,  $\rho=0.5423$ ), αντίστοιχα. Οι στατιστικές παράμετροι  $A_{mR_i}$ ,  $S_{aR_i}$  ( $i=1,2$ ) των λογαριθμικών τ.μ.  $A_{R_i}$  ( $i=1,2$ ) που υπεισέρχονται στην ανάλυση δίδονται στον Πίνακα 3.1. Σημειώνεται ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται για τη χωρητικότητα διακοπής του διαύλου προέκυψαν μέσω προσομοιώσεων τύπου Monte Carlo και αναφέρονται σε προσομοίωση  $10^5$  στιγμιαίων υλοποιήσεων του διαύλου. Επίσης, μαζί με τα αποτελέσματα που προκύπτουν μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo, απεικονίζονται και τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλυτικές εκφράσεις για τη χωρητικότητα διακοπής, οι οποίες έχουν εξαχθεί στην εργασία [Liolis 2009c] για τις ειδικές περιπτώσεις του ασυμπτωτικά χαμηλού SNR και ασυμπτωτικά υψηλού SNR, αντίστοιχα.



**Σχήμα 3.9: 0.1% χωρητικότητα διακοπής 2x2 MIMO BFWA διαύλου συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR. Εξάρτηση από κλιματικές συνθήκες και συχνότητα λειτουργίας**

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.9, η συμφωνία που παρατηρείται μεταξύ των αναλυτικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης είναι πολύ καλή. Δεδομένου ότι οι κλιματικές συνθήκες στην Ατλάντα, ΗΠΑ, είναι περισσότερο ήπιες σε σχέση με αυτές που παρατηρούνται στη Σιγκαπούρη, οι αντίστοιχες διαλείψεις λόγω βροχής είναι λιγότερο ισχυρές. Συνεπώς, η χωρητικότητα διακοπής που επιτυγχάνεται από ένα 2x2 MIMO BFWA

δίαυλο που βρίσκεται στην Ατλάντα, ΗΠΑ, είναι υψηλότερη σε σχέση με εκείνη που επιτυγχάνεται από ένα παρόμοιο δίαυλο στη Σιγκαπούρη. Επιπλέον, όσο η συχνότητα λειτουργίας αυξάνει, οι διαλείψεις λόγω βροχής καθίστανται ισχυρότερες με αποτέλεσμα η χωρητικότητα διακοπής που επιτυγχάνεται να μειώνεται.

**Πίνακας 3.1: Παράμετροι υπό θεώρηση MIMO BFWA διαύλων που λαμβάνονται υπόψη για τα αποτελέσματα στο Σχήμα 3.9**

	Ατλάντα, ΗΠΑ $f=25\text{GHz}$ $(L_1, L_2)=(3,4)\text{km}$	Ατλάντα, ΗΠΑ $f=42\text{GHz}$ $(L_1, L_2)=(3,4)\text{km}$	Σιγκαπούρη $f=25\text{GHz}$ $(L_1, L_2)=(3,4)\text{km}$
$(A_{mR1}, S_{aR1})$	(0.0130, 2.0179)	(0.0845, 1.7429)	(0.0612, 1.7587)
$(A_{mR1}, S_{aR1})$	(0.0183, 1.992)	(0.1186, 1.7133)	(0.0859, 1.7292)

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την ανωτέρω ανάλυση MIMO BFWA διαύλων με χωρικά συσχετισμένες διαλείψεις λόγω βροχόπτωσης, ο αναγνώστης παραπέμπεται στην εργασία [Liolis 2009c].



## **Κεφάλαιο 4. Μοντέλα και Επιδόσεις MIMO Σταθερών Δορυφορικών Διαύλων σε Συχνότητες άνω των 10GHz**

Στο κεφάλαιο αυτό μελετώνται MIMO σταθεροί δορυφορικοί δίαυλοι που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχής. Για τη δημιουργία διαύλου πολλαπλών εισόδων – πολλαπλών εξόδων εξετάζονται τόσο ο διαφορισμός δορυφόρου όσο και ο διαφορισμός θέσης δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην περιγραφή του μοντέλου του αντιστοίχου διαύλου και στην εκτίμηση της επίδοσής του μέσω αναλυτικών εκφράσεων. Σημειώνεται ότι κάθε υποενότητα του κεφαλαίου αντιστοιχεί σε συνεισφορά της Διατριβής στη διεθνή βιβλιογραφία [Π2, Π7, Σ3, Σ6].

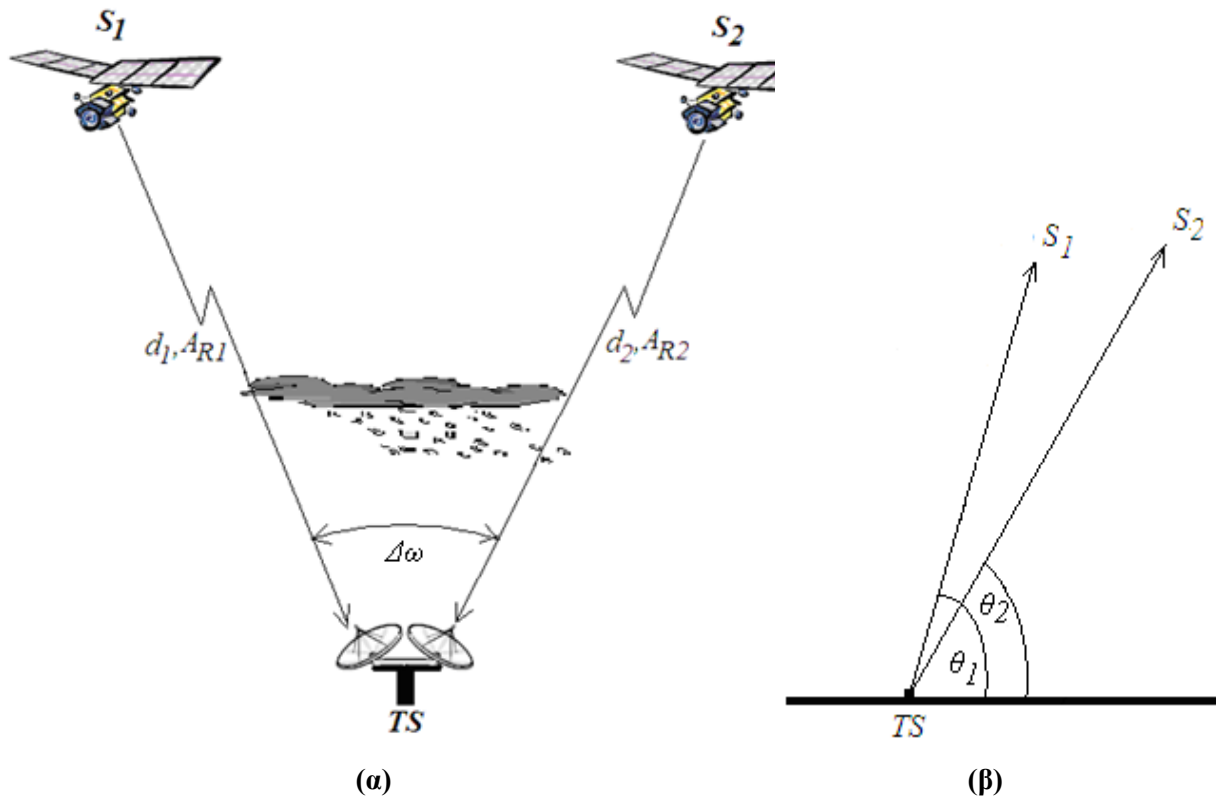
### **4.1. Μοντέλο και Χωρητικότητα MIMO Σταθερού Δορυφορικού Διαύλου με Διαφορισμό Δορυφόρου σε Συχνότητες άνω των 10GHz**

Στην ενότητα αυτή λαμβάνονται υπόψη MIMO σταθεροί δορυφορικοί δίαυλοι που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz στους οποίους οι πολλαπλές εισοδοί – πολλαπλές εξοδοί προκύπτουν με εφαρμογή της τεχνικής διαφορισμού δορυφόρου.

#### **4.1.1. Ανάλυση**

Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται η διάταξη του υπό θεώρηση 2x2 MIMO δορυφορικού διαύλου όπου εφαρμόζεται διπλός διαφορισμός δορυφόρου. Συγκεκριμένα, λαμβάνεται υπόψη η κάτω ζεύξη. Ο σταθερός τερματικός σταθμός TS (Terminal Station) διατηρεί ταυτόχρονα συνδέσεις και με τους δύο δορυφόρους,  $S_1$  και  $S_2$ , διαθέτοντας δύο κατευθυντικές κεραιές με κοινό κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας  $G_R(\cdot)$ . Οι αποστάσεις των κεκλιμένων ραδιοδρόμων  $S_i$ -TS ( $i=1,2$ ) είναι  $d_i$  ( $i=1,2$ ) και οι αποσβέσεις που εισάγονται λόγω βροχής κατά μήκος των αντιστοίχων ενεργών μηκών  $L_i$  ( $i=1,2$ ) (δηλαδή των αντιστοίχων τμημάτων των κεκλιμένων ραδιοδρόμων προς το δορυφόρο που βρίσκονται υπό βροχή) είναι  $A_{Ri}$  ( $i=1,2$ ). Οι δύο δορυφόροι  $S_1$  και  $S_2$  σχηματίζουν γωνιακή απόσταση ως προς τον TS ίση με  $\Delta\omega$ . Όσον αφορά τις γωνίες ανύψωσης των κεκλιμένων ραδιοδρόμων που υπεισέρχονται κατά την ανάλυση του προβλήματος συμβολίζονται με

$\theta_i (i=1,2)$  και θεωρείται η γενική περίπτωση όπου  $\theta_1 \neq \theta_2$ . Η πόλωση του συστήματος θεωρείται απλή γραμμική.



**Σχήμα 4.1:** Διάταξη 2x2 MIMO δορυφορικού διαύλου με διπλό διαφορισμό δορυφόρου που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz υπό διαλείψεις λόγω βροχόπτωσης

Υποθέτοντας ότι υπάρχει καθαρή οπτική επαφή LOS και στις δύο ραδιοζεύξεις  $S_i$ -TS ( $i=1,2$ ) καθώς και ότι οι διαλείψεις λόγω βροχής αποτελούν τον κυριότερο μηχανισμό διαλείψεων (οι διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης αγνοούνται λόγω της υψηλής κατευθυντικότητας των κεραιών του TS), για το κέρδος διαύλου  $g_i$  για κάθε ραδιοζεύξη  $S_i$ -TS ( $i=1,2$ ) ισχύει

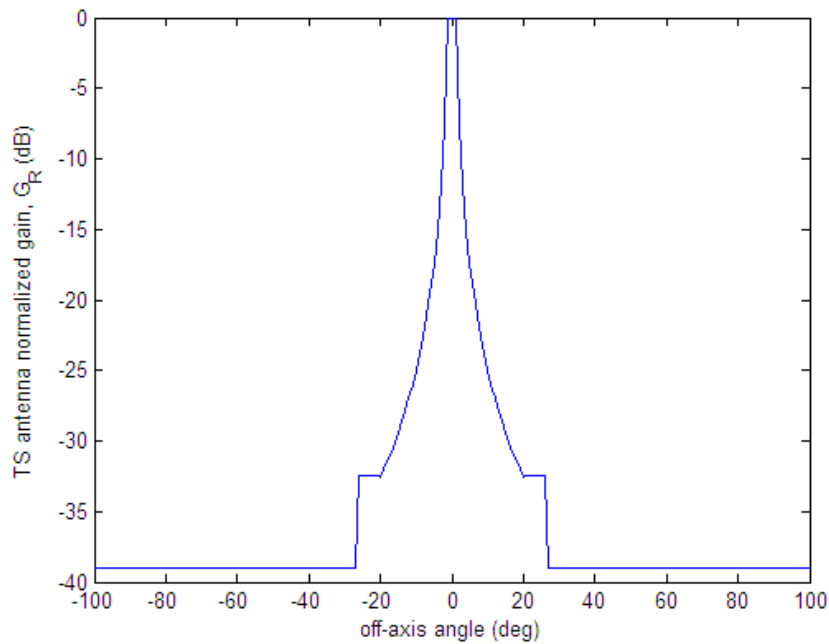
$$g_i \propto G_R(\psi_i) \cdot d_i^{-2} \cdot 10^{-A_{Ri}/10} \quad (i=1,2) \quad (4.1)$$

Δηλαδή οι συνολικές αποσβέσεις που προκαλούν οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας σε κάθε ραδιοζεύξη  $S_i$ -TS ( $i=1,2$ ) είναι (σε dB)

$$A_i = \Delta_{G_{R,i}} + FSL_i + A_{Ri} \quad (i=1,2) \quad (4.2)$$

Στην (4.1),  $\psi_i$  ( $i=1,2$ ) είναι η γωνία απόκλισης (off-axis angle) που σχηματίζει η διεύθυνση του ραδιοδρόμου  $S_i$ -TS με τη διεύθυνση κατά την οποία μεγιστοποιείται το κατευθυντικό κέρδος της κεραίας δέκτη του σταθμού TS. Στην (4.2)  $\Delta_{G_{R,i}}$  ( $i=1,2$ ) είναι η απόσβεση που

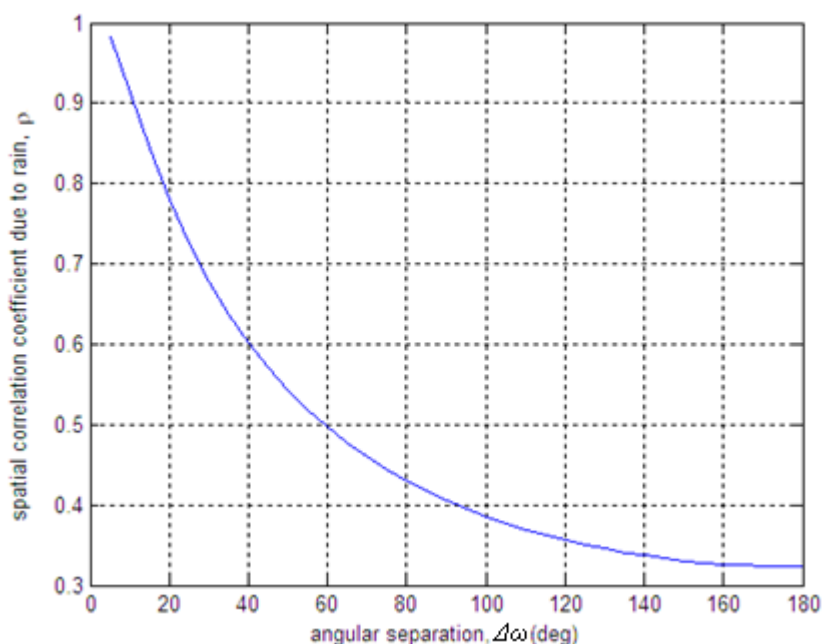
εισάγεται από την απώλεια στόχευσης έκαστης των κεραιών λήψης του σταθμού TS προς τον αντίστοιχο δορυφόρο  $S_i$  ( $i=1,2$ ). Στο Σχήμα 4.2 έχει σχεδιαστεί το κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας  $G_R(\cdot)$  που θεωρείται κοινό για έκαστη των κεραιών λήψης του σταθμού TS και είναι συμβατό με τις συστάσεις της ITU-R [ITU580]. Δεδομένης της υψηλής κατευθυντικότητας των κεραιών, θεωρείται ότι  $\psi_i = 0^\circ$  ( $i=1,2$ ) με αποτέλεσμα  $\Delta G_{R,i} = 0dB$  ( $i=1,2$ ), αντίστοιχα. Δηλαδή, έκαστη των κεραιών λήψης του σταθμού TS είναι προσανατολισμένη κατά βέλτιστο τρόπο προς τον αντίστοιχο δορυφόρο  $S_i$  ( $i=1,2$ ).



**Σχήμα 4.2: Κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας  $G_R(\cdot)$  συμβατό με τις ITU-R συστάσεις [ITU580] έκαστης των κεραιών λήψης του σταθμού TS**

Επιπλέον, στην (4.2)  $FSL_i = 10 \log_{10} (4\pi d_i f / c)^2$  είναι οι απώλειες διάδοσης ελευθέρου χώρου σε κάθε ραδιοζεύξη, όπου  $f$  η συχνότητα λειτουργίας. Για το χαρακτηρισμό των τ.μ.  $A_{Ri}$  ( $i=1,2$ ) και της χωρικής ανομοιογένειας του φυσικού μέσου βροχής, λαμβάνεται υπόψη το φυσικό-στατιστικό μοντέλο που περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα I. Σε αυτή την περίπτωση, οι τ.μ.  $A_{Ri}$  ( $i=1,2$ ) ακολουθούν τη δισδιάστατη από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή με στατιστικές παραμέτρους  $A_{mRi}, S_{aRi}$  ( $i=1,2$ ), ενώ οι κανονικές τ.μ.  $\ln(A_{Ri})$  ( $i=1,2$ ) είναι χωρικά συσχετισμένες μεταξύ τους με συντελεστή συσχέτισης  $\rho_n$ . Στο Σχήμα 4.3 απεικονίζεται ο συντελεστής συσχέτισης  $\rho$  των λογαριθμικών τ.μ.  $A_{Ri}$  ( $i=1,2$ ), ο οποίος σχετίζεται με τον ανωτέρω συντελεστή συσχέτισης  $\rho_n$  των κανονικών τ.μ.  $\ln(A_{Ri})$  ( $i=1,2$ ) μέσω της σχέσης (III.39). Σύμφωνα με το Σχήμα 4.3, όσο μεγαλύτερη είναι η γωνιακή

απόσταση  $\Delta\omega$ , τόσο λιγότερο συσχετίζονται χωρικά στο MIMO δορυφορικό δίαυλο οι διαλείψεις λόγω βροχοπτώσης.



**Σχήμα 4.3:** Χωρικός συντελεστής συσχέτισης λόγω βροχοπτώσεων συναρτήσει της γωνιακής απόστασης  $\Delta\omega$  για  $2 \times 2$  MIMO δορυφορικό δίαυλο με διπλό διαφορισμό δορυφόρου που λειτουργεί στην Ka ζώνη συχνοτήτων και με γωνίες ανύψωσης  $\theta_1=45^\circ$  και  $\theta_2=40^\circ$

Με βάση τις ανωτέρω παραδοχές και θεωρώντας δίαυλο με επίπεδες διαλείψεις ως προς τη συχνότητα (λόγω της υψηλής κατευθυντικότητας των κεραιών του TS), ο πίνακας  $\mathbf{H}$  που προκύπτει για τον υπό μελέτη  $2 \times 2$  MIMO δορυφορικό δίαυλο περιγράφεται από τη σχέση

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{g_1} \exp(j\omega_1) & 0 \\ 0 & \sqrt{g_2} \exp(j\omega_2) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

όπου οι φάσεις  $\omega_i$  ( $i=1,2$ ) θεωρούνται ομοιόμορφα κατανομημένες στο διάστημα  $[0,2\pi)$ .

Στο σημείο αυτό τονίζεται η σχετική ομοιότητα μεταξύ των πινάκων  $\mathbf{H}$  της (4.3) και της (3.48), όπου παρατηρείται διαγώνια μορφή και στις δύο περιπτώσεις. Συνεπώς, ισχύουν αντίστοιχες παρατηρήσεις που ήδη αναφέρθηκαν στην Ενότητα 3.7.4 για τους σχηματιζόμενους «παράλληλους» MIMO υποδιαύλους. Επιπλέον, τονίζεται ότι λόγω των διαφορετικών γωνιών ανύψωσης των κεκλιμένων ραδιοδρόμων  $\theta_i$  ( $i=1,2$ ), οι συνολικές αποσβέσεις διαδρομής  $A_i$  ( $i=1,2$ ) κατά μήκος κάθε ραδιοζεύξης  $S_i$ -TS ( $i=1,2$ ) δεν είναι ίσες. Ως εκ τούτου, ο ανωτέρω πίνακας  $\mathbf{H}$  (όπως και αυτός στην (3.48)) δεν μπορεί να κανονικοποιηθεί. Επιπλέον, οι διαφορετικές γωνίες ανύψωσης των κεκλιμένων ραδιοδρόμων  $\theta_i$  ( $i=1,2$ ) εισάγουν απόκλιση στο χρόνο λήψης του σήματος λόγω



διαφορετικής καθυστέρησης διάδοσής του σε κάθε ραδιοζεύξη (delay offset), που προκαλεί πρόβλημα ασυγχρονισμού. Η απόκλιση αυτή είναι εγγενής σε κάθε καταναμημένο σύστημα επικοινωνίας, όπως π.χ., τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και τα δίκτυα συνεργατικού διαφορισμού [Mietzner 2004],[Nosratinia 2004],[Wei 2006],[Li 2003], όπου οι διάφορες πολλαπλές κεραιές εκπομπής και λήψης είναι καταναμημένες σε διάφορους κόμβους του δικτύου. Αντίθετα, η απόκλιση αυτή δεν συναντάται στη συμβατική περίπτωση διαύλων MIMO διότι εκεί οι διάφορες πολλαπλές κεραιές είναι τοποθετημένες όλες μαζί στη πλευρά του πομπού (ή και του δέκτη, αντίστοιχα). Η επίλυση του προβλήματος έλλειψης συγχρονισμού πραγματοποιείται με χρήση τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (DSP, Digital Signal Processing), γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα των πομποδεκτών. Ωστόσο, δεδομένου ότι η Διατριβή επικεντρώνεται στη διατύπωση μοντέλων διαύλων MIMO και δεν υπεισέρχεται σε θέματα αντιστοίχων τεχνικών MIMO, η επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος δεν θα απασχολήσει περαιτέρω, μολονότι λαμβάνεται υπόψη στο μοντέλο διαλείψεων του διαύλου MIMO.

Στη συνέχεια, υποτίθεται ότι ο πίνακας διαύλου  $\mathbf{H}$  είναι πλήρως γνωστός στο δέκτη TS και άγνωστος στους πομπούς των δορυφόρων  $S_1$  και  $S_2$ . Εφόσον δεν υπάρχει πλήρης γνώση της κατάστασης του διαύλου CSI (Channel State Information) στην πλευρά εκπομπής, η τεχνική ισοκατανομής της ισχύος στους δύο υποδιαύλους αποτελεί την αναμενόμενη επιλογή (βλ. Ενότητα 3.4.4.1). Συνεπώς, η στιγμιαία χωρητικότητα (για την ακρίβεια, η μέγιστη αμοιβαία πληροφορία που μπορεί να μεταδοθεί μέσω του διαύλου) για ντετερμινιστικό πίνακα διαύλου  $\mathbf{H}$  δίδεται από την (3.25), η οποία στην προκειμένη περίπτωση γράφεται υπό τη μορφή

$$C = \log_2 \det \left( \mathbf{I}_2 + \frac{P_T}{2N_0} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) = \sum_{i=1}^2 \log_2 \left( 1 + \frac{P_T}{2N_0} \lambda_i \right) \quad (4.4)$$

όπου  $\lambda_i$  ( $i=1,2$ ) οι ιδιοτιμές του πίνακα  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$  και  $P_T$  η συνολική ισχύς εκπομπής που διαθέτουν από κοινού οι δύο δορυφόροι  $S_i$  ( $i=1,2$ ). Λαμβάνοντας υπόψη τις ανωτέρω υποθέσεις για το μοντέλο διαύλου, η (4.4) τροποποιείται ως εξής

$$C = \sum_{i=1}^2 \log_2 \left( 1 + 0.5 SNR_{CSi} 10^{-ARi/10} \right) \quad (4.5)$$

όπου  $SNR_{CSi}$  ( $i=1,2$ ) οι ονομαστικές τιμές των λόγων SNR υπό συνθήκες καθαρού ουρανού οι οποίες, με βάση την (4.1) για το κέρδος διαύλου  $g_i$ , συνδέονται μεταξύ τους (σε dB) μέσω της σχέσης

$$SNR_{CS1} - SNR_{CS2} = 20 \log_{10}(d_2/d_1) \quad (4.6)$$

Ωστόσο, εξαιτίας των διαλείψεων λόγω βροχόπτωσης, οι οποίες είναι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας που επιφέρουν αργές διαλείψεις στο διάλυο, ο MIMO διάλυλος  $\mathbf{H}$  αποτελεί στοχαστικό διάλυο. Στην περίπτωση αυτή, το καταλληλότερο στατιστικό μέτρο για την εκτίμηση της επίδοσης του διαλύου αποτελεί η *χωρητικότητα διακοπής* που ορίζεται μέσω της (3.31). Λαμβάνοντας υπόψη τις θεωρήσεις φυσικο-στατιστικής περιγραφής των τ.μ. απόσβεσης λόγω βροχής  $A_{Ri}$  ( $i=1,2$ ) που αναφέρθηκαν προηγουμένως και περιγράφονται αναλυτικά στο Παράρτημα I, το μετασχηματισμό της (2.8) για τις κανονικές τ.μ.  $u_i$  ( $i=1,2$ ), με αντικατάσταση της (4.5) στην (3.31) και ακολουθώντας τις διαδικασίες μετασχηματισμού ολοκληρωμάτων που αναπτύσσονται στο Παράρτημα III, η χωρητικότητα διακοπής του υπό θεώρηση 2x2 MIMO δορυφορικού διαλύου  $C_{out,q}$  συνδέεται με την πιθανότητα διακοπής  $q$  μέσω της σχέσης

$$P(C \leq C_{out,q}) = \frac{1}{2} \int_{u_A(C_{out,q})}^{+\infty} du f_U(u) \operatorname{erfc} \left( \frac{u_B(C_{out,q}) - \rho_n u}{\sqrt{2(1-\rho_n^2)}} \right) = q \quad (4.7)$$

όπου  $\operatorname{erfc}(\cdot)$  η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος,  $f_U(u)$  η σ.π.π. της κανονικής κατανομής, και οι ποσότητες  $u_A, u_B$  δίδονται από τις σχέσεις

$$u_A(C_{out,q}) = \left[ \ln \left( 10 \log_{10}(0.5 \cdot SNR_{CS2}) - 10 \log_{10} \left( 2^{C_{out,q}} - 1 \right) \right) - \ln(A_{mR2}) \right] / S_{aR2} \quad (4.8)$$

$$u_B(C_{out,q}) = \left[ \ln \left( 10 \log_{10}(0.5 SNR_{CS1}) + 10 \log_{10} \left( 1 + 0.5 SNR_{CS2} \cdot 10^{-A_{mR2} \exp(u_1 S_{aR2}) / 10} \right) \right) - 10 \log_{10} \left( 2^{C_{out,q}} - 1 - 0.5 SNR_{CS2} \cdot 10^{-A_{mR2} \exp(u_1 S_{aR2}) / 10} \right) - \ln(A_{mR1}) \right] / S_{aR1} \quad (4.9)$$

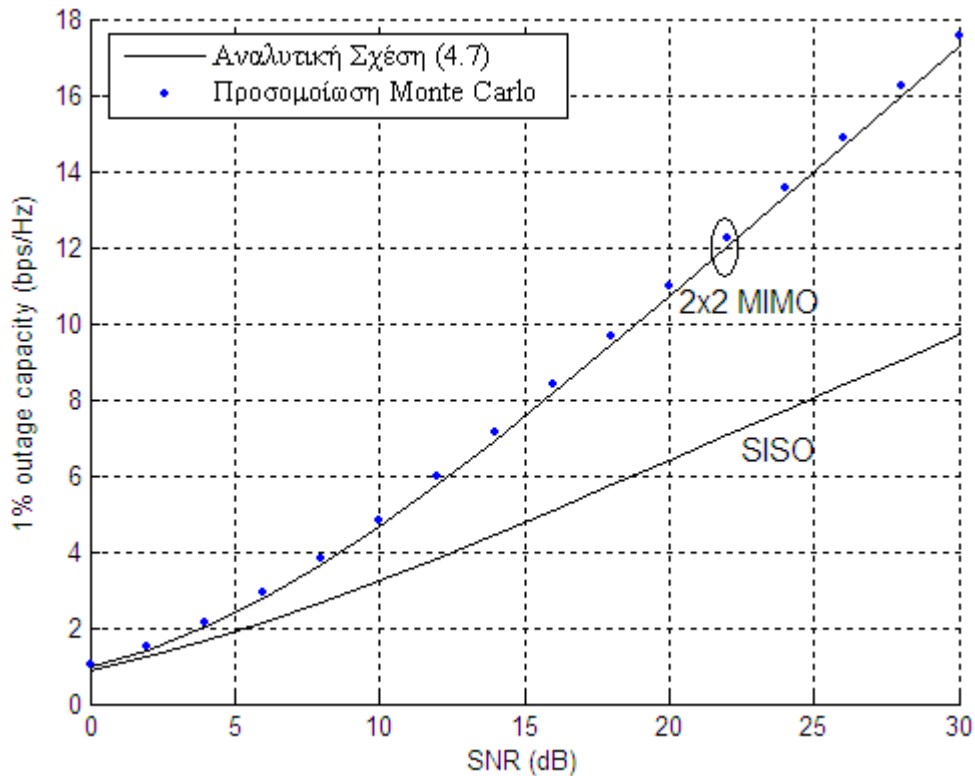
Όπως παρατηρείται από την (4.7), η προσδιοριστέα χωρητικότητα διακοπής  $C_{out,q}$  εμφανίζεται στο κάτω όριο του ολοκληρώματος.

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις φυσικές παραμέτρους  $A_{mRi}, S_{aRi}$  ( $i=1,2$ ) και  $\rho_n$ , που αφορούν στο σύνολό τους το φυσικο-στατιστικό μοντέλο περιγραφής των διαλείψεων λόγω βροχόπτωσης και του φυσικού μέσου βροχής, ο αναγνώστης παραπέμπεται στο Παράρτημα I.

#### 4.1.2. Αριθμητικά Αποτελέσματα

Στη συνέχεια παρατίθενται διάφορα αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούν τη μαθηματική ανάλυση που μόλις παρουσιάστηκε. Συγκεκριμένα, θεωρείται 2x2 MIMO δορυφορικός διάυλος που λειτουργεί στην Ka ζώνη συχνοτήτων υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχόπτωσης στην Ατλάντα, ΗΠΑ. Οι γωνίες ανύψωσης είναι  $\theta_1=45^\circ$  και  $\theta_2=40^\circ$ , ενώ η γωνιακή απόσταση των δύο δορυφόρων ως προς τον TS  $\Delta\omega=40^\circ$  αντιστοιχεί σε χωρικό συντελεστή συσχέτισης λόγω βροχόπτωσης  $\rho=0.6$  (βλ. Σχήμα 4.3). Σημειώνεται ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται για τη χωρητικότητα διακοπής του διαύλου προέκυψαν μέσω προσομοιώσεων τύπου Monte Carlo και αναφέρονται σε προσομοίωση  $10^5$  στιγμιαίων υλοποιήσεων του διαύλου. Για λόγους σύγκρισης, σε κάθε σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται και η χωρητικότητα διακοπής των αντιστοίχων SISO διαύλων.

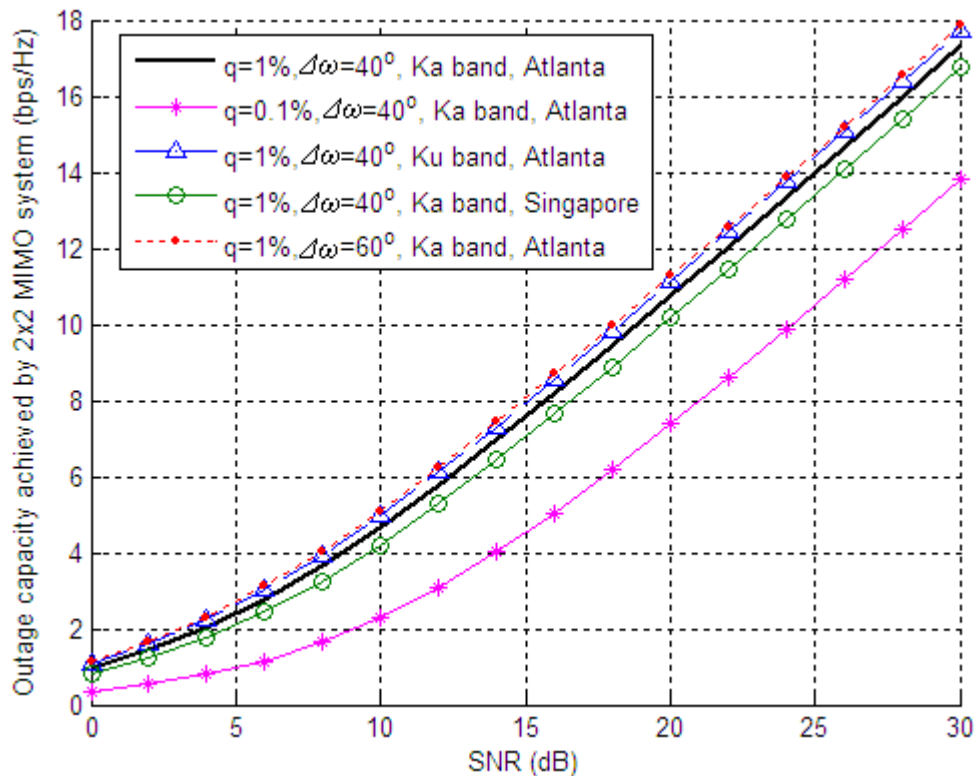
Το Σχήμα 4.4 απεικονίζει την 1% χωρητικότητα διακοπής του υπό θεώρηση 2x2 MIMO δορυφορικού διαύλου συναρτήσει του  $SNR_{CSI}$  (δηλαδή, του σηματοθορυβικού λόγου του επικρατέστερου υποδιαύλου υπό συνθήκες καθαρού ουρανού δεδομένου ότι  $\theta_1 > \theta_2$ ). Μαζί με τα αναλυτικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την αναλυτική σχέση (4.7), τα αποτελέσματα προσομοίωσης Monte Carlo σχεδιάζονται, επίσης, για λόγους επαλήθευσης. Η συμφωνία που παρατηρείται μεταξύ των αναλυτικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης είναι πολύ καλή για όλο το εύρος μεταβολής του SNR. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.4, η απόσταση μεταξύ των καμπυλών MIMO και SISO μειώνεται για πολύ χαμηλές τιμές SNR ενώ γίνεται σημαντική για υψηλές τιμές του SNR. Για παράδειγμα, για  $SNR=10\text{dB}$ , η φασματική απόδοση που επιτυγχάνεται μέσω διαύλου MIMO είναι 4.84bps/Hz ενώ αυτή που επιτυγχάνεται μέσω διαύλου SISO είναι 3.23bps/Hz. Αυτό συνιστά αύξηση του ρυθμού μετάδοσης κατά περίπου 50%, η οποία επιτυγχάνεται μέσω της τεχνολογίας MIMO. Για  $SNR=20\text{dB}$ , τα αντίστοιχα μεγέθη που προκύπτουν είναι 10.95bps/Hz και 6.41bps/Hz που αντιστοιχούν σε περίπου 71% αύξηση του ρυθμού μετάδοσης. Συνεπώς, το κέρδος χωρητικότητας που επιτυγχάνεται μέσω του προτεινόμενου 2x2 MIMO δορυφορικού διαύλου σε σχέση με το συμβατικό δίαυλο SISO αποδεικνύεται ότι είναι σημαντικό.



**Σχήμα 4.4: 1% χωρητικότητα διακοπής 2x2 MIMO δορυφορικού διαύλου με διαφορισμό δορυφόρου στη Ka ζώνη συχνοτήτων συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR. Επαλήθευση αναλυτικής σχέσης (4.7) μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo**

Το Σχήμα 4.5 παρουσιάζει την εξάρτηση της χωρητικότητας διακοπής που επιτυγχάνεται σε ένα 2x2 MIMO δορυφορικό δίαυλο με διπλό διαφορισμό δορυφόρου από την πιθανότητα διακοπής  $q$ , τη γωνιακή απόσταση  $\Delta\omega$ , τη συχνότητα λειτουργίας  $f$  και τις κλιματικές συνθήκες. Όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται εδώ έχουν προκύψει με βάση την αναλυτική σχέση (4.7). Για το σκοπό αυτό, λαμβάνεται υπόψη το υπό θεώρηση βασικό σενάριο μαζί με τέσσερα ακόμη υποθετικά σενάρια που αφορούν διαφορετικές τιμές των αντιστοίχων παραμέτρων (βλ. Σχήμα 4.5). Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.5, όταν η συχνότητα λειτουργίας  $f$  αυξάνεται, οι διαλείψεις λόγω βροχόπτωσης γίνονται εντονότερες, με αποτέλεσμα να μειώνεται η χωρητικότητα διακοπής του 2x2 MIMO δορυφορικού διαύλου. Επίσης, δεδομένου ότι οι κλιματικές συνθήκες στην Ατλάντα, ΗΠΑ, είναι ηπιότερες σε σχέση με της Σιγκαπούρης, οι διαλείψεις λόγω βροχόπτωσης είναι και αυτές λιγότερο ισχυρές. Συνεπώς, η χωρητικότητα διακοπής που επιτυγχάνεται από ένα 2x2 MIMO δορυφορικό δίαυλο που βρίσκεται στην Ατλάντα, ΗΠΑ, είναι υψηλότερη σε σύγκριση με εκείνη που επιτυγχάνεται από παρόμοιο δίαυλο στη Σιγκαπούρη. Επιπλέον, όσο η γωνιακή απόσταση  $\Delta\omega$  αυξάνεται (από  $40^\circ$  στις  $60^\circ$ ), ο χωρικός συντελεστής συσχέτισης λόγω βροχής μειώνεται (από 0.6 σε 0.5, βλ. Σχήμα 4.3) και η χωρητικότητα

διακοπής που επιτυγχάνεται αυξάνεται ελαφρώς, αντίστοιχα. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη περίπτωση, δεν παρατηρείται σημαντική αύξηση της χωρητικότητας λόγω μείωσης της χωρικής συσχέτισης ανάλογης με αυτή που παρατηρείται γενικά στη περίπτωση μείωσης της χωρικής συσχέτισης στις διαλείψεις μικρής κλίμακας με βάση τη θεωρία MIMO (βλ. Ενότητα 3.7.3). Επίσης, όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.5, όσο μειώνεται η πιθανότητα διακοπής  $q$  μειώνεται και η χωρητικότητα διακοπής  $C_{out,q}$ · το πόσο μειώνεται εξαρτάται από το είδος του διαύλου, το πλήθος εισόδων/εξόδων αυτού, κτλ.



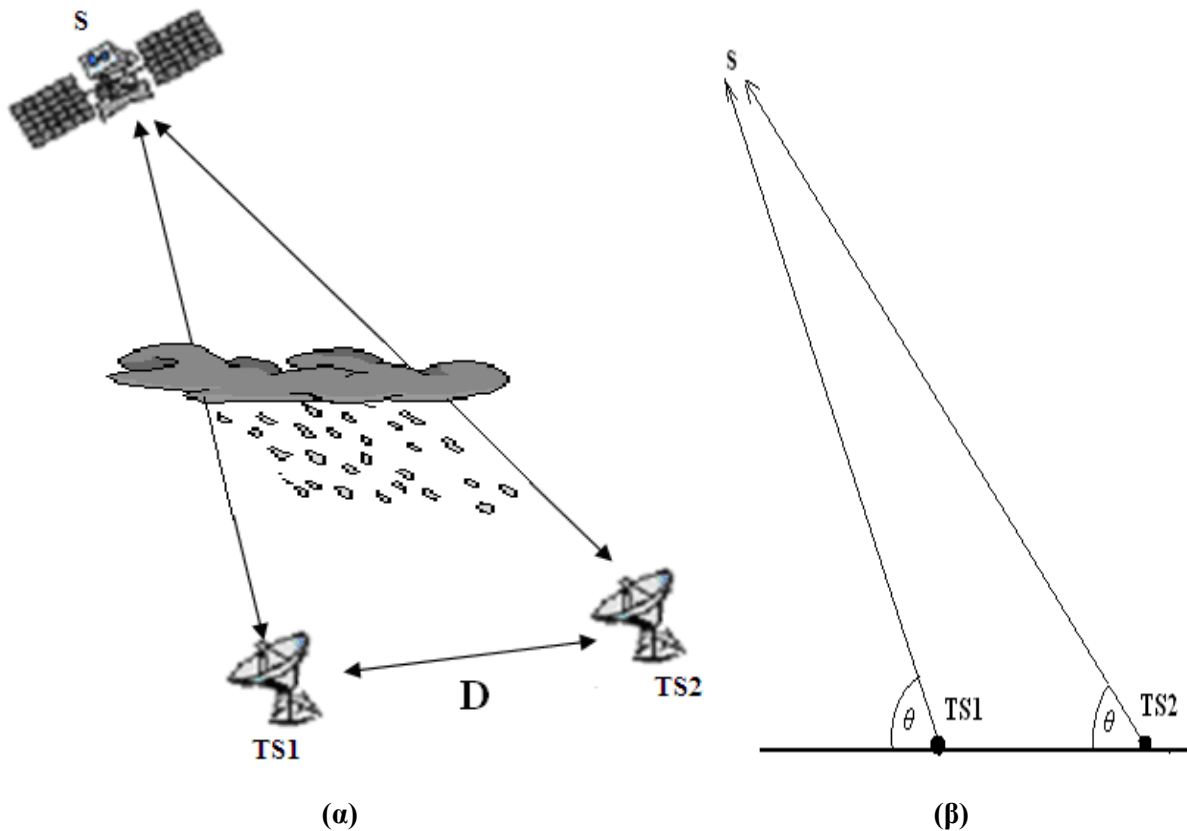
Σχήμα 4.5: Χωρητικότητα διακοπής 2x2 MIMO δορυφορικού διαύλου με διαφορισμό δορυφόρου συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR. Εξάρτηση από κλιματικές συνθήκες και συχνότητα λειτουργίας

## 4.2. Μοντέλο και Χωρητικότητα SIMO/MISO Σταθερού Δορυφορικού Διαύλου με Διαφορισμό Θέσης σε Συχνότητες άνω των 10GHz

Στην ενότητα αυτή θεωρούνται SIMO και MISO σταθεροί δορυφορικοί δίαυλοι που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz στους οποίους οι πολλαπλές έξοδοι και είσοδοι, αντίστοιχα, προκύπτουν με εφαρμογή της τεχνικής διαφορισμού θέσης.

### 4.2.1. Ανάλυση

Στο Σχήμα 4.6 απεικονίζεται η διάταξη του υπό θεώρηση δορυφορικού διαύλου όπου εφαρμόζεται διπλός διαφορισμός θέσης.



Σχήμα 4.6: Διάταξη δορυφορικού διαύλου με διπλό διαφορισμό θέσης που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz υπό διαλείψεις λόγω βροχόπτωσης. Η κάτω ζεύξη αντιστοιχεί σε 2x1 SIMO ενώ η άνω ζεύξη αντιστοιχεί σε 1x2 MISO δορυφορικό δίαυλο.

Συγκεκριμένα, λαμβάνεται υπόψη τόσο η κάτω ζεύξη όσο και η άνω ζεύξη. Η κάτω ζεύξη αντιστοιχεί σε 2x1 SIMO ενώ η άνω ζεύξη αντιστοιχεί σε 1x2 MISO δορυφορικό δίαυλο. Οι δύο σταθεροί τερματικοί σταθμοί  $TS_1$  και  $TS_2$  διαθέτουν κατευθυντική κεραία με κοινό κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας  $G_R(\cdot)$ , ενώ διατηρούν ταυτόχρονα συνδέσεις με το δορυφόρο S. Η απόσταση μεταξύ των τερματικών σταθμών  $TS_1$  και  $TS_2$  είναι ίση με  $D$ . Οι γωνίες ανύψωσης  $\theta$  των κεκλιμένων ραδιοδρόμων, που υπεισέρχονται κατά την ανάλυση του προβλήματος, θεωρούνται μεταξύ τους ίσες [Panagoroulos 2004a] με αποτέλεσμα οι αποστάσεις  $d$  των κεκλιμένων ραδιοδρόμων S- $TS_i$  ( $i=1,2$ ) να είναι και αυτές ίσες μεταξύ τους καθώς επίσης και τα αντίστοιχα ενεργά μήκη  $L$ . Αντίστοιχα, οι αποσβέσεις που εισάγονται λόγω βροχής κατά μήκος των αντιστοιχών ενεργών μηκών  $L$  είναι διαφορετικές,

$A_{Ri}$  ( $i=1,2$ ), χαρακτηρίζονται, όμως, από τις ίδιες στατιστικές παραμέτρους  $A_{mR}, S_{aR}$ . Επίσης, λόγω της διαφορετικής συχνότητας λειτουργίας στην κάτω και την άνω ζεύξη του δορυφορικού διαύλου, η κατανομή των τ.μ.  $A_{Ri}$  ( $i=1,2$ ) για κάθε ζεύξη είναι αντίστοιχα διαφορετική.

Λαμβάνοντας υπόψη ανάλογες παραδοχές με αυτές της Ενότητας 4.1 όσον αφορά το μοντέλο κέρδους διαύλου  $g_i$  και θεωρώντας επίσης δίαυλο με επίπεδες διαλείψεις ως προς τη συχνότητα (λόγω της υψηλής κατευθυντικότητας των κεραιών των TS<sub>1</sub> και TS<sub>2</sub>), οι πίνακες  $\mathbf{h}_{dl}$  και  $\mathbf{h}_{ul}$  που προκύπτουν για την κάτω και την άνω ζεύξη του υπό μελέτη δορυφορικού διαύλου περιγράφονται, αντίστοιχα, ως εξής

$$\mathbf{h} = \begin{cases} \mathbf{h}_d = \begin{bmatrix} h_{1d} & h_{2d} \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{h}_u = \begin{bmatrix} h_{1u} & h_{2u} \end{bmatrix} \end{cases} = \begin{cases} \exp(j2\pi df_d / c) \begin{bmatrix} \sqrt{g_{1d}} & \sqrt{g_{2d}} \end{bmatrix}^T & SIMO \\ \exp(j2\pi df_u / c) \begin{bmatrix} \sqrt{g_{1u}} & \sqrt{g_{2u}} \end{bmatrix} & MISO \end{cases} \quad (4.10)$$

όπου ο  $[\cdot]^T$  συμβολίζει τον ανάστροφο ενός πίνακα και οι δείκτες  $d$  και  $u$  την κάτω και την άνω ζεύξη, αντίστοιχα.

Ο πίνακας διαύλου  $\mathbf{h}$  θεωρείται απολύτως γνωστός στην πλευρά λήψης και άγνωστος στην πλευρά εκπομπής. Με βάση την ανάλυση των Ενοτήτων 3.4.2 και 3.4.3.1, η στιγμιαία χωρητικότητα για ντετερμινιστικό πίνακα διαύλου  $\mathbf{h}$  δίδεται από τις σχέσεις (3.20) και (3.23) για τις υπό μελέτη περιπτώσεις της κάτω και της άνω ζεύξης, αντίστοιχα. Οι σχέσεις αυτές στην προκειμένη περίπτωση γράφονται υπό τη μορφή

$$C = \begin{cases} \log_2 \left( 1 + SNR_d \cdot 10^{-\frac{AR_{1,d}}{10}} + SNR_d \cdot 10^{-\frac{AR_{2,d}}{10}} \right) & SIMO \\ \log_2 \left( 1 + \frac{SNR_u}{2} \cdot 10^{-\frac{AR_{1,u}}{10}} + \frac{SNR_u}{2} \cdot 10^{-\frac{AR_{2,u}}{10}} \right) & MISO \end{cases} \quad (4.11)$$

όπου  $SNR_x$  ( $x=d,u$ ) οι διαφορετικές στη γενική περίπτωση ονομαστικές τιμές των σηματοθορυβικών λόγων SNR υπό συνθήκες καθαρού ουρανού στις αντίστοιχες περιπτώσεις της κάτω και της άνω ζεύξης. Με προσεκτική παρατήρηση της (4.11), προκύπτει ότι και στις δύο περιπτώσεις SIMO (downlink) και MISO (uplink), η στιγμιαία χωρητικότητα  $C$  δίδεται από την ίδια έκφραση. Το γεγονός αυτό απλοποιεί τους υπολογισμούς στο εξής και ενοποιεί την ανάλυση των δύο διαφορετικών περιπτώσεων. Δηλαδή,

$$C = \log_2 \left[ 1 + SNR \cdot \left( 10^{-\frac{A_{R1}}{10}} + 10^{-\frac{A_{R2}}{10}} \right) \right] \quad (4.12)$$

όπου

$$\{SNR, A_{Ri}\} = \begin{cases} \{SNR_d, A_{Ri,d}\} & SIMO \\ \{SNR_u/2, A_{Ri,u}\} & MISO \end{cases} \quad (i=1,2) \quad (4.13)$$

Ωστόσο, δεδομένων των διαλείψεων λόγω βροχοπτώσης, οι οποίες είναι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας που επιφέρουν αργές διακυμάνσεις στο διάυλο, τα στοιχεία του πίνακα διαύλου  $\mathbf{h}$  είναι τ.μ.. Στην περίπτωση αυτή, το καταλληλότερο στατιστικό μέτρο για την εκτίμηση της επίδοσης του διαύλου αποτελεί η *χωρητικότητα διακοπής* όπως ορίζεται μέσω της (3.31). Λαμβάνοντας υπόψη τις θεωρήσεις φυσικο-στατιστικής περιγραφής των τ.μ. απόσβεσης λόγω βροχής  $A_{Ri}$  ( $i=1,2$ ) που περιγράφονται αναλυτικά στο Παράρτημα I, το μετασχηματισμό της (2.8) για τις κανονικές τ.μ.  $u_i$  ( $i=1,2$ ), με αντικατάσταση της (4.12) στην (3.31) και ακολουθώντας τις διαδικασίες μετασχηματισμού ολοκληρωμάτων που αναπτύσσονται στο Παράρτημα III, η κοινή χωρητικότητα διακοπής  $C_{out,q}$  των υπό θεώρηση 2x1 SIMO και 1x2 MISO δορυφορικών διαύλων στην περίπτωση της κάτω και της άνω ζεύξης, αντίστοιχα, συνδέεται με την πιθανότητα διακοπής  $q$  μέσω της σχέσης

$$P(C \leq C_{out,q}) = \frac{1}{2} \int_{K(C_{out,q})}^{+\infty} du f_U(u) \operatorname{erfc} \left( \frac{\Lambda(C_{out,q}) - \rho_n u}{\sqrt{2(1-\rho_n^2)}} \right) = q \quad (4.14)$$

όπου

$$K(C_{out,q}) = \frac{\ln \left[ 10 \log_{10} \left( \frac{SNR}{2^{C_{out,q}} - 1} \right) / A_m \right]}{S_a} \quad (4.15)$$

$$\Lambda(C_{out,q}) = \frac{\ln \left[ 10 \log_{10} \left( \frac{SNR}{2^{C_{out,q}} - 1 - SNR \cdot 10^{-\frac{A_m \exp(u \cdot S_a)}{10}}} \right) / A_m \right]}{S_a} \quad (4.16)$$

Όπως παρατηρείται από την (4.14), η προσδιοριστέα χωρητικότητα διακοπής  $C_{out,q}$  εμφανίζεται στο κάτω όριο του ολοκληρώματος.



#### 4.2.2. Αριθμητικά Αποτελέσματα

Στη συνέχεια το προτεινόμενο αναλυτικό μοντέλο της (4.14) επαληθεύεται αριθμητικά μέσω προσομοιώσεων τύπου Monte Carlo, οι οποίες αναφέρονται σε προσομοίωση  $10^5$  στιγμιαίων υλοποιήσεων του διαύλου. Επίσης, εξετάζεται η επίδραση διαφόρων γεωμετρικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών του δορυφορικού διαύλου με διαφορισμό θέσης στην κατανομή της χωρητικότητας διακοπής. Όλα τα αριθμητικά αποτελέσματα θεωρούν αποστάσεις διαχωρισμού  $D \leq 2\text{km}$  που αναφέρονται σε αποστάσεις διαφορισμού θέσης μικρής κλίμακας (micro-scale site diversity). Για τις αποστάσεις αυτές έχει προκύψει βάσει πειραματικών μετρήσεων [Matricciani 2003] ότι ο χωρικός συντελεστής συσχέτισης  $\rho$  μεταξύ των λογαριθμικών τ.μ.  $A_{Ri}$  ( $i=1,2$ ) μπορεί να εκφραστεί προσεγγιστικά συναρτήσει της απόστασης  $D$  μέσω της γραμμικής σχέσης

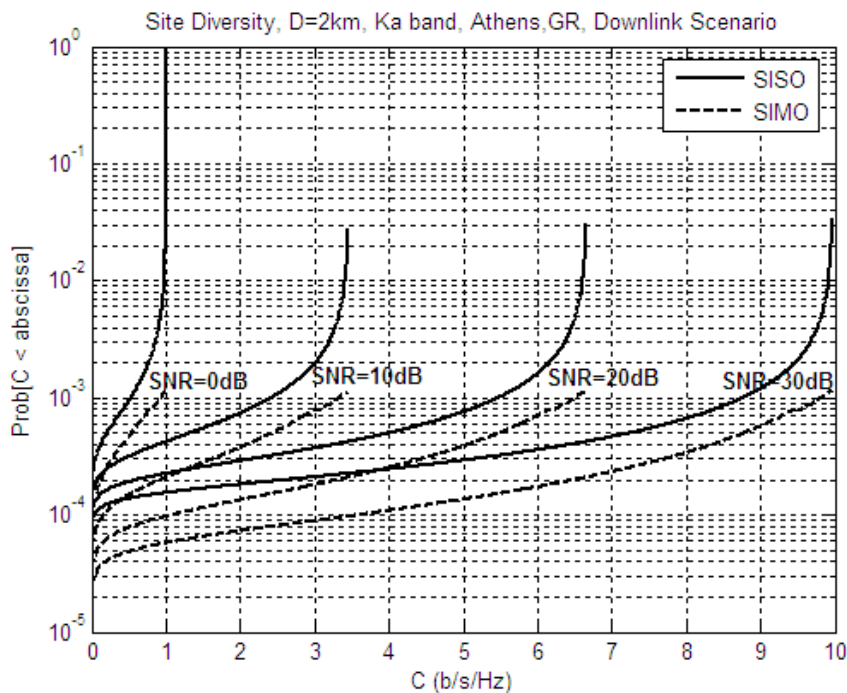
$$\rho = -\frac{1}{15}D + \frac{11}{15}, \quad 0.5\text{km} \leq D \leq 2\text{km} \quad (4.17)$$

Για λόγους σύγκρισης, σε κάθε σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται και η χωρητικότητα διακοπής των αντιστοίχων SISO διαύλων.

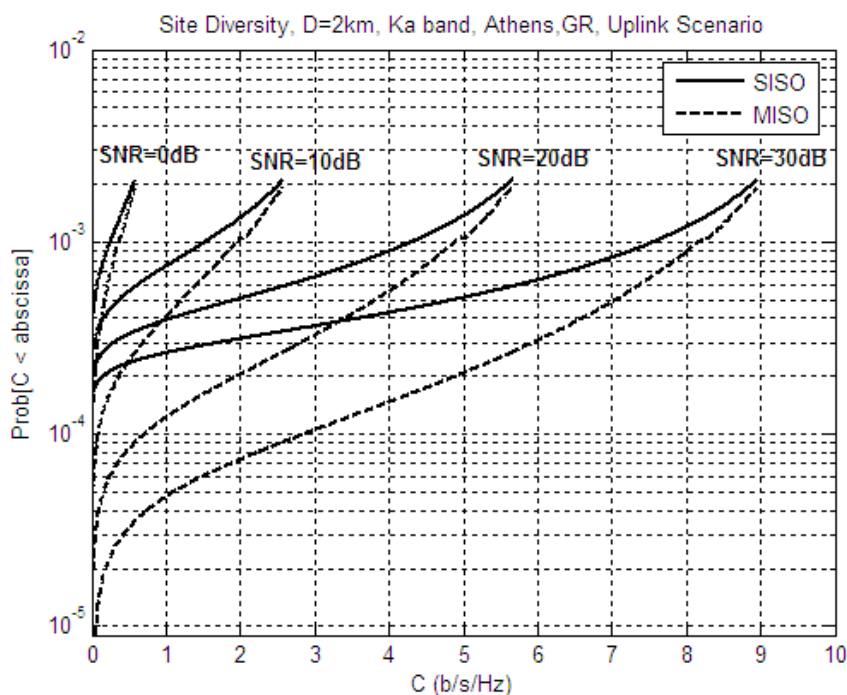
Το Σχήμα 4.7 απεικονίζει τη συνάρτηση αθροιστικής κατανομής της χωρητικότητας που επιτυγχάνεται σε  $2 \times 1$  SIMO δορυφορικό δίαυλο με διαφορισμό θέσης, που αντιστοιχεί στην κάτω ζεύξη του υπό θεώρηση διαύλου. Επίσης, θεωρείται η  $K_a$  ως ζώνη συχνοτήτων, η Αθήνα ως περιοχή εξυπηρέτησης και  $D=2\text{km}$  ως απόσταση διαχωρισμού μεταξύ των  $TS_1$  και  $TS_2$ . Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.7, η διαφορά μεταξύ των αντιστοίχων SIMO και SISO καμπυλών αυξάνει με το SNR. Στο Σχήμα 4.8, απεικονίζεται η συμμετρική περίπτωση του σεναρίου της άνω ζεύξης (MISO). Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται μικρότερο κέρδος χωρητικότητας μεταξύ των αντιστοίχων καμπυλών MISO και SISO, το οποίο μειώνεται με την αύξηση της πιθανότητας διακοπής  $q$ . Αν, για λόγους σύγκρισης, οι διάφορες διατάξεις του δορυφορικού διαύλου διερευνηθούν όλες υπό τους ίδιους περιορισμούς ισχύος εκπομπής, δηλαδή για μια κοινή στάθμη SNR, θα προκύψει η ακόλουθη διάταξη των χωρητικοτήτων διακοπής

$$C_{SIMO,d} > C_{SISO,d} > C_{MISO,u} > C_{SISO,u}$$

Η διάταξη αυτή είναι αναμενόμενη λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταξύ των σεναρίων της κάτω και της άνω ζεύξης, όπως π.χ., η διαφορετική συχνότητα λειτουργίας  $f$ , όπου  $f_d \ll f_u$ .



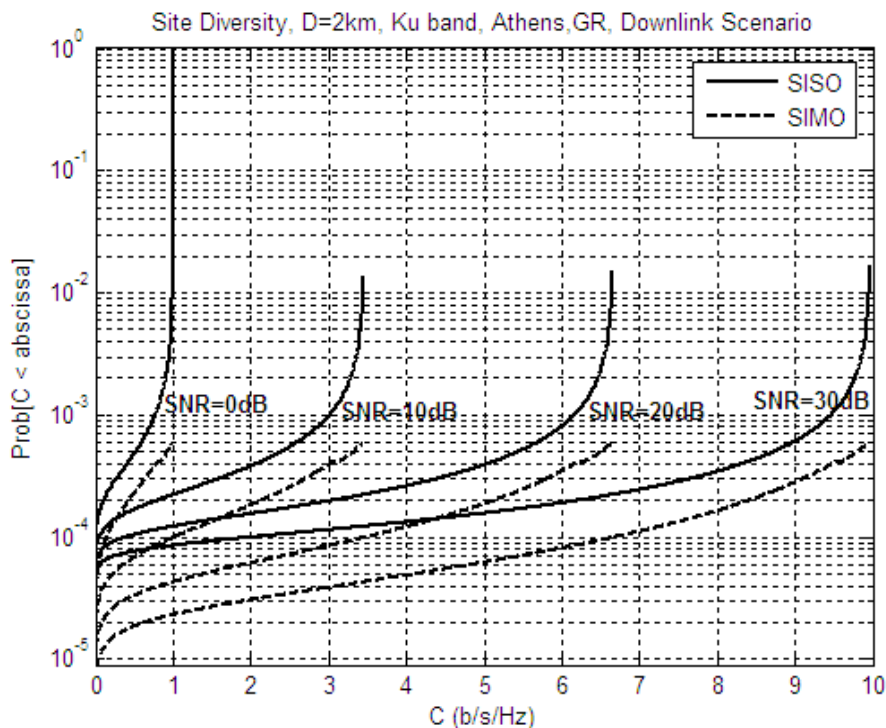
Σχήμα 4.7: Συνάρτηση Αθροιστικής Κατανομής της χωρητικότητας σε 2x1 SIMO δορυφορικό διάυλο με διαφορισμό θέσης που αντιστοιχεί στην κάτω ζεύξη. (Ζώνη συχνοτήτων: Ka, περιοχή εξυπηρέτησης: Αθήνα και απόσταση διαχωρισμού: D=2km)



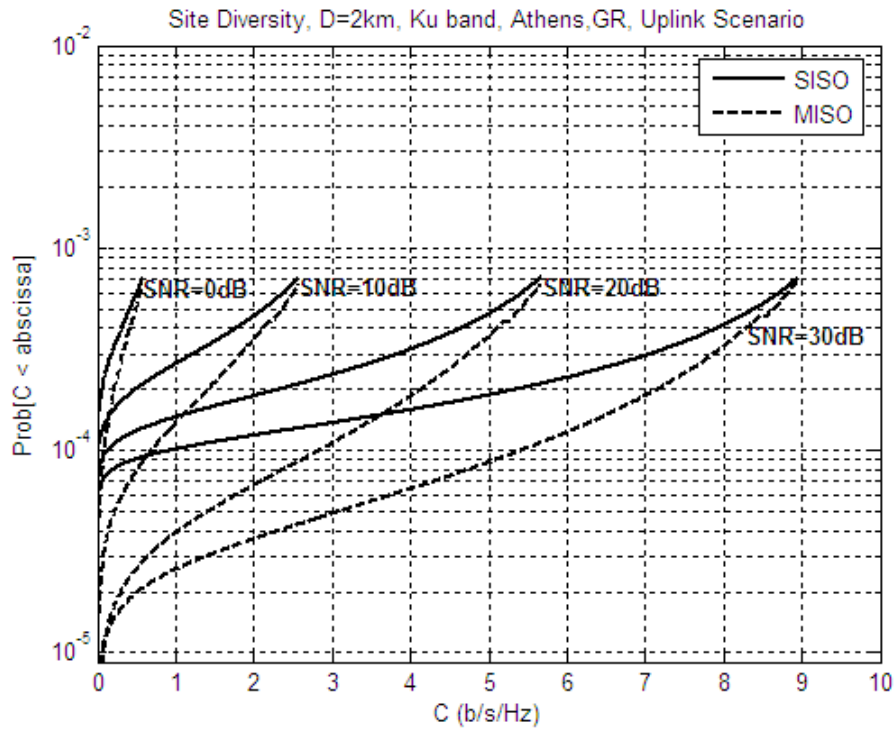
Σχήμα 4.8: Συνάρτηση Αθροιστικής Κατανομής της χωρητικότητας σε 1x2 MISO δορυφορικό διάυλο με διαφορισμό θέσης που αντιστοιχεί στην άνω ζεύξη. (Ζώνη συχνοτήτων: Ka, περιοχή εξυπηρέτησης: Αθήνα και απόσταση διαχωρισμού: D=2km)

Παρόμοιες επιδόσεις του υπό θεώρηση διαύλου όσον αφορά την κατανομή χωρητικότητας μπορούν να παρατηρηθούν στα σχήματα που παρατίθενται στη συνέχεια, δηλαδή, από Σχήμα 4.9 έως Σχήμα 4.12, τα οποία χαρακτηρίζουν SIMO και MISO δορυφορικούς

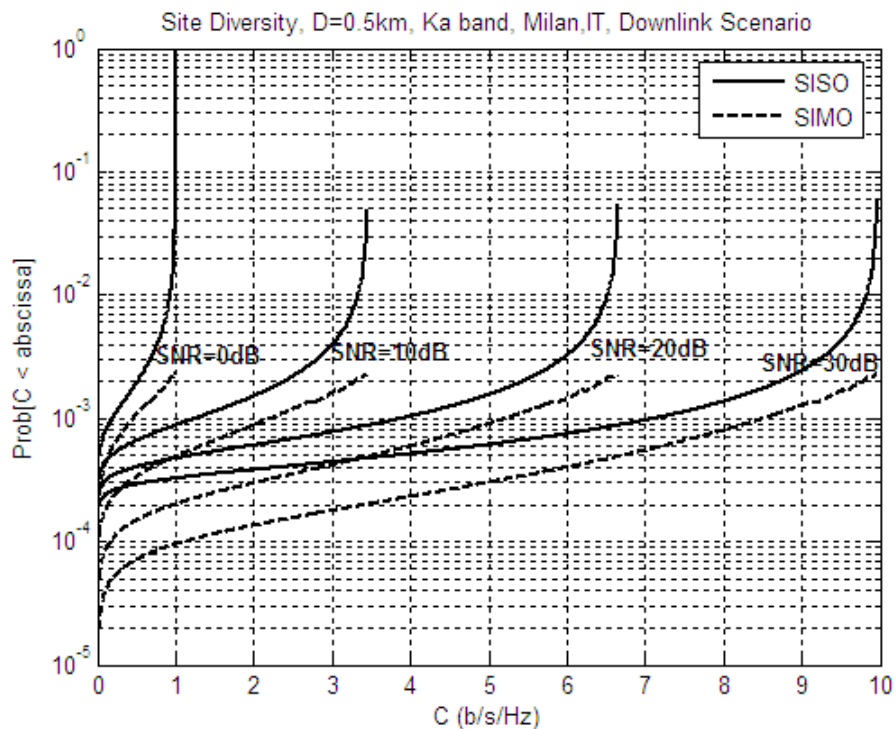
διαύλους με διαφορισμό θέσης με αντίστοιχα διαφορετικά φασματικά και κλιματικά χαρακτηριστικά. Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι, όταν η συχνότητα λειτουργίας αυξάνεται ή οι κλιματικές συνθήκες στην περιοχή εξυπηρέτησης καθίστανται δυσμενέστερες από πλευράς βροχοπτώσεων, οι διαλείψεις που προκαλούνται λόγω βροχοπτώσεων στο δίαυλο αυξάνονται, με αποτέλεσμα η χωρητικότητα διακοπής που επιτυγχάνεται στο δίαυλο να μειώνεται στις αντίστοιχες περιπτώσεις. Ωστόσο, ενδιαφέρον προκαλεί το γεγονός ότι δεν παρατηρείται σημαντική επίπτωση της απόστασης διαχωρισμού  $D$  στη χωρητικότητα διακοπής που επιτυγχάνεται κατά περίπτωση διαύλου. Δηλαδή, προκύπτει σχετικά μικρή διαφοροποίηση της χωρητικότητας διακοπής που επιτυγχάνεται και στις δύο υπό θεώρηση περιπτώσεις SIMO και MISO όταν η απόσταση διαχωρισμού  $D$  μεταβάλλεται εντός του εύρους αποστάσεων μικρής κλίμακας  $0.5\text{km} \leq D \leq 2\text{km}$ . Η παρατήρηση αυτή είναι σε συμφωνία με την αντίστοιχη της Ενότητας 4.1, όπου επίσης δεν παρατηρείται σημαντική αύξηση της χωρητικότητας διακοπής λόγω μείωσης της χωρικής συσχέτισης και διαφοροποιείται σε σχέση με τη θεωρία MIMO (βλ. Ενότητα 3.7.3). Πράγματι, στην τελευταία περίπτωση, παρατηρείται γενικά σημαντική αύξηση της χωρητικότητας διακοπής όταν μειώνεται η χωρική συσχέτιση των διαλείψεων μικρής κλίμακας.



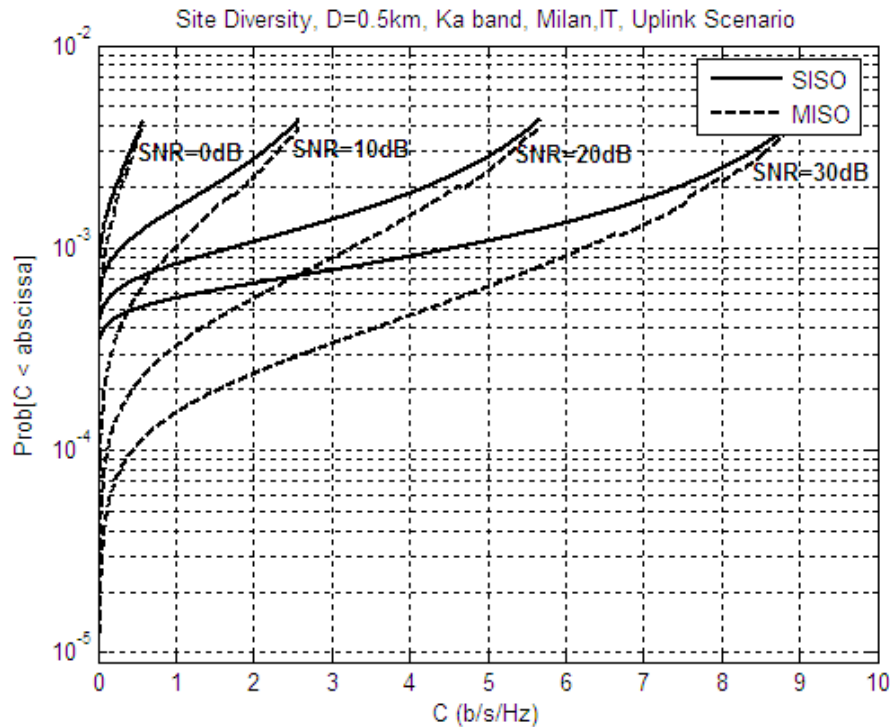
**Σχήμα 4.9:** Συνάρτηση Αθροιστικής Κατανομής της χωρητικότητας σε 2x1 SIMO δορυφορικό δίαυλο με διαφορισμό θέσης που αντιστοιχεί στην κάτω ζεύξη. (Ζώνη συχνοτήτων: Ku, περιοχή εξυπηρέτησης: Αθήνα και απόσταση διαχωρισμού:  $D=2\text{km}$ )



Σχήμα 4.10: Συνάρτηση Αθροιστικής Κατανομής της χωρητικότητας σε 1x2 MISO δορυφορικό δίαυλο με διαφορισμό θέσης που αντιστοιχεί στην άνω ζεύξη. (Ζώνη συχνοτήτων: Ku, περιοχή εξυπηρέτησης: Αθήνα και απόσταση διαχωρισμού:  $D=2\text{km}$ )



Σχήμα 4.11: Συνάρτηση Αθροιστικής Κατανομής της χωρητικότητας σε 2x1 SIMO δορυφορικό δίαυλο με διαφορισμό θέσης που αντιστοιχεί στην κάτω ζεύξη. (Ζώνη συχνοτήτων: Ka, περιοχή εξυπηρέτησης: Μιλάνο και απόσταση διαχωρισμού:  $D=0.5\text{km}$ )



Σχήμα 4.12: Συνάρτηση Αθροιστικής Κατανομής της χωρητικότητας σε 1x2 MISO δορυφορικό δίαυλο με διαφορισμό θέσης που αντιστοιχεί στην άνω ζεύξη. (Ζώνη συχνοτήτων: Ka, περιοχή εξυπηρέτησης: Μιλάνο και απόσταση: διαχωρισμού  $D=0.5\text{km}$ )

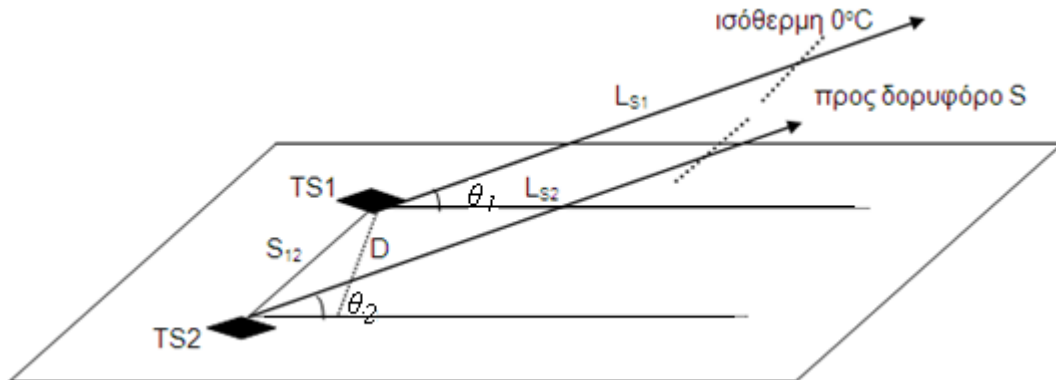
### 4.3. Πιθανότητα Διακοπής λόγω Σφαλμάτων Μετάδοσης Ψηφίων σε SIMO Σταθερό Δορυφορικό Δίαυλο με Διαφορισμό Θέσης σε Συχνότητες άνω των 10GHz

Στην ενότητα αυτή λαμβάνονται υπόψη SIMO σταθεροί δορυφορικοί δίαυλοι που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz και στους οποίους οι πολλαπλές έξοδοι προκύπτουν μέσω της τεχνικής διαφορισμού θέσης.

#### 4.3.1. Ανάλυση

Συγκεκριμένα, θεωρείται η κάτω ζεύξη του δορυφορικού διαύλου με διπλό διαφορισμό θέσης όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.6. Θεωρείται δηλαδή 2x1 SIMO δορυφορικός δίαυλος για τον οποίο ισχύουν όλες οι παραδοχές περιγραφής διαύλου που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 4.2.1, εκτός από τη θεώρηση της γενικής περίπτωσης κατά την οποία οι γωνίες ανύψωσης είναι διαφορετικές  $\theta_1 \neq \theta_2$  (βλ. Σχήμα 4.13). Επιπλέον, θεωρείται ότι τα σήματα διαφορεικής λήψης των δύο σταθερών τερματικών σταθμών  $TS_1$  και  $TS_2$

συνδυάζονται με χρήση της βέλτιστης μεθόδου συνδυασμού σημάτων διαφορικής λήψης MRC [Proakis 2001]. Ως σχήμα διαμόρφωσης θεωρείται ενδεικτικά η BPSK (Binary Phase Shift Keying) διαμόρφωση. Ωστόσο, η ανάλυση που παρουσιάζεται κατωτέρω μπορεί να επεκταθεί και για σχήματα διαμόρφωσης μεγαλύτερης τάξης.



Σχήμα 4.13: Γενική περίπτωση διάταξης διπλού διαφορισμού θέσης όπου  $\theta_1 \neq \theta_2$ .

Στην παρούσα ενότητα ενδιαφέρει η μελέτη του στατιστικού μέτρου της Πιθανότητας Διακοπής λόγω Σφαλμάτων Μετάδοσης Ψηφίων (Bit Error Outage Probability, BEOP) [Conti 2003a], [Conti 2003b],[Mary 2007],[Mary 2009]

$$BEOP = \Pr[BEP \geq BEP_{th}] \quad (4.18)$$

όπου BEP η πιθανότητα λάθους του συστήματος και  $BEP_{th}$  το κατώφλιο BEP πάνω από το οποίο το σύστημα τίθεται σε προσωρινή διακοπή (outage). Όπως στην περίπτωση της χωρητικότητας διακοπής, η πιθανότητα BEOP χρησιμοποιείται κυρίως για την εκτίμηση της επίδοσης διαύλων που εμφανίζουν διαλείψεις μεγάλης κλίμακας που προκαλούν αργές διακυμάνσεις.

Λαμβάνοντας υπόψη τις υποθέσεις περί χρήσης BPSK και MRC συνδυασμού των σημάτων διαφορικής λήψης, η στιγμιαία πιθανότητα λάθους του υπό θεώρηση δορυφορικού διαύλου (θεωρώντας ντετερμινιστικό πίνακα διαύλου  $\mathbf{h}$ ) γράφεται υπό τη μορφή [Proakis 2001]

$$BEP = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{N_0} \|\mathbf{h}\|_F^2} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{N_0} \sum_{i=1}^2 |h_i|^2} \right) \quad (4.19)$$

όπου  $\|\cdot\|_F$  συμβολίζει τη Frobenius νόρμα ενός πίνακα και  $E_b/N_0$  ο λόγος ενέργειας ψηφίου προς φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου στην είσοδο του MRC δέκτη. Θεωρώντας ανάλογες παραδοχές με αυτές της Ενότητας 4.1 όσον αφορά το μοντέλο διαύλου, η (4.19) τροποποιείται ως εξής

$$BEP = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\sum_{i=1}^2 \eta_i 10^{-A_{Ri}/10}} \right) \quad (4.20)$$

όπου  $\eta_i$  συμβολίζει το μέσο σηματοθορυβικό λόγο λήψης SNR σε κάθε υποδίαυλο S-TS<sub>i</sub> ( $i=1,2$ ) υπό συνθήκες καθαρού ουρανού. Οι λόγοι  $\eta_i$  ( $i=1,2$ ) συνδέονται μεταξύ τους μέσω της σχέσης (4.6), η οποία στην προκειμένη περίπτωση γράφεται υπό τη μορφή

$$\eta_1/\eta_2 = (d_2/d_1)^2 \quad (4.21)$$

Σημειώνεται ότι η ποσότητα

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{E_b}{N_0} \|\mathbf{h}\|_F^2 = \frac{E_b}{N_0} \sum_{i=1}^2 |h_i|^2 = \sum_{i=1}^2 \eta_i 10^{-A_{Ri}/10} \quad (4.22)$$

που εμφανίζεται στις σχέσεις (4.19) και (4.20) αποτελεί τον ενεργό σηματοθορυβικό λόγο που προκύπτει από το βέλτιστο συνδυασμό των σημάτων λήψης στην είσοδο του MRC δέκτη (*effective* MRC combined SNR).

Από την (4.20) προκύπτει ότι, όταν οι  $A_{Ri}$  ( $i=1,2$ ) είναι τ.μ. και η BEP είναι τ.μ. της οποίας η στατιστική κατανομή μελετάται μέσω της πιθανότητας BEOP της (4.18). Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη τις θεωρήσεις φυσικο-στατιστικού χαρακτηρισμού των τ.μ. απόσβεσης λόγω βροχής  $A_{Ri}$  ( $i=1,2$ ) που περιγράφονται αναλυτικά στο Παράρτημα I, το μετασχηματισμό της (2.8) για τις κανονικές τ.μ.  $u_i$  ( $i=1,2$ ), με αντικατάσταση της (4.20) στην (4.18) και ακολουθώντας τις διαδικασίες μετασχηματισμού ολοκληρωμάτων που αναπτύσσονται στο Παράρτημα III, η πιθανότητα BEOP του υπό θεώρηση SIMO δορυφορικού διαύλου εκφράζεται ως εξής

$$BEOP = \Pr \left[ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\sum_{i=1}^2 \eta_i 10^{-A_{Ri}/10}} \right) \geq BEP_{th} \right] = \Pr \left[ \eta_{\text{eff}} \leq \left( \operatorname{erfc}^{-1} (2BEP_{th}) \right)^2 \right] \Rightarrow$$

$$BEOP = \frac{1}{2} \int_{\Omega(BEP_{th})}^{+\infty} \operatorname{d}f_U(u) \operatorname{erfc} \left[ \frac{(\Psi(BEP_{th}) - \rho_n u)}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}} \right] \quad (4.23)$$

όπου

$$\Omega(BEP_{th}) = \frac{\ln \left[ 10 \log_{10} \left( \frac{\eta_2}{\left( \operatorname{erfc}^{-1} (2BEP_{th}) \right)^2} \right) \right] - \ln A_{m2}}{S_{a2}} \quad (4.24)$$

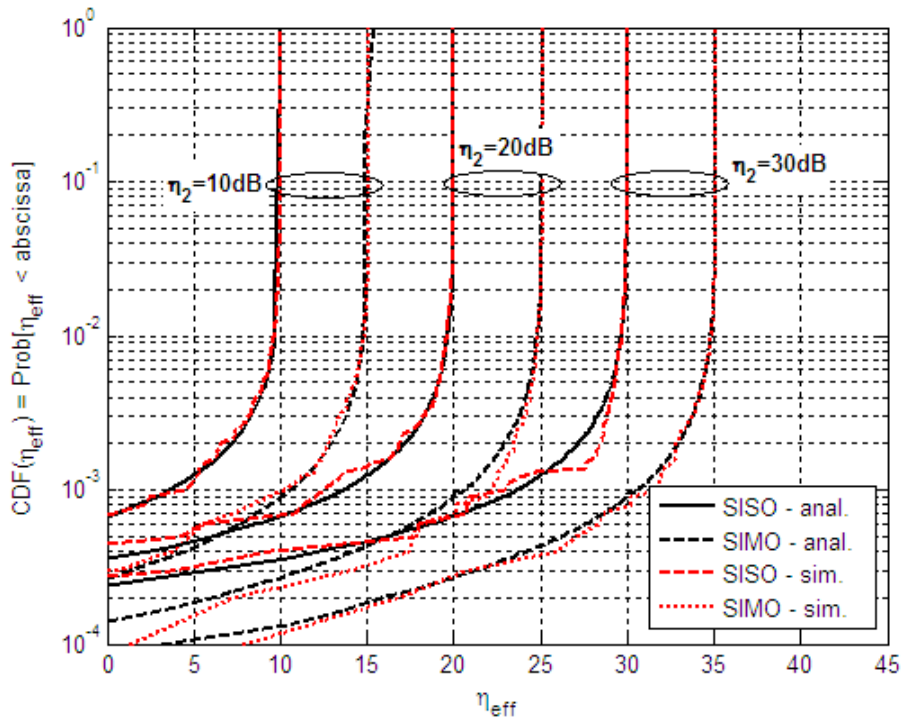
$$\Psi(BEP_{th}) = \frac{\ln \left[ 10 \log_{10} \left( \frac{\eta_1}{(\text{erfc}^{-1}(2BEP_{th}))^2 - \eta_2 10^{-A_{m2} \exp(u \cdot S_{a2})/10}} \right) \right] - \ln A_{m1}}{S_{a1}} \quad (4.25)$$

#### 4.3.2. Αριθμητικά Αποτελέσματα

Στη συνέχεια το προτεινόμενο μοντέλο που βασίζεται στην (4.23) επαληθεύεται αριθμητικά μέσω προσομοιώσεων τύπου Monte Carlo, οι οποίες αναφέρονται σε προσομοίωση  $10^5$  στιγμιαίων υλοποιήσεων του διαύλου. Επίσης, εξετάζεται η επίδραση διαφόρων γεωμετρικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών του SIMO δορυφορικού διαύλου με διαφορισμό θέσης στην κατανομή της πιθανότητας BEOP. Ως περιοχή εξυπηρέτησης των δύο σταθερών τερματικών σταθμών  $TS_1$  και  $TS_2$  θεωρείται η Αθήνα ενώ η ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας τους είναι η Ka. Για λόγους σύγκρισης, στα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζεται επίσης η χωρητικότητα διακοπής των αντιστοίχων SISO διαύλων.

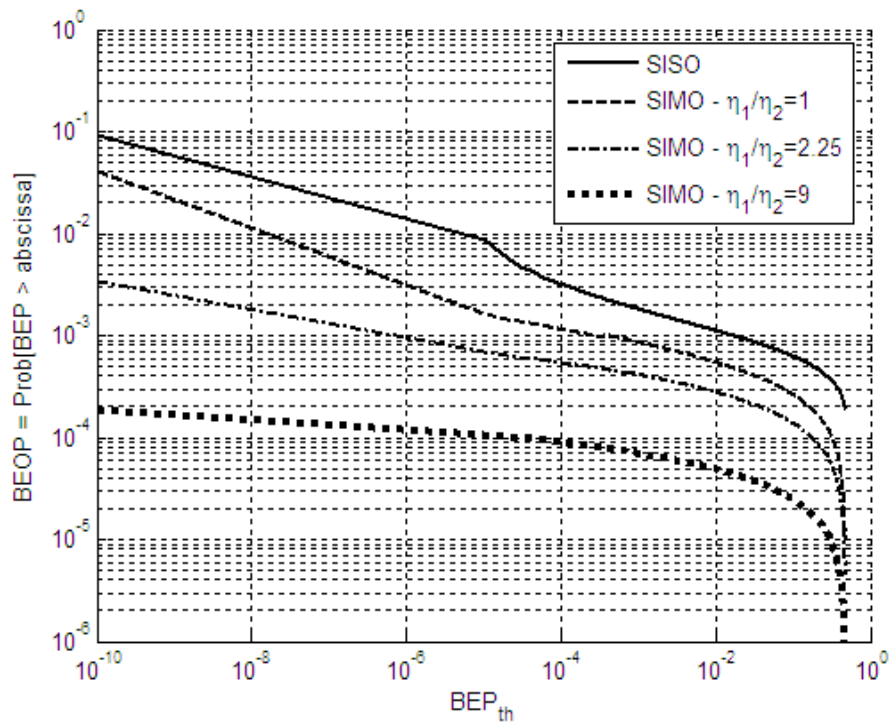
Στο Σχήμα 4.14 η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής του ενεργού σηματοθορυβικού λόγου  $\eta_{eff}$  στην είσοδο του MRC δέκτη για 1x2 SIMO δορυφορικό δίαυλο που λειτουργεί υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχόπτωσης επαληθεύεται αριθμητικά μέσω προσομοιώσεων τύπου Monte Carlo για διάφορες τιμές του  $\eta_2=10, 20$  και  $30$  dB θεωρώντας ότι  $\eta_1/\eta_2=2.25$  και  $\rho_n=0.7$ . Όπως προκύπτει από το Σχήμα 4.14, η σύγκλιση μεταξύ αναλυτικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης είναι πολύ καλή για όλο το φάσμα τιμών του σηματοθορυβικού λόγου  $\eta_2$  που θεωρήθηκε.





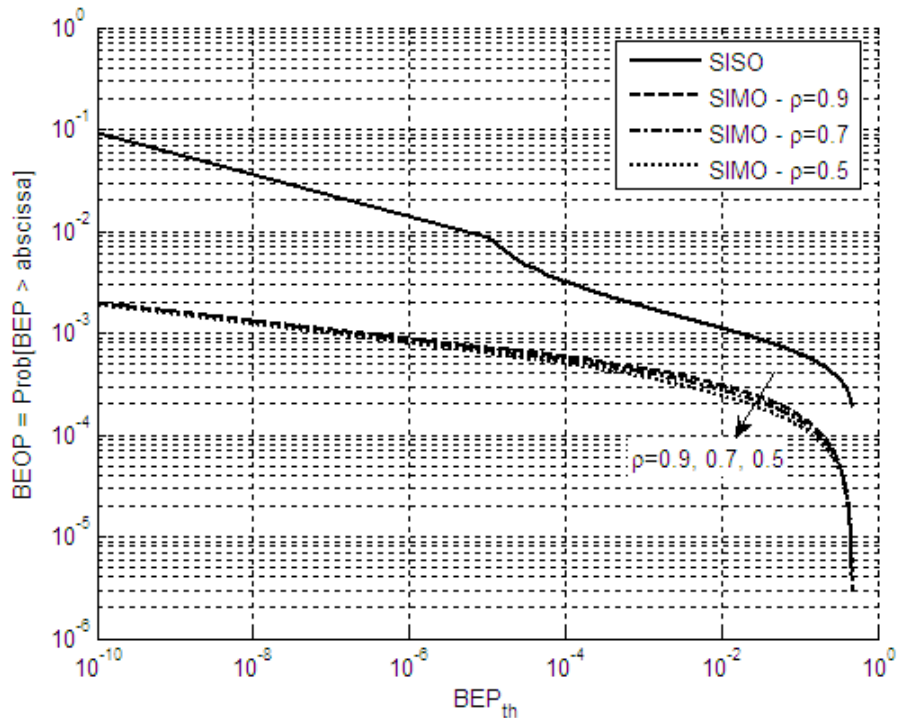
**Σχήμα 4.14:** Συνάρτηση Αθροιστικής Κατανομής του ενεργού σηματοθορυβικού λόγου  $\eta_{eff}$  στην είσοδο του MRC δέκτη για 1x2 SIMO δορυφορικό διάυλο που λειτουργεί υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχής. Επαλήθευση μέσω προσομοιώσεων τύπου Monte Carlo για  $\eta_2=10, 20$  και  $30$  dB ( $\eta_1/\eta_2=2.25$  και  $\rho_n=0.7$ )

Στο Σχήμα 4.15 απεικονίζεται η πιθανότητα BEOP 1x2 SIMO δορυφορικού διαύλου που λειτουργεί υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχόπτωσης για διάφορες τιμές του λόγου  $\eta_1/\eta_2=1, 2.25$  και  $9$ , θεωρώντας ότι  $n_2=10$ dB και  $\rho_n=0.7$ . Παρατηρείται ότι, όσο ο λόγος  $\eta_1/\eta_2$  αυξάνει, δηλαδή όσο το διαφορικό σύστημα γίνεται λιγότερο ισοσταθμισμένο (αντίστοιχα, το SIMO σύστημα γίνεται περισσότερο διατεταγμένο), η πιθανότητα BEOP μειώνεται γεγονός που υποδηλώνει ότι το σύστημα γίνεται λιγότερο επιρρεπές σε διακοπές λόγω σφαλμάτων μετάδοσης ψηφίων.



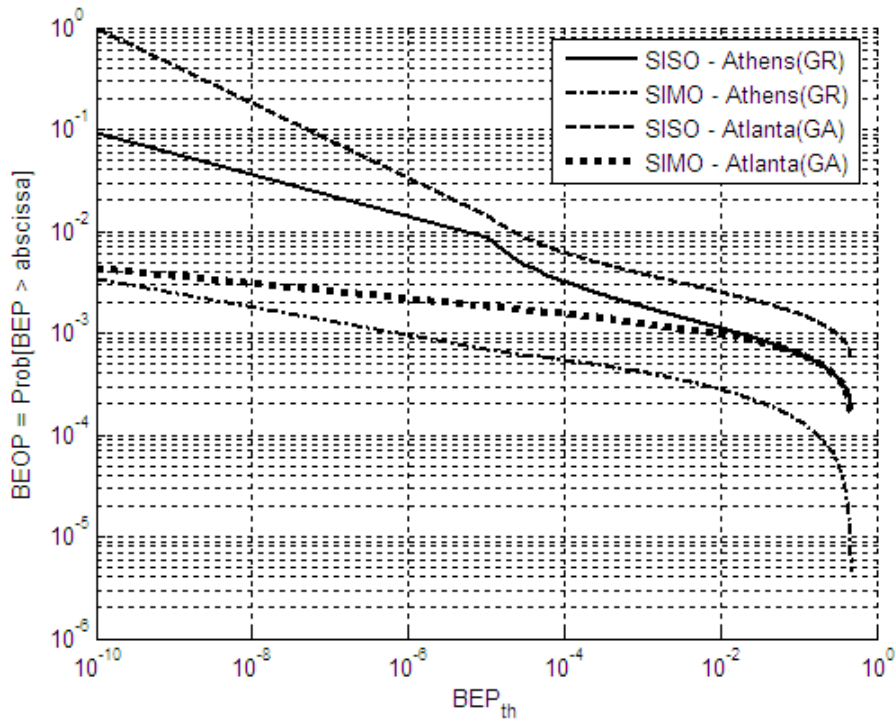
**Σχήμα 4.15:** Πιθανότητα BEOP σε 1x2 SIMO δορυφορικό δίαυλο που λειτουργεί υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχής για  $\eta_1/\eta_2=1, 2.25$  και  $9$  ( $n_2=10\text{dB}$  και  $\rho_n=0.7$ )

Στο Σχήμα 4.16 απεικονίζεται η πιθανότητα BEOP σε 1x2 SIMO δορυφορικό δίαυλο που λειτουργεί υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχοπτώσης για διάφορες τιμές του λογαριθμικού συντελεστή συσχέτισης  $\rho_n=0.9, 0.7$  και  $0.5$ , θεωρώντας ότι  $n_1/n_2=2.25$  και  $n_2=10\text{dB}$ . Και στη περίπτωση αυτή ενδιαφέρον προκαλεί το γεγονός ότι δεν παρατηρείται σημαντική επίπτωση του χωρικού συντελεστή συσχέτισης στη πιθανότητα BEOP. Δηλαδή, οποιαδήποτε μεταβολή του  $\rho_n$  επιφέρει πολύ μικρή μεταβολή στην πιθανότητα BEOP, ειδικά για χαμηλές τιμές της πιθανότητας BEP. Η παρατήρηση αυτή είναι σε συμφωνία με τις αντίστοιχες των Ενοτήτων 4.1 και 4.2, όπου δεν παρατηρείται σημαντική αύξηση της χωρητικότητας διακοπής λόγω μείωσης της χωρικής συσχέτισης και διαφοροποιείται σε σχέση με τη θεωρία MIMO (βλ. Ενότητα 3.7.3). Πράγματι, στην τελευταία περίπτωση, παρατηρείται γενικά σημαντική αύξηση της χωρητικότητας διακοπής όταν μειώνεται η χωρική συσχέτιση των διαλείψεων μικρής κλίμακας.



**Σχήμα 4.16:** Πιθανότητα BEOP σε 1x2 SIMO δορυφορικό δίαυλο που λειτουργεί υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχής για  $\rho_n=0.9, 0.7$  και  $0.5$  ( $n_1/n_2=2.25$  και  $n_2=10\text{dB}$ )

Στο Σχήμα 4.17 απεικονίζεται η πιθανότητα BEOP σε 1x2 SIMO δορυφορικό δίαυλο που λειτουργεί υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχοπτώσεως υπό διαφορετικές κλιματικές συνθήκες, δηλαδή, θεωρώντας διαφορετικές περιοχές εξυπηρέτησης των τερματικών σταθμών  $TS_1$  και  $TS_2$ . Θεωρείται ότι  $n_1/n_2=2.25$ ,  $n_2=10\text{dB}$  και  $\rho_n=0.7$ . Παρατηρείται ότι, όσο οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή εξυπηρέτησης γίνονται δυσμενέστερες από πλευράς βροχοπτώσεων, οι διαλείψεις που εισάγονται στο δορυφορικό δίαυλο λόγω βροχής αυξάνονται. Συνεπώς, η πιθανότητα BEOP του διαύλου στις αντίστοιχες περιπτώσεις αυξάνει, γεγονός που υποδηλώνει ότι το σύστημα γίνεται περισσότερο επιρρεπές σε διακοπές λόγω σφαλμάτων μετάδοσης ψηφίων.



**Σχήμα 4.17:** Πιθανότητα BEOP σε 1x2 SIMO δορυφορικό διάυλο που λειτουργεί υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχής για διαφορετικές κλιματικές συνθήκες βροχόπτωσης ( $n_1/n_2=2.25$ ,  $n_2=10\text{dB}$ ,  $\rho_n=0.7$ )

Τέλος, επισημαίνεται το σημαντικό διαφορικό κέρδος μεταξύ των αντιστοίχων καμπυλών SIMO και SISO λόγω της τεχνικής διαφορικής λήψης MRC, το οποίο παρατηρείται σε όλες τις εξετασθείσες περιπτώσεις. Συνεπώς, το διαφορικό κέρδος που επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας την τεχνολογία MIMO σε δορυφορικές μεταδόσεις αποδεικνύεται ότι είναι σημαντικό.

## **Κεφάλαιο 5. Μοντέλα και Επιδόσεις MIMO Κινητών Δορυφορικών Διαύλων σε Συχνότητες κάτω των 10GHz**

Στο κεφάλαιο αυτό μελετώνται MIMO κινητοί δορυφορικοί δίαυλοι που λειτουργούν σε συχνότητες κάτω των 10GHz υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω σκίασης και λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης. Για τη δημιουργία διαύλου πολλαπλών εισόδων – πολλαπλών εξόδων εξετάζονται ο διαφορισμός πόλωσης, ο διαφορισμός δορυφόρου και ο διαφορισμός κεραίας δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στο μοντέλο του αντιστοίχου διαύλου που προκύπτει κάθε φορά αλλά και στην εκτίμηση της επίδοσής του μέσω προσομοιώσεων. Σημειώνεται ότι η κάθε υπο-ενότητα του κεφαλαίου αντιστοιχεί σε συνεισφορά της Διατριβής στη διεθνή βιβλιογραφία [Π1, Π3, Σ2, Σ4].

Η βασική ιδέα επί της οποίας στηρίζονται όλα τα μοντέλα MIMO διαύλων για κινητές επικοινωνίες μεταξύ Γης-δορυφόρου (Land Mobile Satellite, LMS) που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο συνοψίζεται ως εξής:

*Καίτοι δεν υπάρχουν ακόμη διαθέσιμα έγκυρα μοντέλα MIMO LMS διαύλων που έχουν διεξοδικά επικυρωθεί με βάση πειραματικά δεδομένα, στατιστικά μοντέλα MIMO LMS διαύλων μπορούν να προκύψουν με την προσεκτική ενοποίηση (consolidation) των διαθέσιμων πειραματικών αποτελεσμάτων για SISO και MIMO διαύλους καθώς και με την επαγωγική χρησιμοποίησή τους (extrapolation) στην εκάστοτε περίπτωση ενδιαφέροντος MIMO LMS διαύλων.*

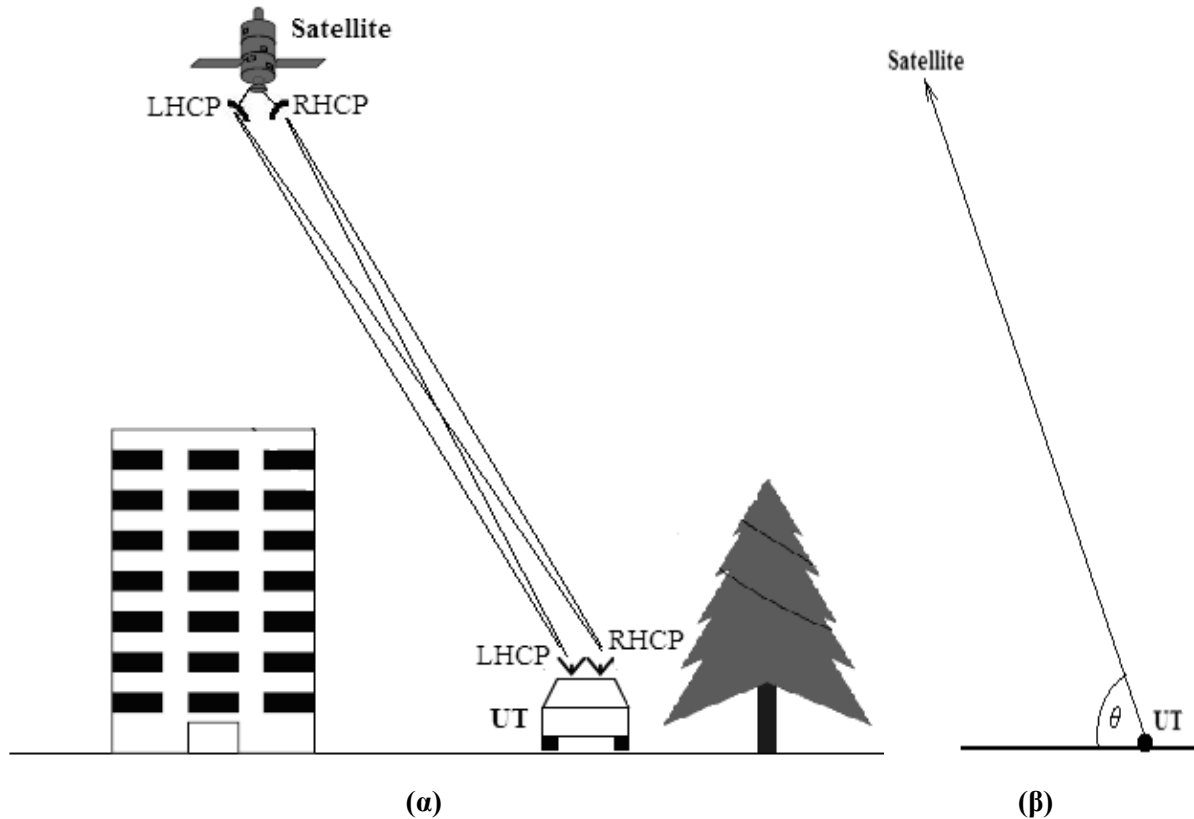
Με βάση την ανωτέρω ιδέα, στο παρόν κεφάλαιο λαμβάνεται κατά περίπτωση υπόψη η πλούσια υφιστάμενη βιβλιογραφία περί μοντέλων SISO LMS (βλ. Κεφάλαιο 2) και MIMO ασυρμάτων διαύλων (βλ. Κεφάλαιο 3) καθώς και περιορισμένα σε πλήθος πειραματικά αποτελέσματα που είναι διαθέσιμα σήμερα στο πλαίσιο των MIMO LMS διαύλων.

### **5.1. Μοντέλο και Χωρητικότητα MIMO Κινητού Δορυφορικού Διαύλου με Διαφορισμό Πόλωσης σε Συχνότητες κάτω των 10GHz**

Στην ενότητα αυτή θεωρούνται MIMO κινητοί δορυφορικοί δίαυλοι που λειτουργούν σε συχνότητες κάτω των 10GHz στους οποίους οι πολλαπλές εισοδοί – πολλαπλές έξοδοι προκύπτουν με εφαρμογή της τεχνικής διαφορισμού πόλωσης.

### 5.1.1. Ανάλυση

Στο Σχήμα 5.1 απεικονίζεται η διάταξη του υπό θεώρηση 2x2 MIMO LMS διαύλου που μελετάται στην παρούσα ενότητα.



**Σχήμα 5.1:** Διάταξη 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό πόλωσης που λειτουργεί σε συχνότητες κάτω των 10GHz υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω σκίασης και πολυδιαδρομικής διάδοσης

Ειδικότερα, μελετάται η κάτω ζεύξη. Για την υλοποίηση του διαφορισμού πόλωσης στο δίαυλο ο δορυφόρος διαθέτει διπλά κυκλικά πολωμένα κεραία δύο στοιχείων (το ένα με δεξιόστροφη κυκλική πόλωση (Right Hand Circular Polarized, RHCP) και το άλλο με αριστερόστροφη κυκλική πόλωση (Left Hand Circular Polarized, LHCP)) και το κινητό τερματικό χρήστη (User Terminal, UT) είναι επίσης εξοπλισμένο με παρόμοια διπλά κυκλικά πολωμένα κεραία δύο στοιχείων. Συγκεκριμένα, σε κάθε άκρο της δορυφορικής ζεύξης θεωρείται κεραία διπλής πόλωσης (π.χ., διασταυρούμενα δίπολα για την παραγωγή κυκλικής πόλωσης με σύνθετες (synthesized) LHCP και RHCP εξόδους). Δηλαδή, τα πολλαπλά στοιχεία της κεραίας είναι συν-τοποθετημένα (co-located) μεταξύ τους σε κάθε πλευρά της ζεύξης και δεν υπάρχει χωρικός διαχωρισμός μεταξύ τους [Oestges 2008]. Όσον αφορά τη συχνότητα λειτουργίας, τη δορυφορική τροχιά και την πόλωση του σήματος,

θεωρείται το βασικό σενάριο στο πλαίσιο του προτύπου DVB-SH, δηλαδή, S (2/4 GHz) ζώνη συχνοτήτων, γεωστατική τροχιά (GEO) και κυκλική πόλωση, αντίστοιχα [DVB-SH],[DVB-SH IG]. Η δορυφορική γωνία ανύψωσης συμβολίζεται με  $\theta$ . Με βάση τη μορφή του τοπικού περιβάλλοντος στην περιοχή του κινητού UT, η LOS ζεύξη μεταξύ δορυφόρου-UT μπορεί να είναι καθαρή, μερικώς ή πλήρως εμποδιζόμενη, ενδεχόμενα που προκαλούν διαλείψεις λόγω σκίασης και πολυδιαδρομικής διάδοσης. Δεδομένου ότι οι πολυδιαδρομικές διόδευσεις του σήματος δεν υφίστανται σημαντική χρονική διασπορά, θεωρείται ότι ο διάυλος εμφανίζει επίπεδες διαλείψεις ως προς τη συχνότητα [Perez-Fontan 2001],[King 2007a],[Sellathurai 2006],[Taricco 2003],[Lacoste 2009],[Alfano 2009].

Με βάση τις ανωτέρω υποθέσεις, ο υπό θεώρηση MIMO LMS διάυλος περιγράφεται από 2x2 MIMO πίνακα διαύλου  $\mathbf{H}=[h_{ij}]$  ( $i,j=1,2$ ), τα στοιχεία  $h_{ij}$  του οποίου αντιπροσωπεύουν τις συνιστώσες συνολικής διάλειψης των SISO LMS υποδιαύλων που σχηματίζονται μεταξύ των πλευρών εκπομπής και λήψης και ενσωματώνουν τόσο τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (δηλαδή, εκείνες που αφορούν τη σκίαση της απευθείας LOS συνιστώσας) όσο και τις διαλείψεις μικρής κλίμακας (δηλαδή, εκείνες που αφορούν την πολυδιαδρομική διάδοση). Στη συνέχεια, εξετάζεται μεμονωμένα έκαστο των φαινομένων διάδοσης που σχετίζεται με τον ανωτέρω 2x2 MIMO LMS διάυλο και δίδεται το αντίστοιχο μοντέλο περιγραφής του. Δηλαδή,

- Περιβάλλουσα υποδιαύλων SISO LMS μεταξύ πομπού και δέκτη
- Συνολική απομόνωση διασταύρωσης πόλωσης ζεύξης
- Συσχέτιση πόλωσης στις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας
- Συσχέτιση πόλωσης στις διαλείψεις μικρής κλίμακας
- Χρονική συσχέτιση

#### **A. Περιβάλλουσα Υποδιαύλων SISO LMS Μεταξύ Πομπού και Δέκτη**

Στον υπό θεώρηση 2x2 MIMO LMS διάυλο σχηματίζονται 4 (=2x2) υποδιαύλοι SISO LMS μεταξύ πομπού και δέκτη,  $h_{ij}$  ( $i,j=1,2$ ). Λόγω της ευρείας εφαρμογής του στην περίπτωση SISO LMS διαύλων, το μοντέλο *Loo* υιοθετείται για την περιβάλλουσα  $|h_{ij}|$  ( $i,j=1,2$ ) (βλ. Ενότητα 2.3.3.3). Συνεπώς, ο πίνακας  $\mathbf{H}$  του υπό θεώρηση 2x2 MIMO LMS διαύλου περιγράφεται ως εξής

$$\mathbf{H} = [h_{ij}] = [\bar{h}_{ij}] + [\tilde{h}_{ij}] = \bar{\mathbf{H}} + \tilde{\mathbf{H}} \quad (i, j = 1, 2) \quad (5.1)$$

όπου

$$h_{ij} = |h_{ij}| \exp(j\phi_{ij}) = |\bar{h}_{ij}| \exp(j\bar{\phi}_{ij}) + |\tilde{h}_{ij}| \exp(j\tilde{\phi}_{ij}) \quad (5.2)$$

$$p(|h_{ij}|) = \frac{|h_{ij}|}{b_0 \sqrt{2\pi d_0}} \int_0^\infty \frac{1}{z} \exp\left[-\frac{(\ln z - \mu)^2}{2d_0} - \frac{|h_{ij}|^2 + z^2}{2b_0}\right] I_0\left(\frac{|h_{ij}|z}{b_0}\right) dz \quad (5.3)$$

οι γωνίες  $\bar{\phi}_{ij}, \tilde{\phi}_{ij}$  ( $i,j=1,2$ ) θεωρούνται ομοιόμορφα κατανεμημένες στο διάστημα  $[0,2\pi)$ ,  $p(\cdot)$  η σ.π.π. της κατανομής Loo για τα  $|h_{ij}|$  ( $i,j=1,2$ ) που προκύπτει από τη (2.14),  $|\bar{h}_{ij}|$  ( $i,j=1,2$ ) η περιβάλλουσα των συνιστωσών διαλείψεων μεγάλης κλίμακας και  $|\tilde{h}_{ij}|$  ( $i,j=1,2$ ) η περιβάλλουσα των συνιστωσών διαλείψεων μικρής κλίμακας.

Οι στατιστικές παράμετροι  $(\alpha, \psi, MP)$  της κατανομής Loo δίδονται από τις σχέσεις (2.17)-(2.19). Η επιλογή των εκάστοτε τιμών τους εξαρτάται κάθε φορά από το υπό θεώρηση σενάριο διάδοσης (δηλαδή, με κριτήριο τη συχνότητα λειτουργίας, το περιβάλλον διάδοσης στην περιοχή του χρήστη και τη δορυφορική γωνία ανύψωσης) και αναφέρεται στις πειραματικές τιμές οι οποίες προτείνονται στην [Prieto-Cerdeira 2010] και παρατίθενται λεπτομερώς υπό μορφή πινάκων στο Παράρτημα II. Η μεθοδολογία για την εξαγωγή των τιμών των παραμέτρων  $(\alpha, \psi, MP)$  με βάση τους πίνακες του Παραρτήματος II περιγράφεται συνοπτικά στην Ενότητα 2.3.3.5 και αναλυτικότερα στην [Prieto-Cerdeira 2010].

## B. Συνολική Απομόνωση Διασταύρωσης Πόλωσης Ζεύξης

Η συνολική απομόνωση διασταύρωσης πόλωσης της ζεύξης (cross polarization discrimination, XPD) περιγράφει ποσοτικά την ικανότητα της δορυφορικής ζεύξης να διακρίνει τις δύο πολώσεις, LHCP και RHCP. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται τόσο από τη σχετική δυνατότητα που διαθέτουν οι κεραίες εκπομπής και λήψης όσο και από το βαθμό στον οποίο οι διάφοροι σκεδαστές του διαύλου αποπολώνουν τα κύματα που διαδίδονται κατά τις δύο πολώσεις. Συνεπώς, υφίστανται δύο βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη συνολική απομόνωση διασταύρωσης πόλωσης της ζεύξης, XPD, και υπεισέρχονται στην ανάλυση που ακολουθεί:

- Η απομόνωση διασταύρωσης πόλωσης της κεραίας του πομπού και του δέκτη,  $XPD_{ant,x}$  ( $X=T_x, R_x$ ), η οποία επηρεάζει την κατανομή των συνιστωσών διαλείψεων τόσο μεγάλης κλίμακας  $|\bar{h}_{ij}|$  ( $i,j=1,2$ ) όσο και μικρής κλίμακας  $|\tilde{h}_{ij}|$  ( $i,j=1,2$ ).
- Η διασταύρωση πόλωσης του περιβάλλοντος διάδοσης,  $XPC_{env}$ , η οποία επηρεάζει μόνο την κατανομή των συνιστωσών διαλείψεων μικρής κλίμακας  $|\tilde{h}_{ij}|$  ( $i,j=1,2$ ).



Τα ανωτέρω μεγέθη  $XPD$ ,  $XPD_{ant,X}$  ( $X=T_x, R_x$ ) και  $XPC_{env}$  συνδέονται μεταξύ τους μέσω της σχέσης

$$XPD^{-1} = XPC_{env}^{-1} + XPD_{ant,T_x}^{-1} + XPD_{ant,R_x}^{-1} \quad (5.4)$$

Ωστόσο, σε δορυφορικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα που λειτουργούν στην πράξη, η απομόνωση διασταύρωσης πόλωσης της κεραίας του UT (κεραία λήψης στην προκειμένη περίπτωση) λαμβάνει τιμές όχι μεγαλύτερες από  $XPD_{ant,R_x}=15\text{dB}$  ενώ η απομόνωση διασταύρωσης πόλωσης της κεραίας του δορυφόρου (κεραία εκπομπής στην προκειμένη περίπτωση) λαμβάνει πολύ μεγάλες τιμές που θεωρητικά τείνουν στο  $\infty$ . Συνεπώς, η (5.4) γράφεται υπό τη μορφή

$$\begin{aligned} XPD^{-1} &= XPC_{env}^{-1} + XPD_{ant,T_x}^{-1} + XPD_{ant,R_x}^{-1} \xrightarrow{XPD_{ant,T_x} \rightarrow \infty} \\ XPD^{-1} &= XPC_{env}^{-1} + XPD_{ant,R_x}^{-1} \xrightarrow{XPD_{ant,R_x} \leftrightarrow XPD_{ant}} \\ XPD^{-1} &= XPC_{env}^{-1} + XPD_{ant}^{-1} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Για την επίδραση του φαινομένου κατά το οποίο ο διάυλος ευνοεί τη διάδοση ενός κύματος κατά τη μία πόλωση σε σχέση με τη διάδοση κατά την άλλη, ορίζεται ο λόγος ομοπολικής ισχύος (Co-Polar Ratio, CPR) ως ο λόγος του κέρδους ισχύος μεταξύ μιας κεραίας εκπομπής και μιας κεραίας λήψης ίδιας πόλωσης προς το αντίστοιχο κέρδος ισχύος της ορθογώνιας πόλωσης. Το φαινόμενο αυτό μελετήθηκε εις βάθος στις εργασίες [Oestges 2004],[Sorensen 1998] για τις περιπτώσεις διαφορισμού πόλωσης  $0^\circ/90^\circ$  και  $\pm 45^\circ$  στο πλαίσιο επίγειων σταθερών και κινητών ραδιοδιαύλων μέσω πειραματικών μετρήσεων και, συγκεκριμένα, μέσω του λόγου BPR (Branch Power Ratio) που ορίζεται (σε dB) ως εξής

$$BPR = 10 \log_{10} \frac{E[|h_{11}|^2]}{E[|h_{22}|^2]} \quad (5.6)$$

όπου  $E[\cdot]$  ο τελεστής της μέσης τιμής. Στα περισσότερα πρακτικά σενάρια που εξετάστηκαν στις [Oestges 2004],[Sorensen 1998] και, ιδιαίτερα, σε αυτά που αφορούσαν την περίπτωση διαφορισμού πόλωσης  $\pm 45^\circ$ , βρέθηκε ότι  $BPR=0\text{dB}$ , δηλαδή, ότι μπορεί να θεωρηθεί συμμετρία μεταξύ των δύο πολώσεων. Η ανωτέρω παρατήρηση συμφωνεί επίσης με πειραματικά αποτελέσματα που έχουν εξαχθεί στην περίπτωση κινητών δορυφορικών διαύλων [King 2007a]. Συνεπώς, η ίδια συμμετρία λαμβάνεται υπόψη και στην προκειμένη περίπτωση διαφορισμού πόλωσης με δεξιόστροφη και αριστερόστροφη κυκλική πόλωση R/L-HCP. Με βάση την ανωτέρω παραδοχή, η ισχύς των συνιστωσών των διαλείψεων μεγάλης και μικρής κλίμακας δίδεται, αντίστοιχα, μέσω των σχέσεων

$$E\left[|\bar{h}_{ij}|^2\right] = \begin{cases} (\psi^2 + \alpha^2) \cdot (1 - \beta_{ant}) & i = j \\ (\psi^2 + \alpha^2) \cdot \beta_{ant} & i \neq j \end{cases} \quad (5.7)$$

$$E\left[|\tilde{h}_{ij}|^2\right] = \begin{cases} MP \cdot (1 - \gamma) & i = j \\ MP \cdot \gamma & i \neq j \end{cases} \quad (5.8)$$

όπου ( $i,j=1,2$ ), οι στατιστικές παράμετροι ( $\alpha, \psi, MP$ ) της κατανομής Loo εκφράζονται σε γραμμική κλίμακα (όχι σε dB), η παράμετρος  $\beta_{ant} \in [0,1]$  εξαρτάται μόνο από την  $XPD_{ant}$  και η παράμετρος  $\gamma \in [0,1]$  εξαρτάται από τις  $XPD_{ant}$  και  $XPC_{env}$ .

Όσον αφορά τη σχέση μεταξύ των παραμέτρων μοντελοποίησης  $\beta_{ant}$  και  $\gamma$  που εμφανίζονται στις (5.7)-(5.8) και των μετρήσιμων μεγεθών  $XPD_{ant}$  και  $XPC_{env}$ , ισχύουν οι εκφράσεις:

$$XPD_{ant} = 10 \log_{10} \left[ E\left[|\bar{h}_{ii}|^2\right] / E\left[|\bar{h}_{ij}|^2\right] \right] = 10 \log_{10} \left[ 1 - \beta_{ant} / \beta_{ant} \right] \quad (5.9)$$

$$XPC_{env} = 10 \log_{10} \left[ (1 - \gamma_{env}) / \gamma_{env} \right] \quad (5.10)$$

$$\gamma = \beta_{ant} (1 - \gamma_{env}) + (1 - \beta_{ant}) \gamma_{env} \quad (5.11)$$

Αρκετές εργασίες όπου δημοσιεύονται αποτελέσματα εκτεταμένων πειραματικών μετρήσεων, όπως π.χ. [Mansor 2010],[King 2007a],[King 2007b],[Sellathurai 2006],[Lempriainen 1998],[Brown 2007], προτείνουν συγκεκριμένες τιμές για τις μετρήσιμες παραμέτρους  $XPD_{ant}$  και  $XPC_{env}$  οι οποίες λαμβάνονται υπόψη στη Διατριβή για την υπό μελέτη περίπτωση MIMO LMS δορυφορικού διαύλου με διαφορισμό πόλωσης.

### Γ. Συσχέτιση Πόλωσης στις Συνιστώσες Διαλείψεων Μεγάλης Κλίμακας

Λόγω της τεράστιας απόστασης μεταξύ Γης-δορυφόρου και της συν-τοποθέτησης (co-location) των πολλαπλών στοιχείων κεραίας στο δορυφόρο (πομπό) και UT (δέκτη), οι συνιστώσες διαλείψεων μεγάλης κλίμακας  $\bar{h}_{ij}$  ( $i,j=1,2$ ) εμφανίζουν μεγάλη συσχέτιση πόλωσης (polarization correlation – κατ’ αντιστοιχία με τη χωρική συσχέτιση, spatial correlation). Αν  $\bar{\mathbf{C}}$  είναι ο  $4 \times 4$  πίνακας μεταβλητότητας για τις συνιστώσες διαλείψεων μεγάλης κλίμακας, με βάση την (3.42), προκύπτει  $2 \times 2$  πίνακας διαύλου  $\bar{\mathbf{H}}_{w,cor}$  με στοιχεία συσχετισμένες (λόγω πόλωσης) και ομοιόμορφα κατανεμημένες τ.μ. που ακολουθούν την κυκλικά συμμετρική μιγαδική κανονική κατανομή (ZMCSCG, Zero-Mean Circularly Symmetric Complex Gaussian) με μέση τιμή μηδέν και μοναδιαία διασπορά ως εξής

$$vec(\bar{\mathbf{H}}_{w,cor}) = \bar{\mathbf{C}}^{1/2} \cdot vec(\bar{\mathbf{H}}_w) \quad (5.12)$$

όπου ο 2x2 πίνακας  $\bar{\mathbf{H}}_w$  δίδεται από την (3.32). Επισημαίνεται ότι η μόνη διαφορά μεταξύ των πινάκων  $\bar{\mathbf{H}}_{w,cor}$  και  $\bar{\mathbf{H}}_w$  έγκειται στο ότι ο δεύτερος έχει στοιχεία ανεξάρτητες ενώ ο πρώτος συσχετισμένες (λόγω πόλωσης) ZMCSCG τ.μ. Εισάγοντας κατάλληλα τη μέση τιμή  $\alpha$  και την τυπική απόκλιση  $\psi$  (σε dB) στην έκφραση του κανονικά κατανομημένου πίνακα  $\bar{\mathbf{H}}_{w,cor}$  και υψώνοντας έπειτα εις τη δύναμη του 10 ώστε να προκύψει λογαριθμοκανονικά κατανομημένος πίνακας, ο 2x2 πίνακας  $\bar{\mathbf{H}} = [\bar{h}_{ij}]$  εκφράζεται ως εξής

$$vec(\bar{\mathbf{H}}) = 10^{\lfloor vec(\bar{\mathbf{H}}_{w,cor}) \cdot (\psi/20) + (\alpha/20) \rfloor} \quad (5.13)$$

Στην πρωτοποριακή εργασία [King 2007a], προτείνονται πειραματικά αποτελέσματα που χαρακτηρίζουν τον πίνακα μεταβλητότητας  $\bar{\mathbf{C}}$  στο πλαίσιο MIMO LMS διαύλων για διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης:

$$\bar{\mathbf{C}} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1 & 0.86 & 0.85 & 0.90 \\ 0.86 & 1 & 0.91 & 0.87 \\ 0.85 & 0.91 & 1 & 0.88 \\ 0.90 & 0.87 & 0.88 & 1 \end{bmatrix} & \text{Αγροτικό Περιβάλλον (με Δένδρα)} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0.76 & 0.76 & 0.83 \\ 0.76 & 1 & 0.83 & 0.75 \\ 0.76 & 0.83 & 1 & 0.78 \\ 0.83 & 0.75 & 0.78 & 1 \end{bmatrix} & \text{Προαστιακό Περιβάλλον} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0.86 & 0.86 & 0.92 \\ 0.86 & 1 & 0.89 & 0.85 \\ 0.86 & 0.89 & 1 & 0.93 \\ 0.92 & 0.85 & 0.93 & 1 \end{bmatrix} & \text{Αστικό Περιβάλλον} \end{cases} \quad (5.14)$$

Από τους ανωτέρω πίνακες μεταβλητότητας φαίνεται ότι, παρά το γεγονός ότι τα αποτελέσματα αυτά αναφέρονται σε ιδιαίτερα χαμηλές δορυφορικές γωνίες ανύψωσης ( $\theta \approx 15^\circ$  [King 2007a]), οι συντελεστές συσχέτισης λόγω πόλωσης που επηρεάζουν τις συνιστώσες διαλείψεων μεγάλης κλίμακας λαμβάνουν αρκετά μεγάλες τιμές (δηλαδή, κοντά στο 1) για όλα τα περιβάλλοντα διάδοσης όπως φαίνεται στην (5.14). Αυτό δείχνει ότι ακόμη και στην πλέον γενική και πρακτικά ενδιαφέρουσα περίπτωση μεγαλύτερων γωνιών ανύψωσης, οι συντελεστές συσχέτισης λόγω πόλωσης θα έχουν εξίσου μεγάλες τιμές εφόσον η αντίστοιχη σκίαση της απευθείας LOS ζεύξης θα είναι μικρότερη. Για το

λόγο αυτό, στη Διατριβή θεωρούνται οι ανωτέρω πίνακες μεταβλητότητας  $\bar{\mathbf{C}}$  που προτείνονται στην [King 2007a] και δίδονται από την (5.14).

#### Δ. Συσχέτιση Πόλωσης στις Συνιστώσες Διαλείψεων Μικρής Κλίμακας

Λόγω της γωνιακής διασποράς των συνιστωσών πολυδιαδρομικής διάδοσης και της συντοποθέτησης πολλαπλών στοιχείων κεραίας στην πλευρά του πομπού και του δέκτη, οι συνιστώσες διαλείψεων μικρής κλίμακας  $\tilde{h}_{ij}$  ( $i,j=1,2$ ) εμφανίζουν συσχέτιση πόλωσης (polarization correlation). Αν  $\tilde{\mathbf{C}}$  ο  $4 \times 4$  πίνακας μεταβλητότητας για τις συνιστώσες διαλείψεων μικρής κλίμακας και  $\tilde{\mathbf{H}}_w$   $2 \times 2$  πίνακας διαύλου με στοιχεία ανεξάρτητες και ομοιόμορφα κατανεμημένες τ.μ. που ακολουθούν την κυκλικά συμμετρική μιγαδική κανονική κατανομή ZMCSCG με μέση τιμή μηδέν και διασπορά  $MP$ , με βάση την (3.42), προκύπτει  $2 \times 2$  πίνακας διαύλου  $\tilde{\mathbf{H}}$  με στοιχεία *συσχετισμένες* (λόγω πόλωσης) και ομοιόμορφα κατανεμημένες τ.μ. που ακολουθούν την κυκλικά συμμετρική μιγαδική κανονική κατανομή ZMCSCG με μέση τιμή μηδέν και διασπορά  $MP$  ως εξής

$$vec(\tilde{\mathbf{H}}) = \tilde{\mathbf{C}}^{1/2} \cdot vec(\tilde{\mathbf{H}}_w) \quad (5.15)$$

όπου

$$\tilde{\mathbf{C}} = \tilde{\mathbf{R}}_{tx}^T \otimes \tilde{\mathbf{R}}_{rx} \quad (5.16)$$

Στην (5.16),  $\otimes$  συμβολίζει τον τελεστή του γινομένου Kronecker,  $[\cdot]^T$  τον ανάστροφο ενός πίνακα και  $\tilde{\mathbf{R}}_{tx}$ ,  $\tilde{\mathbf{R}}_{rx}$  είναι οι  $2 \times 2$  πίνακες μεταβλητότητας για τις συνιστώσες διαλείψεων μικρής κλίμακας που αφορούν την πλευρά εκπομπής και λήψης, αντίστοιχα. Με βάση τις (5.15)-(5.16), την ανάλυση της Ενότητας 3.7.3 και την απλοποιημένη έκφραση της (3.44), ο  $2 \times 2$  πίνακας διαύλου  $\tilde{\mathbf{H}}$  για τις συνιστώσες διαλείψεων μικρής κλίμακας γράφεται υπό τη μορφή

$$\tilde{\mathbf{H}} = \tilde{\mathbf{R}}_{rx}^{1/2} \cdot \tilde{\mathbf{H}}_w \cdot \tilde{\mathbf{R}}_{tx}^{1/2} \quad (5.17)$$

Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τις (5.1) και (5.8), οι  $2 \times 2$  πίνακες μεταβλητότητας  $\tilde{\mathbf{R}}_{tx}$  και  $\tilde{\mathbf{R}}_{rx}$  για τις συνιστώσες διαλείψεων μικρής κλίμακας που αφορούν την πλευρά εκπομπής και λήψης, αντίστοιχα, δίδονται από τις εξής εκφράσεις (βλ. Παράρτημα IV)

$$\tilde{\mathbf{R}}_{tx} = E[\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}] = MP \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2\sqrt{(1-\gamma)\gamma}\tilde{\rho}_{tx} \\ 2\sqrt{(1-\gamma)\gamma}\tilde{\rho}_{tx} & 1 \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

$$\tilde{\mathbf{R}}_{rx} = E[\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H] = MP \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2\sqrt{(1-\gamma)\gamma}\tilde{\rho}_{rx} \\ 2\sqrt{(1-\gamma)\gamma}\tilde{\rho}_{rx} & 1 \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

όπου  $[\cdot]^H$  συμβολίζει τον αναστροφο-συζυγή ενός πίνακα και  $\tilde{\rho}_{tx}, \tilde{\rho}_{rx}$  οι συντελεστές συσχέτισης λόγω πόλωσης των συνιστωσών διαλείψεων μικρής κλίμακας που αφορούν την πλευρά εκπομπής και λήψης, αντίστοιχα. Αρκετές εργασίες όπου δημοσιεύονται αποτελέσματα εκτεταμένων πειραματικών μετρήσεων, όπως π.χ. [Mansor 2010],[King 2007a],[King 2007b],[Sellathurai 2006],[Lempiainen 1998], προτείνουν συγκεκριμένες τιμές για τις μετρήσιμες παραμέτρους  $\tilde{\rho}_{tx}, \tilde{\rho}_{rx}$  οι οποίες λαμβάνονται υπόψη στη Διατριβή για την υπό μελέτη περίπτωση MIMO LMS δορυφορικού διαύλου με διαφορισμό πόλωσης.

### Ε. Χρονική Συσχέτιση

Για τη χρονική συσχέτιση που εισάγεται στο δίαυλο καθώς το UT κινείται με συγκεκριμένη ταχύτητα στο LMS περιβάλλον διάδοσης, θεωρούνται οι εξής δύο περιπτώσεις χρονικών διακυμάνσεων:

**i) Χρονικές Διακυμάνσεις Μεταξύ Διαφορετικών Καταστάσεων Διαύλου (inter-state temporal variations):** Στην περίπτωση SISO-LMS, για τις χρονικές διακυμάνσεις των συνιστωσών διαλείψεων μεγάλης κλίμακας που αφορά τις χρονικές διακυμάνσεις μεταξύ διαφορετικών καταστάσεων του διαύλου θεωρείται το πρώτης τάξης μοντέλο αλυσίδας Markov δύο καταστάσεων που περιγράφεται στην Ενότητα 2.3.3.5 [Prieto-Cerdeira 2010]. Στην υπό θεώρηση περίπτωση 2x2 MIMO LMS, που περιγράφηκε στην Παράγραφο Γ, ο συντελεστής συσχέτισης λόγω πόλωσης που επηρεάζει τις συνιστώσες διαλείψεων μεγάλης κλίμακας λαμβάνει αρκετά μεγάλες τιμές κοντά στη μονάδα, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι διάφοροι υποδίαυλοι SISO LMS που σχηματίζονται μεταξύ πομπού και δέκτη είναι σχεδόν πλήρως συσχετισμένοι και ακολουθούν την ίδια αλληλουχία καταστάσεων διαύλου Καλής και Κακής Κατάστασης. Συνεπώς, το μοντέλο αλυσίδας Markov που προκύπτει στην υπό θεώρηση 2x2 MIMO LMS περίπτωση είναι επίσης πρώτης τάξης και δύο καταστάσεων με τους ίδιους πίνακες πιθανοτήτων κατάστασης  $\mathbf{W}$  και μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων

$\mathbf{P}$  όπως στη SISO LMS περίπτωση, δηλαδή,  $\mathbf{W}_{MIMO} = \mathbf{W}_{SISO}$  και  $\mathbf{P}_{MIMO} = \mathbf{P}_{SISO}$  (βλ. Ενότητα 2.3.3.5).

**ii) Χρονικές Διακυμάνσεις Εντός Ίδιας Κατάστασης Διαύλου (intra-state temporal variations):** Όσον αφορά τις χρονικές διακυμάνσεις εντός της ίδιας κατάστασης του διαύλου, θεωρούνται οι εξής δύο υπο-περιπτώσεις για τις διαλείψεις μεγάλης και μικρής κλίμακας, αντίστοιχα:

- **Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας:** Στην περίπτωση αυτή, για την περιγραφή συγκεκριμένης απόστασης συνοχής (coherence distance) στις συνιστώσες διαλείψεων μεγάλης κλίμακας, θεωρείται διαδικασία βαθυπερατού φιλτραρίσματος όμοια με αυτή που αρχικά προτάθηκε στην [Gudmundson 1991] στο πλαίσιο των επίγειων κινητών επικοινωνιών η οποία επαληθεύτηκε αργότερα μέσω πειραματικών μετρήσεων στην [King 2007a] για κινητούς δορυφορικούς διαύλους. Για κάθε κατάσταση διαύλου, δημιουργείται μια ακολουθία κανονικών τυχαίων δειγμάτων διαύλου με μηδενική μέση τιμή και μοναδιαία διασπορά αρχικά. Ειδικότερα, θεωρείται ένα δείγμα για κάθε μπλοκ ψηφίων μετάδοσης διάρκειας  $T$ . Στη συνέχεια, τα παραγόμενα αυτά κανονικώς κατανεμημένα δείγματα διαύλου διέρχονται μέσω βαθυπερατού φίλτρου για να εισαχθεί η υπόψη χρονική συσχέτιση. Το φίλτρο αυτό είναι βαθυπερατό τύπου IIR (Infinite Impulse Response) ενός συντελεστή:

$$y_n = x_n + A \cdot y_{n-1} \quad (5.20)$$

όπου  $A = \exp(-\nu T / r_c)$ ,  $\nu$  η ταχύτητα του κινητού τερματικού χρήστη UT,  $T$  το διάστημα δειγματοληψίας που λαμβάνεται ίσο με τη διάρκεια του μπλοκ ψηφίων μετάδοσης (δηλαδή με τη διάρκεια της ομάδας ψηφίων μετάδοσης που χαρακτηρίζει κάθε τηλεπικοινωνιακό σύστημα), και  $r_c$  η απόστασης συνοχής. Στη συνέχεια, τα φιλτραρισμένα δείγματα διαύλου κανονικοποιούνται ως προς (δηλαδή, διαιρούνται με)  $(1-A^2)$  ώστε να ανακτηθούν τα αρχικά στατιστικά των δειγμάτων πριν το βαθυπερατό φιλτράρισμα. Τέλος, βάσει των (5.12)-(5.13), τα παραγόμενα χρονικά συσχετισμένα κανονικώς κατανεμημένα δείγματα διαύλου εισάγονται στον πίνακα  $\bar{\mathbf{H}}_w$  ώστε να προκύψει ο πίνακας  $\bar{\mathbf{H}}$ .

- **Διαλείψεις μικρής κλίμακας:** Στην περίπτωση αυτή, για να εισαχθεί χρονική συσχέτιση στις συνιστώσες διαλείψεων μικρής κλίμακας, θεωρείται μια απλοποιημένη διαδικασία ώστε να διατηρηθεί ο χρόνος προσομοίωσης και

κατάληψης της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (Central Processing Unit, CPU) του Η/Υ σε χαμηλά επίπεδα. Συγκεκριμένα, τα παραγόμενα δείγματα διαύλου πολυδιαδρομικής διάδοσης θεωρούνται σταθερά κατά τη διάρκεια ενός μπλοκ ψηφίων μετάδοσης διάρκειας  $T$  (δηλαδή, πλήρης χρονική συσχέτιση θεωρείται σε κάθε μπλοκ ψηφίων μετάδοσης) αλλά μεταβάλλονται ανεξάρτητα από μπλοκ σε μπλοκ. Η διάρκεια  $T$  του μπλοκ ψηφίων μετάδοσης λαμβάνεται ίση με το χρόνο συνοχής του διαύλου (coherence time) και αποτελεί το διάστημα δειγματοληψίας αυτού, δηλαδή, ο διάυλος δειγματοληπτείται μόνο μια φορά για κάθε μπλοκ ψηφίων μετάδοσης, γεγονός το οποίο μειώνει σημαντικά το χρόνο προσομοίωσης και κατάληψης της CPU σε Η/Υ. Το θεωρούμενο μοντέλο, αν και απλοποιητικό, επαρκεί για στατιστικές αναλύσεις διακοπής (outage statistical analyses) [Ozarow 1994] σε αργά μεταβαλλόμενους διαύλους, όπως είναι η συνήθης περίπτωση δορυφορικών διαύλων LMS, καθώς και σε συστήματα των οποίων η επίδοση χαρακτηρίζεται κατά κύριο λόγο από την καθυστέρηση μετάδοσης (delay limited systems) [Hanly 1995],[Tse 2005], όπως είναι η περίπτωση στα δορυφορικά συστήματα DVB-SH με βραχύ πλαίσιο κώδικα FEC ( $n_{ldpc}=16200$  bits) [DVB-SH]. Ωστόσο, η υιοθέτηση περισσότερο σύνθετων μοντέλων που προϋποθέτουν τη χρήση βαθυπερατών φίλτρων χαμηλής τάξης (π.χ., τύπου Butterworth [Prieto-Cerdeira 2010]) αποτελεί πρόταση για μελλοντική εργασία στο πλαίσιο αυτό, αν και αυξάνει σημαντικά το χρόνο προσομοίωσης και κατάληψης της CPU σε Η/Υ.

### 5.1.2. Αριθμητικά Αποτελέσματα

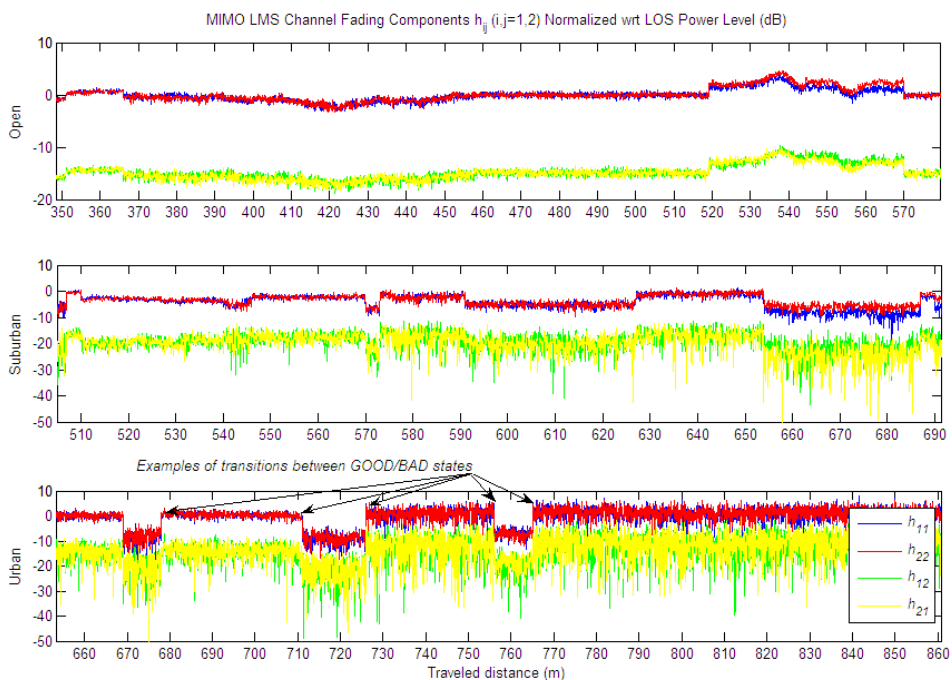
Στη συνέχεια παρατίθενται αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούν υλοποιήσεις του προτεινόμενου μοντέλου για τον υπό θεώρηση 2x2 MIMO LMS διάυλο. Συγκεκριμένα, θεωρούνται τρία σενάρια 2x2 MIMO LMS διαύλων με διαφορισμό πόλωσης που λειτουργούν σε συχνότητες κάτω των 10GHz υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω σκίασης και πολυδιαδρομικής διάδοσης σε τρία διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης, αντίστοιχα. Όλες οι παράμετροι που υπεισέρχονται κατά την ανάλυση δίδονται στον Πίνακα 5.1. Στα σχήματα που ακολουθούν, η *χωρητικότητα διακοπής* που ορίζεται μέσω της (3.31) λαμβάνεται ως στατιστικό μέτρο για την εκτίμηση της επίδοσης των αντιστοίχων MIMO LMS διαύλων ενώ, για λόγους σύγκρισης, απεικονίζεται επίσης η *χωρητικότητα διακοπής* των αντιστοίχων SISO LMS διαύλων.

**Πίνακας 5.1: Παράμετροι των υπό θεώρηση σεναρίων 2x2 MIMO LMS διαύλων με διαφορισμό πόλωσης**

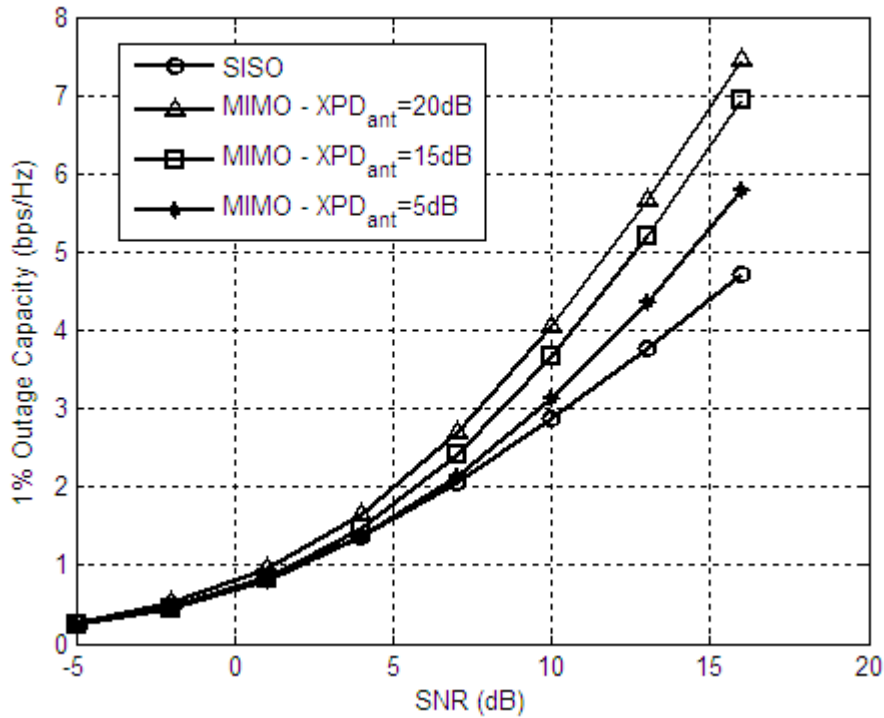
Παράμετρος	Ανοικτό Αγροτικό Περιβάλλον Διάδοσης	Προαστιακό Περιβάλλον Διάδοσης	Αστικό Περιβάλλον Διάδοσης	Αναφορά
Συχνότητα Λειτουργίας, $f$	2.2GHz (Ζώνη S)	2.2GHz (Ζώνη S)	2.2GHz (Ζώνη S)	[DVB-SH], [Heuberger 2008]
Δορυφορική Τροχιά	GEO	GEO	GEO	[DVB-SH IG]
Πόλωση	Διπλή Κυκλική (RHCP & LHCP)	Διπλή Κυκλική (RHCP & LHCP)	Διπλή Κυκλική (RHCP & LHCP)	[DVB-SH IG]
Ταχύτητα Κινητού UT, $v$	50km/h	50km/h	50km/h	[DVB-SH IG]
Δορυφορική Γωνία Ανύψωσης, $\theta$	40°	40°	40°	[DVB-SH IG]
Διασταύρωση Πόλωσης Περιβάλλοντος Διάδοσης, $XPC_{env}$	15dB	6dB	5dB	[Sellathurai 2006], [Lempiainen 1998]
Απομόνωση Διασταύρωσης Πόλωσης Κεραίας UT, $XPD_{ant}$	15dB	15dB	15dB	[Sellathurai 2006], [Lempiainen 1998]
Τριάδα Στατιστικών Παραμέτρων $Loo$ ( $\alpha, \psi, MP$ )	Για κάθε νέα κατάσταση διαύλου, μια νέα τριάδα στατιστικών παραμέτρων $Loo$ ( $\alpha, \psi, MP$ ) επιλέγεται με βάση τη δεδομένη από κοινού κατανομή $f(M_A, \Sigma_A, MP)$	Για κάθε νέα κατάσταση διαύλου, μια νέα τριάδα στατιστικών παραμέτρων $Loo$ ( $\alpha, \psi, MP$ ) επιλέγεται με βάση τη δεδομένη από κοινού κατανομή $f(M_A, \Sigma_A, MP)$	Για κάθε νέα κατάσταση διαύλου, μια νέα τριάδα στατιστικών παραμέτρων $Loo$ ( $\alpha, \psi, MP$ ) επιλέγεται με βάση τη δεδομένη από κοινού κατανομή $f(M_A, \Sigma_A, MP)$	[Prieto Cerdeira 2010]
Συντελεστής Συσχέτισης λόγω Πόλωσης για Διαλείψεις Μικρής Κλίμακας στην Πλευρά Εκπομπής, $\tilde{\rho}_{tx}$	0.4	0.5	0.5	[Sellathurai 2006], [Lempiainen 1998]
Συντελεστής Συσχέτισης λόγω Πόλωσης για Διαλείψεις Μικρής Κλίμακας στην Πλευρά Λήψης, $\tilde{\rho}_{rx}$	0.5	0.5	0.5	[Sellathurai 2006], [Lempiainen 1998]
Πίνακας Μεταβλητότητας για Διαλείψεις Μεγάλης Κλίμακας, $\bar{C}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0.86 & 0.85 & 0.90 \\ 0.86 & 1 & 0.91 & 0.87 \\ 0.85 & 0.91 & 1 & 0.88 \\ 0.90 & 0.87 & 0.88 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0.76 & 0.76 & 0.83 \\ 0.76 & 1 & 0.83 & 0.75 \\ 0.76 & 0.83 & 1 & 0.78 \\ 0.83 & 0.75 & 0.78 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0.86 & 0.86 & 0.92 \\ 0.86 & 1 & 0.89 & 0.85 \\ 0.86 & 0.89 & 1 & 0.93 \\ 0.92 & 0.85 & 0.93 & 1 \end{bmatrix}$	[King 2007a]
Χρονικές Διακυμάνσεις Μεταξύ Διαφορετικών Καταστάσεων Διαύλου	1 <sup>ης</sup> τάξης μοντέλο αλυσίδας Markov 2 καταστάσεων	1 <sup>ης</sup> τάξης μοντέλο αλυσίδας Markov 2 καταστάσεων	1 <sup>ης</sup> τάξης μοντέλο αλυσίδας Markov 2 καταστάσεων	[Prieto Cerdeira 2010]



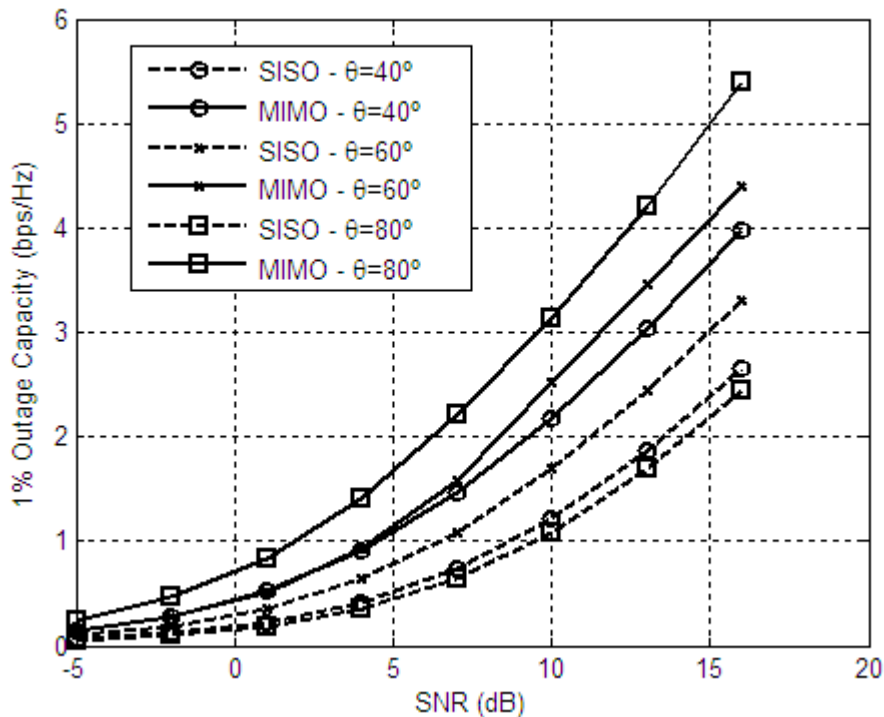
Στο Σχήμα 5.2 απεικονίζονται οι παραγόμενες χρονοσειρές με βάση το προτεινόμενο μοντέλο 2x2 MIMO LMS διαύλων για τρία διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης: ανοικτό αγροτικό, προαστιακό και αστικό. Συγκεκριμένα, οι υποδιαύλοι  $h_{ij}$  ( $i,j=1,2$ ) (κανονικοποιημένοι ως προς τη στάθμη ισχύος LOS, σε dB) απεικονίζονται συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης του τερματικού χρήστη UT. Σε κάθε περιβάλλον διάδοσης, καθώς το UT κινείται παρατηρείται αλληλουχία μεταξύ της Καλής και Κακής κατάστασης του MIMO διαύλου. Επίσης, για κάθε περιβάλλον διάδοσης, η στάθμη όλων των Καλών (και των Κακών, αντίστοιχα) καταστάσεων του διαύλου δεν είναι ίδια, γεγονός που οφείλεται στην υπόθεση ότι, για κάθε νέα κατάσταση διαύλου, μια νέα τριάδα στατιστικών παραμέτρων  $L_{oo}(\alpha, \psi, MP)$  επιλέγεται με βάση τη δεδομένη από κοινού κατανομή  $f(M_A, \Sigma_A, MP)$ . Επιπλέον, κατά τη μετάβαση από ανοικτό αγροτικό σε αστικό περιβάλλον διάδοσης, παρατηρείται αύξηση των διαλείψεων πολυδιαδρομικής διάδοσης λόγω της αντίστοιχης αύξησης του πλήθους των σκεδαστών. Επίσης, η απομόνωση διασταύρωσης πόλωσης μεταξύ των ομοπολικών  $h_{ii}$  ( $i=j=1,2$ ) και των ετεροπολικών  $h_{ij}$  ( $i \neq j=1,2$ ) συνιστωσών δεν είναι σταθερή κατά μήκος της διανυόμενης απόστασης του UT, γεγονός που οφείλεται κυρίως στην  $XPC_{env}$ . Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.2, το προτεινόμενο μοντέλο MIMO LMS διαύλου ενσωματώνει επίσης επιτυχώς τη χρονική και χωρική (λόγω πόλωσης) συσχέτιση μεταξύ των συνιστωσών του διαύλου.



**Σχήμα 5.2:** Χρονοσειρές 2x2 MIMO LMS διαύλων με διαφορεισμό πόλωσης παραγόμενες με βάση το προτεινόμενο μοντέλο σε διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης: ανοικτό αγροτικό, προαστιακό και αστικό.

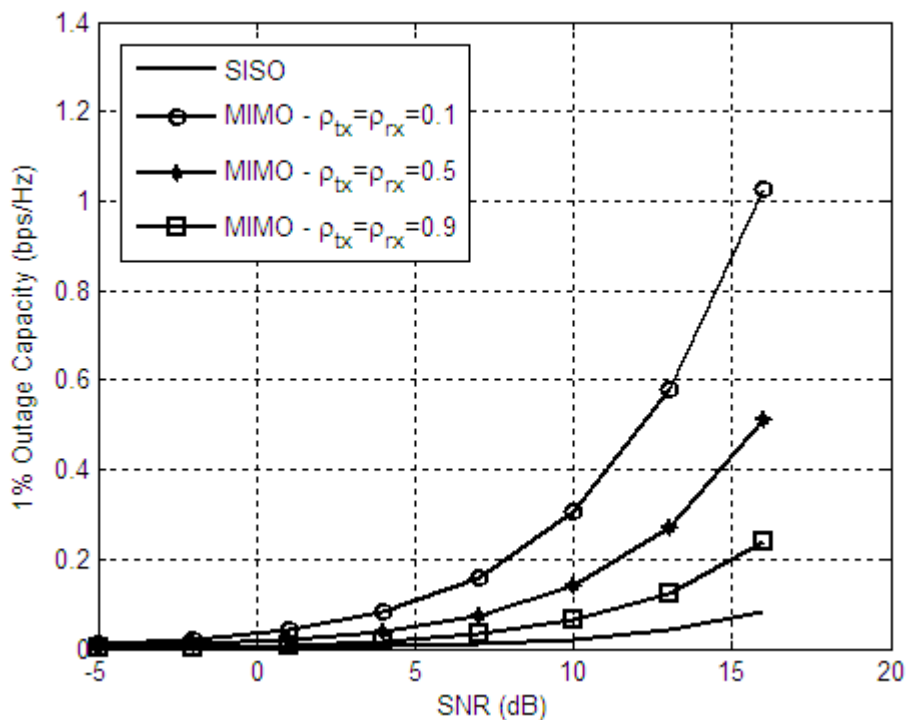


Σχήμα 5.3: 1% χωρητικότητα διακοπής 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό πόλωσης συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR σε ανοικτό αγροτικό περιβάλλον διάδοσης. Εξάρτηση από παράμετρο  $XPD_{ant}$



Σχήμα 5.4: 1% χωρητικότητα διακοπής 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό πόλωσης συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR σε προαστιακό περιβάλλον διάδοσης. Εξάρτηση από δορυφορική γωνία ανύψωσης  $\theta$

Στα Σχήματα 5.3 - 5.5 απεικονίζεται η 1% χωρητικότητα διακοπής του υπό θεώρηση 2x2 MIMO LMS διαύλου συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR. Σημειώνεται ότι τα αριθμητικά αυτά αποτελέσματα έχουν προκύψει μέσω προσομοιώσεων τύπου Monte Carlo και αναφέρονται σε προσομοίωση  $10^5$  στιγμιαίων υλοποιήσεων του διαύλου. Συγκεκριμένα, το Σχήμα 5.3 απεικονίζει την εξάρτηση της χωρητικότητας διακοπής από την απομόνωση διασταύρωσης πόλωσης της κεραίας του UT,  $XPD_{ant}$ , σε ανοικτό αγροτικό περιβάλλον διάδοσης όπου παρατηρείται ότι, όσο το  $XPD_{ant}$  αυξάνεται τόσο περισσότερο εξασθενούν οι ετεροπολικές παρεμβολές διαύλου, με συνέπεια ο MIMO δίαυλος να γίνεται διαγώνιος και η χωρητικότητα διακοπής του να αυξάνεται. Επιπλέον, το Σχήμα 5.4 απεικονίζει την εξάρτηση της χωρητικότητας διακοπής από τη δορυφορική γωνία ανύψωσης,  $\theta$ , σε προαστιακό περιβάλλον διάδοσης. Όπως φαίνεται από το σχήμα αυτό, όσο η γωνία  $\theta$  αυξάνεται τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα η απευθείας LOS ζεύξη να είναι σκιασμένη με αποτέλεσμα, οι Κακές καταστάσεις του διαύλου να επικρατούν και η χωρητικότητα διακοπής του MIMO LMS διαύλου να μειώνεται.



Σχήμα 5.5: 1% χωρητικότητα διακοπής 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό πόλωσης συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR σε αστικό περιβάλλον διάδοσης. Εξάρτηση από συσχέτιση λόγω πόλωσης για διαλείψεις μικρής κλίμακας (Ειδική περίπτωση όπου  $\tilde{\rho}_{rx} = \tilde{\rho}_{tx}$  και μόνο η Κακή κατάσταση του διαύλου θεωρείται).

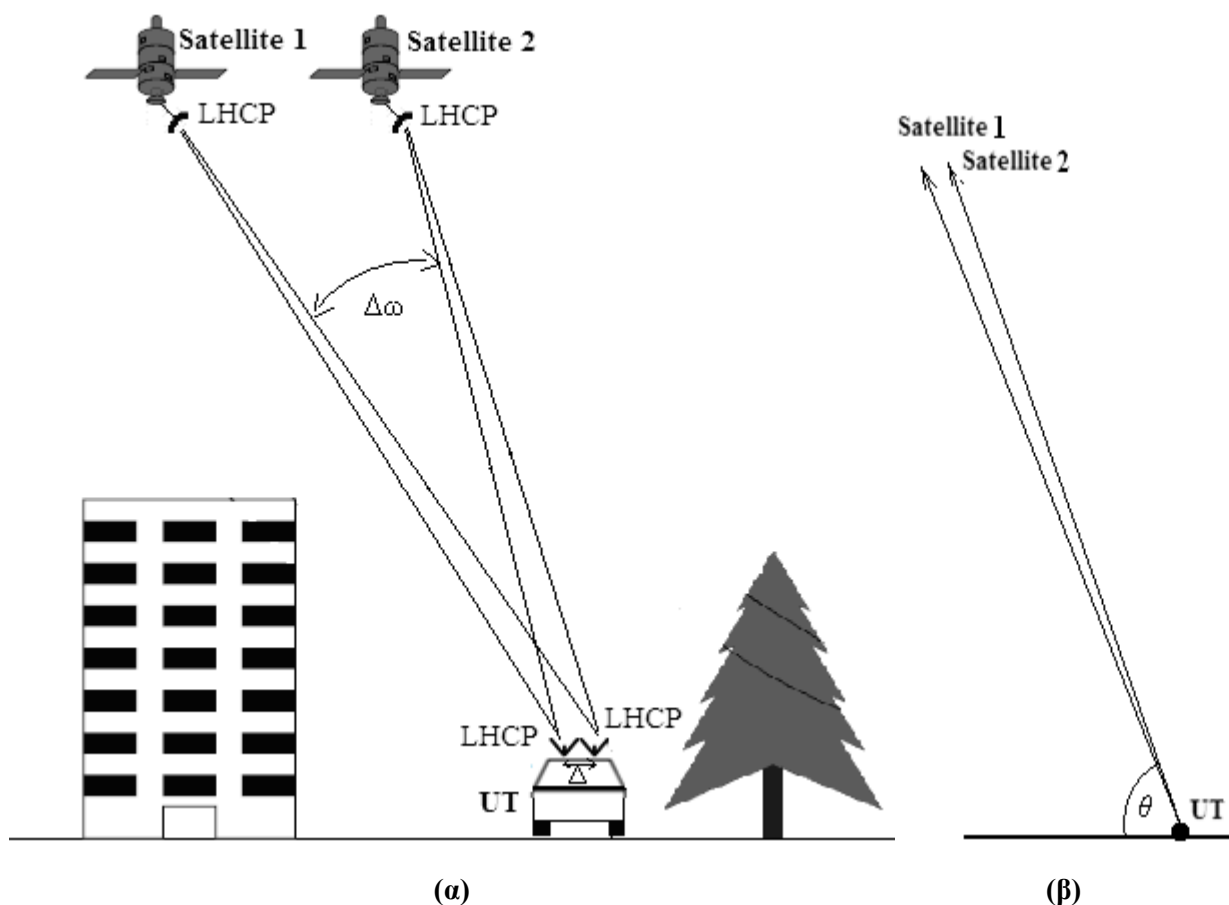
Στο Σχήμα 5.5 απεικονίζεται η εξάρτηση της χωρητικότητας διακοπής από τη συσχέτιση λόγω πόλωσης για διαλείψεις μικρής κλίμακας σε αστικό περιβάλλον διάδοσης. Συγκεκριμένα, λαμβάνεται υπόψη η ειδική περίπτωση όπου  $\tilde{\rho}_{rx} = \tilde{\rho}_{tx}$  και θεωρείται μόνο η Κακή κατάσταση του διαύλου ως περισσότερο χαρακτηριστική του αστικού περιβάλλοντος διάδοσης (λόγω του μεγάλου πλήθους των σκεδαστών). Όπως φαίνεται από το σχήμα αυτό, όσο ο συντελεστής συσχέτισης για διαλείψεις μικρής κλίμακας μειώνεται τόσο αυξάνεται η χωρητικότητα διακοπής που επιτυγχάνεται στον υπό μελέτη 2x2 MIMO LMS δίαυλο. Επιπλέον, σε σχέση με τα Σχήματα 5.3 – 5.4, το Σχήμα 5.5 υποδηλώνει ότι η χωρητικότητα διακοπής που επιτυγχάνεται από 2x2 MIMO LMS δίαυλο σε αστικό περιβάλλον διάδοσης είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη που επιτυγχάνεται σε αγροτικό και προαστιακό περιβάλλον διάδοσης. Ωστόσο, ακόμα και στην περίπτωση του μη ευνοϊκού αστικού περιβάλλοντος διάδοσης, όπου η σκίαση των δορυφορικών ζεύξεων είναι πολύ συχνό φαινόμενο, παρατηρείται σημαντικό κέρδος χωρητικότητας μεταξύ των αντιστοίχων διαύλων MIMO και SISO, το οποίο επιτυγχάνεται μέσω της προτεινόμενης τεχνολογίας MIMO.

## **5.2. Μοντέλο και Χωρητικότητα MIMO Κινητού Δορυφορικού Διαύλου με Διαφορισμό Δορυφόρου σε Συχνότητες κάτω των 10GHz**

Στην ενότητα αυτή θεωρούνται MIMO κινητοί δορυφορικοί δίαυλοι που λειτουργούν σε συχνότητες κάτω των 10GHz στους οποίους οι πολλαπλές εισοδοί – πολλαπλές έξοδοι προκύπτουν με εφαρμογή της τεχνικής διαφορισμού δορυφόρου.

### **5.2.1. Ανάλυση**

Στο Σχήμα 5.6 απεικονίζεται η διάταξη του υπό θεώρηση 2x2 MIMO LMS διαύλου που εξετάζεται στην παρούσα ενότητα.



**Σχήμα 5.6:** Διάταξη 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό δορυφόρου που λειτουργεί σε συχνότητες κάτω των 10GHz υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω σκίασης και πολυδιαδρομικής διάδοσης

Ειδικότερα, μελετάται η κάτω ζεύξη. Για την υλοποίηση του διαφορισμού δορυφόρου στο διάυλο το κινητό τερματικό χρήστη UT διαθέτει κεραία δύο στοιχείων ενώ διατηρεί ταυτόχρονα συνδέσεις και με τους δύο δορυφόρους,  $S_1$  και  $S_2$ , έκαστος των οποίων διαθέτει απλή κεραία ενός στοιχείου. Η πόλωση του συστήματος υποτίθεται απλή κυκλική (LHCP ή RHCP), δηλαδή, τα δύο στοιχεία της κεραίας UT όσο και αυτά των δύο δορυφόρων είναι όλα πολωμένα με την ίδια κυκλική πόλωση (LHCP ή RHCP). Η απόσταση μεταξύ των δύο στοιχείων της κεραίας λήψης του UT συμβολίζεται με  $\Delta$  ενώ η γωνιακή απόσταση που σχηματίζεται μεταξύ των δύο δορυφόρων  $S_1$  και  $S_2$  ως προς το UT συμβολίζεται με  $\Delta\omega$ . Οι γωνίες ανύψωσης των κεκλιμένων ραδιοδρόμων που υπεισέρχονται κατά την ανάλυση του προβλήματος θεωρούνται ίσες μεταξύ τους και συμβολίζονται με  $\theta$ . Όσον αφορά τη συχνότητα λειτουργίας, τη δορυφορική τροχιά και την πόλωση του μεταδιδόμενου σήματος, υποτίθεται το βασικό σενάριο στο πλαίσιο του προτύπου DVB-SH, δηλαδή, S (2/4 GHz) ζώνη συχνοτήτων, γεωστατική τροχιά (GEO) και κυκλική αριστερόστροφη πόλωση LHCP,

αντίστοιχα [DVB-SH],[DVB-SH IG]. Όπως στην περίπτωση του MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό πόλωσης που μελετήθηκε στην Ενότητα 5.1, έτσι και στην προκειμένη περίπτωση, με βάση τη μορφή του τοπικού περιβάλλοντος στην περιοχή του κινητού UT, η LOS ζεύξη μεταξύ δορυφόρου-UT μπορεί να είναι καθαρή, μερικώς ή πλήρως εμποδιζόμενη, ενδεχόμενα που οδηγούν σε διαλείψεις λόγω σκίασης και πολυδιαδρομικής διάδοσης. Δεδομένου ότι οι πολυδιαδρομικές οδεύσεις του σήματος δεν υφίστανται σημαντική χρονική διασπορά, θεωρείται ότι ο δίαυλος εμφανίζει επίπεδες διαλείψεις ως προς τη συχνότητα [Perez-Fontan 2001],[King 2007a],[Sellathurai 2006],[Taricco 2003],[Lacoste 2009],[Alfano 2009].

Σύμφωνα με τις ανωτέρω υποθέσεις, ο υπό θεώρηση MIMO LMS δίαυλος περιγράφεται από 2x2 MIMO πίνακα διαύλου  $\mathbf{H}=[h_{ij}]$  ( $i,j=1,2$ ). Στη συνέχεια εξετάζεται μεμονωμένα έκαστο των φαινομένων διάδοσης που σχετίζεται με τον υπό μελέτη 2x2 MIMO LMS δίαυλο. Ωστόσο, τονίζεται ότι το μοντέλο περιγραφής του εκάστοτε φαινομένου διάδοσης δίδεται μόνο όπου υπάρχει διαφοροποίηση σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο περιγραφής που ισχύει στην περίπτωση του 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό πόλωσης, ο οποίος μελετήθηκε στην Ενότητα 5.1.

- Περιβάλλουσα υποδιαύλων SISO LMS μεταξύ πομπού και δέκτη
- Απόσβεση δια-δορυφορικών διαύλων λόγω κεραίας λήψης
- Χωρική συσχέτιση στις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας
- Χωρική συσχέτιση στις διαλείψεις μικρής κλίμακας
- Χρονική συσχέτιση

#### **A. Περιβάλλουσα Υποδιαύλων SISO LMS Μεταξύ Πομπού και Δέκτη**

Ισχύει ότι και στην αντίστοιχη περίπτωση του 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό πόλωσης, ο οποίος μελετήθηκε στην Ενότητα 5.1 (βλ. Παράγραφο A).

#### **B. Απόσβεση Δια-Δορυφορικών Διαύλων λόγω Κεραίας Λήψης**

Λόγω της κατευθυντικότητας των στοιχείων της κεραίας λήψης του UT, προκαλείται απόσβεση στο μεταδιδόμενο σήμα από κάθε δορυφόρο. Αν  $\varepsilon \in [0,1]$  είναι η παράμετρος που εξαρτάται από το διάγραμμα ακτινοβολίας των στοιχείων της κεραίας λήψης του UT και περιγράφει την εισαγόμενη απόσβεση σε κάθε δια-δορυφορικό δίαυλο, έκαστο των δύο στοιχείων της κεραίας λήψης του UT λαμβάνει το μεταδιδόμενο σήμα από τον αντίστοιχο δορυφόρο με το μέγιστο κέρδος και εισάγει απόσβεση στο μεταδιδόμενο σήμα από τον

έτερο δορυφόρο ίση με  $\sqrt{\varepsilon/(1-\varepsilon)}$ . Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη τη συμμετρική περίπτωση όπου τα δύο στοιχεία της κεραίας λήψης του UT είμαι όμοια μεταξύ τους, ο παράγοντας απόσβεσης δια-δορυφορικών διαύλων λόγω κεραίας λήψης,  $XSD_{ant}$ , που επηρεάζει τις συνιστώσες διαλείψεων μεγάλης κλίμακας  $\bar{h}_{ij}$  ( $i,j=1,2$ ) εκφράζεται (σε dB) ως εξής

$$XSD_{ant} = 10 \log_{10} \frac{E\left[|\bar{h}_{ii}|^2\right]}{E\left[|\bar{h}_{ij}|^2\right]} = 10 \log_{10} \left[ 1 - \varepsilon / \varepsilon \right] \quad (5.21)$$

Για παράδειγμα, για κεραία λήψης του UT με ημισφαιρικό διάγραμμα ακτινοβολίας ισχύει ότι  $\varepsilon=0.5$  και, συνεπώς,  $XSD_{ant}=0\text{dB}$  [Rappaport 1999].

Όσον αφορά την επίδραση της απόσβεσης δια-δορυφορικών διαύλων λόγω κεραίας λήψης στις συνιστώσες διαλείψεων μικρής κλίμακας  $\tilde{h}_{ij}$  ( $i,j=1,2$ ), κατ' αντιστοιχία με την (5.8) και με εναλλαγή των παραμέτρων  $\varepsilon$  και  $\gamma$  προκύπτει η εξής σχέση

$$E\left[|\tilde{h}_{ij}|^2\right] = \begin{cases} MP \cdot (1 - \varepsilon) & i = j \\ MP \cdot \varepsilon & i \neq j \end{cases} \quad (5.22)$$

όπου ( $i,j=1,2$ ).

### Γ. Χωρική Συσχέτιση στις Συνιστώσες Διαλείψεων Μεγάλης Κλίμακας

Στην περίπτωση αυτή ισχύουν όσα και στην αντίστοιχη περίπτωση του 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό πόλωσης, ο οποίος μελετήθηκε στην Ενότητα 5.1 (βλ. Παράγραφο Γ), με τις εξής διαφορές όσον αφορά τον πίνακα μεταβλητότητας  $\bar{\mathbf{C}}$ . Συγκεκριμένα, μέχρι σήμερα, δεν υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα που χαρακτηρίζουν τον πίνακα μεταβλητότητας  $\bar{\mathbf{C}}$  για MIMO LMS διαύλους με διαφορισμό δορυφόρου σε διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης. Η μόνη ερευνητική προσπάθεια προς αυτή την κατεύθυνση πραγματοποιείται στο πλαίσιο του έργου MIMOSA [MIMOSA] το οποίο, όμως, είναι ακόμα σε εξέλιξη και τα ενδιάμεσα αποτελέσματά του δεν έχουν δημοσιευτεί. Ωστόσο, για τον πίνακα μεταβλητότητας  $\bar{\mathbf{C}}$  στην υπό μελέτη περίπτωση 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό δορυφόρου, προτείνεται η εξής σχέση

$$\bar{\mathbf{C}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \bar{\rho}_N & \bar{\rho}_N \\ 1 & 1 & \bar{\rho}_N & \bar{\rho}_N \\ \bar{\rho}_N & \bar{\rho}_N & 1 & 1 \\ \bar{\rho}_N & \bar{\rho}_N & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

όπου

$$\bar{\rho}_N = \frac{\ln \left[ 1 + \bar{\rho}_{LN} \left( \exp(\psi^2) - 1 \right) \right]}{\psi^2} \quad (5.24)$$

ο συντελεστής χωρικής συσχέτισης μεταξύ κανονικά κατανεμημένων συνιστωσών διαλείψεων μεγάλης κλίμακας  $\ln(\bar{h}_{ij})$  ( $i,j=1,2$ ) και  $\bar{\rho}_{LN}$  ο συντελεστής χωρικής συσχέτισης μεταξύ λογαριθμικά κατανεμημένων συνιστωσών διαλείψεων μεγάλης κλίμακας  $\bar{h}_{ij}$  ( $i,j=1,2$ ). Συγκεκριμένα, λόγω της τεράστιας απόστασης μεταξύ Γης-δορυφόρου και της σχετικά μικρότερης απόστασης μεταξύ των αντιστοίχων κεραιών εκπομπής και λήψης, η (5.23) υποδηλώνει τα εξής:

- Ο συντελεστής χωρικής συσχέτισης των κανονικά κατανεμημένων συνιστωσών διαλείψεων μεγάλης κλίμακας που εισάγεται μεταξύ δύο διαφορετικών δορυφόρων εκπομπής και του ίδιου στοιχείου κεραιάς λήψης του UT είναι ίσος με  $\bar{\rho}_N$ .
- Ο συντελεστής χωρικής συσχέτισης των κανονικά κατανεμημένων συνιστωσών διαλείψεων μεγάλης κλίμακας του διαύλου που εισάγεται μεταξύ διαφορετικών δορυφόρων και διαφορετικών στοιχείων κεραιάς λήψης του UT είναι ίσος με  $\bar{\rho}_N$ .
- Ο συντελεστής χωρικής συσχέτισης των κανονικά κατανεμημένων συνιστωσών διαλείψεων μεγάλης κλίμακας του διαύλου που εισάγεται μεταξύ δύο διαφορετικών στοιχείων κεραιάς λήψης του UT και του ίδιου δορυφόρου εκπομπής είναι ίσος με 1.

Ο συντελεστής χωρικής συσχέτισης  $\bar{\rho}_{LN}$ , γνωστός και ως συντελεστής συσχέτισης λόγω σκίασης (shadowing correlation), έχει μελετηθεί εκτενώς στη σχετική βιβλιογραφία [Heuberger 2008],[Robet 1992],[Vazquez-Castro 2002],[Lutz 1996],[Bischl 1996]. Οι εργασίες αυτές προτείνουν συγκεκριμένες τιμές για τη μετρήσιμη παράμετρο  $\bar{\rho}_{LN}$ , οι οποίες λαμβάνονται υπόψη στη Διατριβή για την υπό μελέτη περίπτωση MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό δορυφόρου.

#### Δ. Χωρική Συσχέτιση στις Συνιστώσες Διαλείψεων Μικρής Κλίμακας

Στην περίπτωση αυτή ισχύουν όσα και στην αντίστοιχη περίπτωση του 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό πόλωσης, ο οποίος μελετήθηκε ανωτέρω στην Ενότητα 5.1 (βλ. Παράγραφο Δ), με τις εξής διαφορές:

Οι πίνακες μεταβλητότητας  $\tilde{\mathbf{R}}_{ix}$ ,  $\tilde{\mathbf{R}}_{ix}$  για τις συνιστώσες διαλείψεων μικρής κλίμακας  $\tilde{h}_{ij}$  ( $i,j=1,2$ ) που αφορούν την πλευρά εκπομπής και λήψης, αντίστοιχα, προκύπτουν κατ'



αντιστοιχία με τις (5.18)-(5.19) και με εναλλαγή των παραμέτρων  $\varepsilon$  και  $\gamma$ , δηλαδή (βλ. Παράρτημα IV):

$$\tilde{\mathbf{R}}_{tx} = E[\tilde{\mathbf{H}}^H \tilde{\mathbf{H}}] = MP \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2\sqrt{(1-\varepsilon)\varepsilon}\tilde{\rho}_{tx} \\ 2\sqrt{(1-\varepsilon)\varepsilon}\tilde{\rho}_{tx} & 1 \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

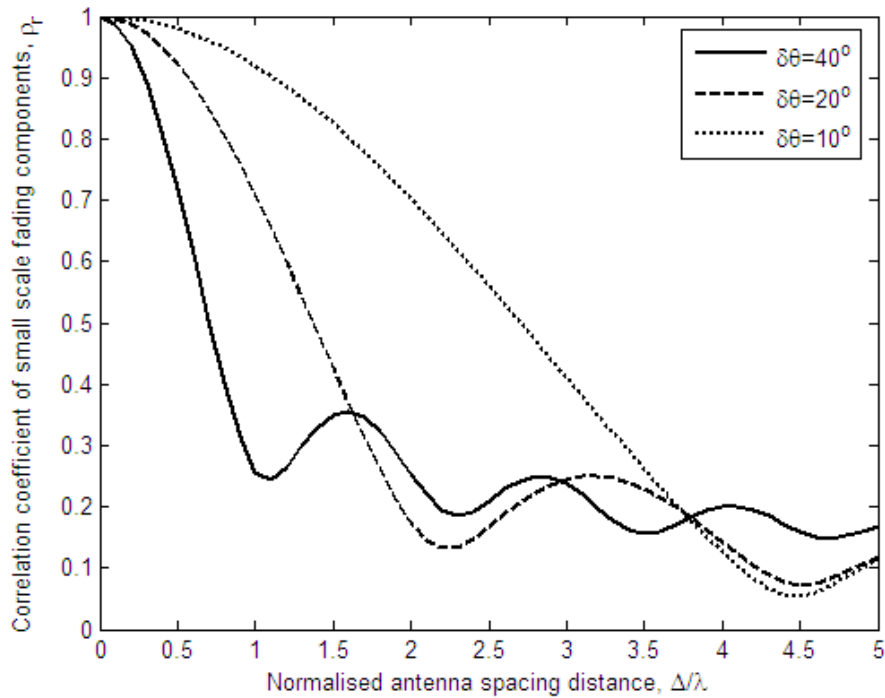
$$\tilde{\mathbf{R}}_{rx} = E[\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H] = MP \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2\sqrt{(1-\varepsilon)\varepsilon}\tilde{\rho}_{rx} \\ 2\sqrt{(1-\varepsilon)\varepsilon}\tilde{\rho}_{rx} & 1 \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

όπου ( $i,j=1,2$ ). Οι συντελεστές χωρικής συσχέτισης  $\tilde{\rho}_{tx}, \tilde{\rho}_{rx}$  που εμφανίζονται στις (5.25)-(5.26) εξαρτώνται από:

- Τη γωνιακή διασπορά  $\delta\theta$  των συνιστωσών πολυδιαδρομικής διάδοσης, η οποία εξαρτάται από το περιβάλλον διάδοσης. Συγκεκριμένα, σε ανοικτά περιβάλλοντα διάδοσης, όπως π.χ., το αγροτικό και το προαστιακό, όπου οι σκεδαστές είναι αραιά κατανομημένοι, η γωνιακή διασπορά  $\delta\theta$  λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές σε σύγκριση με αυτές που λαμβάνει σε αστικά περιβάλλοντα διάδοσης, όπου οι σκεδαστές είναι πυκνά κατανομημένοι.
- Την απόσταση διαχωρισμού δύο διαδοχικών στοιχείων κεραίας εκπομπής (και αντίστοιχα, λήψης). Συγκεκριμένα, στην υπό μελέτη περίπτωση MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό δορυφόρου, στην πλευρά εκπομπής, η απόσταση αυτή σχετίζεται με τη γωνιακή απόσταση  $\Delta\omega$  των δύο δορυφόρων ως προς το UT ενώ, στην πλευρά λήψης, με την απόσταση  $\Delta$  μεταξύ των δύο στοιχείων της κεραίας λήψης του UT. Αν ως κεραία λήψης του UT υποθεθεί ομοιόμορφη γραμμική στοιχειοκεραία (Uniform Linear Array, ULA), για το συντελεστή χωρικής συσχέτισης  $\tilde{\rho}_{rx}$  προκύπτει η κατωτέρω σχέση [Proakis 2001],[Rappaport 1999],[Tse 2005]

$$\tilde{\rho}_{rx} = E[\tilde{h}_{1i}\tilde{h}_{2i}^*] = \frac{1}{2\delta\theta} \int_{\theta-\delta\theta}^{\theta+\delta\theta} \exp(j2\pi\Delta \cos \omega) d\omega \quad (i=1,2) \quad (5.27)$$

Με βάση την (5.27), στο Σχήμα 5.7 απεικονίζεται ο συντελεστής χωρικής συσχέτισης  $\tilde{\rho}_{rx}$  για τις συνιστώσες διαλείψεων μικρής κλίμακας  $\tilde{h}_{ij}$  ( $i,j=1,2$ ) στην πλευρά λήψης συναρτήσει της απόστασης  $\Delta$  για διάφορες τιμές της γωνιακής διασποράς  $\delta\theta$  θεωρώντας ULA κεραία για το UT και δορυφορική γωνία ανύψωσης  $\theta=40^\circ$ .



**Σχήμα 5.7:** Συντελεστής χωρικής συσχέτισης για τις διαλείψεις μικρής κλίμακας στην πλευρά λήψης συναρτήσει της απόστασης  $\Delta$  (κανονικοποιημένης ως προς το μήκος κύματος  $\lambda$ ) και εξάρτηση από γωνιακή διασπορά  $\delta\theta$ . Θεωρείται ομοιόμορφη γραμμική στοιχειοκεραία (ULA) και δορυφορική γωνία ανύψωσης  $\theta=40^\circ$ .

Στο πλαίσιο των MIMO LMS διαύλων με διαφορισμό δορυφόρου, τα μόνα διαθέσιμα αποτελέσματα για τους συντελεστές χωρικής συσχέτισης  $\tilde{\rho}_{tx}, \tilde{\rho}_{rx}$  έχουν δημοσιευτεί στις [King 2005b],[King 2007a]. Ωστόσο, στις εργασίες αυτές έχει υποτεθεί ιδιαίτερα μικρή γωνιακή απόσταση  $\Delta\omega$  μεταξύ των δορυφόρων ώστε να ισχύει η υπόθεση ότι οι διάφορες ακτίνες (rays) φθάνουν παράλληλα στο UT, γεγονός που περιορίζει τη χρηστικότητα των προτεινόμενων τιμών για τους  $\tilde{\rho}_{tx}, \tilde{\rho}_{rx}$  σε σενάρια πρακτικών συστημάτων. Αντίθετα, στο πλαίσιο των συμβατικών MIMO επίγειων διαύλων, οι συντελεστές χωρικής συσχέτισης  $\tilde{\rho}_{tx}, \tilde{\rho}_{rx}$  έχουν μελετηθεί εκτενώς (βλ. Ενότητα 3.7.3). Μεταξύ άλλων, λαμβάνεται υπόψη η κατανομή της ισχύος των πολυδιαδρομικών συνιστωσών κατά τη διεύθυνση του αζιμούθιου προσδίδοντας έτσι τρισδιάστατη (3D) θεώρηση<sup>3</sup> στην ανάλυση του υπό μελέτη προβλήματος εύρεσης τιμών για τους συντελεστές  $\tilde{\rho}_{tx}, \tilde{\rho}_{rx}$  [Shafi 2006]. Για τους ανωτέρω λόγους, οι συντελεστές  $\tilde{\rho}_{tx}, \tilde{\rho}_{rx}$  του υπό μελέτη MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό

<sup>3</sup> Για ανάλογη 3D θεώρηση στο πλαίσιο των δορυφορικών επικοινωνιών, ο αναγνώστης παραπέμπεται στο [Kasparis 2007].

δορυφόρου εξάγονται με προσεκτική διαισθητική εκτίμηση των διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων που αφορούν τόσο MIMO επίγειους (πρωτίστως) όσο και MIMO LMS (δευτερευόντως) διαύλους. Συνεπώς, για αρκετά μεγάλη γωνιακή απόσταση  $\Delta\omega$  μεταξύ των δύο δορυφόρων και δεδομένης της έλλειψης σκεδαστών στο διάστημα και, συγκεκριμένα, στο εγγύς περιβάλλον έκαστου των δύο δορυφόρων, θεωρείται ότι  $\tilde{\rho}_{rx} = 0$ , δηλαδή, μηδενική χωρική συσχέτιση. Στην πλευράς λήψης, ο συντελεστής  $\tilde{\rho}_{rx}$  λαμβάνεται υψηλότερος σε αστικά περιβάλλοντα διάδοσης σε σύγκριση με αυτόν σε αγροτικά και προαστιακά περιβάλλοντα διάδοσης δεδομένου ότι στην πρώτη περίπτωση οι σκεδαστές είναι πυκνά κατανομημένοι και, ως εκ τούτου, η αντίστοιχη γωνιακή διασπορά  $\delta\theta$  των πολυδιαδρομικών συνιστωσών είναι μικρότερη. Οι ανωτέρω τιμές για τους συντελεστές  $\tilde{\rho}_{rx}, \tilde{\rho}_{rx}$  συνοψίζονται στον Πίνακα 5.2.

### **Ε. Χρονική Συσχέτιση**

Για τη χρονική συσχέτιση που εισάγεται στο δίαυλο καθώς το UT κινείται με συγκεκριμένη ταχύτητα στο LMS περιβάλλον διάδοσης, θεωρούνται οι εξής δύο περιπτώσεις χρονικών διακυμάνσεων:

**i) Χρονικές Διακυμάνσεις Μεταξύ Διαφορετικών Καταστάσεων Διαύλου:** Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στην Παράγραφο Γ, στην υπό θεώρηση περίπτωση 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό δορυφόρου, αντίθετα με την αντίστοιχη περίπτωση διαφορισμού πόλωσης, ο συντελεστής χωρικής συσχέτισης  $\bar{\rho}_{LN}$  που επηρεάζει τις συνιστώσες διαλείψεων μεγάλης κλίμακας λαμβάνει σχετικά χαμηλές τιμές. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι οι διάφοροι υποδίαυλοι SISO LMS που σχηματίζονται μεταξύ πομπού και δέκτη ακολουθούν *διαφορετική* αλληλουχία καταστάσεων διαύλου Καλής και Κακής Κατάστασης. Συνεπώς, δεδομένου του πρώτης τάξης μοντέλου αλυσίδας Markov δύο καταστάσεων που θεωρείται στην περίπτωση SISO LMS διαύλου και περιγράφεται στην Ενότητα 2.3.3.5 [Prieto-Cerdeira 2010], το μοντέλο αλυσίδας Markov που προκύπτει στην υπό θεώρηση 2x2 MIMO LMS περίπτωση είναι επίσης πρώτης τάξης αλλά τεσσάρων καταστάσεων, όπως αυτό που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.8. Η μεθοδολογία για να προκύψει το θεωρούμενο απλοποιημένο μοντέλο τεσσάρων καταστάσεων με βάση το αρχικό μοντέλο δύο καταστάσεων περιγράφεται αναλυτικά στην [Lutz 1996]. Σύμφωνα με αυτή, αναγκαία είναι η γνώση των πιθανοτήτων μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων που ισχύουν στη SISO LMS περίπτωση [Prieto-Cerdeira 2010] και του συντελεστή συσχέτισης  $\bar{\rho}_{LN}$

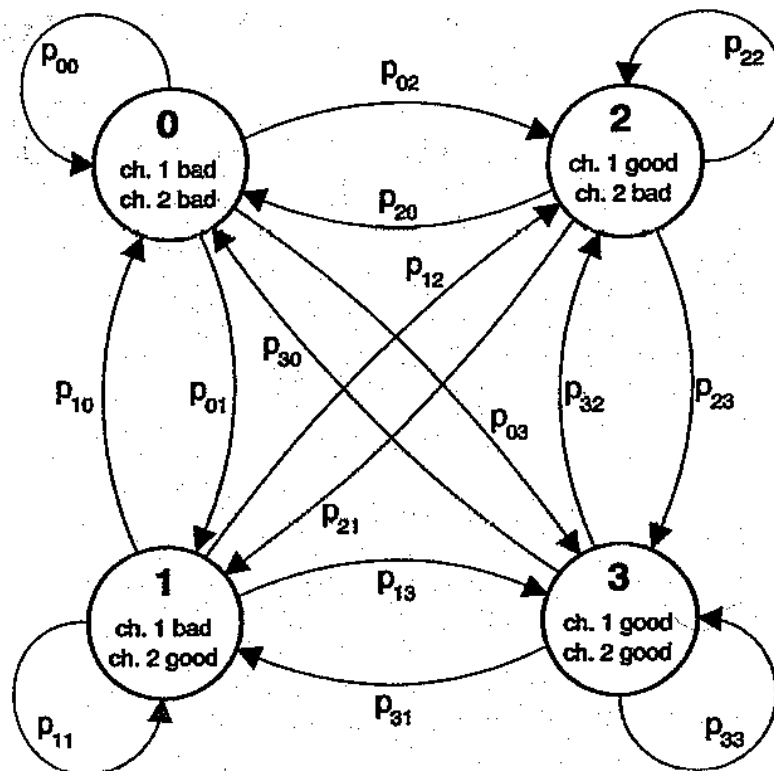
[Heuberger 2008],[Robet 1992],[Vazquez-Castro 2002],[Lutz 1996],[Bischl 1996].  
 Συνεπώς, δεδομένων των πιθανοτήτων μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων  $\mathbf{P}_{SISO,i}(b_i,g_i)$  ( $i=1,2$ ) που ισχύουν για το μοντέλο δύο καταστάσεων στη SISO LMS περίπτωση, οι αντίστοιχες πιθανότητες μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων  $\mathbf{P}_{MIMO}$  για το μοντέλο τεσσάρων καταστάσεων στην υπό μελέτη MIMO LMS περίπτωση προκύπτουν ως εξής [Lutz 1996]

$$\mathbf{P}_{MIMO} = \mathbf{P}_u + \mathbf{C}_{temp} \quad (5.28)$$

όπου

$$\mathbf{P}_u = \begin{bmatrix} (1-g_1)(1-g_2) & (1-g_1)g_2 & g_1(1-g_2) & g_1g_2 \\ (1-g_1)b_2 & (1-g_1)(1-b_2) & g_1b_2 & g_1(1-b_2) \\ b_1(1-g_2) & b_1g_2 & (1-b_1)(1-g_2) & (1-b_1)g_2 \\ b_1b_2 & b_1(1-b_2) & (1-b_1)b_2 & (1-b_1)(1-b_2) \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

και ο 4x4 πίνακας πραγματικών στοιχείων  $\mathbf{C}_{temp}$  δίδεται συναρτήσει του συντελεστή συσχέτισης  $\bar{\rho}_{LN}$  στην [Lutz 1996].



Σχήμα 5.8: Markov μοντέλο 4 καταστάσεων διαύλου

**ii) Χρονικές Διακυμάνσεις Εντός Ίδιας Κατάστασης Διαύλου:** Όσον αφορά τις χρονικές διακυμάνσεις εντός ίδιας κατάστασης του διαύλου, για τις διαλείψεις μεγάλης και μικρής κλίμακας, ισχύουν όσα και στην αντίστοιχη περίπτωση του 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό πόλωσης, ο οποίος μελετήθηκε στην Ενότητα 5.1 (βλ. Παράγραφο Ε, Υποπερίπτωση ii).

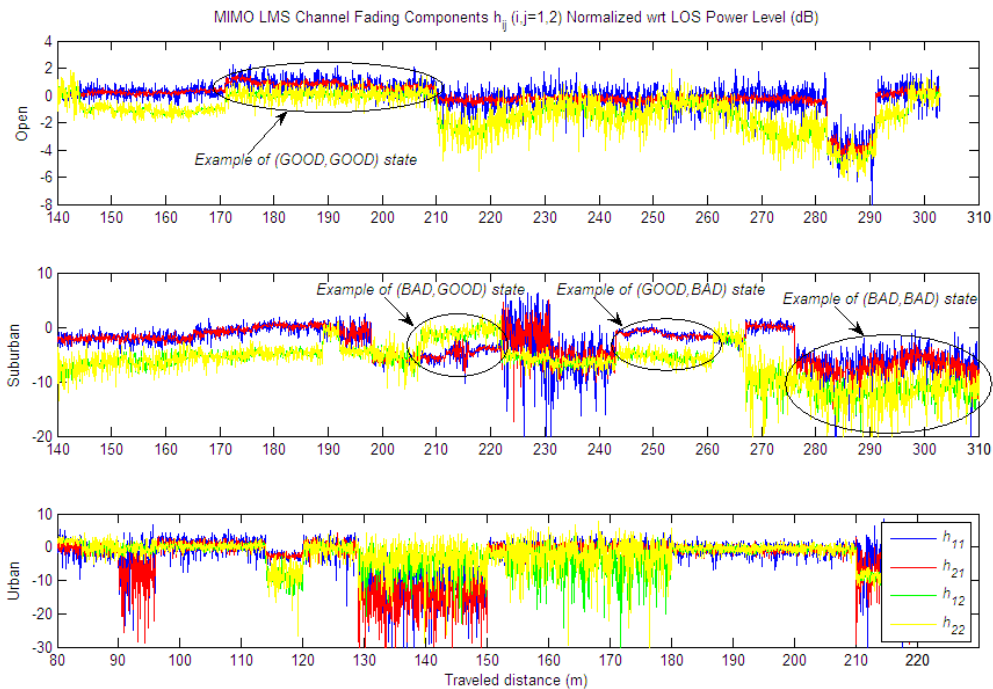
### 5.2.2. Αριθμητικά Αποτελέσματα

Στη συνέχεια, παρατίθενται αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούν υλοποιήσεις του προτεινόμενου μοντέλου για τον υπό θεώρηση 2x2 MIMO LMS δίαυλο. Συγκεκριμένα, λαμβάνονται υπόψη τρία σενάρια 2x2 MIMO LMS διαύλων με διαφορισμό δορυφόρου που λειτουργούν σε συχνότητες κάτω των 10GHz υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω σκίασης και πολυδιαδρομικής διάδοσης σε τρία διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης, αντίστοιχα. Όλες οι παράμετροι που υπεισέρχονται κατά την ανάλυση δίδονται στον Πίνακα 5.2. Στα σχήματα που ακολουθούν, για την εκτίμηση της επίδοσης των αντιστοίχων MIMO LMS διαύλων ως στατιστικό μέτρο λαμβάνεται η *χωρητικότητα διακοπής* που ορίζεται μέσω της (3.31) ενώ, για λόγους σύγκρισης, απεικονίζεται επίσης και η χωρητικότητα διακοπής των αντιστοίχων SISO LMS διαύλων.

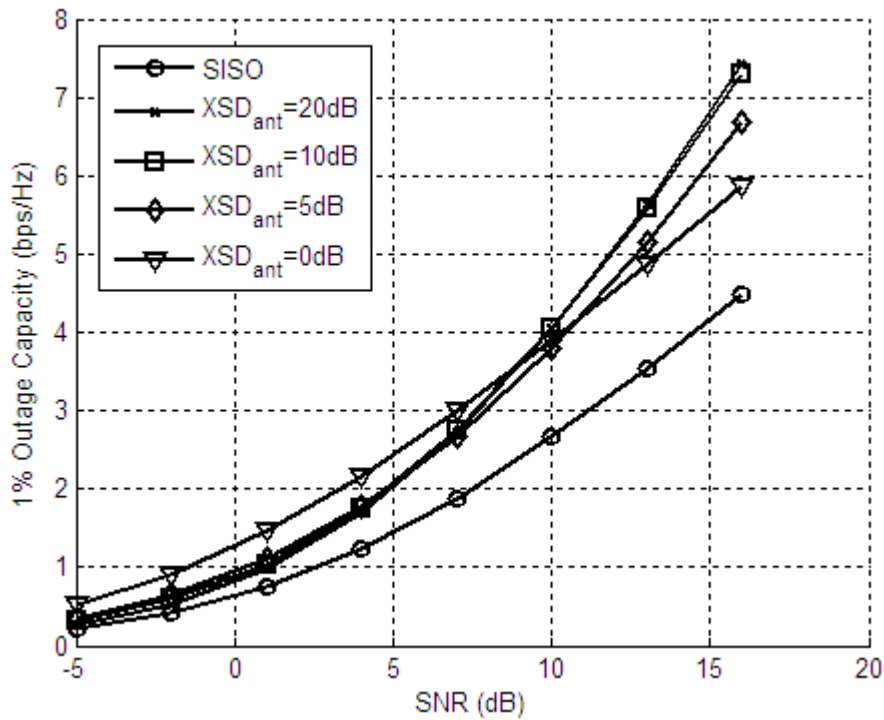
**Πίνακας 5.2: Παράμετροι των υπό θεώρηση σεναρίων 2x2 MIMO LMS διαύλων με διαφορισμό δορυφόρου**

Παράμετρος	Ανοικτό Αγροτικό Περιβάλλον Διάδοσης	Προαστιακό Περιβάλλον Διάδοσης	Αστικό Περιβάλλον Διάδοσης	Αναφορά
Συχνότητα Λειτουργίας, $f$	2.2GHz (Ζώνη S)	2.2GHz (Ζώνη S)	2.2GHz (Ζώνη S)	[DVB-SH], [Heuberger 2008]
Δορυφορική Τροχιά	GEO	GEO	GEO	[DVB-SH IG]
Πόλωση	Απλή Κυκλική (LHCP)	Απλή Κυκλική (LHCP)	Απλή Κυκλική (LHCP)	[DVB-SH IG]
Ταχύτητα Κινητού UT, $v$	50km/h	50km/h	50km/h	[DVB-SH IG]
Δορυφορική Γωνία Ανύψωσης, $\theta$	40°	40°	40°	[DVB-SH IG]
Γωνιακή Απόσταση Δορυφόρων ως προς UT	30°	30°	30°	[Heuberger 2008]
Απόσβεση Δια-Δορυφορικών Διαύλων λόγω Κεραίας Λήψης UT, $XSD_{ant}$	0dB ( $\epsilon=0.5$ )	0dB ( $\epsilon=0.5$ )	0dB ( $\epsilon=0.5$ )	Κεραία UT με Ημισφαιρικό Διάγραμμα Ακτινοβολίας [Rappaport 1999]
Τριάδα Στατιστικών Παραμέτρων $Loo$ ( $\alpha, \psi, MP$ )	Για κάθε νέα κατάσταση διαύλου, μια νέα τριάδα στατιστικών παραμέτρων $Loo$ ( $\alpha, \psi, MP$ ) επιλέγεται με βάση τη δεδομένη από κοινού κατανομή $f(M_A, \Sigma_A, MP)$	Για κάθε νέα κατάσταση διαύλου, μια νέα τριάδα στατιστικών παραμέτρων $Loo$ ( $\alpha, \psi, MP$ ) επιλέγεται με βάση τη δεδομένη από κοινού κατανομή $f(M_A, \Sigma_A, MP)$	Για κάθε νέα κατάσταση διαύλου, μια νέα τριάδα στατιστικών παραμέτρων $Loo$ ( $\alpha, \psi, MP$ ) επιλέγεται με βάση τη δεδομένη από κοινού κατανομή $f(M_A, \Sigma_A, MP)$	[Prieto Cerdeira 2010]
Συντελεστής Χωρικής Συσχέτισης για Διαλείψεις Μικρής Κλίμακας στην Πλευρά Εκπομπής, $\tilde{\rho}_{tx}$	0	0	0	Θεωρία Ενότητας 3.7.3, [King 2005b]
Συντελεστής Χωρικής Συσχέτισης για Διαλείψεις Μικρής Κλίμακας στην Πλευρά Λήψης, $\tilde{\rho}_{rx}$	0.1	0.2	0.3	Θεωρία Ενότητας 3.7.3, [King 2005b]
Συντελεστής Χωρικής Συσχέτισης για Διαλείψεις Μεγάλης Κλίμακας, $\bar{\rho}_{LN}$	0.25	0.3	0.7	[Heuberger 2008], [Prieto Cerdeira 2010]
Χρονικές Διακυμάνσεις Μεταξύ Διαφορετικών Καταστάσεων Διαύλου	1 <sup>ης</sup> τάξης μοντέλο αλυσίδας Markov 4 καταστάσεων	1 <sup>ης</sup> τάξης μοντέλο αλυσίδας Markov 4 καταστάσεων	1 <sup>ης</sup> τάξης μοντέλο αλυσίδας Markov 4 καταστάσεων	[Prieto Cerdeira 2010], [Lutz 1996]

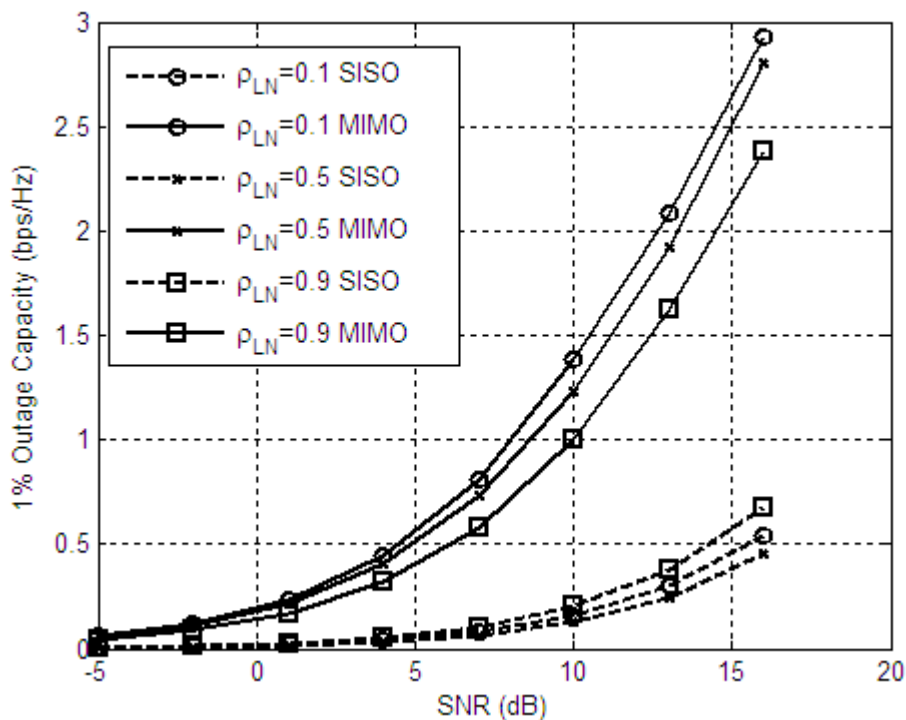
Στο Σχήμα 5.9 απεικονίζονται οι παραγόμενες χρονοσειρές με βάση το προτεινόμενο μοντέλο 2x2 MIMO LMS διαύλων για τρία περιβάλλοντα διάδοσης: ανοικτό αγροτικό, προαστιακό και αστικό. Συγκεκριμένα, οι υποδιάυλοι  $h_{ij}$  ( $i,j=1,2$ ) (κανονικοποιημένοι ως προς τη στάθμη ισχύος LOS, σε dB) απεικονίζονται συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης του τερματικού χρήστη UT. Σε κάθε περιβάλλον διάδοσης, καθώς το UT κινείται, παρατηρείται μια αλληλουχία μεταξύ των διαφόρων καταστάσεων του MIMO διαύλου, δηλαδή, (GOOD,GOOD), (GOOD,BAD), (BAD, GOOD) και (BAD,BAD). Επιπλέον, αντίστοιχες παρατηρήσεις με αυτές που προκύπτουν από το Σχήμα 5.2 για την περίπτωση MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό πόλωσης ισχύουν και στην υπό μελέτη περίπτωση MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό δορυφόρου με την εξής, ωστόσο, διαφορά: Στην προκειμένη περίπτωση, λόγω της απλής πόλωσης του συστήματος και του θεωρούμενου ημισφαιρικού διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας λήψης του UT, δεν προκύπτει σημαντική απόσβεση δια-δορυφορικών διαύλων μεταξύ των διαγωνίων και αντι-διαγωνίων στοιχείων του πίνακα διαύλου  $\mathbf{H}$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9.



**Σχήμα 5.9:** Χρονοσειρές 2x2 MIMO LMS διαύλων με διαφορισμό δορυφόρου παραγόμενες με βάση το προτεινόμενο μοντέλο σε διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης: ανοικτό αγροτικό, προαστιακό και αστικό.



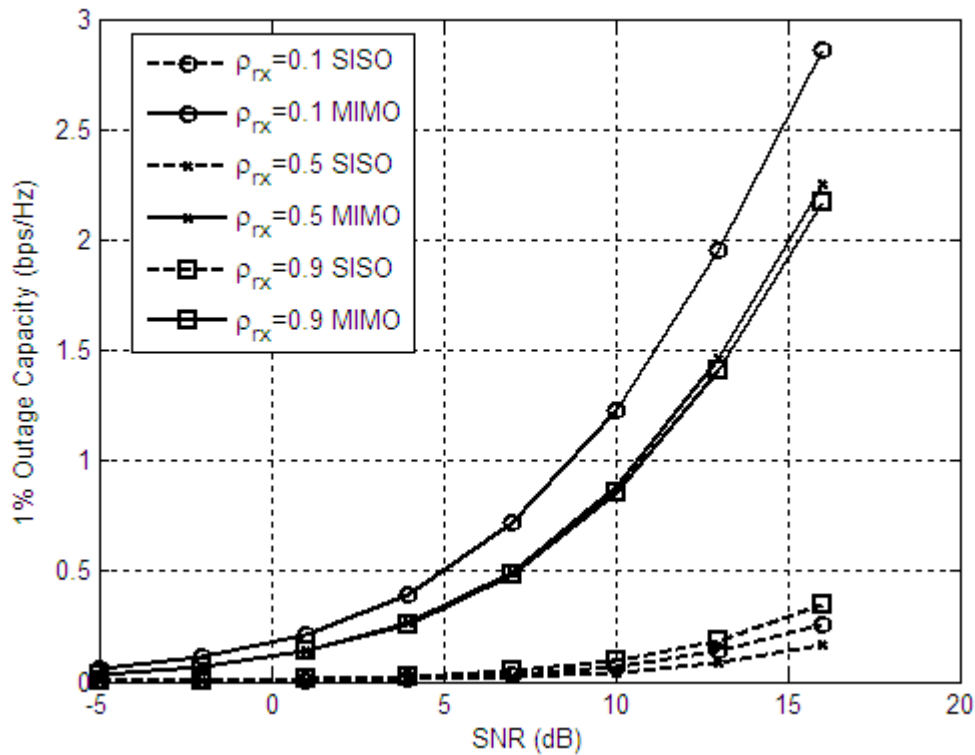
Σχήμα 5.10: 1% χωρητικότητα διακοπής 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό δορυφόρου συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR σε ανοικτό αγροτικό περιβάλλον διάδοσης. Εξάρτηση από παράμετρο  $XSD_{ant}$



Σχήμα 5.11: 1% χωρητικότητα διακοπής 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό δορυφόρου συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR σε προαστιακό περιβάλλον διάδοσης. Εξάρτηση από συντελεστή χωρικής συσχέτισης για διαλείψεις μεγάλης κλίμακας,  $\bar{\rho}_{LN}$



Στα Σχήματα 5.10 - 5.12 απεικονίζεται η 1% χωρητικότητα διακοπής του υπό θεώρηση 2x2 MIMO LMS διαύλου συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR. Σημειώνεται ότι τα αριθμητικά αυτά αποτελέσματα έχουν προκύψει μέσω προσομοιώσεων τύπου Monte Carlo και αναφέρονται σε προσομοίωση  $10^5$  στιγμιαίων υλοποιήσεων του διαύλου. Συγκεκριμένα, το Σχήμα 5.10 απεικονίζει την εξάρτηση της χωρητικότητας διακοπής από την απόσβεση δια-δορυφορικών διαύλων λόγω κεραίας λήψης UT,  $XSD_{ant}$  σε ανοικτό αγροτικό περιβάλλον διάδοσης όπου παρατηρείται ότι, όσο το  $XSD_{ant}$  αυξάνεται τόσο περισσότερο εξασθενούν οι ετεροπολικές παρεμβολές διαύλου, με συνέπεια, ο MIMO δίαυλος να γίνεται διαγώνιος και η χωρητικότητα διακοπής του να αυξάνεται. Επιπλέον, το Σχήμα 5.11 απεικονίζει την εξάρτηση της χωρητικότητας διακοπής από το συντελεστή χωρικής συσχέτισης  $\bar{\rho}_{LN}$  για διαλείψεις μεγάλης κλίμακας σε προαστιακό περιβάλλον διάδοσης. Όπως φαίνεται από το σχήμα αυτό, όσο ο συντελεστής  $\bar{\rho}_{LN}$  αυξάνεται, η χωρητικότητα διακοπής του MIMO LMS διαύλου μειώνεται.



Σχήμα 5.12: 1% χωρητικότητα διακοπής 2x2 MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό δορυφόρου συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR σε αστικό περιβάλλον διάδοσης. Εξάρτηση από χωρική συσχέτιση διαλείψεων μικρής κλίμακας στην πλευρά λήψης (Ειδική περίπτωση όπου θεωρείται μόνο η (BAD,BAD) κατάσταση του διαύλου)

Στο Σχήμα 5.12 απεικονίζεται η εξάρτηση της χωρητικότητας διακοπής από τη χωρική συσχέτιση για διαλείψεις μικρής κλίμακας στην πλευρά λήψης σε αστικό περιβάλλον διάδοσης. Συγκεκριμένα, λαμβάνεται υπόψη η ειδική περίπτωση όπου θεωρείται μόνο η (BAD,BAD) κατάσταση του διαύλου ως περισσότερο χαρακτηριστική του αστικού περιβάλλοντος διάδοσης (λόγω του μεγάλου πλήθους σκεδαστών). Όπως φαίνεται από το σχήμα αυτό, όσο ο συντελεστής χωρικής συσχέτισης  $\tilde{\rho}_{rx}$  μειώνεται τόσο αυξάνεται η χωρητικότητα διακοπής που επιτυγχάνεται στον υπό μελέτη 2x2 MIMO LMS δίαυλο. Επιπλέον, σε σχέση με τα Σχήματα 5.10 - 5.11, το Σχήμα 5.12 υποδηλώνει ότι η χωρητικότητα διακοπής που επιτυγχάνεται από 2x2 MIMO LMS δίαυλο σε αστικό περιβάλλον διάδοσης είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη που επιτυγχάνεται σε αγροτικό και προαστιακό περιβάλλον διάδοσης. Ωστόσο, όπως παρατηρήθηκε προηγουμένως για την περίπτωση MIMO LMS διαύλων με διαφορισμό πόλωσης έτσι και στην προκειμένη περίπτωση, ακόμα και σε μη ευνοϊκό αστικό περιβάλλον διάδοσης, όπου η σκίαση των δορυφορικών ζεύξεων είναι πολύ συχνό φαινόμενο, παρατηρείται σημαντικό κέρδος χωρητικότητας μεταξύ των διαύλων MIMO και SISO που επιτυγχάνεται μέσω της προτεινόμενης τεχνολογίας MIMO.

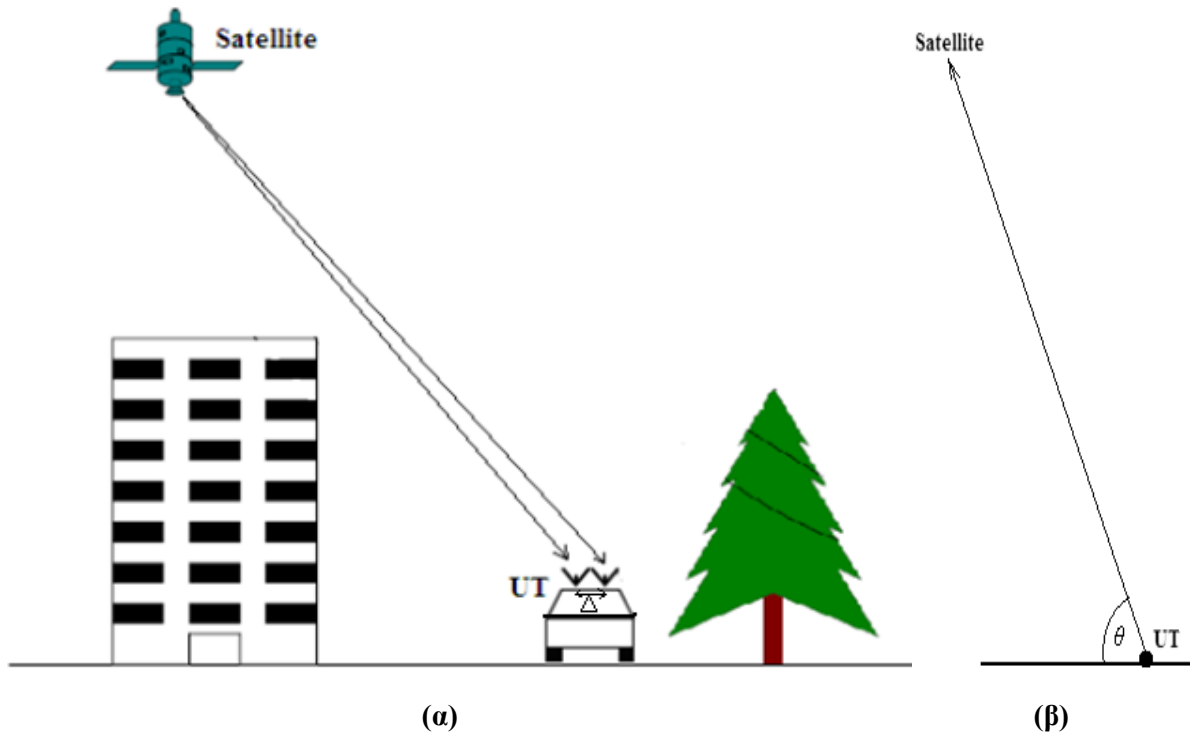
### **5.3. Μοντέλο και Πιθανότητα Λάθους SIMO Κινητού Δορυφορικού Διαύλου με Διαφορισμό Κεραίας σε Συχνότητες κάτω των 10GHz**

Στην ενότητα αυτή θεωρούνται SIMO κινητοί δορυφορικοί δίαυλοι που λειτουργούν σε συχνότητες κάτω των 10GHz στους οποίους οι πολλαπλές έξοδοι προκύπτουν με εφαρμογή της τεχνικής διαφορισμού κεραίας.

#### **5.3.1. Ανάλυση**

Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι το μοντέλο MIMO LMS διαύλων με διαφορισμό δορυφόρου που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 5.2.1 είναι αρκετά γενικό και ευέλικτο ώστε καλύπτει την ειδική περίπτωση SIMO LMS διαύλων με διαφορισμό κεραίας. Συγκεκριμένα, έχοντας υπόψη το Σχήμα 5.6 και θεωρώντας μόνο ένα δορυφόρο, προκύπτει το Σχήμα 5.13 όπου απεικονίζεται η διάταξη 2x1 SIMO LMS διαύλου με διπλό διαφορισμό κεραίας.

Αντίστοιχα, θεωρώντας πολλαπλά ( $M_R$  το πλήθος) στοιχεία κεραιών στο τερματικό χρήστη UT, προκύπτει  $M_R \times 1$  SIMO LMS διάυλος με διαφορισμό κεραίας.



**Σχήμα 5.13:** Διάταξη  $2 \times 1$  SIMO LMS διαύλου με διαφορισμό κεραίας που λειτουργεί σε συχνότητες κάτω των 10GHz υπό συνθήκες διαλείψεων λόγω σκίασης και πολυδιαδρομικής διάδοσης

Συνεπώς, για τον υπό μελέτη  $2 \times 1$  SIMO LMS διάυλο με διαφορισμό κεραίας στην παρούσα ενότητα, ισχύει το γενικό μοντέλο MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό δορυφόρου που παρουσιάστηκε προηγουμένως στην Ενότητα 5.2 με τις εξής βασικές τροποποιήσεις:

- Ο υπό θεώρηση SIMO LMS διάυλος περιγράφεται από  $2 \times 1$  πίνακα διαύλου  $\mathbf{h}=[h_i]$  ( $i=1,2$ ), του οποίου τα στοιχεία έχουν την ίδια στατιστική κατανομή Loo.
- Δεν υφίσταται απόσβεση δια-δορυφορικών διαύλων λόγω κεραίας λήψης εφόσον στην πλευρά εκπομπής υπάρχει μόνο ένας δορυφόρος.
- Ο  $2 \times 2$  πίνακας μεταβλητότητας  $\bar{\mathbf{C}}$  που περιγράφει τη χωρική συσχέτιση στις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας δίδεται από τη σχέση

$$\bar{\mathbf{C}} = \begin{bmatrix} 1 & \bar{\rho}_N \\ \bar{\rho}_N & 1 \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

- Ο 2x2 πίνακας μεταβλητότητας  $\tilde{\mathbf{R}}_{rx}$  που περιγράφει τη χωρική συσχέτιση στις διαλείψεις μικρής κλίμακας στην πλευρά λήψης δίδεται από τη σχέση (βλ. Παράρτημα IV)

$$\tilde{\mathbf{R}}_{rx} = E[\tilde{\mathbf{h}}\tilde{\mathbf{h}}^H] = MP \cdot \begin{bmatrix} 1 & \tilde{\rho}_{rx} \\ \tilde{\rho}_{rx} & 1 \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

- Όσον αφορά τη χρονική συσχέτιση και, συγκεκριμένα, τις χρονικές διακυμάνσεις μεταξύ διαφορετικών καταστάσεων του διαύλου, θεωρείται πρώτης τάξης μοντέλο αλυσίδας Markov δύο καταστάσεων όμοιο (δηλαδή, με τους ίδιους πίνακες  $\mathbf{W}$  και  $\mathbf{P}$ ) με αυτό που περιγράφεται στην Ενότητα 2.3.3.5 [Prieto-Cerdeira 2010] για την περίπτωση SISO-LMS διαύλου.

### 5.3.2. Αριθμητικά Αποτελέσματα

Στη συνέχεια, παρατίθενται ενδεικτικά διάφορα αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούν υλοποιήσεις του προτεινόμενου μοντέλου για τον υπό θεώρηση SIMO LMS δίαυλο. Ως στατιστικό μέτρο για την εκτίμηση της επίδοσης των αντιστοίχων SIMO LMS διαύλων στα σχήματα που ακολουθούν λαμβάνεται η μέση πιθανότητα λάθους (Bit Error Probability, BEP) η οποία ορίζεται ως εξής [Proakis 2001]

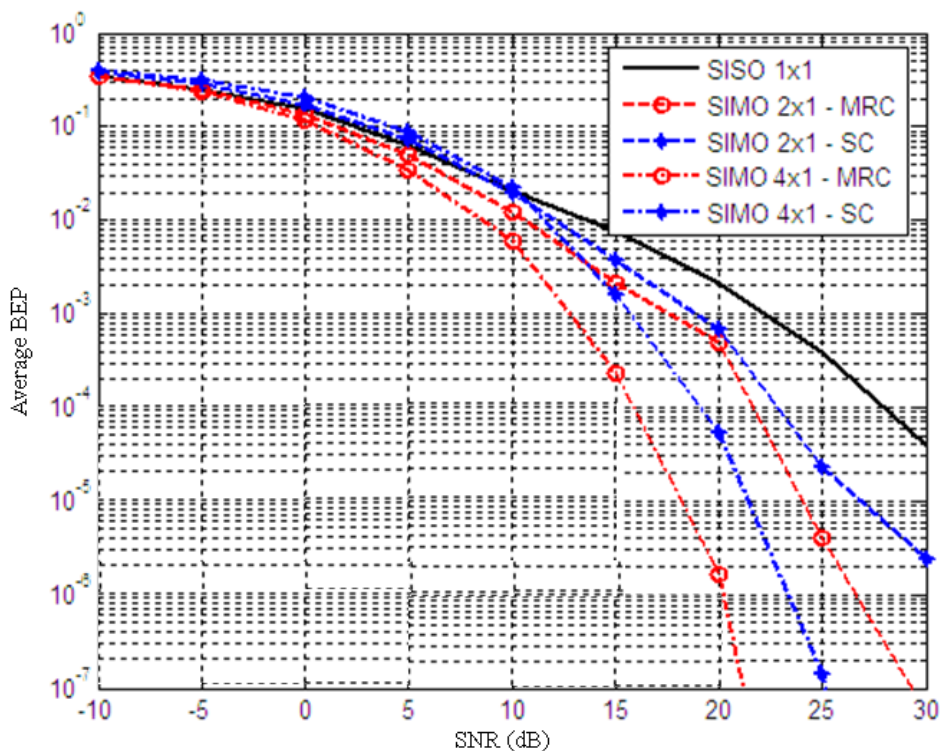
$$BEP = E_{\mathbf{h}}[BEP(\mathbf{h})] \quad (5.32)$$

όπου  $E_{\mathbf{h}}[\cdot]$  ο στατιστικός μέσος όρος ως προς  $10^5$  το πλήθος στιγμιαίες υλοποιήσεις του διαύλου  $\mathbf{h}$  και

$$BEP(\mathbf{h}) = \begin{cases} \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{N_0} \sum_{i=1}^{M_R} |h_i|^2} & MRC \\ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{N_0} \max_{i=1,2,\dots,M_R} \{|h_i|^2\}} & SC \end{cases} \quad (5.33)$$

η στιγμιαία πιθανότητα λάθους για τις δύο υπό μελέτη τεχνικές συνδυασμού των σημάτων διαφορεικής λήψης, MRC (Maximum Ratio Combining) και SC (Selection Combining) [Proakis 2001]. Στην (5.33),  $E_b/N_0$  είναι ο λόγος ενέργειας ψηφίου προς φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου στην είσοδο του δέκτη,  $\operatorname{erfc}(\cdot)$  η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος, ενώ ως σχήμα διαμόρφωσης θεωρείται η διαμόρφωση QPSK (Quadrature Phase Shift Keying).

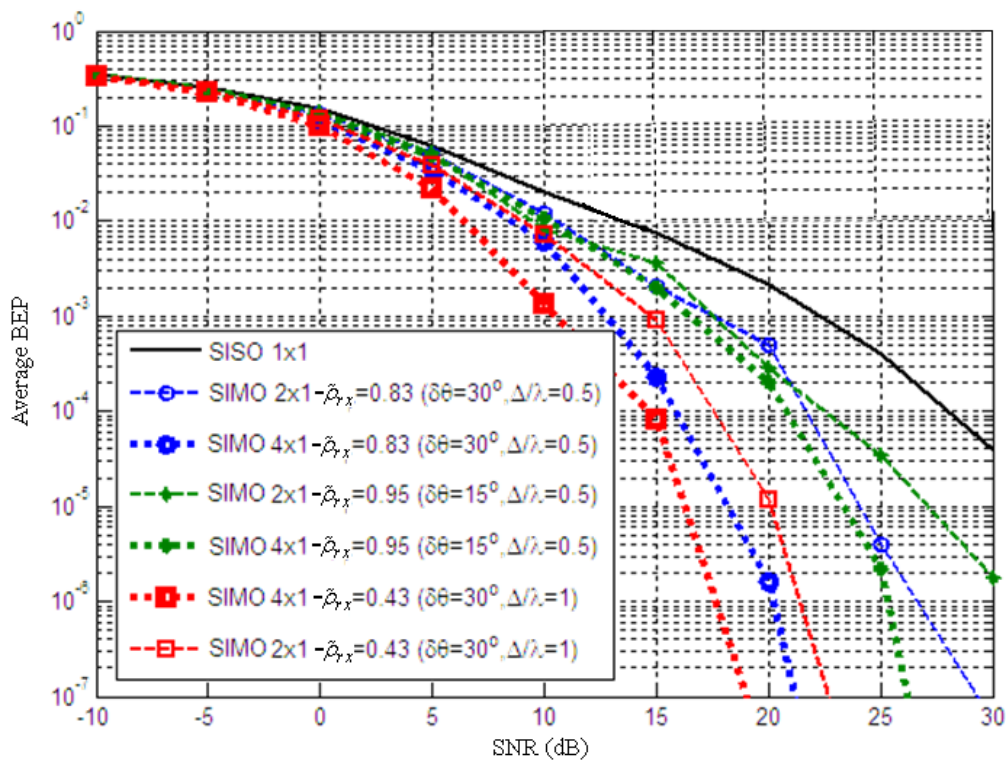
Στο Σχήμα 5.14 απεικονίζεται η μέση BEP για SIMO LMS δίαυλο με διαφορισμό κεραίας συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR σε αστικό περιβάλλον διάδοσης. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η εξάρτηση της μέσης BEP από το πλήθος  $M_R$  των στοιχείων της κεραίας λήψης του UT καθώς και από την τεχνική συνδυασμού των σημάτων διαφορικής λήψης (MRC και SC). Οι υπόλοιπες παράμετροι που υπεισέρχονται στην ανάλυση είναι:  $\theta=40^\circ$ ,  $\tilde{\rho}_{rx}=0.83$  ( $\delta\theta=30^\circ$ ,  $\Delta/\lambda=0.5$ ),  $\bar{\rho}_{LN}=0.9$ ,  $f=2.2\text{GHz}$  και  $v=120\text{km/h}$ . Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.14, παρατηρείται σημαντικό διαφορικό κέρδος μεταξύ των αντιστοιχών SIMO και SISO καμπυλών που επιτυγχάνεται μέσω της προτεινόμενης τεχνολογίας πολλαπλών κεραιών. Το διαφορικό αυτό κέρδος είναι υψηλότερο στην MRC διαφορική λήψη σε σύγκριση με την SC, ενώ αυξάνεται με το πλήθος  $M_R$  των στοιχείων της κεραίας λήψης του UT.



**Σχήμα 5.14:** Μέση BEP για SIMO LMS δίαυλο με διαφορισμό κεραίας συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR σε αστικό περιβάλλον διάδοσης. Εξάρτηση από πλήθος  $M_R$  στοιχείων κεραίας λήψης και τεχνική συνδυασμού των σημάτων διαφορικής λήψης (MRC και SC)

Στο Σχήμα 5.15 απεικονίζεται η μέση BEP για SIMO LMS δίαυλο με διαφορισμό κεραίας συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR σε αστικό περιβάλλον διάδοσης. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η εξάρτηση της μέσης BEP από το πλήθος  $M_R$  των στοιχείων της

κεραίας λήψης του UT καθώς και από το συντελεστή χωρικής συσχέτισης  $\tilde{\rho}_{rx}$  στις διαλείψεις μικρής κλίμακας του διαύλου. Για το συνδυασμό των σημάτων διαφορεικής λήψης θεωρείται η τεχνική MRC. Οι υπόλοιπες παράμετροι που υπεισέρχονται στην ανάλυση είναι:  $\theta=40^\circ$ ,  $\bar{\rho}_{LN}=0.9$ ,  $f=2.2\text{GHz}$  και  $v=120\text{km/h}$ . Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.15, και στην περίπτωση αυτή παρατηρείται σημαντικό διαφορικό κέρδος μεταξύ των αντιστοιχών SIMO και SISO καμπυλών το οποίο αυξάνεται με το πλήθος  $M_R$  των στοιχείων της κεραίας λήψης του UT. Επιπλέον, όσο μειώνεται ο συντελεστής χωρικής συσχέτισης  $\tilde{\rho}_{rx}$ , δηλαδή όσο αυξάνεται η απόσταση  $\Delta$  διαχωρισμού των στοιχείων της κεραίας λήψης του UT ή/και όσο αυξάνεται η γωνιακή διασπορά  $\delta\theta$  των πολυδιαδρομικών συνιστωσών, τόσο μεγαλύτερο είναι το διαφορικό κέρδος που προκύπτει από τον MRC συνδυασμό των σημάτων διαφορεικής λήψης στον υπό μελέτη SIMO LMS δίαυλο.

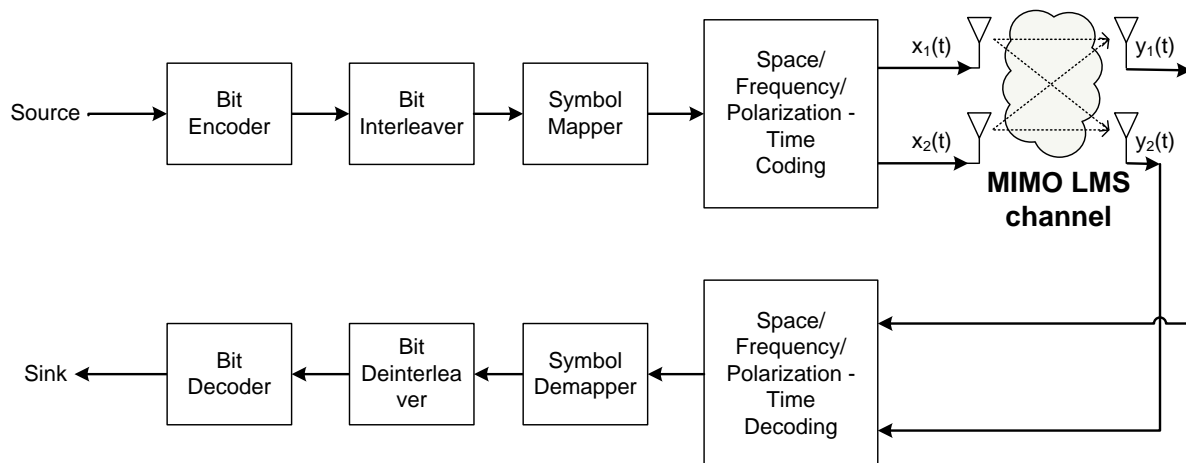


**Σχήμα 5.15:** Μέση BEP για SIMO LMS δίαυλο με διαφορισμό κεραίας και MRC συνδυασμό σημάτων διαφορεικής λήψης συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου SNR σε αστικό περιβάλλον διάδοσης. Εξάρτηση από πλήθος  $M_R$  στοιχείων κεραίας λήψης και από χωρική συσχέτιση στις διαλείψεις μικρής κλίμακας

## 5.4. Μεθοδολογία Δημιουργίας Χρονοσειρών MIMO Κινητών Δορυφορικών Διαύλων σε Συχνότητες κάτω των 10GHz

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται μια αναλυτική βήμα-προς-βήμα μεθοδολογία δημιουργίας χρονοσειρών των ανωτέρω MIMO LMS διαύλων με βάση τα αντίστοιχα προτεινόμενα μοντέλα. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται μια ενοποιημένη μεθοδολογία που καλύπτει όλες τις ανωτέρω υπό μελέτη περιπτώσεις MIMO LMS διαύλων, δηλαδή, MIMO LMS με διαφορισμό πόλωσης, MIMO LMS με διαφορισμό δορυφόρου και SIMO LMS με διαφορισμό κεραίας (με την τελευταία να προκύπτει άμεσα ως υπο-περίπτωση της δεύτερης).

Η εν λόγω μεθοδολογία δημιουργίας χρονοσειρών μπορεί να ενσωματωθεί σε προσομοιωτές σύγχρονων δορυφορικών συστημάτων επικοινωνίας, όπως π.χ., συστήματα βασισμένα στα πρότυπα DVB-SH [DVB-SH] και DVB-NGH [DVB-NGH], προκειμένου να αναλυθεί η επίδοση διαφόρων εξειδικευμένων MIMO τεχνικών μετάδοσης Space/Frequency/ Polarization-Time Coding πάνω από MIMO LMS διαύλους (βλ. Σχήμα 5.16). Σημειώνεται ότι επιτυχείς δοκιμές της ανωτέρω ενσωμάτωσης αναφέρονται ήδη στις εργασίες [Perez-Neira 2008],[Perez-Neira 2011], [Arapoglou 2011c],[Shankar 2011],[Cioni 2010].



Σχήμα 5.16: Μπλοκ διάγραμμα προσομοίωσης σε H/Y δορυφορικού τηλεπικοινωνιακού συστήματος που εφαρμόζει MIMO τεχνικές μετάδοσης

### ΒΗΜΑ 1<sup>ο</sup>: Ορισμός αλυσίδας Markov και δημιουργία τυχαίας όδευσης (random walk)

- Για το δεδομένο περιβάλλον διάδοσης, η διάρκεια κάθε κατάστασης, ο πίνακας πιθανοτήτων κατάστασης  $\mathbf{W}$  και ο πίνακας πιθανοτήτων μετάβασης μεταξύ των

καταστάσεων  $\mathbf{P}$  λαμβάνονται από την [Prieto Cerdeira 2010] για SISO LMS διάυλο (βλ. Ενότητα 2.3.3.5).

- ii. Για την περίπτωση MIMO LMS με διαφορισμό πόλωσης, λαμβάνεται υπόψη 1<sup>ης</sup> τάξης μοντέλο αλυσίδας Markov με 2 καταστάσεις διαύλου όπου οι πίνακες  $\mathbf{W}, \mathbf{P}$  είναι ίσοι με αυτούς της περίπτωσης SISO LMS διαύλου.
- iii. Για την περίπτωση MIMO LMS με διαφορισμό δορυφόρου, λαμβάνεται υπόψη 1<sup>ης</sup> τάξης μοντέλο αλυσίδας Markov με 4 καταστάσεις διαύλου όπου οι πίνακες  $\mathbf{W}, \mathbf{P}$  προκύπτουν με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύσσεται στην [Lutz 1996] για δεδομένο συντελεστή χωρικής συσχέτισης διαλείψεων μεγάλης κλίμακας  $\bar{\rho}_{LN}$ .
- iv. Έστω ότι  $P(i,j)$  η πιθανότητα μετάβασης από την κατάσταση διαύλου  $i$  στην κατάσταση  $j$ ,  $S_t$  η τρέχουσα κατάσταση διαύλου και  $S_{t+1}$  η αμέσως επόμενη κατάσταση διαύλου. Δεδομένης της  $S_t$ , η κατάσταση  $S_{t+1}$  δημιουργείται ως εξής: Δημιουργία τ.μ.  $U$  ομοιόμορφα κατανεμημένης στο διάστημα  $(0,1)$ , δηλαδή,  $U \sim Uniform(0,1)$ ; Για  $i=1$ , έλεγχος συνθήκης  $U \leq \sum_{j=1}^i P(S_t, j)$ ; Αν είναι αληθής, η νέα κατάσταση είναι  $S_{t+1}=j$ ; Διαφορετικά, έλεγχος της ίδιας συνθήκης για  $i=i+1$ .

### **ΒΗΜΑ 2<sup>ο</sup>: Υπολογισμός τριάδας στατιστικών παραμέτρων Loo ( $\alpha, \psi, MP$ )**

- i. Κάθε φορά που προκύπτει νέα κατάσταση διαύλου, για το δεδομένο περιβάλλον διάδοσης, επιλέγεται με βάση τη δεδομένη από κοινού κατανομή  $f(M_A, \Sigma_A, MP)$  όπως περιγράφεται στην [Prieto Cerdeira 2010] μια νέα τριάδα στατιστικών παραμέτρων Loo ( $\alpha, \psi, MP$ ).

### **ΒΗΜΑ 3<sup>ο</sup>: Δημιουργία συνιστωσών διαλείψεων μεγάλης κλίμακας**

- i. Για κάθε κατάσταση διαύλου, δημιουργείται μια ακολουθία κανονικών τυχαίων δειγμάτων διαύλου με μηδενική μέση τιμή και μοναδιαία διασπορά. Ένα δείγμα διαύλου θεωρείται για κάθε μπλοκ ψηφίων μετάδοσης διάρκειας  $T$ .
- ii. Στη συνέχεια, τα ανωτέρω παραγόμενα κανονικά κατανεμημένα δείγματα διαύλου διέρχονται μέσω βαθυπερατού φίλτρου τύπου IIR ενός συντελεστή που δίδεται στην (5.20).
- iii. Στη συνέχεια, τα ανωτέρω φιλτραρισμένα δείγματα διαύλου κανονικοποιούνται ως προς  $(I-A^2)$  ώστε να ανακτηθούν τα αρχικά στατιστικά τους πριν το βαθυπερατό φιλτράρισμα.



- iv. Η ανωτέρω διαδικασία (Βήματα 3i-3iii) επαναλαμβάνεται για κάθε διάσταση πόλωσης (στην περίπτωση διαφορισμού πόλωσης) ή για κάθε χωρική διάσταση (στην περίπτωση διαφορισμού δορυφόρου) ώστε να προκύψει ο πίνακας διαύλου  $\bar{\mathbf{H}}_w$ .
- v. Στη συνέχεια, για δεδομένο πίνακα μεταβλητότητας  $\bar{\mathbf{C}}$ , μεταξύ των ανωτέρω κανονικώς κατανεμημένων δειγμάτων διαύλου εισάγεται σε κάθε διάσταση μέσω της (5.12) συσχέτιση πόλωσης (στην περίπτωση διαφορισμού πόλωσης) ή χωρική συσχέτιση (στην περίπτωση διαφορισμού δορυφόρου) ώστε να προκύψει ο πίνακας  $\bar{\mathbf{H}}_{w,cor}$ .
- vi. Με δεδομένη τη δυάδα στατιστικών παραμέτρων  $L_{oo}(\alpha, \psi)$  από το Βήμα 2i, από τον ανωτέρω πίνακα  $\bar{\mathbf{H}}_{w,cor}$  προκύπτει ο πίνακας  $\bar{\mathbf{H}}$  μέσω της (5.13).
- vii. Επιπροσθέτως, στην περίπτωση διαφορισμού πόλωσης, λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της απομόνωσης διασταύρωσης πόλωσης της ζεύξης μέσω της (5.7) ώστε να προκύψει ο τελικός πίνακας διαύλου  $\bar{\mathbf{H}}$  για τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας. Αντίστοιχα, στην περίπτωση διαφορισμού δορυφόρου, λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της απόσβεσης δια-δορυφορικών διαύλων λόγω κεραίας λήψης, μέσω της (5.21) ώστε να προκύψει ο τελικός πίνακας διαύλου  $\bar{\mathbf{H}}$  για τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας.

#### **ΒΗΜΑ 4<sup>ο</sup>: Δημιουργία συνιστωσών διαλείψεων μικρής κλίμακας**

- i. Με βάση την (3.32), δημιουργία 2x2 πίνακα διαύλου  $\tilde{\mathbf{H}}_w$  με στοιχεία ανεξάρτητες και ομοιόμορφα κατανεμημένες τ.μ. που ακολουθούν την κυκλικά συμμετρική μιγαδική κανονική κατανομή ZMCSCG με μέση τιμή μηδέν και διασπορά  $MP$ .
- ii. Σε κάθε κατάσταση διαύλου και για κάθε διάσταση πόλωσης (στην περίπτωση διαφορισμού πόλωσης) ή για κάθε χωρική διάσταση (στην περίπτωση διαφορισμού δορυφόρου), τα ανωτέρω δείγματα διαύλου θεωρείται ότι παραμένουν σταθερά κατά τη διάρκεια ενός μπλοκ ψηφίων μετάδοσης αλλά ότι μεταβάλλονται ανεξάρτητα από μπλοκ σε μπλοκ. Η διάρκεια  $T$  του μπλοκ ψηφίων μετάδοσης λαμβάνεται ίση με το χρόνο συνοχής του διαύλου (coherence time) και αποτελεί το διάστημα δειγματοληψίας αυτού.
- iii. Στη συνέχεια, για δεδομένους πίνακες μεταβλητότητας  $\tilde{\mathbf{R}}_{rx}$ ,  $\tilde{\mathbf{R}}_{tx}$ , μεταξύ των ανωτέρω κανονικώς κατανεμημένων δειγμάτων διαύλου εισάγεται σε κάθε

διάσταση μέσω της (5.17) συσχέτιση πόλωσης (στην περίπτωση διαφορισμού πόλωσης) ή χωρική συσχέτιση (στην περίπτωση διαφορισμού δορυφόρου) ώστε να προκύψει ο πίνακας διαύλου  $\tilde{\mathbf{H}}$ .

- iv. Επιπροσθέτως, στην περίπτωση διαφορισμού πόλωσης, λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της απομόνωσης διασταύρωσης πόλωσης της ζεύξης μέσω της (5.8) ώστε να προκύψει ο τελικός πίνακας διαύλου  $\tilde{\mathbf{H}}$  για τις διαλείψεις μικρής κλίμακας. Αντίστοιχα, στην περίπτωση διαφορισμού δορυφόρου, λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της απόσβεσης δια-δορυφορικών διαύλων λόγω κεραίας λήψης, μέσω της (5.22) ώστε να προκύψει ο τελικός πίνακας διαύλου  $\tilde{\mathbf{H}}$  για τις διαλείψεις μικρής κλίμακας.

#### **ΒΗΜΑ 5<sup>ο</sup>: Συνδυασμός συνιστωσών διαλείψεων μεγάλης και μικρής κλίμακας**

- i. Για κάθε παραγόμενη χρονοσειρά MIMO LMS διαύλου, δηλαδή, για κάθε στιγμιαία υλοποίηση του διαύλου  $\mathbf{H}$ , οι ανωτέρω παραγόμενοι δίαυλοι  $\bar{\mathbf{H}}$  (για τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας, από Βήμα 3vii) και  $\tilde{\mathbf{H}}$  (για τις διαλείψεις μικρής κλίμακας, από Βήμα 4iv) προστίθενται μεταξύ τους, δηλαδή,  $\mathbf{H} = \bar{\mathbf{H}} + \tilde{\mathbf{H}}$ .

Σημειώνεται ότι, εφόσον η τριάδα στατιστικών παραμέτρων Loo ( $a, \psi, MP$ ) θεωρείται κανονικοποιημένη ως προς τη στάθμη ισχύος LOS (σε dB), οι χρονοσειρές MIMO LMS διαύλων που παράγονται με την ανωτέρω μεθοδολογία θεωρούνται επίσης κανονικοποιημένες ως προς τη στάθμη ισχύος LOS. Συνεπώς, ο τελικός πίνακας MIMO διαύλου  $\mathbf{H}$  δεν απαιτεί περαιτέρω κανονικοποίηση.

---

## Βιβλιογραφία

---

- [3GPP] 3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project), <http://www.3gpp.org>
- [3GPP2] 3GPP2 (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project 2), <http://www.3gpp2.org>
- [Abdi 2003] Abdi, W.C. Lau, M.-S. Alouini, M. Kaveh, "A new simple model for land mobile satellite channels: First- and second-order statistics," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 2, no. 3, pp. 519-528, 2003.
- [Abramowitz 1964] Abramowitz, and I.A. Stegun (Eds.), *Handbook of Mathematical Functions*, Appl. Math. Ser. No. 55, National Bureau of Standards, Washington, D.C., 1964. (Reprinted by Dover, New York, 1965).
- [Akturan 1997] Akturan, W.J. Vogel, "Path diversity for LEO satellite-PCS in the urban environment," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 45, no. 7, pp. 1107-1116, 1997.
- [Akturan 2008] Akturan, "An overview of the Sirius satellite radio system", *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol.26, no.5, pp. 349–358, 2008.
- [Alamouti 1998] Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, 1998.
- [Alfano 2007] Alfano, A. De Maio, "A theoretical framework for LMS MIMO communication systems performance analysis", in *Proc. 3rd Int. Waveform Diversity Design Conf. 2007*, June 2007.
- [Alvarez-Diaz 2005] Alvarez-Diaz, C. Mosquera, M. Neri, G.E. Corazza, "Joint precoding and predistortion techniques for satellite telecommunication systems," in *2nd Int. Symp. Wireless Commun. Syst.*, pp. 688-692, Sept. 2005.
- [Alvarez-Diaz 2007] Alvarez-Diaz, N. Courville, C. Mosquera, G. Liva, G.E. Corazza, "Non-linear interference mitigation for broadband multimedia satellite systems," in *Int. Work. Satell. Space Commun.*, pp. 61-65, Sept. 2007.
- [Arapoglou 2004] Arapoglou P.-D.M., A.D. Panagopoulos, G. Chatzarakis, J.D. Kanellopoulos, P.G. Cottis, "Diversity techniques for satellite communications: an educational graphical tool," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 46, no. 3, pp. 109-114, 2004.

- [Arapoglou 2005] Arapoglou P.-D.M., A.D. Panagopoulos, J.D. Kanellopoulos, and P.G. Cottis, "Inter-cell Radio Interference Studies in CDMA Based LMDS Networks", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 8, pp. 2471-2479, August 2005.
- [Arapoglou 2011a] Arapoglou P.-D.M., K. Liolis, M. Bertinelli, A. Panagopoulos, P. Cottis, R. De Gaudenzi, "MIMO over Satellite: A Review", *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol.13, no.1, pp. 27–51, 1<sup>st</sup> Quarter 2011.
- [Arapoglou 2011b] Arapoglou P.-D.M., M. Zamkotsian, P.G. Cottis, "Dual polarization MIMO in LMS broadcasting systems: Possible benefits and challenges", *Int. J. Satellite Communications Networking*, vol. 29, no. 4, pp. 349-366, 2011.
- [Arapoglou 2011c] Arapoglou P.-D.M., P. Burzigotti, A. Alamanac, R. De Gaudenzi, "To MIMO or Not To MIMO in Mobile Satellite Broadcasting Systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 9, pp. 2807-2811, September 2011.
- [Arbesser-Rastburg 1997] Arbesser-Rastburg B.R., A. Paraboni, "European research on Ka-band slant path propagation", *Proceedings of IEEE*, vol. 85, no. 6, pp. 843 – 852, June 1997.
- [Arndt 2010] Arndt, A. Ihlow, A. Heuberger, T. Heyn, E. Eberlein, R. Prieto-Cerdeira, "Mobile satellite broadcasting with angle diversity — performance evaluation based on measurements", in *Proc. 2010 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, pp. 1–8, 2010.
- [Aulin 1979] Aulin, "A modified model for the fading signal at a mobile radio channel", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 28, no. 3, pp. 182 – 203, Aug. 1979.
- [Barts 1994] Barts R.M., W.L. Stutzman, "Modeling and simulation of mobile satellite propagation," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 40, no. 4, pp. 375-382, 1994.

- [Biglieri 1998] Biglieri E., J. Proakis, and S. Shamai, "Fading Channels: Information Theoretic and Communications Aspects", IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 44(6), pp. 2619-2692, October 1998.
- [Biglieri 2007a] Biglieri E., R. Calderbank, A. Constantinides, A. Goldsmith, A. Paulraj, V. Poor, MIMO Wireless Communications, Cambridge University Press, 2007.
- [Biglieri 2007b] Biglieri E., A. Goldsmith, B. Muquet, and H. Sari, "Diversity, interference cancellation and spatial multiplexing in MIMO mobile WiMAX systems", IEEE Mobile WiMAX Symposium, March 2007.
- [Bischl 1996] Bischl, M. Werner, E. Lutz, "On satellite diversity and mobile user environment for NGSO S-PCNs", in Proc. 16th AIAA Int. Commun. Satell. Systems Conf., ICSSC 1996, Washington, USA, Feb. 1996.
- [Bolcskei 2001] Bolcskei, A.J. Paulraj, K.V.S. Hari, R.U. Nabar, and W.W. Lu, "Fixed Broadband Wireless Access: State of the Art, Challenges, and Future Directions", IEEE Communications Magazine, vol. 39, no. 1, pp.100-108, January 2001.
- [Braten 2002] Braten L.E., T. Tjelta, "Semi-Markov multistate modeling of the land mobile propagation channel for geostationary satellites," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 50, no. 12, pp. 1795-1802, 2002.
- [Briskman 2002] Briskman, "DARS satellite constellation performance", in Proc. AIAA International Communication Satellite Systems Conference, 2002.
- [Brown 2007] Brown, S.R. Saunders, S. Stavrou, M. Fiocco, "Characterization of Polarization Diversity at the Mobile", IEEE Trans. Vehic. Technol., vol. 56, no. 5, Sep. 2007.
- [Burzigotti 2008] Burzigotti, R. Prieto-Cerdeira, A. Bolea-Alamanac, F. Perez-Fontan, I. Sanchez-Lago, "DVB-SH analysis using a multi-state land mobile satellite channel model", in 4<sup>th</sup> Advanced Satellite Mobile Systems, ASMS 2008, pp. 149–155, 2008.
- [Castanet 2003] Castanet, A. Bolea-Alamañac, and M. Bousquet, "Interference and fade mitigation techniques for Ka and Q/V band satellite communication systems", COST 280 Workshop: Propagation Impairment Mitigation for Millimeter Wave Radio Systems, Noordwijk, The Netherlands, May 2003.

- [CDMA2000] 3GPP2, “Physical layer standard for CDMA2000 spread spectrum systems”, in: Release C, 3GPP2 C.S0002-D, September 2005.
- [Cheffena 2006] Cheffena, L.E. Bråten, T. Tjelta, and T. Ekman, “Time dynamic channel model for broadband fixed wireless access systems”, in Proc. IST Mobile and Wireless Summit 2006, Myconos, Greece, June 2006.
- [Cheffena 2010] Cheffena, L.E. Bråten, T. Ekman, and T. Tjelta, “Combined Dynamic Channel Simulator for High Capacity Broadband Fixed Wireless Access Systems”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Volume: 58 Issue:10, pp. 3421 – 3426, Oct. 2010.
- [Cheffena 2011] Cheffena M., Perez-Fontan F., Lacoste F., Corbel E., Mametsa H.-J., “Land mobile satellite dual polarized MIMO channel along roadside trees: Modeling and performance evaluation”, in Proc. 5<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Rome, Italy, April 2011.
- [Cho 2004] Cho H.-K., K.P. Bowman, and G.R. North, “ A comparison of gamma and lognormal distributions for characterizing satellite rain rates from the Tropical Rainfall Measuring Mission”, Journal of Applied Meteorology, vol. 43, no11, pp. 1586-1597, 2004.
- [Chu 2005] Chu C.Y., and K.S. Chen, “Effects of Rain Fading on the Efficiency of the Ka-Band LMDS System in the Taiwan Area”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 54, no. 1, pp. 9-19, January 2005.
- [Chuah 2002] Chuah C.-N., D.N.C. Tse, J.M. Kahn, R.A. Valenzuela, “Capacity Scaling in MIMO Wireless Systems Under Correlated Fading”, IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 48, no. 3, pp. 637-650, Mar. 2002.
- [Cioni 2007a] Cioni, C. Parraga-Niebla, G. Seco-Granados, S. Scalise, A. Vanelli-Coralli, and M.A. Vazquez-Castro, “Advanced Fade Countermeasures for DVB-S2 Systems in Railway Scenarios”, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Special Issue on Satellite Communications, vol. 2007, Article ID 49718, 17 pages, 2007.
- [Cioni 2007b] Cioni, A. Vanelli-Coralli, G. E. Corazza, J. L. Vicario, and M.A.V Castro, “SIMO diversity with antenna selection for DVB-S2/RCS in LMS scenarios,” in Int. Work. Satell. Space Commun., IWSSC 07, pp. 255-258, 2007.

- [Cioni 2010] Cioni, A. Vanelli-Coralli, G.E. Corazza, P. Burzigotti, P.-D.M. Arapoglou, "Analysis and performance of MIMO-OFDM in mobile satellite broadcasting systems," in Proc. IEEE Globecom 2010, Miami, Florida, USA, 6-10 Dec. 2010.
- [Clarke 1945] Clarke A.C., "Extra Terrestrial Relays: Can Rocket Stations Give World-wide Radio Coverage?," *Wireless World*, pp. 305-308, October 1945.
- [Conti 2003a] Conti, M. Z. Win, M. Chiani, and J. H. Winters, "Bit Error Outage for Diversity Reception in Shadowing Environment," *IEEE Communications Letters*, vol. 7, no. 1, Jan. 2003.
- [Conti 2003b] Conti, M.Z. Win, M. Chiani, "On the Inverse Symbol Error Probability for Diversity Reception", *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 51, no. 7, 2003.
- [Corazza 1994] Corazza G.E., and F. Vatalaro, "A statistical model for land mobile satellite channels and its application to nongeostationary orbit systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vo. 43, no. 3, pp. 738-741, 1994.
- [Corazza 2007] Corazza G.E. (Ed.), *Digital Satellite Communications*, ISBN: 978-0-387-25634-4, Springer, 2007.
- [Corbel 2008] Corbel, I. Buret, J.-D. Gayraud, G.E. Corazza, A. Bolea Alamanac, "Hybrid satellite & terrestrial mobile network for 4G: Candidate architecture and space segment dimensioning," in *4th Adv. Satell. Mob. Syst.*, ASMS 2008, pp. 162-166, Bologna, 26-28 Aug., 2008.
- [COST 255] COST 255, *Radiowave Propagation Modeling for SatCom Services at Ku Band and Above*, Final Report, ESA Publication Division, ISBN 92-9092-608-2, ISSN 0379-6566, 2002.
- [Cottatellucci 2006] Cottatellucci, M. Debbah, G. Gallinaro, R. Muller, M. Neri, R. Rinaldo, "Interference mitigation techniques for broadband satellite systems," in *24th AIAA Int. Commun. Satell. Syst. Conf.*, ICSSC 2006, June 2006.
- [Cottis 2002] Κωπτιής Π.Γ., Χ. Καψάλης, *Δορυφορικές Επικοινωνίες*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2002.
- [Cover 2006] Cover T.M., and J.A. Thomas, *Elements of Information Theory*, Wiley, 2<sup>nd</sup> Edition, 2006.
- [Crane 1980] Crane R.K., "Prediction of attenuation by rain," *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-28, pp. 1717-1733, Sept. 1980.

- [Crane 2003] Crane R.K., Propagation Handbook for Wireless Communication System Design, CRC Press, LLC, 2003.
- [Debbah 2006] Debbah M., G. Gallinaro, R. Müller, R. Rinaldo, and A. Vernucci, “Interference mitigation for the reverse-link of interactive satellite networks,” in Proceedings of the 9th International Workshop on Signal Processing for Space Communications (SPSC '06), Noordwijk, The Netherlands, September 2006.
- [De Gaudenzi 1994] De Gaudenzi R., and F. Giannetti, "Analysis of an advanced satellite digital audio broadcasting system and complementary terrestrial gap-filler single frequency network," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 43, no.2, pp. 194-210, May 1994.
- [De Wolf 1993] De Wolf, and L. Ligthart, “Multipath effects due to rain at 30–50 GHz frequency communication links,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, pp. 1132–1138, Aug. 1993.
- [Derryberry 2002] Derryberry, S. D. Gray, D. M. Ionescu, G. Mandyam, and B. Raghothaman, “Transmit diversity in 3G CDMA systems,” IEEE Comm. Mag., vol. 40, no. 4, pp. 68–75, April 2002.
- [Driessen 1999] Driessen P.F., G.J. Foschini, "On the capacity formula for multiple input-multiple output wireless channels: A geometric interpretation," IEEE Trans. Commun., vol. 47, no. 2, pp. 173-176, 1999.
- [DVB-NGH] DVB-NGH (Next Generation Handheld), <http://www.dvb.org/technology/dvb-ngh>
- [DVB-RCS IG] ETSI TR 102 768 V1.1.1 (2009-04), “Interaction channel for Satellite Distribution Systems; Guidelines for the use of EN 301 790 in mobile scenarios”.
- [DVB-RCS] ETSI EN 301 790 V1.5.1 (2009-05), Digital Video Broadcasting (DVB); “Interaction channel for satellite distribution systems”.
- [DVB-RCS2] DVB BlueBook A155-2 (2011-03), DVB-RCS2 Lower Layer Satellite Specification.
- [DVB-S2] ETSI EN 302 307 V1.1.1 (2005-03), Digital Video Broadcasting (DVB); “Second generation framing structure, channel coding and modulation



systems for broadcasting interactive services, news Gathering and other broadband satellite applications”.

[DVB-SH IG] ETSI TS 102 584 V1.1.1 (2008-12), Digital Video Broadcasting (DVB); “Guidelines for Implementation for Satellite Services to Handheld devices (SH) below 3GHz”.

[DVB-SH] ETSI EN 302 583 V1.1.2 (2010-02), Digital Video Broadcasting (DVB); “Framing structure, channel coding and modulation for Satellite services to Handheld devices (SH) below 3 GHz”.

[DVB-T2] ETSI EN 302 755 V1.2.1 (2011-02), Digital Video Broadcasting (DVB); “Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system”.

[Eberlein 2001] Eberlein E., M. Breiling, J. Stoessel, H. Gerhauser, “Apparatus and method for transmitting information and apparatus and method for receiving information,” US Patent 6314289, Nov. 2001.

[Eklund 2002] Eklund, R.B. Marks, K.L. Stanwood, and S. Wang, “IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the WirelessMAN Air Interface for Broadband Wireless Access,” IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 6, pp. 98-107, June 2002.

[Erceg 2004] Erceg, P. Soma, D.S. Baum, and S. Catreux, “Multiple-Input Multiple-Output Fixed Wireless Radio Channel Measurements and Modeling Using Dual-Polarized Antennas at 2.5 GHz,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol.3, no.6, pp.2288-2298, Nov. 2004.

[Evans 1996] Evans B.G., G. Butt, M.J. Willis, M.A.N. Parks, "Land mobile satellite wideband measurement experiment at L- and S- bands," University of Surrey, ESA/ESTEC Contract no. 10582/93/NL/MB(SC), Final Report, 1996.

[Faria 2009] Faria, T. Kuerner, B. Lehembre, P. Unger, "Satellite digital broadcast services to handheld DVB-SH: The complementary ground component," Int. J. Satell. Commun. Netw., vol. 27, no. 4-5, pp. 241-274, 2009.

[FISI] EC FP7 ICT project “FISI: Future Integral Satcom Initiative”, <http://www.f-isi.org>

- [Foschini 1996] Foschini G.J., "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas," Bell Labs Tech. J., pp. 41-59, 1996.
- [Foschini 1998] Foschini G.J., and M.J. Gans, "On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas", Wireless Personal Communications, vol.6, pp.311-335, March 1998.
- [Foschini 1999] Foschini G.J., G.D. Golden, R.A. Valenzuela, P.W. Wolniansky, "Simplified processing for high spectral efficiency wireless communication employing multi-element arrays," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 17, no. 11, pp. 1841-1852, 1999.
- [Foschini 2003] Foschini G.J., D. Chizhik, M.J. Gans, C. Papadias, R.A. Valenzuela, "Analysis and performance of some basic space-time architectures," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 21, no. 3, pp. 303-320, 2003.
- [Freescale 2008] Kotecha, and J. Wong, "LTE: MIMO Techniques in 3GPP-LTE", Freescale Semiconductors Inc., November 2008.
- [Frigyes 2005] Frigyes, and P. Horváth, "Polarization-Time Coding in satellite links", IEEE SSC Newsletter, vol. 15, no. 2, April 2005.
- [Gallinaro 2005] Gallinaro, G. Caire, M. Debbah, L. Cottatellucci, R. Muller, R. Rinaldo, "Perspectives of adopting interference mitigation techniques in the context of broadband multimedia satellite systems," in 23<sup>rd</sup> AIAA Int. Commun. Satell. Syst. Conf., ICSSC 2005, Sept. 2005.
- [Gesbert 2003] Gesbert, M. Shafi, D.-S. Shiu, P.J. Smith, and A. Naguib, "From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.21, no.3, pp.281-302, April 2003.
- [Gesbert 2008] Gesbert, C. V. Rensburg, F. Tosato, and F. Kaltenberger, "Multiple antenna techniques," in UMTS Long Term Evolution (LTE): From Theory to Practice, S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, Eds. Wiley, Chapter 7, 2008.
- [Getu 2005] Getu B.N., J.B. Andersen, "The MIMO cube", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 4, no. 3, pp. 1136-1141, May 2005.
- [Ghosh 2005] Ghosh, D.R. Wolter, J.G. Andrews, and R. Chen, "Broadband Wireless Access with WiMAX/802.16: Current Performance Benchmarks and

- Future Potential”, IEEE Communications Magazine, vol. 43, no. 2, pp.129-136, February 2005.
- [Golden 1999] Golden G.D., G.J. Foschini, P.W. Wolniansky, "Detection algorithm and initial laboratory results using the V-BLAST space-time communication architecture," Electron. Lett., vol. 35, no. 1, pp. 14-15, 1999.
- [Goldhirsh 1997] Goldhirsh, B.H. Musiani, A.W. Dissanayake, K.-T. Lin, "Three site space-diversity experiment at 20 GHz using ACTS in the Eastern United States," Proc. IEEE, vol. 85, no. 6, pp. 970-980, 1997.
- [Goldsmith 2003] Goldsmith, S.A. Jafar, N. Jindal, S. Vishwanath, "Capacity limits of MIMO channels," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 21, no. 5, pp. 684-702, 2003.
- [Gong 1999] Gong, and D. Falconer, "Co-channel Interference in Cellular Fixed Broadband Access Systems with Directional Antennas", Wireless Personal Communications, vol. 10, no. 1, pp. 103-117, June 1999.
- [GRABEL] EC FP7 SME project "GRABEL: GNSS Reconfigurable Antenna Based Enhanced Localization", <http://grabel.eclexys.com>
- [Greenstein 2009] Greenstein L.J., S. Ghassemzadeh, V. Erceg, and D.G. Michelson, "Rician K-factors in narrowband fixed wireless channels: Theory, experiments, and statistical models," IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009.
- [Gudmundson 1991] Gudmundson, "Correlation Model for Shadow Fading in Mobile Radio Systems", IEE Electr. Lett., vol.27, no.23, pp.2145-2146, 1991.
- [Hanly 1995] Hanly S.V., D. N. Tse, "The Multi-Access Fading Channel: Shannon and Delay Limited Capacities", in Proc. 33rd Allerton Conf., Monticello, IL, pp. 786-795, 1995.
- [Hashim 2005] Hashim M.H., and S. Stavrou, "Wind influence on radio waves propagating through vegetation at 1.8GHz", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol.4, pp.143-146, 2005.
- [Hendrantoro 2003] Hendrantoro, R.J.C. Bultitude and D.D. Falconer, "Use of Cell-Site Diversity in Millimeter-Wave Fixed Cellular Systems to Combat the Effects of Rain Attenuation", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 20, no. 3, pp. 602-614, Apr. 2003.

- [Heuberger 2008] Heuberger, “Fade correlation and diversity effects in satellite broadcasting to mobile users in S-band”, *International Journal of Satellite Communications and Networking* 26 (5) pp. 359–379, DOI: 10.1002/sat.906, 2008.
- [Hochwald 2001] Hochwald, T. L. Marzetta and C. B. Papadias, “A transmitter diversity scheme for wideband CDMA systems based on space-time spreading,” *IEEE JSAC*, vol. 19, no. 1, pp. 48-60, Jun. 2001.
- [Hodge 1982] Hodge D.B., "An improved model for diversity gain on earth-space propagation paths," *Radio Sci.*, vol. 17, no. 6, pp. 1393-1399, 1982.
- [Horvath 2004] Horvath, and I. Frigyes, “Application of MIMO Concept in Millimeter-Wave Broadband Wireless Access Networks”, *Int’l Journal of Wireless Information Networks*, vol.11, no. 4, pp.217-225, October 2004.
- [Horvath 2005] Horvath, I. Frigyes, "Polarization-time coding in satellite links," *IEEE Satell. Space Newslett.*, vol. 15, no. 2, pp. 6-8, 2005.
- [Horvath 2006] Horvath, and I. Frigyes, “Application of the 3D Polarization Concept in Satellite MIMO Systems”, in *Proc. IEEE Globecom 2006*, San Francisco,CA, November 2006.
- [Horvath 2007] Horvath, G. K. Karagiannidis, P. R. King, S. Stavrou, I. Frigyes “Investigations in Satellite MIMO Channel Modeling: Accent on Polarization,” *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2007, Article ID 98942, 2007.
- [Hottinen 2006] Hottinen A., Kuusela M., Hugi K., Jianzhong Zhang, Raghothaman B., “Industrial embrace of smart antennas and MIMO”, *IEEE Wireless Communications Magazine*, Volume: 13, Issue: 4, Aug. 2006.
- [Hou 2000] Hou P., J. Zhuang, and G. Zhang, “A Rain Fading Simulation Model for Broadband Wireless Access Channels in Millimeter Wavebands”, in *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference 2000*, pp.2559-2563, 2000.
- [HSDPA 2001] High Speed Downlink Packet Access (HSDPA), 3GPP TR 25.855, V5.0.0 (Release 5), Sept. 2001.
- [Hult 2005] Hult, and A. Mohammed, “MIMO antenna applications for LEO satellite communications”, in *Proc. 3rd ESA Int’l Workshop, COST Action 280*, Noordwijk, The Netherlands, June 2005.

- [Hwang 1997] S.-H. Hwang, K.-J. Kim, J.-Y. Ahn, and K.-C. Whang, "A channel model for nongeostationary orbiting satellite system," in Vehicular Technology Conference, 1997 IEEE 47th, vol. 1, pp. 41–45, May 1997.
- [IEEE-MBWA] IEEE 802.20 Standards on Mobile Broadband Wireless Access (MBWA), [www.ieee802.org/20](http://www.ieee802.org/20)
- [IEEE-WiMAX] IEEE 802.16 Standards on Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems (WiMAX), <http://www.ieee802.org/16>
- [IEEE-WRAN] IEEE 802.22 Standards on Wireless Regional Area Networks (WRAN), <http://www.ieee802.org/22>
- [Intel 2004] Intel Corp. "WiMAX," Intel Technology Journal, vol. 8, no. 3, pp. 173-258, Aug. 2004.
- [ITU1410] ITU-R Recommendation P.1410-4, "Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial broadband radio access systems operating in a frequency range from 3 to 60 GHz", Geneva, Switzerland, 2009.
- [ITU1815] ITU-R Recommendation P.1815-0, "Differential rain attenuation", Geneva, Switzerland, 2007.
- [ITU580] ITU-R Recommendation S.580-6, "Radiation Diagrams for Use as Design Objectives for Antennas of Earth Stations Operating with Geostationary Satellites", Geneva, 2004.
- [ITU618] ITU-R Recommendation P.618-9, "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems", Geneva, Switzerland, 2007.
- [ITU676] ITU-R Recommendation P.676-4, "Attenuation by atmospheric gasses," Geneva, Switzerland, 2005.
- [ITU681] ITU-R Recommendation P.681-6, "Propagation data required for the design of Earth-space land mobile telecommunication systems," Geneva, Switzerland, 2003.
- [ITU837] ITU-R Recommendation P.837-5, "Characteristics of precipitation for propagation modeling", Geneva, Switzerland, 2007.
- [ITU838] ITU-R Recommendation P. 838-2, "Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods", Geneva, Switzerland, 2003.

- [ITU840] ITU-R Recommendation P.840-3, "Attenuation due to clouds and fog," Geneva, Switzerland, 1999.
- [Jahn 1995] Jahn A., and E. Lutz, "Propagation Data and channel model for LMS systems", Final Rep. ESA PO 141 742, DLR, 1995.
- [Kanellopoulos 1991] Kanellopoulos J.D., A. Reppas, "Prediction of outage performance of an orbital diversity earth-space system," *Europ. Trans. Telecommun.*, vol. 2, no. 6, pp. 729-735, 1991
- [Kanellopoulos 1993] Kanellopoulos J.D., S. Ventouras, and C.N. Vazouras, "A Revised Model for the Prediction of Differential Rain Attenuation on Adjacent Earth-Space Propagation Paths", *Radio Science*, vol. 28, pp. 1071-1086, 1993.
- [Kanellopoulos 1999] Κανελλόπουλος Ι.Δ., Σχεδίαση Μικροκυματικών Ζεύξεων, Εκδόσεις ΕΠΙΣΕΥ, 1999.
- [Kanellopoulos 2000] Kanellopoulos J.D., A.D. Panagopoulos, and S.N. Livieratos, "A Comparison of Co-polar and Co-channel Satellite Interference Prediction Models With Experimental Results at 11.6 GHz and 20GHz", *International Journal of Satellite Communications*, no 18, pp. 107-120, 2000.
- [Karagiannidis 2010] Καραγιαννίδης Γ.Κ., Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2010.
- [Karaliopoulos 1999] Karaliopoulos, F.-N. Pavlidou, "Modelling the land mobile satellite channel: a review," *IEE Electr. Commun. Eng. J.*, vol.11, no.5, pp.235-248, Oct. 1999.
- [Karasawa 1997] Karasawa, K. Kimura, K. Minamisono, "Analysis of availability improvements in LMSS by means of satellite diversity based on three state propagation channel model," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 46, no. 4, pp. 1047-1056, 1997.
- [Kasparis 2007] Kasparis, P.R. King, and B.G. Evans, "Doppler spectrum of the multipath fading channel in mobile satellite systems with directional terminal antennas", *IET Communications*, vol. 01, no. 06, Dec. 2007.
- [Katzberg 2006] Katzberg, O. Torres, M. Grant, and D. Masters, "Utilizing calibrated GPS reflected signals to estimate soil reflectivity and dielectric constant: results

from SMEX02,” *Remote Sensing of Environment*, vol.100, no. 1, pp. 17–28, 2006.

- [Kelley 2009] Kelley P., "Overview of the DVB-SH specifications," *Int. J. Satell. Commun. Netw.*, vol. 27, no. 4-5, pp. 193-293, 2009.
- [Kim 2007] Kim H.W., K. Kang, D.-S. Ami, "Distributed space-time coded transmission for mobile satellite communication using ancillary terrestrial component," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun., ICC 2007*, pp. 4426-4431, June 2007.
- [King 2005a] King P.R., and S. Stavrou, "Land Mobile-Satellite MIMO Capacity Predictions", *Electronics Letters*, vol.41, no.13, pp.749-751, June 2005.
- [King 2005b] King P.R., B.G. Evans, S. Stavrou, "Physical-statistical model for the land mobile-satellite channel applied to satellite/HAP-MIMO", in *Proc. 11th European Wireless Conference*, vol.1, Apr.2005.
- [King 2006a] King P.R., and S. Stavrou, "Tree obscured mobile satellite channel characteristics and mitigation", in *Proc. IST Mobile Summit 2006*, Myconos, Greece, June 2006.
- [King 2006b] King P.R., S. Stavrou, "Capacity improvement for a land mobile single satellite MIMO system," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 5, pp. 98-100, 2006.
- [King 2006c] King P.R., S. Stavrou, "Characteristics of the land mobile satellite MIMO channel," in *64th Veh. Technol. Conf., VTC 2006*, 25-28 Sept., 2006.
- [King 2007a] King P.R., "Modeling and Measurement of the Land Mobile Satellite MIMO Radio Propagation Channel", Ph.D. Thesis, University of Surrey, UK, Jun. 2007.
- [King 2007b] King P.R., S. Stavrou, "Low Elevation Wideband Land Mobile Satellite MIMO Channel Characteristics", *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 6, no. 7, pp.2712-2720, Jul. 2007.
- [Kubista 2000] Kubista, F. Pérez-Fontán, M.A. Vazquez-Castro, S. Buonomo, B.R. Arbesser-Rastburg, and J.P.V. Poiaras Baptista, "Ka-band propagation measurements and statistics for land mobile satellite applications", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 3, pp. 973-983, May 2000.

- [Lacoste 2009] Lacoste, F. Carvalho, F. Perez Fontan, A. Nunez Fernandez, V. Fabro, G. Scot, "Polarization and spatial diversity measurements of the Land Mobile Satellite propagation channel at S-band," in COST IC0802 MCM2, Toulouse, France, 4-6 Nov. 2009.
- [Larson 2008] Larson K.M., E.E. Small, E. Gutmann, A. Bilich, P. Axelrad, and J. Braun, "Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations: initial results," *GPS Solutions*, vol 12, no. 3, pp. 173-177, 2008.
- [Laws 1943] Laws J.O and D.A. Parsons, "The relation of raindrop-size intensity", *Trans. Amer. Geophys. Union*, Vol.24, p.452-460, 1943.
- [Lempiainen 1998] Lempiainen J.A., J.K. Laiho-Steffens, "The Performance of Polarization Diversity Schemes at a Base Station in Small/Micro Cell at 1800 MHz", *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, vol. 47, No. 3, Aug. 1998.
- [Li 2001] Li, C. Look Law, V.K. Dubey, and J.T. Ong, "Ka-band land mobile satellite channel model incorporating weather effects", *IEEE Communications Letters*, vol. 5, no. 5, pp.194-196, May 2001.
- [Li 2003] Li, "Energy efficient wireless sensor networks with transmission diversity," *Electron. Lett.*, vol. 39, no. 24, p. 1753-1755, 2003.
- [Lin 1975] Lin S.H., "A method for calculating rain attenuation distribution on microwave paths," *Bell Systems Technical Journal*, vol. 54, no. 6, pp. 1051–1086, 1975.
- [Lindskog 2000] Lindskog, A. Paulraj, A transmit diversity scheme for channels with intersymbol interference, in: *Communications, 2000. ICC 2000. 2000 IEEE International Conference on*, Vol. 1, pp. 307–311, 2000.
- [Liolis 2006a] Liolis K.P., A.D. Panagopoulos, and P.G. Cottis, "Outage Capacity Statistics of MIMO Satellite Networks Operating at Ka Band and Above", in *Proc. 2006 Ka and Broadband Communications Conference*, Naples, Italy, September 2006.
- [Liolis 2006b] Liolis K.P., A.D. Panagopoulos, and P.G. Cottis, "Rician K-Factor Statistics for Broadband Fixed Wireless Access Accurate Channel Modeling", in *Proc. 2006 IEEE Antennas and Propagation Society Int'l Symposium*, Albuquerque, USA, July 2006.



- [Liolis 2007a] Liolis K.P., A. Bolea-Alamanac, R. Prieto-Cerdeira, A.D. Panagopoulos, and A. Martellucci, “On the Relation between Mobility and Rainfall Effects in Ku/Ka-band Line-of-Sight Land Mobile Satellite Channels: An Analytical Statistical Approach”, in Proc. 2007 Int’l Workshop on Satellite and Space Communications (IWSSC2007), Salzburg, Austria, September 2007.
- [Liolis 2007b] Liolis K.P., A.D. Panagopoulos, and P.G. Cottis, “Multi-Satellite MIMO Communications at Ku-Band and Above: Investigations on Spatial Multiplexing for Capacity Improvement and Selection Diversity for Interference Mitigation”, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Special Issue on Satellite Communications, vol. 2007, doi:10.1155/2007/59608, 2007.
- [Liolis 2008] Liolis K.P., I. Andrikopoulos, and P.G. Cottis, “On Statistical Modeling and Performance Evaluation of SIMO Land Mobile Satellite Channels”, in Proc. 4th Advanced Satellite Mobile Systems Conference (ASMS 2008), Bologna, Italy, August 2008.
- [Liolis 2009a] Liolis K.P., A.D. Panagopoulos, and P.-D.M. Arapoglou, “An Analytical Unifying Approach for Outage Capacity Achieved in SIMO and MISO Broadband Satellite Channel Configurations”, in Proc. 3rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP2009), Berlin, Germany, March 2009.
- [Liolis 2009b] Liolis K.P., A.D. Panagopoulos, P.-D.M. Arapoglou, and S. Scalise, “Ricean K-Factor Statistics for Accurate Land Mobile Satellite Channel Modeling at Ku Band and Above in Temperate and Tropical Climatic Regions”, in Proc. COST Action IC0802, MCM2, Toulouse, France, November 2009.
- [Liolis 2009c] Liolis K.P., A.D. Panagopoulos, P.G. Cottis, and B.D. Rao, “On the Applicability of MIMO Principle to 10-66GHz BFWA Networks: Capacity Enhancement through Spatial Multiplexing and Interference Reduction through Selection Diversity”, IEEE Transactions on Communications, vol. 57, no. 2, Feb. 2009.
- [Liolis 2009d] Liolis K.P., J. Gómez-Vilardebó, E. Casini, and A. Pérez-Neira, “On the Statistical Modeling of MIMO Land Mobile Satellite Channels: A Consolidated Approach”, in Proc. 27<sup>th</sup> AIAA International

Communications Satellite Systems Conference (ICSSC2009), Edinburgh, UK, June 2009.

- [Liolis 2010a] Liolis K.P., A.D. Panagopoulos, and S. Scalise, "On the Combination of Tropospheric and Local Environment Propagation Effects for Mobile Satellite Systems above 10GHz", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 3, pp. 1109–1120, 2010.
- [Liolis 2010b] Liolis K.P., J. Gómez-Vilardebó, E. Casini, and A. Pérez-Neira, "Statistical Modeling of Dual-Polarized MIMO Land Mobile Satellite Channels", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 58, no. 11, pages 3077-3083, November 2010.
- [Liolis 2011a] Liolis K.P., A.D. Panagopoulos, and P.G. Cottis, "Bit Error Outage over SIMO Spatially Correlated Rain Fading Channels", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 53, no.3, pp. 204-209, June 2011.
- [Loo 1985] Loo, "A Statistical Model for a Land Mobile Satellite Link", *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, vol.34, no.3, pp.122-127, Aug. 1985.
- [Loo 1998] Loo, and J.S. Butterworth, "Land mobile satellite channel measurement and modeling," *Proceedings of IEEE*, vol. 86, pp. 1442–1463, July 1998.
- [Love 2008] Love D.J., R.W. Heath Jr., V.K.N. Lau, D. Gesbert, B.D. Rao, M. Andrews, "An overview of limited feedback in wireless communication systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 26, no. 8, pp. 1341-1365, 2008.
- [Lutz 1991] Lutz E., D. Cygan, M. Dippold, F. Dolainsky, W. Papke, "The land mobile satellite communications channel - Recording, statistics, and channel model," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 40, no. 2, pp. 375-386, 1991.
- [Lutz 1996] Lutz E., "A Markov model for correlated land mobile satellite channels," *Int. J. Satell. Commun.*, vol. 14, no.4, pp. 333-339, 1996.
- [Manning 1984] Manning R.M., "A rain attenuation model for satellite link attenuation predictions incorporating the spatial inhomogeneity of rainrate", *Int. Jour. Satell. Commun.* Vol.2, p.187-197, 1984.
- [Mansor 2010] Mansor M.F.B., T.W. C. Brown, B. G. Evans, "Satellite MIMO measurements with co-located quadrifilar helix antennas at the receiver terminal," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 9, pp. 712-715, 2010.

- [Maral 2002] Maral G., M. Bousquet, *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology*, 4<sup>th</sup> Edition, Wiley, 2002.
- [Martin 2004] Martin, A. Geurtz, and B. Ottersten, "Spectrally efficient mobile satellite real-time broadcast with transmit diversity", in Proc. IEEE VTC 2004, Sept. 2004.
- [Maruyama 2008] Maruyama, Y. Shirato, M. Akimoto, and M. Nakatsugawa, "Service Area Expansion of Quasi-Millimeter FWA Systems Through Site Diversity Based on Detailed Rainfall Intensity Data", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol 56, no. 10, Oct. 2008.
- [Mary 2007] Mary P., M. Dohler, J.-M. Gorce, G. Villemaud, M. Arndt, "BPSK Bit Error Outage over Nakagami-m Fading Channels in Lognormal Shadowing Environments," *IEEE Communications Letters*, vol. 11, no. 7, pp. 565-567, Jul. 2007.
- [Mary 2009] Mary P., M. Dohler, J.-M. Gorce, G. Villemaud, M. Arndt, "M-ary Symbol Error Outage over Nakagami-m Fading Channels in Shadowing Environments", *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 57, no. 10, 2009.
- [Marzetta 1999] Marzetta, B. Hochwald, "Capacity of a mobile multiple-antenna communication link in Rayleigh flat fading," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 45, no. 1, pp. 139-157, 1999.
- [Masters 2004] Masters D., P. Axelrad, and S. Katzberg, "Initial results of landreflected GPS bistatic radar measurements in SMEX02," *Remote Sensing of Environment*, vol. 92, no. 4, pp. 507–520, 2004.
- [Matricciani 1987] Matricciani E., "Orbital diversity in resource-shared satellite communication systems above 10 GHz," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 5, no. 4, pp. 714-723, 1987.
- [Matricciani 1995] Matricciani E., M. Mauri, "ITALSAT-OLYMPUS 20-GHz orbital diversity experiment at Spino d' Adda," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 43, no. 1, pp. 105-107, 1995.
- [Matricciani 2003] Matricciani E., "Micro scale site diversity in satellite and tropospheric communication systems affected by rain attenuation," *Space Communications*, vol. 19, pp. 83-90, 2003.
- [METRA] EC FP5 IST project METRA, <http://www.ist-metra.org>

- [Meyer 2000] Meyer C.D., Matrix Analysis and Applied Linear Algebra, SIAM, 2000.
- [Michalski 2002] Michalski, “An overview of the XM satellite radio system”, in Proc. AIAA International Communication Satellite Systems Conference, 2002.
- [Mietzner 2004] Mietzner, and P.A. Hoeher, “Distributed Space-Time codes for cooperative wireless networks in the presence of different propagation delays and path losses”, in Proc. IEEE SAM 2004, Barcelona, Spain, July 2004.
- [Mietzner 2009] Mietzner, R. Schober, L. Lampe, W.H. Gerstacker, P.A. Hoeher, "Multiple-antenna techniques for wireless communications - A comprehensive literature survey," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 11, no. 2, 2009.
- [MILADY] ESA ARTES project “MiLADY: Mobile satellite channel with Angle DiversitY”, <http://telecom.esa.int>
- [Miller 2008] Miller M.J., T. Eidenschink, A. Das, “MIMO satellite system,” US Patent WO 2008/086414 A2, July 2008.
- [MIMOHW] ESA ARTES project “MIMO Hardware Demonstrator”, <http://telecom.esa.int>
- [MIMOSA] ESA ARTES project “MIMOSA: Characterisation of the MIMO Channel for Mobile Satellite Systems”, <http://telecom.esa.int>
- [Moraitis 2009] Moraitis, P. Horvath, P. Constantinou, I. Frigyes, “On the capacity evaluation of a Land Mobile Satellite system using multiple element antennas at the receiver”, in Proc. 3rd Europ. Conf. Antennas Propag., EuCAP 2009, Berlin, Germany, Mar. 2009.
- [Morello 2006] Morello, V. Mignone, "DVB-S2: The second generation standard for satellite broad-band services," Proc. IEEE, vol. 94, no. 1, pp. 210-227, 2006.
- [Morita 1978] Morita, I. Higuti, “Statistical studies on rain attenuation and site diversity effect on earth to satellite links in microwave and millimeter wavebands,” IEICE Transactions, Section E, vol. E 61, no. 6, pp. 425–432, Jun. 1978.
- [Morlet 2007] Morlet, A. Bolea-Alamañac, G. Gallinaro, L. Erup, P. Takats, and A. Ginesi, “Introduction of Mobility Aspects for DVB-S2/RCS Broadband Systems”, International Journal on Space Communications, vol. 21, No. 1-2, pp. 5-17, 2007.

- [Multibeam-IM] ESA ARTES project “Novel Intra-System Interference Mitigation Techniques and Technologies for Next Generations Broadband Satellite Systems”, <http://telecom.esa.int>
- [Nabar 2002] Nabar R.U., H. Bolcskei, V. Erceg, D. Gesbert, A.J. Paulraj, "Performance of multiantenna signaling techniques in the presence of polarization diversity," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 50, no. 10, pp. 2253-2262, 2002.
- [Nabar 2004] Nabar R.U., H. Bolcskei and A. Paulraj, “Diversity performance of Ricean MIMO channels”, *ITG Workshop on Smart Antennas*, pp. 253–256, 2004.
- [Neskovic 2000] Neskovic N., G. Paunovic, "Modern approaches in modeling of mobile radio systems propagation environment," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 3, no. 3, pp. 2-12, 2000.
- [Nosratinia 2004] Nosratinia, T.E. Hunter, A. Hedayat, "Cooperative communication in wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 10, pp. 74-80, 2004.
- [Oestges 2004] Oestges, V. Erceg, A. Paulraj, “Propagation Modeling of MIMO Multipolarized Fixed Wireless Channels”, *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, vol.53, no.3, pp.644-654, May 2004.
- [Oestges 2008] Oestges, B. Clerckx, M. Guillaud, M. Debbah. “Dual-polarized wireless communications: From propagation models to system performance evaluation”, *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 7, no. 10, pp. 4019-4031, Oct. 2008.
- [Oh 2006] Oh C.-I., S.-H. Choi, D.-I. Chang, D.-G. Oh, "Analysis of the rain fading channel and the system applying MIMO," in *Int. Symp. Commun. Inform. Technol.*, *ISCIT 2006*, pp. 507-510, 2006.
- [Ozarow 1994] Ozarow H., S. Shamai (Shitz), A. D. Wyner, “Information Theoretic Considerations for Cellular Mobile Radio”, *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, vol. 43, pp. 359-378, May 1994.
- [Panagopoulos 2002a] Panagopoulos A.D., J.D. Kanellopoulos, “Adjacent Satellite Interference Effects as applied to the Outage Performance of an Earth-Space System located in a Heavy Rain Climatic Region”, *Annals of Telecommunications*, No 9-10, pp.925-942, 2002.

- [Panagopoulos 2002b] Panagopoulos A.D., J.D. Kanellopoulos, "Cell-Site Diversity Performance of Millimeter-Wave Fixed Cellular Systems Operating at Frequencies Above 20GHz", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 1, pp. 183-185, 2002.
- [Panagopoulos 2002c] Panagopoulos A.D., J.D. Kanellopoulos, "Prediction of Triple-Orbital Diversity Performance in Earth-Space Communications", International Journal of Satellite Communications, vol.20, pp.187-200, 2002.
- [Panagopoulos 2003a] Panagopoulos A.D., J.D. Kanellopoulos, "Differential Rain Attenuation Statistics on two Converging Point-to-Point Terrestrial Links Located in a Tropical Climatic Region", Annals of Telecommunications, vol.58, no3-4, pp. 673-677, Mar.-April 2003.
- [Panagopoulos 2003b] Panagopoulos A.D., J.D. Kanellopoulos, "Statistics of Differential Rain Attenuation on Converging Terrestrial Propagation Paths", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 51, no. 9, pp.2514-2517, September 2003.
- [Panagopoulos 2004a] Panagopoulos A.D., P.-D.M. Arapoglou, and P.G. Cottis, "Satellite Communications at Ku, Ka, and V Bands: Propagation Impairments and Mitigation Techniques", IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol.6, no.3, 3<sup>rd</sup> Quarter 2004.
- [Panagopoulos 2004b] Panagopoulos A.D., P.-D.M. Arapoglou, P.G. Cottis, "Site versus orbital diversity: performance comparison based on propagation characteristics at the Ku band and above," IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett., vol. 3, pp. 26-29, 2004.
- [Panagopoulos 2005a] Panagopoulos A.D., P.-D.M. Arapoglou, G.E. Chatzarakis, J.D. Kanellopoulos and P.G. Cottis, "LMDS Diversity Systems: A New Performance Model Incorporating Stratified Rain", IEEE Communications Letters, vol.9, no.2, pp.145-147, February 2005.
- [Panagopoulos 2005b] Panagopoulos A.D., P.-D.M. Arapoglou, J.D. Kanellopoulos, P.G. Cottis, "Long-term rain attenuation probability and site diversity gain prediction formulas," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 53, no. 7, pp. 2307-2313, 2005.

- [Panagopoulos 2005c] Panagopoulos A.D., T.D. Kritikos, J.D. Kanellopoulos, "Aggravation of radio interference effects on a dual polarized Earth-space link by two adjacent interfering satellites under rain fades," *Radio Sci.*, vol. 40, 2005.
- [Panagopoulos 2007a] Panagopoulos A.D., K.P. Liolis, and P.G. Cottis, "Rician K-Factor Distribution in Broadband Fixed Wireless Access Channels under Rain Fades", *IEEE Communications Letters*, vol. 11, no. 4, pp. 301-303, April 2007.
- [Panagopoulos 2007b] Panagopoulos A.D., P.-D.M. Arapoglou, J.D. Kanellopoulos, and P.G. Cottis, "Intercell Radio Interference Studies in Broadband Wireless Access Networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 1, pp. 3-12, January 2007.
- [Papazian 1997] Papazian P.B., G.A. Hufford, R.J. Achatz, and R. Hoffman , "Study of the Local Multipoint Distribution Service Radio Channel", *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol.43, no.2, pp.175-184, 1997.
- [Papoulis 2002] Papoulis, and S.U. Pillai, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, 4<sup>th</sup> Edition, Englewood Cliffs, NJ: McGraw-Hill, 2002.
- [Patzold 1998] Patzold M., Y. Li, and F. Laue, "A Study of a Land Mobile Satellite Channel Model with Asymmetrical Doppler Power Spectrum and Lognormally Distributed Line-of-Sight Component", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 47, no. 1, pp. 297-310, February 1998.
- [Paul 2008] Paul, and T. Ogunfunmi, "Wireless LAN Comes of Age: Understanding the IEEE 802.11n Amendment," *IEEE Circuits Syst. Mag.*, vol. 8, no. 1, pp. 28–54, 1<sup>st</sup> Quarter 2008.
- [Paulraj 1997] Paulraj A.J., and C.B. Papadias, "Space-time processing for wireless communications", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 14, no. 5, November 1997.
- [Paulraj 2003] Paulraj A.J., R. Nabar and D. Gore, *Introduction to Space-Time Wireless Communications*, Cambridge Univ. Press, May 2003.
- [Paulraj 2004] Paulraj A.J., D.A. Gore. R.U. Nabar, and H. Bolcskei, "An Overview of MIMO Communications – A Key to Gigabit Wireless", *Proceedings of IEEE*, vol.92, no.2, pp.198-218, February 2004.

- [Perez-Fontan 1997a] Perez-Fontan, J.P. Gonzalez, M.J.S. Ferreiro, M.A. Vazquez-Castro, S. Buonomo, J.P. Baptista, "Complex envelope three-state Markov model based simulator for the narrow-band LMS channel," *Int. J. Satell. Commun.*, vol. 15, no. 1, pp. 1-15, 1997.
- [Perez-Fontan 1997b] Perez-Fontan, M.A. Vazquez-Castro, J. Kurnish, J. Pamp, E. Zollinger, S. Buonomo, P. Baptista, B. Arbesser-Rastburg, "A versatile framework for a narrow- and wide-band statistical propagation model for the LMS channel," *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 43, no. 4, pp. 431-458, 1997.
- [Perez-Fontan 2001] Perez-Fontan, M.-A. Vazquez Castro, C. Enjamio Cabado, J. Pita García, E. Kubista, "Statistical Modeling of the LMS Channel", *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, vol.50, no.6, pp.1549-1567, Nov. 2001.
- [Perez-Fontan 2007] Perez-Fontan, I. Sanchez Lago, R. Prieto Cerdeira, A. Bolea Alamañac, "Consolidation of a Multi-State Narrowband Land Mobile Satellite Channel Model", in *Proc. 2nd Europ. Conf. Antennas Propag., EuCAP 2007*, Edinburgh, UK, Nov. 2007.
- [Perez-Fontan 2008] Perez-Fontan, A. Mayo, D. Marote, R. Prieto-Cerdeira, P. Marino, F. Machado, N. Riera, "Review of generative models for the narrowband land mobile satellite propagation channel," *Int. J. Satell. Commun. Netw.*, vol. 26, pp. 291-316, 2008.
- [Perez-Neira 2008] Perez-Neira A.I., C. Ibars, J. Serra, A. Del Coso, J. Gómez-Vilardebó, M. Caus, "MIMO Applicability to Satellite Networks", in *Proc. 10<sup>th</sup> Int. Work. Signal. Process. Space Commun., SPSC 2008*, Rhodes, Greece, Oct. 2008.
- [Perez-Neira 2011] Perez-Neira A.I., C. Ibars, J. Serra, A. del Coso, J. Gómez-Vilardebó, M. Caus, and K.P. Liolis, "MIMO Channel Modeling and Transmission Techniques for Multi-Satellite and Hybrid Satellite-Terrestrial Mobile Networks", *Elsevier's Physical Communication*, Vol.4, Issue 2, pp. 127-139, June 2011.
- [Petre 2004] Petre, B. V. Poucke, A. Bourdoux, and L. V. Perre, "MIMO-OFDM for High-Speed WLANs," *IMEC*, Jan. 2004.



- [Prieto-Cerdeira 2010] Prieto-Cerdeira, F. Pérez Fontán, P. Burzigotti, A. Bolea Alamañac, I. Sanchez Lago, “Versatile Two-State Land Mobile Satellite Channel Model with First Application to DVB-SH Analysis”, *Int. J. Satell. Commun. Network.*, Vol. 28, No. 5-6, pp. 291–315, September-December 2010.
- [Proakis 2001] Proakis J.G., *Digital Communications*, McGraw-Hill Int’l Edition, 4<sup>th</sup> Edition, 2001.
- [Rappaport 1999] Rappaport T.S., *Wireless Communications – Principles & Practice*, Prentice Hall, 1999.
- [Rice 1997] Rice M., B. Humpherys, "Statistical models for the ACTS K-band land mobile satellite channel," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf., VTC 1997*, pp. 46-50, Phoenix, AZ, 1997.
- [Robet 1992] Robet P.P., B.G. Evans, A. Ekman, "Land mobile satellite communications channel model for simultaneous transmission from a land mobile terminal via two separate satellites," *Int. J. Satell. Commun.*, vol. 10, pp. 139-154, 1992.
- [Sanayei 2004] Sanayei, and A. Nosratinia, “Antenna Selection in MIMO Systems”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 10, pp. 68-73, October 2004.
- [S-OFDM] ESA ARTES project “Study of Enhanced Multicarrier (OFDM) Digital Transmission Techniques for Broadband Satellites”, <http://telecom.esa.int>
- [Scalise 2002] Scalise, J. Kunisch, H. Ernst, J. Siemons, G. Harles, and J. Hörle, “Measurement campaign for the land mobile satellite channel in Ku-band”, in *Proc. 5th European Mobile and Personal Satellite Workshop (EMPS’02)*, Baveno-Stresa, Italy, 2002.
- [Scalise 2008] Scalise, H. Ernst, and G. Harles, “Measurement and Modeling of the Land Mobile Satellite Channel at Ku-Band”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 2, pp. 693 - 703, March 2008.
- [Sellathurai 2002] Sellathurai M., S. Haykin, "Turbo-BLAST for wireless communications: Theory and experiments," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 50, no. 10, pp. 2538-2546, 2002.

- [Sellathurai 2006] Sellathurai M., P. Guinand, J. Lodge, "Space-time coding in mobile satellite communications using dual-polarized channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, no. 1, pp. 188-199, January 2006.
- [Shafi 2006] Shafi M., Z. Min, P.J. Smith, A.L. Moustakas, A.F. Molisch, "The Impact of Elevation Angle on MIMO Capacity", in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun., ICC 2006, Istanbul, Turkey, Jun. 2006*.
- [Shankar 2011] Shankar B. M.R., P.-D. Arapoglou, B. Ottersten, "Golden Codes for Dual Polarized MIMO-OFDM Transmissions in Hybrid Satellite/Terrestrial Mobile Systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun., ICC, Kyoto, Japan, June 2011*.
- [Shannon 1948] Shannon, C. E., "A mathematical theory of communication", *Bell System Technical Journal*, 27, 379-423, 623-656, 1948.
- [Shiu 2000] Shiu D.-S., G.J. Foschini, M.J. Gans, J.M. Kahn, "Fading Correlation and its Effect on the Capacity of Multielement Antenna Systems", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, no. 3, pp. 502-513, Mar. 2000.
- [Sinka 2003] Sinka, and J. Bitto, "Site Diversity Against Rain Fading in LMDS Systems", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 13, no. 8, pp. 317-319, August 2003.
- [Smith 1992] Smith H., S. K. Barton, J. G. Gardiner, and M. Sforza, "Characterization of the land mobile-satellite (LMS) channel at L and S bands: Narrowband measurements", *ESA AOPs 104 433/114 473*, University of Bradford, 1992.
- [Sorensen 1998] Sorensen, A. Ø. Nielsen, P. E. Mogensen, M. Tolstrup, K. Steffensen, "Performance of Two-Branch Polarization Antenna Diversity in an Operational GSM Network," in *Proc. IEEE VTC'98*, pp. 741-746, Ottawa, Canada, May 1998.
- [Stuber 2004] Stuber G.L., J.R. Barry, S.W. McLaughlin, Y.G. Li, M.A. Ingram, T.G. Pratt, "Broadband MIMO-OFDM wireless communications," *Proceed. IEEE*, vol. 92, no. 2, pp. 271-294, 2004.
- [Stutzman 1993] Stutzman W.L., "The special section on propagation effects on satellite communication links", *IEEE Proc.*, Vol.81, No.6, p.850-855, 1993.

- [Suzuki 1977] Suzuki H., "A Statistical Model for Urban Radio Propagation," IEEE Trans. Comm., vol. 25, no. 7, pp. 673-680, July 1977.
- [Tan 2000] Tan, and L. Pedersen, "Study of Simultaneous Coverage and Route Diversity Improvement under Rainy Periods for LMDS Systems at 42GHz," in Proc. of ESA Millennium Conf. Antennas and Propagation, vol. AP2000, Davos, Switzerland, April 2000.
- [Taricco 2003] Taricco G., E. Viterbo, and E. Biglieri, "MIMO Transmission for Mobile Satellite Communication Systems: A Review", in Proc. 8th Int'l Workshop on Signal Processing for Space Communications, Italy, September 2003.
- [Tarokh 1998] Tarokh, N. Seshadri, A.R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance criterion and code construction," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 44, no. 2, pp. 744-765, 1998.
- [Tarokh 1999] Tarokh, H. Jafarkhani, A.R. Calderbank, "Space-time block codes from orthogonal designs," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 45, no. 5, pp. 1456-1467, 1999.
- [Telatar 1999] Telatar E., "Capacity of Multiantenna Gaussian Channels", European Transactions on Communications, vol. 10, no. 6, pp. 585-595, November-December 1999.
- [Theologou 2002] Θεολόγου Μ.Ε., Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών, Εκδόσεις ΕΜΠ, 2002.
- [Tjhung 1999] Tjhung, C.C. Chai, "Fade statistics in Nakagami-lognormal channels," IEEE Trans. Commun., vol. 47, no. 12, pp. 1769-1772, 1999.
- [Tse 2005] Tse D., and P. Viswanath, Fundamentals of Wireless Communication, Cambridge Univ. Press, 2005.
- [Tulino 2005] Tulino A.M., A. Lozano, S. Verdu, "Impact of antenna correlation on the capacity of multiantenna channels," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 51, no. 7, pp. 2491-2509, 2005.
- [UMB] 3GPP2, "Physical layer for Ultra Mobile Broadband (UMB) air interface specification", 2007.
- [Vatalaro 2002] Vatalaro F., F. Mazzenga, G. De Maio, A. Forcella, "The generalized Rice lognormal channel model - first and second order statistical

- characterization and simulation," *Int. J. Satell. Commun.*, vol. 20, no. 1, pp. 29-45, 2002.
- [Vaughan 1990] Vaughan R.C., "Polarization diversity in mobile communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 39, no. 3, pp. 177-186, 1990.
- [Vazquez-Castro 2002] Vazquez-Castro M.A., F. Pérez Fontán, S.R. Saunders, "Shadowing correlation assessment and modeling for satellite diversity in urban environments", *Int. J. Satell. Commun.*, vol. 20, pp.151-166, 2002.
- [Vucetic 1992] Vucetic, J. Du, "Channel modeling and simulation in satellite mobile communication systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 10, no. 8, pp. 1209-1217, 1992.
- [Wei 2006] Wei S., D.L. Goeckel, M.C. Valenti, "Asynchronous cooperative diversity," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 5, no. 6, pp. 1547-1557, 2006.
- [WINNER] EC FP6 IST project WINNER, MATLAB implementation of the 3GPP spatial channel model, [https://www.ist-winner.org/3gpp\\_scm.html](https://www.ist-winner.org/3gpp_scm.html).
- [WWiSE 2004] Airgo Networks, Bermai, Broadcom, Conexant, ST Microelectronics, Texas Instruments, "WWiSE IEEE 802.11n Proposal WWiSE IEEE 802.11n Proposal Technical Summary", WWiSE group, Aug. 2004.
- [Xie 2000] Xie, Y. Fang, "A general statistical channel model for mobile satellite systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 3, pp. 744-752, 2000.
- [Xu 2000] Xu, T.S. Rappaport, R.J. Boyle, and J.H. Schaffner, "Measurements and models for 38-GHz point-to-multipoint radiowave propagation", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.18, no. 3, pp.310-321, March 2000.
- [Yamashita 2005] Yamashita F., K. Kobayashi, M. Ueba, M. Umehira, "Broadband multiple satellite MIMO system," in *62nd IEEE Veh. Techn. Conf., VTC 2005*, vol. 4, pp. 2632-2636, Sept. 2005.
- [Zorba 2008a] Zorba, M. Realp, A.I. Perez-Neira, "An improved partial CSIT random beamforming for multibeam satellite systems," in *10<sup>th</sup> Int. Work. Signal Process. Space Commun., SPSC 2008*, Rhodes, Greece, Oct. 2008.
- [Zorba 2008b] Zorba, M. Realp, M.A. Lagunas, and A.I Perez-Neira, "Dual polarization for MIMO processing in multibeam satellite systems," in *10<sup>th</sup> Int. Work. Signal Process. Space Commun., SPSC 2008*, Rhodes, Greece, Oct. 2008.

# Παράρτημα Ι. Φυσικο-Στατιστικό Μοντέλο Διαλείψεων λόγω Βροχόπτωσης

## I.1. Περιγραφή Μέσου Βροχής

### I.1.1. Μικροσκοπική Δομή της Βροχής

Το μέσο διάδοσης βροχής αποτελείται γενικά από ένα μεγάλο αριθμό σταγόνων των οποίων η θέση, το μέγεθος και ο προσανατολισμός είναι τυχαίες μεταβλητές και, επομένως, δεν μπορούν να προσδιορισθούν με ντετερμινιστικό τρόπο. Κατά τη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε συχνότητες άνω των 10GHz, οι διαστάσεις των σταγόνων βροχής είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος κύματος και, συνεπώς, καθεμία από αυτές λειτουργεί ως σκεδαστής του ραδιοκύματος. Συγκεκριμένα, τα ρεύματα μετατόπισης που επάγονται κατά την πρόσπτωση του κύματος επί των σταγόνων της βροχής προκαλούν δευτερεύοντα πεδία μακριά από αυτήν. Επιπλέον, εκτός από τον παράγοντα της σκέδασης, ισχυρή είναι και η από τους υδρομετεωρίτες εισαγόμενη απορρόφηση ενέργειας, που μάλιστα υπερτερεί έναντι της σκέδασης στη φασματική περιοχή από 10 έως 30GHz. Αν και στις συχνότητες αυτές το μήκος κύματος δεν είναι αρκετά μικρό ώστε να δικαιολογούνται μεγάλες απώλειες λόγω σκέδασης, σε ακόμα υψηλότερες συχνότητες (περιοχή EHF συχνοτήτων) η σκέδαση αποτελεί τη βασική αιτία απόσπασης μέρους της ισχύος των ραδιοκυμάτων από τους υδρομετεωρίτες.

Η συνδυασμένη δράση της σκέδασης και της απορρόφησης, δράση που οφείλεται στην ύπαρξη υδρομετεωριτών στο δρόμο διάδοσης των ραδιοκυμάτων, όχι μόνο δημιουργεί μεγάλες τιμές απόσβεσης, αλλά συμβάλλει και στην αποπόλωση του κύματος. Το γεγονός αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία για τα συστήματα εκείνα που κάνουν χρήση της τεχνικής διαφορισμού πόλωσης και της τεχνικής αναχρησιμοποίησης συχνότητας για την αύξηση του εύρους ζώνης συχνοτήτων που προσφέρουν. Οι κυριότερες παράμετροι της σταγόνας βροχής που προκαλούν αποπόλωση στο ραδιοκύμα είναι το σχήμα της σταγόνας (αποδεκτό έχει γίνει το σχήμα του πεπλατυσμένου σφαιροειδούς), καθώς και η γωνία κλίσης της (canting angle). Η γωνία κλίσης ως προς τον ορίζοντα, που εμφανίζει η σταγόνα βροχής κατά την πτώση της, οφείλεται στον άνεμο (ειδικότερα στην κατεύθυνση και την έντασή του) που πνέει κατά περίσταση στην περιοχή. Επίσης, για λόγους πληρότητας σημειώνεται ότι στην περίπτωση των δορυφορικών ζεύξεων σημαντική αιτία αποπόλωσης αποτελούν

εκτός από τις σταγόνες βροχής και οι κρύσταλλοι πάγου που βρίσκονται συνήθως πάνω από τα σύννεφα.

Εκτός από τα ανωτέρω επιμέρους χαρακτηριστικά των σταγόνων βροχής, εκείνο που ενδιαφέρει στην πράξη τα δορυφορικά συστήματα που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz είναι η συνολική (χωρική) συμπεριφορά του μέσου βροχής ως προς τη διάδοση ραδιοκυμάτων, ώστε να είναι δυνατή η διατύπωση αντιστοίχου μοντέλου και, συνακόλουθα, η πρόβλεψη της εισαγόμενης από το μέσο απόσβεσης.

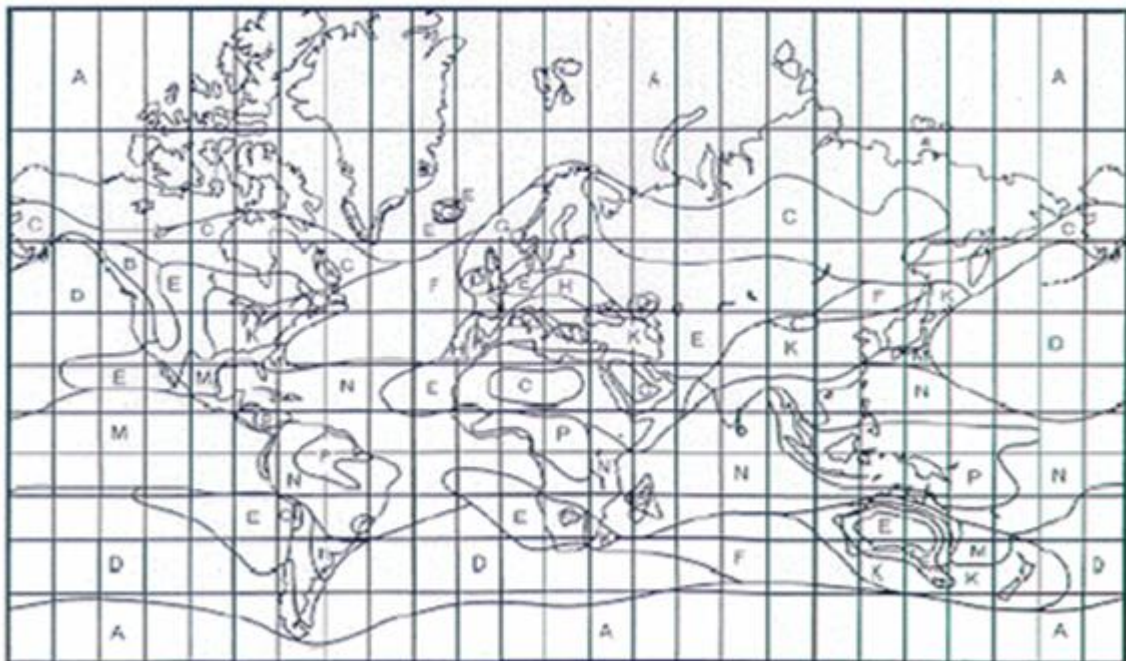
### **I.1.2. Μακροσκοπική Δομή της Βροχής**

Ανάλογα με την εποχή του έτους και τη γεωγραφική θέση, μακροσκοπικά, το μέσο βροχής εμφανίζει δύο μορφές: τη μορφή βροχοπτώσεων μέτριας έντασης και ομαλής συμπεριφοράς (βροχή στρωσιγενούς τύπου), και τη μορφή χωρικά περιορισμένων περιοχών με ισχυρές βροχοπτώσεις (βροχοπυρήνες) που περιβάλλονται από στρωσιγενή βροχή (βροχή συνεκτικού τύπου). Οι βροχοπυρήνες είναι υπεύθυνοι για τις υψηλές τιμές απόσβεσης στις οποίες υπόκεινται τα ραδιοκύματα ορισμένες χρονικές περιόδους στη διάρκεια του έτους. Ανάμεσα στις δύο μορφές βροχής υπάρχει μεγάλη διαφορά όσον αφορά το βαθμό ομοιογένειάς τους, με τη βροχή εντός των βροχοπυρήνων (των οποίων η έκταση φθάνει τις λίγες δεκάδες χιλιόμετρα) να παρουσιάζει μεγάλη ανομοιογένεια/ανομοιομορφία. Όπως είναι λογικό, η ομοιογένεια/ομοιομορφία του στρωσιγενούς τύπου βροχής έχει ως συνέπεια η βροχόπτωση να χαρακτηρίζεται από μεγάλη (χωρική) αυτοσυσχέτιση. Αντίθετα, στο εσωτερικό των βροχοπυρήνων η αυτοσυσχέτιση της βροχόπτωσης παύει να είναι τόσο ισχυρή, με αποτέλεσμα η συμπεριφορά της βροχόπτωσης σε κάποιο σημείο του βροχοπυρήνα να ακολουθεί μόνο μερικώς τις μεταβολές στη βροχόπτωση γειτονικών του σημείων. Το γεγονός αυτό έχει μεγάλη σημασία για τις τεχνικές διαφορισμού που εξετάζονται στη Διατριβή.

Από τα προηγούμενα, γίνεται σαφές ότι η βροχή είναι μία τυχαία (στοχαστική) διαδικασία τόσο στο πεδίο του χώρου, όσο και στο πεδίο του χρόνου και επομένως απαιτείται η στατιστική της μελέτη. Στην πορεία της μελέτης αυτής, βασικό ρόλο διαδραματίζει το μέγεθος της σημειακής έντασης βροχόπτωσης (rainfall rate). Η σημειακή ένταση (ή ρυθμός) βροχόπτωσης  $R$  εκφράζει (σε mm/hr) το ύψος της στάθμης του ύδατος που φθάνει σε ένα σημείο στο έδαφος στη μονάδα του χρόνου. Η γνώση των στατιστικών ιδιοτήτων της (αφού πρόκειται για τυχαία μεταβλητή) είναι απαραίτητη για το μετέπειτα υπολογισμό της κατανομής της απόσβεσης. Συγκεκριμένα, το μέγεθος που ενδιαφέρει κατά τη σχεδίαση

ενός συστήματος δορυφορικών επικοινωνιών είναι η τιμή της πιθανότητας με την οποία η ένταση βροχόπτωσης υπερβαίνει κάποια στάθμη για διάφορα ποσοστά του χρόνου. Ο πλέον αξιόπιστος τρόπος προκειμένου να αποκτηθεί η γνώση αυτή είναι με διεξαγωγή μετρήσεων στην τοποθεσία όπου πρόκειται να (ή έχει ήδη) εγκατασταθεί το δορυφορικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα. Προϋπόθεση ώστε η διαδικασία των μετρήσεων να συγκλίνει σε ένα αποδεκτό αποτέλεσμα είναι η μεγάλη (αρκετών ετών) διάρκειά της, εφόσον έχει παρατηρηθεί ότι μετρήσεις μικρής χρονικής διάρκειας στην ίδια περιοχή διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους [Lin 1975],[Morita 1978].

Ωστόσο, τις περισσότερες φορές, η ανάγκη για ταχεία εγκατάσταση του δορυφορικού δικτύου δεν δίδει στο σχεδιαστή την πολυτέλεια να πραγματοποιήσει μία τόσο χρονοβόρα διαδικασία μετήσεων. Ένας ακόμη περιοριστικός παράγοντας για τη διεξαγωγή πειραμάτων είναι το οικονομικό κόστος που συνοδεύει την κίνηση αυτή. Προς τούτο, ο διεθνής τηλεπικοινωνιακός οργανισμός ITU-R έχει χωρίσει την υφήλιο σε 15 διαφορετικές κλιματικές ζώνες (A, B, C, D, E, F, G, H, J, K, L, M, N, P, Q), κάνοντας διαθέσιμη για καθεμία από τις ζώνες αυτές την (αθροιστική) κατανομή υπέρβασης  $P(R \geq r)$  μίας στάθμης  $r$  έντασης βροχόπτωσης για διάφορα ποσοστά του χρόνου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι με βάση το χωρισμό αυτό οι μεσογειακές περιοχές ανήκουν στις K, L κλιματικές ζώνες, η Βόρεια Ευρώπη στις F, H ζώνες, η Ιαπωνία στη M ζώνη, ενώ οι τροπικές περιοχές της Κεντρικής Αφρικής και Νότιας Αμερικής στις P, Q ζώνες.



Σχήμα I.1: Διαχωρισμός της υφήλιου σε κλιματικές ζώνες

Με μία πρόσφατη σύστασή της ITU-R P.837-5 [ITU837], η ITU-R αναβάθμισε τα δεδομένα που προσφέρει για τη σημειακή ένταση βροχόπτωσης προσαρμόζοντάς τα στον έντονα τοπικό χαρακτήρα που εμφανίζει το μέγεθος αυτό. Της κίνησης αυτής είχε προηγηθεί η διαπίστωση ότι ακόμα και σε περιοχές στο εσωτερικό της ίδιας κλιματικής ζώνης η βροχόπτωση παρουσιάζει συχνά μεγάλες διαφορές και ότι μία εμπλουτισμένη τράπεζα δεδομένων ήταν πλέον απαραίτητη. Έτσι, σύμφωνα με τη σύσταση ITU-R P.837-5 προτείνεται η χρήση από τους σχεδιαστές μηχανικούς των χαρτών βροχής (rainmaps), στους οποίους τα στατιστικά δεδομένα εξειδικεύονται για περιοχές με έκταση μικρότερη μίας κλιματικής ζώνης. Ο χωρισμός της υφελίου γίνεται ανάλογα με το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της περιοχής σε βήματα των 1.5°. Τα συνιστώμενα δεδομένα θεωρούνται ιδιαίτεως αξιόπιστα, αφού έχουν προκύψει από διάρκειας 15 ετών μετρήσεις του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μέσης Κλίμακας Πρόγνωσης Καιρικών Συνθηκών (European Center of Medium-Range Weather Forecast, ECMWF). Τέλος, σε σχέση με τους χάρτες βροχής αναφέρεται ότι η βήμα-προς-βήμα εξαγωγή της σημειακής έντασης βροχόπτωσης R σύμφωνα με τη σύσταση P.837-5 παρατίθεται λεπτομερώς στην Ενότητα I.6.2.

Σε καθέναν από τους ανωτέρω τρόπους απόκτησης δεδομένων βροχόπτωσης (μέθοδος μετρήσεων, μέθοδος κλιματικών ζωνών και μέθοδος χαρτών βροχής), αριθμητικές τιμές της έντασης βροχόπτωσης αντιστοιχίζονται σε ποσοστά χρόνου υπέρβασης της τιμής αυτής. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ωστόσο, εξυπηρετεί η κατανομή υπέρβασης της έντασης βροχόπτωσης να λαμβάνει συγκεκριμένη μαθηματική μορφή. Έχει παρατηρηθεί [Lin 1975] ότι για τα κλιματικά χαρακτηριστικά της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής η λογαριθμοκανονική κατανομή είναι εκείνη που προσεγγίζει με μεγαλύτερη επιτυχία τα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ σε περιοχές υποτροπικών και τροπικών κλιμάτων (Νότια Αμερική, Ιαπωνία, Αφρική) ενδείκνυται η κατανομή γάμμα [Morita 1978]. Σε όλη την έκταση της Διατριβής ακολουθείται αποκλειστικά η λογαριθμοκανονική κατανομή για την ένταση βροχόπτωσης R. Πρόκειται για την κατανομή εκείνη, σύμφωνα με την οποία ο φυσικός λογάριθμος της τυχαίας μεταβλητής ακολουθεί την κανονική κατανομή και, ως εκ τούτου, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας έχει τη μορφή

$$f_R(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot R \cdot S_r} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{\ln R - \ln R_m}{\sqrt{2} \cdot S_r} \right)^2 \right] \quad (I.1)$$

όπου  $R_m$  και  $S_r$  η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της τυχαίας μεταβλητής  $\ln R$ , αντίστοιχα. Από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας φθάνει κανείς εύκολα μετά από ολοκλήρωση στην αθροιστική κατανομή υπέρβασης μίας στάθμης  $r$  σημειακής έντασης βροχόπτωσης.



$$P(R \geq r) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\ln r - \ln R_m}{\sqrt{2} \cdot S_r} \right) \quad (\text{I.2})$$

Σημειώνεται ότι  $\operatorname{erfc}(x)$  είναι η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος που ορίζεται από τη σχέση

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-y^2) dy \quad (\text{I.3})$$

Για μικρές τιμές έντασης βροχόπτωσης ( $R < 5 \text{ mm/hr}$ ), η λογαριθμοκανονική προσέγγιση αποκλίνει από τα πειραματικά δεδομένα αφού οδηγεί σε μία υπερεκτίμηση της πιθανότητας υπέρβασης. Το γεγονός αυτό όμως είναι πρακτικά αδιάφορο δεδομένου ότι κατά τη σχεδίαση του συστήματος ενδιαφέρουν οι υψηλές τιμές του ρυθμού  $R$  που παράγουν και τις μεγάλες αποσβέσεις. Παραμένοντας στο ίδιο θέμα, τονίζεται ότι όταν υιοθετείται για κάποια περιοχή η λογαριθμοκανονική κατανομή με τη μορφή που μόλις δόθηκε, αυτή ισχύει για το σύνολο του χρόνου στη διάρκεια του έτους, δηλαδή τόσο υπό συνθήκες βροχής όσο και υπό συνθήκες καθαρού ουρανού.

## I.2. Ειδική Απόσβεση λόγω Βροχής

Το επόμενο στάδιο στον καθορισμό της απόσβεσης με αίτιο τη βροχή σε μία δορυφορική ζεύξη μετά την εύρεση της κατανομής της σημειακής έντασης βροχόπτωσης είναι ο υπολογισμός της ειδικής απόσβεσης. Η ειδική απόσβεση  $A_o$  (σε dB/km) ορίζεται ως η εξασθένιση ανά μονάδα μήκους που υφίσταται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα από ένα χωρικά ομοιογενές μέσο βροχής και συνδέεται με την ένταση βροχόπτωσης  $R$  μέσω της σχέσης

$$A_o = a \cdot R^b \quad (\text{I.4})$$

Απλουστευμένα, η σπουδαιότητα της σχέσης αυτής έγκειται στο ότι αποτελεί το συνδετικό κρίκο ανάμεσα στη βροχόπτωση και την απόσβεση, επιτρέποντας έτσι η ανάλυση να περάσει από το επίπεδο της κατανομής της βροχόπτωσης στο επίπεδο της κατανομής της απόσβεσης. Οι παράγοντες  $a$ ,  $b$  που εμπλέκονται στον υπολογισμό της ειδικής απόσβεσης εξαρτώνται από τη ραδιοσυχνότητα λειτουργίας  $f$  του δορυφορικού συστήματος, τη γωνία πόλωσης  $\tau$  του ραδιοκύματος ως προς τον ορίζοντα ( $\tau=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  για οριζόντια, κυκλική και κατακόρυφη πόλωση αντίστοιχα), τη γωνία ανύψωσης  $\varphi$  του ραδιοβήματος και τέλος, από τη μικροσκοπική δομή του μέσου βροχής. Η αναλυτική έκφραση των παραγόντων αυτών είναι

$$a = \frac{a_H + a_V + (a_H - a_V) \cdot \cos^2 \varphi \cdot \cos 2\tau}{2} \quad (\text{I.5.a})$$

$$b = \frac{a_H b_H + a_V b_V + (a_H b_H - a_V b_V) \cdot \cos^2 \varphi \cdot \cos 2\tau}{2a} \quad (\text{I.5.b})$$

Οι συντελεστές  $a_H$ ,  $b_H$  και  $a_V$ ,  $b_V$  αποτελούν τις οριακές περιπτώσεις των  $a$ ,  $b$ , όταν το κύμα που ακτινοβολείται από την κεραία του επίγειου σταθμού ή του δορυφόρου έχει οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση αντίστοιχα. Υπολογίζονται με τη σειρά τους από τις σχέσεις που ακολουθούν, για ραδιοσυχνότητες  $f$  από 10 έως 30GHz.

$$\left. \begin{aligned} a_H &= 2.1114 \cdot 10^{-5} \cdot f^{2.71896} \\ a_V &= 1.6953 \cdot 10^{-5} \cdot f^{2.76183} \\ b_H &= 1.79764 - 0.23202 \cdot \ln f \\ b_V &= 1.8376 - 0.25536 \cdot \ln f \end{aligned} \right\} \quad (\text{I.6})$$

Στις σχέσεις (I.6) έχει ληφθεί υπόψη η μικροσκοπική δομή του μέσου βροχής, μέσω των υποθέσεων ότι η σταγόνα βροχής έχει σφαιρικό σχήμα, κατανομή μεγέθους που ακολουθεί την κατανομή των Laws και Parsons [Laws 1943] και μέσω επιπρόσθετων παραδοχών για το δείκτη διάθλασης, την οριακή ταχύτητα και τις διαστάσεις των σταγόνων. Οι προαναφερθείσες παραδοχές μπορεί να ειπωθεί ότι προσεγγίζουν καλύτερα τις ιδιότητες της σταγόνας βροχής σε εύκρατα κλίματα. Ασφαλώς, οι εκφράσεις αυτές δεν είναι ο μοναδικός τρόπος ώστε να ληφθεί υπόψη η μικροσκοπική δομή της βροχής. Αντίθετα, το ζήτημα του υπολογισμού των συντελεστών  $a_H$ ,  $b_H$  και  $a_V$ ,  $b_V$  είναι ανοικτό σε βελτιώσεις και προς την κατεύθυνση αυτή σημαντική συνεισφορά αναμένεται να έχουν μετρήσεις βροχής μεγαλύτερης αξιοπιστίας και αποτελεσματικότερες μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων σκέδασης.

Στις περισσότερες τεχνικές πρόβλεψης της απόσβεσης λόγω βροχής, η ανάλυση μέχρι το σημείο του υπολογισμού της ειδικής απόσβεσης  $A_0$  είναι ταυτόσημη με αυτή που περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους. Οι διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα διάφορα μοντέλα ξεκινούν από εκείνο το σημείο και έπειτα, και αφορούν τις υποθέσεις που γίνονται για τη χωρική δομή της βροχής. Έτσι, για παράδειγμα, αν θεωρηθεί ότι η βροχή είναι χωρικά ομοιογενής (δηλαδή στρωσιγενούς τύπου) η συνολική απόσβεση  $A$  που εισάγεται σε μήκος  $L$  της ζεύξης υπό βροχή προκύπτει πολύ απλά από το γινόμενο του  $A_0$  επί το  $L$ .

$$A = a \cdot R^b \cdot L \quad (\text{I.7})$$

Παρόμοιος ισχυρισμός με αυτόν της (I.7) δεν μπορεί, ωστόσο, να σταθεί στην πολύ περισσότερο ενδιαφέρουσα στην πράξη βροχή συνεκτικού τύπου, που χαρακτηρίζεται από μεγάλη χωρική ανομοιογένεια εντός των βροχοπυρήνων. Μάλιστα, πρόσθετη δυσκολία υπάρχει στις δορυφορικές σε σχέση με τις επίγειες μικροκυματικές ζεύξεις λόγω της ανάγκης να περιγραφεί χωρικά η δομή της βροχής εκτός από το οριζόντιο και στο

κατακόρυφο επίπεδο. Η δεύτερη από τις περιπτώσεις αυτές εξετάζεται στην επόμενη ενότητα.

### 1.3. Ενεργό Ύψος Βροχής – Υπόθεση Crane

Η κατακόρυφη δομή του μέσου βροχής αποτελείται γενικά από δύο περιοχές: την άνω περιοχή στην οποία οι υδρομετεωρόλιθοι εμφανίζονται με τη μορφή πάγου και χιονιού και την κάτω περιοχή στην οποία οι υδρομετεωρόλιθοι εμφανίζονται με τη μορφή βροχής. Σύμφωνα και με τα όσα έχουν αναφερθεί στην Ενότητα 2.1, η επίδραση του χιονιού και του πάγου είναι αμελητέα στην απόσβεση του ραδιοκύματος όταν η συχνότητα είναι κάτω των 60GHz και μεγαλύτερης βαρύτητας κατά την εξέταση της αποπόλωσης. Κατά συνέπεια, η συνολική απόσβεση την οποία υφίσταται το ραδιοκύμα εξαιτίας των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων λαμβάνει χώρα αποκλειστικά στην κάτω περιοχή. Όριο μεταξύ των δύο αυτών περιοχών αποτελεί το υψόμετρο της ισόθερμης των 0°C που καλείται ενεργό ύψος βροχής. Διευκρινίζεται, ότι η ισόθερμη των 0°C είναι το στρώμα της ατμόσφαιρας σε κάθε σημείο του οποίου η θερμοκρασία ισούται με τη θερμοκρασία τήξης του πάγου. Προκειμένου να αποσαφηνισθεί η έννοια του ενεργού ύψους βροχής, καθώς και άλλων μεγεθών που θα ορισθούν στη συνέχεια του κειμένου, παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2 η γεωμετρία μίας δορυφορικής ζεύξης, όπου έμφαση δίδεται στις δύο περιοχές της κατακόρυφης δομής της βροχής.

Η μέση τιμή του υψομέτρου  $H$  της ισόθερμης των 0°C για κάθε εποχή διαφέρει από τόπο σε τόπο ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας. Μία προσεγγιστική έκφραση για το  $H$  σε km δίδεται από την επόμενη σχέση [Crane 1980]

$$H = \begin{cases} 4.8, & |\Lambda| \leq 30^\circ \\ 7.8 - 0.1 \cdot |\Lambda|, & |\Lambda| > 30^\circ \end{cases} \quad (1.8)$$

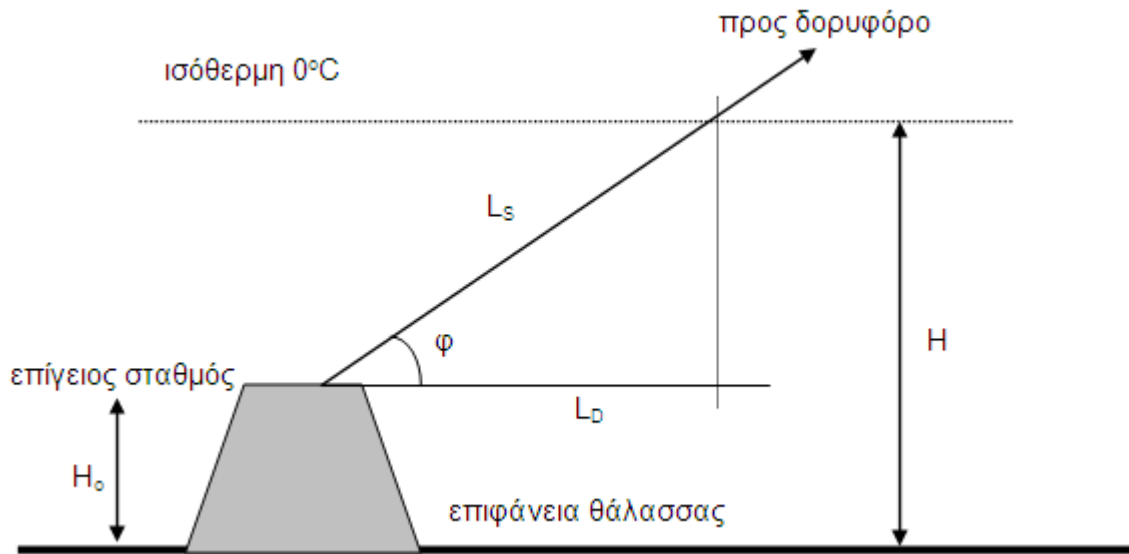
όπου  $\Lambda$  το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας εκφρασμένο σε μοίρες.

Ακριβέστερες προσεγγίσεις για το ύψος  $H$  τελούν προς το παρόν υπό έρευνα, καθώς όπως έχει διαφανεί από πορίσματα διαφορετικών μελετητών [Stutzman 1982] το μέσο ετήσιο υψός της βροχής εμφανίζεται να εξαρτάται εκτός των άλλων και από το ρυθμό βροχόπτωσης  $R$ .

Το μήκος  $L_s$  του τμήματος του κεκλιμένου ραδιοδρόμου προς το δορυφόρο που βρίσκεται στην κάτω περιοχή (δηλαδή υπό βροχή) ονομάζεται ενεργό μήκος, και σε km ισούται με [Kanellopoulos 1999]

$$L_S = \begin{cases} \frac{H - H_o}{\sin \varphi}, & \varphi \geq 10^\circ \\ \sqrt{(R_E + H)^2 - (R_E + H_o)^2} \cdot \cos^2 \varphi - (R_E + H_o) \cdot \sin \varphi, & \varphi < 10^\circ \end{cases} \quad (I.9)$$

όπου  $R_E$  η μέση ακτίνα της γης ( $R_E \cong 6,378 \text{ km}$ ),  $H_o$  το ύψος του επίγειου σταθμού από την επιφάνεια της θάλασσας και  $\varphi$  η γωνία ανύψωσης του κεκλιμένου ραδιοδρόμου προς το δορυφόρο.



Σχήμα I.2: Ενεργό ύψος βροχής και ενεργό μήκος δορυφορικής ζεύξης

Στη συνέχεια συζητείται μία απλοποιημένη θεώρηση της κατακόρυφης δομής του μέσου βροχής, γνωστή ως υπόθεση Crane, με ευρεία εφαρμογή στην ανάλυση δορυφορικών ζεύξεων. Πρωτοπαρουσιάστηκε από τον ίδιο το 1980 [Crane 1980] και συνοψίζεται στην παραδοχή ότι η βροχή κατά τον κατακόρυφο άξονα εμφανίζεται ομοιογενής. Κατά συνέπεια, εάν το ενεργό μήκος  $L_S$  αναλυθεί σε μία οριζόντια και μία κατακόρυφη συνιστώσα μόνο στη πρώτη από αυτές η ένταση βροχόπτωσης είναι ανομοιογενής. Η παραδοχή αυτή, βέβαια, δεν έγινε αυθαίρετα αλλά μετά από μετρήσεις βροχής μέσω ραντάρ. Ο υπολογισμός, λοιπόν, της απόσβεσης  $A_s$  κατά μήκος του κεκλιμένου τμήματος  $L_S$ , μπορεί να προκύψει ισοδύναμα από την αντίστοιχη απόσβεση  $A_D$  κατά μήκος της υποθετικής επίγειας προβολής  $L_D$  του  $L_S$ .

Τα δύο μήκη (το κεκλιμένο τμήμα και η προβολή του στο έδαφος) συσχετίζονται μεταξύ τους με την απλή σχέση,

$$L_D = L_S \cdot \cos \varphi \quad (I.10)$$

ενώ ανάλογη είναι και η σχέση που συνδέει τις δύο αποσβέσεις (εκείνη κατά μήκος του  $L_S$  και εκείνη κατά μήκος του  $L_D$ ).

$$A_D = A_S \cdot \cos\varphi \quad (I.11)$$

Συμπερασματικά και παρά την απλότητά της, η υπόθεση Crane διευκόλυνε σε μεγάλο βαθμό τις προσπάθειες πρόβλεψης της απόσβεσης λόγω βροχής στις δορυφορικές ζεύξεις. Η σημασία της αναγωγής της απόσβεσης της δορυφορικής ζεύξης στην απόσβεση της αντίστοιχης επίγειας ζεύξης είναι μεγάλη λόγω του ότι οι βροχομετρητές, που είναι τα μοναδικά όργανα μέτρησης με δυνατότητα παραγωγής ποσοτικών αποτελεσμάτων για το ρυθμό βροχόπτωσης  $R$ , τοποθετούνται αποκλειστικά επί του εδάφους.

## **I.4. Υπολογισμός Κατανομής Απόσβεσης λόγω Βροχής**

Προτού συνεχισθεί η ανάλυση περαιτέρω κρίνεται σκόπιμο σε αυτό το σημείο να ξεκαθαρισθούν οι εναλλακτικοί δρόμοι που ανοίγονται για την εκτίμηση της κατανομής της απόσβεσης, ανάλογα με το πώς μοντελοποιείται η οριζόντια μεταβολή της δομής της βροχής. Ο χαρακτηρισμός της μεταβολής αυτής τυγχάνει διαφορετικής αντιμετώπισης από τις διάφορες μεθοδολογίες, με αποτέλεσμα τα μοντέλα να διαχωρίζονται σε εμπειρικά, στα οποία η απόσβεση εκτιμάται απευθείας από τοπικά πειραματικά δεδομένα, και σε αναλυτικά/φυσικά (όπως είναι το μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων της επόμενης παραγράφου) στα οποία ακολουθείται μία ευθεία στατιστική ανάλυση. Συνήθως, τα εμπειρικά μοντέλα προκύπτουν απευθείας από δεδομένα απόσβεσης που συλλέγονται στην υπόψη τοποθεσία. Στον απαραίτητο εξοπλισμό ώστε να μετρηθεί η απόσβεση λόγω βροχής συγκαταλέγονται μετεωρολογικά ραντάρ και ραδιόμετρα, χωρίς να είναι απαραίτητη πάντα κάποια πληροφορία για την ένταση βροχόπτωσης, αφού η πληροφορία για αυτήν πειλαμβάνεται στα δεδομένα της απόσβεσης. Πάντως, τα εμπειρικά μοντέλα μειονεκτούν στο ότι δεν έχουν ισχύ σε άλλες περιοχές πλην εκείνης για την οποία σχεδιάστηκαν.

### **I.4.1 Μοντέλο Συνεκτικών Βροχοπυρήνων**

Το μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων αφορά τη βροχή συνεκτικού τύπου και προβλέπει μέσω μίας συμπαγούς μαθηματικής ανάλυσης την κατανομή υπέρβασης της απόσβεσης σε παγκόσμια κλίμακα. Δεδομένα για την εφαρμογή του θεωρούνται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ζεύξης, οι στατιστικές παράμετροι της έντασης βροχόπτωσης στη συγκεκριμένη περιοχή και τα ραδιοηλεκτρικά χαρακτηριστικά (συχνότητα, πόλωση) του τηλεπικοινωνιακού συστήματος [Kanellopoulos 1999]. Η

ανομοιογένεια της βροχής συνεκτικού τύπου δεν επιτρέπει τη χρήση της σχέσης (I.7) και επομένως ο υπολογισμός της απόσβεσης  $A_D$  γίνεται με ολοκλήρωση της ειδικής απόσβεσης στο μήκος  $L_D$ .

$$A_D = \int_0^{L_D} A_o \, dl \quad (I.12)$$

Σημειώνεται ότι το μοντέλο αποσκοπεί στον υπολογισμό της κατανομής υπέρβασης  $P(A_S \geq x_S)$ , κατανομή που με δεδομένο ότι  $P(A_S \geq x_S) = P(A_D \geq x_D)$  υπολογίζεται άμεσα από την κατανομή υπέρβασης της απόσβεσης για την αντίστοιχη υποθετική επίγεια ζεύξη. Τα μεγέθη  $x_S$ ,  $x_D$  είναι οι στάθμες απόσβεσης σε dB τις οποίες υπερβαίνουν οι  $A_S$  και  $A_D$ , αντίστοιχα. Θέτοντας στη θέση του  $x_S$  το περιθώριο διαλείψεων της ζεύξης, τότε η πιθανότητα που υπολογίζεται αντιστοιχεί στην πιθανότητα διακοπής της λειτουργίας της ζεύξης.

Με βάση τη γενική μορφή του μοντέλου, αρχικά, προσδιορίζονται η μέση τιμή  $\mu_o$  και η τυπική απόκλιση  $\sigma_o$  της ειδικής απόσβεσης  $A_o$  ως προς τις στατιστικές παραμέτρους της έντασης βροχόπτωσης  $R$ , που θεωρούνται δεδομένες από αυτό.

$$\mu_o = E[A_o] = a \cdot E[R^b]$$

$$\mu_o = a \cdot m_b \quad (I.13.a)$$

$$\sigma_o^2 = E[A_o^2] - \mu_o^2 = a^2 E[R^{2b}] - a^2 m_b^2 \Rightarrow$$

$$\sigma_o^2 = a^2 \cdot (m_{2b} - m_b^2) \quad (I.13.b)$$

όπου με  $m_k$  συμβολίζεται η ροπή  $k$  τάξης της  $R$ .

Επόμενο βήμα αποτελεί ο προσδιορισμός της μέσης τιμής  $\mu_a$  και της τυπικής απόκλισης  $\sigma_a$  της απόσβεσης  $A_D$  κατά μήκος της προβολής  $L_D$ , συναρτήσει των  $\mu_o$ ,  $\sigma_o$  που εκφράστηκαν στις σχέσεις (I.13).

$$\mu_a = E\left[\int_0^{L_D} A_o \, dl\right] = \int_0^{L_D} E[A_o] \, dl \Rightarrow$$

$$\mu_a = \mu_o \cdot L_D \quad (I.14)$$

Απαραίτητη στον υπολογισμό της  $\sigma_a$  είναι η ροπή δεύτερης τάξης της απόσβεσης  $A_D$ , οπότε

$$A_D^2 = \left[\int_0^{L_D} A_o \, dl\right]^2 = \int_0^{L_D} \int_0^{L_D} A_o(l_1) \cdot A_o(l_1') \, dl_1 \, dl_1' \Rightarrow$$

$$E[A_D^2] = \int_0^{L_D} \int_0^{L_D} E[A_o(l_1) \cdot A_o(l_1')] \, dl_1 \, dl_1' \quad (I.15)$$

όπου  $A_o(l_1), A_o(l'_1)$  είναι οι τιμές της ειδικής απόσβεσης σε δύο σημεία της διαδρομής που απέχουν από την αρχή της υποθετικής επίγειας ζεύξης αποστάσεις  $l_1$  και  $l'_1$  αντίστοιχα.

Επίσης το μέγεθος  $E[A_o(l_1) \cdot A_o(l'_1)]$  αντιστοιχεί στην (χωρική) αυτοσυσχέτιση της ειδικής απόσβεσης στα δύο αυτά σημεία του βροχοπυρήνα. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου, η μεγάλη ανομοιογένεια εντός του βροχοπυρήνα δεν αναιρεί την ύπαρξη κάποιου βαθμού αυτοσυσχέτισης ως προς την ένταση βροχόπτωσης και την ειδική απόσβεση για σημεία στο εσωτερικό του σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Όταν τα δύο σημεία απέχουν αρκετά μεταξύ τους (κατά προσέγγιση όσο η διάσταση του βροχοπυρήνα), η αυτοσυσχέτιση παύει να είναι ισχυρή. Στατιστικά, ο βαθμός αυτοσυσχέτισης μίας τυχαίας μεταβλητής εκτιμάται μέσω του συντελεστή αυτοσυσχέτισης  $\rho_1$  ( $0 \leq \rho_1 \leq 1$ ) που για την περίπτωση της  $A_o$  ορίζεται ως εξής

$$\rho_1 = \frac{E[A_o(l_1) \cdot A_o(l'_1)] - \mu_o^2}{\sigma_o^2} \quad (I.16)$$

Στην προκειμένη περίπτωση, ο συντελεστής αυτός περιγράφει την οριζόντια μεταβολή της δομής της βροχής, αφού, όπως έχει επανηλειμμένως σημειωθεί, μόνο αυτού του είδους η μεταβολή ενδιαφέρει κατά την ανάλυση του μοντέλου των συνεκτικών βροχοπυρήνων. Ο συντελεστής  $\rho_1$  έχει παρατηρηθεί ότι δεν εξαρτάται από τις ακριβείς θέσεις των σημείων  $l_1$  και  $l'_1$ , αλλά μόνο από τη μεταξύ τους απόσταση  $d$ . Το τελευταίο, οδηγεί στον εκ νέου ορισμό του  $\rho_1$  μέσω της αλλαγής μεταβλητής  $d=l_1-l'_1$ .

$$\rho_1(l_1, l'_1) = \rho_1(|l_1 - l'_1|) = \rho_1(d) \quad (I.17)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (I.16), η (I.15) γίνεται

$$E[A_D^2] = \sigma_o^2 \cdot \int_0^{L_D} \int_0^{L_D} \rho_1(d) dl_1 dl'_1 + \mu_o^2 \cdot L_D^2 \Rightarrow$$

$$E[A_D^2] = \sigma_o^2 \cdot H_1 + \mu_o^2 \cdot L_D^2 \quad (I.18)$$

όπου με  $H_1$  έχει ορισθεί το διπλό ολοκλήρωμα

$$H_1 = \int_0^{L_D} \int_0^{L_D} \rho_1(d) dl_1 dl'_1 \quad (I.19)$$

Συνεπώς, με τη βοήθεια των (I.18), (I.14) η τυπική απόκλιση της  $A_D$  ισούται με

$$\sigma_a^2 = E[A_D^2] - \mu_a^2 = \sigma_o^2 \cdot H_1 \quad (I.20)$$

Από το σημείο αυτό και έπειτα, η εξέλιξη του μοντέλου εξαρτάται από τη μορφή της στατιστικής κατανομής που θα επιλεγεί όσον αφορά την ένταση βροχόπτωσης. Δύο από τις

περισσότερο διαδεδομένες κατανομές που τίθενται ευρέως σε εφαρμογή σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η λογαριθμοκανονική και η γάμμα κατανομή. Το λογαριθμοκανονικό μοντέλο (που βρίσκει εφαρμογή σε περιοχές της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής) ακολουθείται καθόλη την έκταση της Διατριβής και υιοθετείται στη συνέχεια.

#### **1.4.2 Προσέγγιση Μοντέλου Συνεκτικών Βροχοπυρήνων μέσω Λογαριθμοκανονικής Κατανομής**

Σύμφωνα με το μοντέλο, η στατιστική κατανομή των τυχαίων μεταβλητών της έντασης βροχόπτωσης και της απόσβεσης της επίγειας προβολής της ζεύξης ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή. Όσον αφορά την πρώτη, η μορφή της έχει ήδη δοθεί στη σχέση (I.2), ενώ όσον αφορά τη δεύτερη παρατίθεται η ανάλογη

$$P(A_D \geq x_D) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\ln x_D - \ln A_m}{\sqrt{2} \cdot S_a} \right) \quad (\text{I.21})$$

όπου  $A_m$ ,  $S_a$  η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της τυχαίας μεταβλητής  $\ln A_D$  αντίστοιχα. Το μοντέλο αποσκοπεί ακριβώς στον υπολογισμό των παραμέτρων  $A_m$ ,  $S_a$  προκειμένου η κατανομή υπέρβασης της απόσβεσης να είναι πλήρως καθορισμένη. Σχετικά με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, τα άγνωστα μεγέθη προς την κατεύθυνση αυτή είναι το ολοκλήρωμα  $H_1$  και οι ροπές  $m_b$ ,  $m_{2b}$  του ρυθμού  $R$ .

Για το πρώτο από τα άγνωστα μεγέθη (δηλαδή το  $H_1$ ) χρησιμοποιείται για το συντελεστή αυτοσυσχέτισης  $\rho_1$  μία ημιεμπειρική έκφραση προερχόμενη από την ερευνητική δραστηριότητα του Lin [Lin 1975].

$$\rho_1(d) = \begin{cases} \frac{G}{\sqrt{G^2 + d^2}}, & d \leq D_r \\ \frac{G}{\sqrt{G^2 + D_r^2}}, & d > D_r \end{cases} \quad (\text{I.22})$$

όπου η σταθερά  $G$  αντιπροσωπεύει την απόσταση σε km στην οποία ο συντελεστής  $\rho_1$  γίνεται ίσος με  $1/\sqrt{2}$  και  $D_r$  είναι η μέγιστη διάσταση του βροχοπυρήνα, επίσης σε km. Η παράμετρος  $G$ , ανάλογα με την εποχή του έτους μπορεί να πάρει τιμές στο διάστημα από 0.75 έως 3km. Το αντίστοιχο πεδίο τιμών για τη μέγιστη διάσταση του βροχοπυρήνα είναι 15 έως 30km. Σχετικά με τις τιμές των  $G$  και  $D_r$  έχει παρατηρηθεί ότι η τιμή τους πέφτει όσο περισσότερο επιβαρυνόμενο είναι το κλίμα της περιοχής. Το γεγονός αυτό ερμηνεύεται από τη σχέση αντίστροφης αναλογίας που υπάρχει ανάμεσα στο μέγεθος του βροχοπυρήνα και το ρυθμό βροχόπτωσης στο κέντρο του, που συνήθως αποτελεί το σημείο μέγιστης



έντασης βροχόπτωσης [Manning 1984]. Έτσι, στις κλιματικές ζώνες K, L, M το ζευγάρι G, D<sub>r</sub> λαμβάνει προσεγγιστικά τις τιμές 1.5km και 30km αντίστοιχα, ενώ στις N, P, Q, όπου η ένταση βροχόπτωσης είναι σαφώς υψηλότερη, λαμβάνει τιμές 1km και 20km περίπου.

Η αντικατάσταση της έκφρασης (I.22) στο ολοκλήρωμα της (I.19), όπως αποδεικνύεται αναλυτικά παρακάτω στην Ενότητα I.5, έχει ως επακόλουθο τη σχέση της επόμενης σελίδας.

$$H_1 = \begin{cases} 2L_D G \sinh^{-1}\left(\frac{L_D}{G}\right) + 2G^2 \left(1 - \sqrt{\left(\frac{L_D}{G}\right)^2 + 1}\right), & L_D \leq D_r \\ 2L_D G \sinh^{-1}\left(\frac{D_r}{G}\right) + 2G^2 \left(1 - \sqrt{\left(\frac{D_r}{G}\right)^2 + 1}\right) + \frac{G \cdot (L_D - D_r)^2}{\sqrt{G^2 + D_r^2}}, & L_D > D_r \end{cases} \quad (I.23)$$

Από την άλλη πλευρά, οι ροπές m<sub>k</sub> της R μετά την υιοθέτηση της λογαριθμοκανονικής κατανομής γίνονται

$$m_b = R_m^b \cdot \exp\left(\frac{b^2 S_r^2}{2}\right) \quad (I.24.a)$$

$$m_{2b} = R_m^{2b} \cdot \exp(2b^2 S_r^2) \quad (I.24.b)$$

ενώ οι στατιστικοί μέσοι όροι της A<sub>D</sub> συνδέονται με αυτούς της lnA<sub>D</sub> ως εξής

$$\mu_a = A_m \cdot \exp\left(\frac{S_a^2}{2}\right) \quad (I.25.a)$$

$$\sigma_a^2 = A_m^2 \cdot \exp(S_a^2) \cdot (\exp(S_a^2) - 1) \quad (I.25.b)$$

Περισσότερες λεπτομέρειες για το πώς προκύπτουν οι σχέσεις (I.24), (I.25) δίδονται στο Παράρτημα III.

Πλέον, βάσει των (I.24), (I.25), είναι δυνατό να τεθούν σε χρήση οι βασικές σχέσεις στις οποίες κατέληξε η γενική ανάλυση της Ενότητας I.4.1.

Από την (I.14) συνάγεται ότι

$$\mu_a = \mu_o \cdot L_D \Leftrightarrow A_m \cdot \exp\left(\frac{S_a^2}{2}\right) = a \cdot R_m^b \cdot \exp\left(\frac{b^2 S_r^2}{2}\right) \cdot L_D \quad (I.26)$$

Από την (I.20) συνάγεται ότι

$$\sigma_a^2 = \sigma_o^2 \cdot H_1 \Leftrightarrow A_m^2 \exp(S_a^2) \cdot [\exp(S_a^2) - 1] = a^2 \cdot R_m^{2b} \cdot H_1 \cdot \exp(b^2 S_r^2) \cdot [\exp(b^2 S_r^2) - 1] \quad (I.27)$$

Οι εξισώσεις (I.26), (I.27) αποτελούν ένα σύστημα ως προς τους αγνώστους  $A_m$ ,  $S_a$ . Το σύστημα δέχεται ως λύσεις τις εξής

$$S_a^2 = \ln \left[ 1 + \frac{H_1}{L_D^2} \cdot [\exp(b^2 S_r^2) - 1] \right] \quad (I.28)$$

$$A_m = a \cdot R_m^b \cdot L_D \cdot \exp \left( \frac{b^2 S_r^2 - S_a^2}{2} \right) \quad (I.29)$$

Μία περισσότερο συνεπτυγμένη έκφραση για την πιθανότητα/κατανομή υπέρβασης κάποιας στάθμης  $x_D$  σε dB προκύπτει εάν ορισθεί η ανηγμένη ως προς τις  $A_m$ ,  $S_a$  τυχαία μεταβλητή

$$U = \frac{\ln A_D - \ln A_m}{S_a} \quad (I.30)$$

η οποία ακολουθεί την κανονική κατανομή.

Τελικά, η επιθυμητή κατανομή υπέρβασης είναι

$$P(A_D \geq x_D) = P(U \geq u) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{u}{\sqrt{2}} \right) \quad (I.31)$$

$$\text{όπου } u = \frac{\ln x_D - \ln A_m}{S_a} \quad (I.32)$$

## **I.5. Υπολογισμός Παραμέτρων που Αφορούν τη Χωρική Δομή του Μέσου Βροχόπτωσης**

### **I.5.1. Υπολογισμός των $H_i$**

Στην παρούσα ενότητα υπολογίζονται αναλυτικά οι παράμετροι  $H_1$ ,  $H_2$  που εμφανίζονται τόσο στο μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων, όσο και στις επεκτάσεις του για τις τεχνικές διαφορισμού θέσης και δορυφόρου (τροχιάς) στις δορυφορικές επικοινωνίες άνω των 10GHz. Αντιστοιχούν στο διπλό ολοκλήρωμα του σημειακού συντελεστή αυτοσυσχέτισης  $\rho_1$  της ειδικής απόσβεσης  $A_0$  για σημεία κατά μήκος της υποθετικής επίγειας προβολής  $L_{Di}$  ( $i=1,2$ ) του ενεργού μήκους  $L_{Si}$  ( $i=1,2$ )

$$H_i = \int_0^{L_{Di}} \int_0^{L_{Di}} \rho_1(l_i, l_i') dl_i dl_i', \quad (i=1,2) \quad (I.33)$$

Εξάλλου, ο συντελεστής  $\rho_1$  έχει παρατηρηθεί ότι δεν εξαρτάται από τις ακριβείς θέσεις των σημείων  $l_i$  και  $l_i'$ , αλλά μόνο από τη μεταξύ τους απόσταση  $d$ . Το τελευταίο, οδηγεί στον ορισμό του  $\rho_1$  μέσω της αλλαγής μεταβλητής  $d=l_i - l_i'$ .

$$\rho_1(l_i, l'_i) = \rho_1(|l_i - l'_i|) = \rho_1(d), \quad (i = 1, 2) \quad (I.34)$$

Δοθείσας της επισήμανσης (I.34), η (I.33) γίνεται

$$H_i = 2 \cdot \int_0^{L_{Di}} \int_0^{L_{Di}} \rho_1(d) dl_i dl'_i \quad (I.35)$$

η οποία επεκτείνεται περαιτέρω με την αλλαγή μεταβλητών

$$x = l_i - l'_i \quad (I.36a)$$

$$y = l'_i \quad (I.36b)$$

και γίνεται

$$H_i = 2 \cdot \int_0^{L_{Di}} \int_0^{L_{Di}-x} \rho_1(x) dx dy \quad (I.37)$$

Το γεγονός αυτό δίδει τη δυνατότητα να μετατραπεί το διπλό ολοκλήρωμα στο απλό

$$H_i = 2 \cdot \int_0^{L_{Di}} \rho_1(x) \cdot (L_{Di} - x) dx \quad (I.38)$$

Από το σημείο αυτό και έπειτα, ο υπολογισμός του  $H_i$  προαπαιτεί την ύπαρξη μίας εμπειρικής ή ημιεμπειρικής έκφρασης για τον  $\rho_1$ . Για το σκοπό αυτό, στη Διατριβή έχει επιλεγεί το μοντέλο του Lin

$$\rho_1(x) = \begin{cases} \frac{G}{\sqrt{G^2 + x^2}}, & x \leq D_r \\ \frac{G}{\sqrt{G^2 + D_r^2}}, & x > D_r \end{cases} \quad (I.39)$$

Θυμίζεται ότι με  $D_r$  συμβολίζεται η μέγιστη διάσταση του βροχοπυρήνα σε km και ότι για τη σταθερά  $G$  ισχύει

$$\rho_1(G) = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (I.40)$$

Η έκφραση του  $\rho_1$  για  $x \leq D_r$  αντικαθίσταται στη συνέχεια στο ολοκλήρωμα (I.38)

$$H_i = 2 \cdot \int_0^{L_{Di}} \frac{G \cdot (L_{Di} - x)}{\sqrt{G^2 + x^2}} dx \Rightarrow$$

$$H_i = 2 \cdot L_{Di} \cdot G \cdot \int_0^{L_{Di}/G} \frac{dz}{\sqrt{1+z^2}} - 2 \cdot G \cdot \int_0^{L_{Di}/G} \frac{z dz}{\sqrt{1+z^2}} \quad (I.41)$$

Καθένα από τα ολοκληρώματα που εμφανίζονται στην ανωτέρω σχέση ισούται με

$$\int \frac{dz}{\sqrt{1+z^2}} = \sinh^{-1}(z) + c \quad (I.42)$$

$$\int \frac{z dz}{\sqrt{1+z^2}} = \sqrt{1+z^2} + c \quad (\text{I.43})$$

Η διαδικασία επίλυσης του απλού ολοκληρώματος (I.38) για  $x > D_r$  είναι ακόμα απλούστερη, οπότε ακολουθεί η τελική έκφραση για την παράμετρο  $H_i$  ( $i=1,2$ )

$$H_i = \begin{cases} 2 \cdot L_{Di} \cdot G \cdot \sinh^{-1}\left(\frac{L_{Di}}{G}\right) + 2 \cdot G^2 \cdot \left(1 - \sqrt{\left(\frac{L_{Di}}{G}\right)^2 + 1}\right), & L_{Di} \leq D_r \\ 2 \cdot L_{Di} \cdot G \cdot \sinh^{-1}\left(\frac{D_r}{G}\right) + 2 \cdot G^2 \cdot \left(1 - \sqrt{\left(\frac{D_r}{G}\right)^2 + 1}\right) + \frac{G \cdot (L_{Di} - D_r)^2}{\sqrt{G^2 + D_r^2}}, & L_{Di} > D_r \end{cases} \quad (\text{I.44})$$

### I.5.2 Υπολογισμός του $H_{2s}$

Κατά την ανάλυση της επέκτασης του μοντέλου συνεκτικών βροχοπυρήνων για την τεχνική διαφορισμού θέσης στις δορυφορικές επικοινωνίες άνω των 10GHz είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του  $H_{2s}$ . Ορίζεται από τη σχέση

$$H_{2s} = \int_0^{L_p} \int_0^{L_p} \rho_2(l_1, l_2) dl_1 dl_2 \quad (\text{I.45})$$

όπου  $\rho_2$  είναι χωρικός συντελεστής συσχέτισης σημείων στις δύο υποθετικές επίγειες προβολές των κεκλιμένων ραδιοδρόμων  $L_{S1}$ ,  $L_{S2}$ . Η έκφραση του  $L_{in}$  για το χωρικό συντελεστή συσχέτισης για περιοχές της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής υιοθετείται και στην προκειμένη περίπτωση

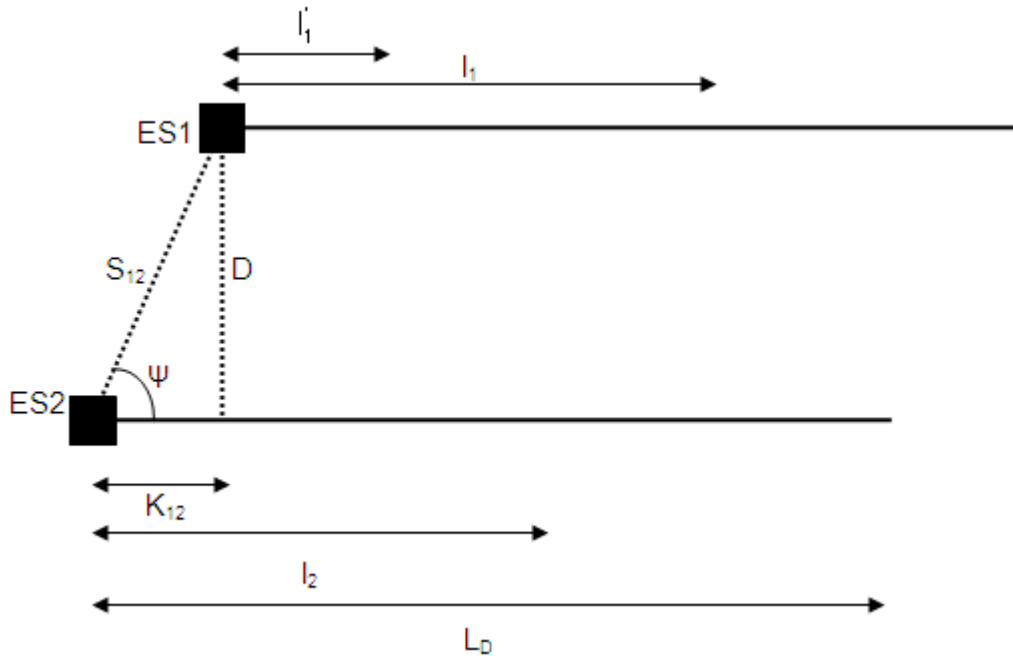
$$\rho_2(l_1, l_2) = \frac{G}{\sqrt{G_o^2 + (K_{12} + l_1 - l_2)^2}} \quad (\text{I.46})$$

όπου

$$G_o = \sqrt{G^2 + D^2} \quad (\text{I.47})$$

$$K_{12} = \sqrt{S_{12}^2 - D^2} \quad (\text{I.48})$$

Η σχηματική αναπαράσταση των μεγεθών αυτών γίνεται στο Σχήμα I.3.



Σχήμα Ι.3: Ορισμός μεγεθών  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $K_{12}$ ,  $\psi$

Ακολουθώντας παρόμοια μαθηματική ανάλυση με αυτήν της παραγράφου Ι.5.1 καταλήγει κανείς στην τελική έκφραση για τον  $H_{2s}$

$$H_{12} = G \cdot G_o \cdot (H_\alpha - H_\beta) \quad (I.49)$$

όπου

$$H_\alpha = \Phi_1 \left( \frac{K_{12} + L_D}{G_o} \right) + \Phi_1 \left( \frac{K_{12} - L_D}{G_o} \right) - 2 \cdot \Phi_1 \left( \frac{K_{12}}{G_o} \right) \quad (I.50a)$$

$$H_\beta = \Phi_2 \left( \frac{K_{12} + L_D}{G_o} \right) + \Phi_2 \left( \frac{K_{12} - L_D}{G_o} \right) - 2 \cdot \Phi_2 \left( \frac{K_{12}}{G_o} \right) \quad (I.50b)$$

και κατά αντιστοιχία των (I.42), (I.43) ισχύει

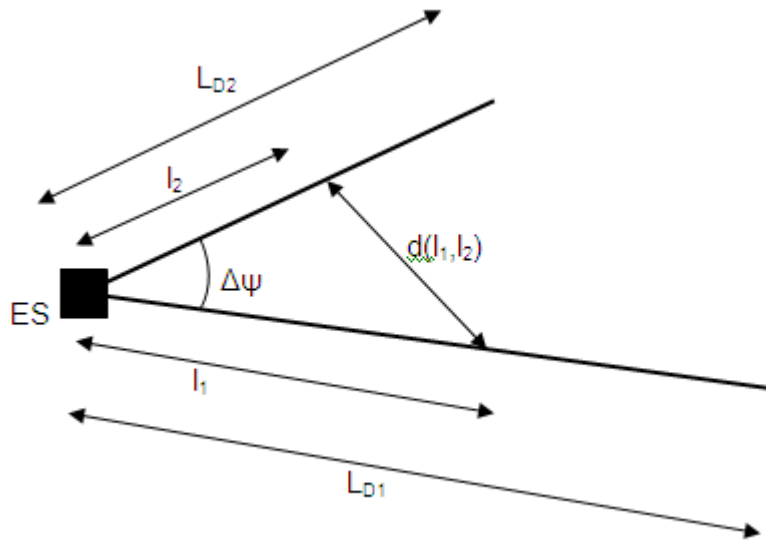
$$\Phi_1(z) = z \cdot \sinh^{-1}(z) \quad (I.51a)$$

$$\Phi_2(z) = \sqrt{z^2 + 1} \quad (I.51b)$$

### I.5.3 Υπολογισμός του $H_{2o}$

Κατά την ανάλυση της επέκτασης του μοντέλου συνεκτικών βροχοπυρήνων για την τεχνική διαφορισμού δορυφόρου (τροχιάς) στις δορυφορικές επικοινωνίες άνω των 10GHz είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της παραμέτρου  $H_{2o}$ . Ο ορισμός της παραμέτρου δίδεται από την επόμενη σχέση

$$H_{20} = \int_0^{L_{D1}} \int_0^{L_{D2}} \rho_2(l_1, l_2) dl_1 dl_2 \quad (I.52)$$



Σχήμα I.4: Ορισμός μεγεθών  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $d(l_1, l_2)$  και  $\Delta\psi$

Ο συντελεστής συσχέτισης  $\rho_2$  περιγράφει κατά αναλογία με την ανάλυση της προηγούμενης παραγράφου τη χωρική δομή της βροχής και, συγκεκριμένα, τη χωρική συσχέτιση της ειδικής απόσβεσης μεταξύ των σημείων που αντιστοιχούν στις αποστάσεις  $l_1$  και  $l_2$  από τον επίγειο σταθμό (βλ. Σχήμα I.4). Τα σημεία αυτά ανήκουν στις υποθετικές επίγειες προβολές των δύο κεκλιμένων ραδιοδρόμων του διαφορικού σχήματος και απέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με

$$d = d(l_1, l_2) = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos \Delta\psi} \quad (I.53)$$

ενώ η γωνία  $\Delta\psi$  αντιστοιχεί στη γωνία μεταξύ των προβολών των δύο κεκλιμένων ραδιοδρόμων πάνω στη γη και συνδέεται με τις γωνίες  $\theta$ ,  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  μέσω της κατωτέρω σχέσης

$$\cos \Delta\psi = \frac{\cos \theta - \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2}{\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2} \quad (I.54)$$

Ο αναλυτικός υπολογισμός της παραμέτρου  $H_{20}$  της (I.52) περιλαμβάνει διαδοχικούς μετασχηματισμούς μεταβλητών και πλήθος αλγεβρικών πράξεων που δεν ενδιαφέρουν στο παρόν. Αντίθετα, δίδεται απευθείας το μακροσκελές τελικό αποτέλεσμα του διπλού ολοκληρώματος, ώστε το μοντέλο να είναι δυνατό να εφαρμοσθεί στην πράξη. Το σύνολο των ενδιάμεσων σταδίων που οδηγούν στην τελική επίλυση της παραμέτρου  $H_{20}$  μπορεί να βρεθεί σε περισσότερο εξειδικευμένα συγγράμματα [Kanellopoulos 1993]. Στο πλαίσιο της τελικής έκφρασης για την εν λόγω παράμετρο ορίζεται και η ακόλουθη γωνία

$$\Theta_T = \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{1 + \cos \Delta\psi}{1 - \cos \Delta\psi}} \cdot \frac{L_{D2} - L_{D1}}{L_{D1} + L_{D2}} \right) \quad (I.54)$$

Η τελική έκφραση για το  $H_{20}$  έχει ως εξής

$$H_{20} = \frac{G}{\sin \Delta\psi} \cdot [M_1 + M_2 - G \cdot (\pi - \Delta\psi)] \quad (I.55)$$

όπου

$$M_1 = G \cdot \left[ \sin^{-1} \left( t_2 \sqrt{\frac{G^2}{G^2 + a_1}} \right) - \sin^{-1} \left( t_1 \sqrt{\frac{G^2}{G^2 + a_1}} \right) \right] + \frac{L_{D1} \cdot \sin \Delta\psi}{2} \left[ \ln \left( 2\sqrt{a_1(a_1 x_2^2 + \beta x_2 + c)} + 2a_1 x_2 + \beta \right) - \ln \left( 2\sqrt{a_1(a_1 x_1^2 + \beta x_1 + c)} + 2a_1 x_1 + \beta \right) \right] - \frac{L_{D1} \cdot \sin \Delta\psi}{2} \left[ \ln \left( 2\sqrt{a_1(a_1 x_2'^2 + \beta x_2' + c)} + 2a_1 x_2' + \beta \right) - \ln \left( 2\sqrt{a_1(a_1 x_1'^2 + \beta x_1' + c)} + 2a_1 x_1' + \beta \right) \right] \quad (I.56)$$

όπου

$$t_1 = -\cos \Delta\psi \quad , \quad t_2 = \sin \left( \Theta_T + \frac{\Delta\psi}{2} \right) \quad (I.57)$$

$$x_1 = \frac{1}{1 + \cos \Delta\psi} \quad , \quad x_2 = \frac{1}{1 - \sin \left( \Theta_T + \frac{\Delta\psi}{2} \right)} \quad (I.58)$$

$$x_1' = \frac{1}{1 - \cos \Delta\psi} \quad , \quad x_2' = \frac{1}{1 + \sin \left( \Theta_T + \frac{\Delta\psi}{2} \right)} \quad (I.59)$$

$$a_1 = L_{D1}^2 \cdot \sin^2 \Delta\psi, \quad \beta = 2 \cdot G^2, \quad c = -G^2 \quad (I.60)$$

και

$$M_2 = G \cdot \left[ \sin^{-1} \left( t_4 \sqrt{\frac{G^2}{G^2 + a_2}} \right) - \sin^{-1} \left( t_3 \sqrt{\frac{G^2}{G^2 + a_2}} \right) \right] + \frac{L_{D2} \cdot \sin \Delta\psi}{2} \left[ \ln \left( 2\sqrt{a_2(a_2 x_4^2 + \beta x_4 + c)} + 2a_2 x_4 + \beta \right) - \ln \left( 2\sqrt{a_2(a_2 x_3^2 + \beta x_3 + c)} + 2a_2 x_3 + \beta \right) \right] - \frac{L_{D2} \cdot \sin \Delta\psi}{2} \left[ \ln \left( 2\sqrt{a_2(a_2 x_4'^2 + \beta x_4' + c)} + 2a_2 x_4' + \beta \right) - \ln \left( 2\sqrt{a_2(a_2 x_3'^2 + \beta x_3' + c)} + 2a_2 x_3' + \beta \right) \right] \quad (I.61)$$

όπου

$$t_3 = \sin \left( \Theta_T - \frac{\Delta\psi}{2} \right) \quad , \quad t_4 = \cos \Delta\psi \quad (I.62)$$

$$x_3 = \frac{1}{1 - \sin \left( \Theta_T - \frac{\Delta\psi}{2} \right)} \quad , \quad x_4 = \frac{1}{1 - \cos \Delta\psi} \quad (I.63)$$

$$x_3' = \frac{1}{1 + \sin \left( \Theta_T - \frac{\Delta\psi}{2} \right)} \quad , \quad x_4' = \frac{1}{1 + \cos \Delta\psi} \quad (I.64)$$

$$a_2 = L_{D2}^2 \cdot \sin^2 \Delta\psi \quad (I.65)$$

Η πολυπλοκότητα των υπολογισμών που υπεισέρχονται στην τελική έκφραση (I.55) του  $H_{20}$  μπορεί να παρακαμφθεί κάνοντας χρήση αλγορίθμων αριθμητικής ολοκλήρωσης διπλών ολοκληρωμάτων.

## **I.6. Υπολογισμός Στατιστικών Μέσων Όρων του Ρυθμού Βροχόπτωσης**

### **I.6.1. Υπολογισμός Παραμέτρων Λογαριθμοκανονικής Κατανομής από Πειραματικά Δεδομένα**

Όπως προαναφέρθηκε, η καλύτερη δυνατή μέθοδος προς την κατεύθυνση προσδιορισμού της πιθανότητας, με την οποία η ένταση βροχόπτωσης  $R$  υπερβαίνει μία δεδομένη στάθμη, είναι η διεξαγωγή τοπικών μετρήσεων βροχόπτωσης. Σε τούτη την περίπτωση, είναι ορισμένες φορές επιθυμητός ο υπολογισμός της μέσης τιμής  $R_m$  και της τυπικής απόκλισης  $S_r$  της τυχαίας μεταβλητής  $\ln R$ , έτσι ώστε να είναι δυνατό να τεθεί σε εφαρμογή το λογαριθμοκανονικό μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων και, μέσω αυτού, να προσδιορισθεί η πιθανότητα υπέρβασης μίας στάθμης απόσβεσης.

Συνήθως, τα διαθέσιμα τοπικά πειραματικά δεδομένα βρίσκονται στη μορφή ζευγών ρυθμού βροχόπτωσης  $R_i$ -πιθανότητας υπέρβασης  $P_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ), όπου  $n$  το εύρος της τράπεζας δεδομένων. Για τον υπολογισμό, λοιπόν, των επιθυμητών στατιστικών μέσων, η χρήση της ανηγμένης κανονικής μεταβλητής  $U$  που ορίζεται από τη σχέση

$$U = \frac{\ln R - \ln R_m}{S_r} \quad (I.66)$$

και έχει τιμή

$$u_i = \frac{\ln R_i - \ln R_m}{S_r} \quad (I.67)$$

Επίσης, για την ίδια παράμετρο από το μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων ισχύει

$$u_i = \sqrt{2} \cdot \text{erfc}^{-1}(2 \cdot P_i) \quad (I.68)$$

Έτσι, αρχικά, για κάθε τιμή της πιθανότητας  $P_i$  υπολογίζεται από την (I.68) η αντίστοιχη τιμή της  $u_i$ , ώστε στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί η σχέση

$$u_i = A \cdot z_i + B \quad (I.69)$$

που προκύπτει από την (I.67)

όπου

$$z_i = \ln R_i \quad (I.70)$$



$$A = \frac{1}{S_r} \quad (I.71)$$

$$B = -\frac{\ln R_m}{S_r} \quad (I.72)$$

Η σχέση (I.69) είναι γραμμική ως προς τα  $u_i$ ,  $z_i$  ώστε με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων να προσδιορίζονται εύκολα οι συντελεστές  $A$ ,  $B$  και από αυτούς οι  $R_m$ ,  $S_r$ .

## I.6.2. Υπολογισμός του Ρυθμού Βροχόπτωσης μέσω των Χαρτών Βροχής

Στην παρούσα ενότητα δίδεται με συνοπτικό τρόπο η παράθεση των απαραίτητων βημάτων για την εύρεση της  $R_p$  με βάση τη χρήση χαρτών βροχής (rainmaps) που προτείνεται στη σύσταση ITU-R P.837-5 [ITU837]:

- Σε πρώτη φάση, ανασύρονται από τα αρχεία δεδομένων ESARAINPR6.TXT, ESARAIN\_MC.TXT και ESARAIN\_MS.TXT η πιθανότητα υπέρβασης εξάωρων βρόχινων περιόδων  $P_{r6}(\%)$ , το ετήσιο ποσό βροχόπτωσης τύπου συνεκτικών βροχοπυρήνων  $M_C(\text{mm})$  και το ετήσιο ποσό βροχόπτωσης στρωσιγενούς τύπου  $M_S(\text{mm})$  αντίστοιχα, για τα τέσσερα κοντινότερα σημεία της υπόψη τοποθεσίας για τα οποία υφίστανται δεδομένα. Τα προαναφερθέντα αρχεία διατίθενται από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA).
- Από τα τέσσερα αυτά σημεία, πραγματοποιώντας διγραμμική παρεμβολή, φθάνει κανείς στις ακριβείς τιμές των  $P_{r6}(\text{Lat}, \text{Lon})$ ,  $M_C(\text{Lat}, \text{Lon})$ ,  $M_S(\text{Lat}, \text{Lon})$  για τη συγκεκριμένη τοποθεσία.
- Στη συνέχεια εξαγάγεται η πιθανότητα βροχής από τη σχέση
$$P_o(\text{Lat}, \text{Lon}) = P_{r6}(\text{Lat}, \text{Lon}) \cdot [1 - \exp(-0.0117(M_S(\text{Lat}, \text{Lon})/P_{r6}(\text{Lat}, \text{Lon})))] \quad (I.73)$$
 Εφόσον το αποτέλεσμα της (I.73) δεν είναι προσδιορισμένο, η πιθανότητα  $P_o$  ισοδυναμεί με το μηδέν και η διαδικασία ολοκληρώνεται.
- Στο τελευταίο βήμα του αλγορίθμου υπολογίζεται ο ρυθμός βροχόπτωσης  $R_p$  που υπερβαίνεται για ποσοστό  $p\%$ , μέσω του επόμενου τύπου

$$R_p(\text{Lat}, \text{Lon}) = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (I.74)$$

όπου

$$A = a \cdot b \quad (I.75)$$

$$B = a + c \cdot \ln(p/P_o(\text{Lat}, \text{Lon})) \quad (I.76)$$

$$C = \ln(p/P_o(\text{Lat}, \text{Lon})) \quad (I.77)$$

και

$$a = 1.11 \quad (I.78)$$

$$b = \frac{(M_c(\text{Lat}, \text{Lon}) + M_s(\text{Lat}, \text{Lon}))}{22932 \cdot P_o} \quad (I.79)$$

$$c = 31.5 \cdot b \quad (I.80)$$

Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι γνωρίζοντας μόνο το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της τοποθεσίας μπορεί κανείς να υπολογίσει με απλό τρόπο το ρυθμό βροχόπτωσης  $R_p$  για οποιοδήποτε ποσοστό του χρόνου  $p$ .

# Παράρτημα II. Μοντέλα Διαύλων Rayleigh, Rice, Loo, Perez-Fontan *et al.* και Prieto-Cerdeira *et al.*

## II.1. Μοντέλο Διαύλου Rayleigh

Το μοντέλο Rayleigh χρησιμοποιείται για τη στατιστική περιγραφή του διαύλου διάδοσης όταν δεν υπάρχει κυρίαρχη συνιστώσα, δηλαδή όταν ο πομπός δεν έχει οπτική επαφή με το δέκτη (Non Line Of Sight, NLOS) και το περιβάλλον είναι πλούσιο σε σκεδαστές. Οπότε, ο τύπος διαύλων που ενδιαφέρει κυρίως είναι οι χρονικά μεταβαλλόμενοι με πολυδιαδρομική διάδοση.

Έκαστη των διαφορετικών διαδρομών που ακολουθεί το σήμα για να φθάσει στο δέκτη χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη χρονική καθυστέρηση,  $\tau_i$ . Οι συνθήκες που επικρατούν στο δίαυλο μεταβάλλονται με το χρόνο, οπότε και τα σήματα που μεταδίδονται μέσω αυτού επηρεάζονται διαρκώς κατά διαφορετικό τρόπο. Έστω ότι μεταδίδεται στενής ζώνης ζωνοπερατό σήμα  $x(t)$  περί τη συχνότητα  $f_c$  (narrowband assumption)

$$x(t) = A \cos(2\pi f_c t) \quad (\text{II.1})$$

Το σήμα λήψης εκφράζεται ως υπέρθεση  $N$  διαφορετικών σημάτων που φθάνουν στο δέκτη ακολουθώντας  $N$  διαφορετικές διαδρομές

$$y(t) = A \sum_{i=1}^N a_i(t) \cos 2\pi f_c (t - \tau_i(t)) + w(t) \quad (\text{II.2})$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^N a_i(t) x(t - \tau_i(t)) + w(t) \quad (\text{II.3})$$

όπου  $a_i(t)$  είναι η χρονικά μεταβαλλόμενη εξασθένηση του σήματος για την  $i$ -οστή διαδρομή,  $\tau_i(t)$  είναι η αντίστοιχη χρονική καθυστέρηση διάδοσης και  $w(t)$  ο θόρυβος που εισάγεται από το δίαυλο.

Το σήμα  $y(t)$  εκφράζεται σε μιγαδική μορφή ως εξής

$$y(t) = \sum_{i=1}^N a_i(t) \exp[-j2\pi f_c \tau_i(t)] + w(t) \Rightarrow$$
$$y(t) = \sum_{i=1}^N a_i(t) \exp[-j\phi_i(t)] + w(t) \quad (\text{II.4})$$

που αποτελεί την απόκριση του διαύλου στην εκθετική διέγερση  $\exp(j2\pi f_c t)$ . Τόσο το πλάτος  $a_i(t)$  όσο και η χρονική καθυστέρηση  $\tau_i(t)$  μεταβάλλονται κατά τυχαίο τρόπο στις διάφορες διαδρομές. Έτσι, το μιγαδικό σήμα  $y(t)$  μπορεί να περιγραφεί ως τυχαία (στοχαστική) διαδικασία. Η ύπαρξη πολλών διαδρομών (δηλαδή μεγάλο πλήθος  $N$ ) επιτρέπει την εφαρμογή του κεντρικού οριακού θεωρήματος (Central Limit Theorem)<sup>4</sup>. Κατά συνέπεια, η  $y(t)$  μπορεί να θεωρηθεί ως τυχαία κανονική (Gaussian) διαδικασία.

Οι συντελεστές  $c_i(t)$

$$c_i(t) = a_i(t)e^{-j\varphi_i(t)} \quad (\text{II.5})$$

περιγράφονται ως μιγαδικές τυχαίες κανονικές διαδικασίες που είναι μεταξύ τους ασυσχέτιστες.

Οι συντελεστές αυτοί μπορούν να παρασταθούν με βάση τη συμφασική (in-phase) και την ορθογωνική τους (quadrature) συνιστώσα, δηλαδή

$$c_i(t) = c_I(t) + jc_Q(t) \quad (\text{II.6})$$

όπου  $c_I(t)$  και  $c_Q(t)$  είναι πραγματικές κανονικές τυχαίες διαδικασίες στατικές και στατιστικά ανεξάρτητες iid με μηδενική μέση τιμή. Έτσι, το πλάτος και η φάση των συνιστωσών γράφονται

$$a_i(t) = \sqrt{c_I(t)^2 + c_Q(t)^2} \quad (\text{II.7})$$

$$\varphi_i(t) = \tan^{-1} \frac{c_Q(t)}{c_I(t)} \quad (\text{II.8})$$

Η φάση  $\phi(t)$  είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα  $[0, 2\pi)$  ενώ το πλάτος  $a(t)$  ακολουθεί στατιστικά τη σ.π.π. Rayleigh [Papoulis]

$$f_A(a) = \frac{a}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{a^2}{2\sigma^2}\right] \quad (\text{II.9})$$

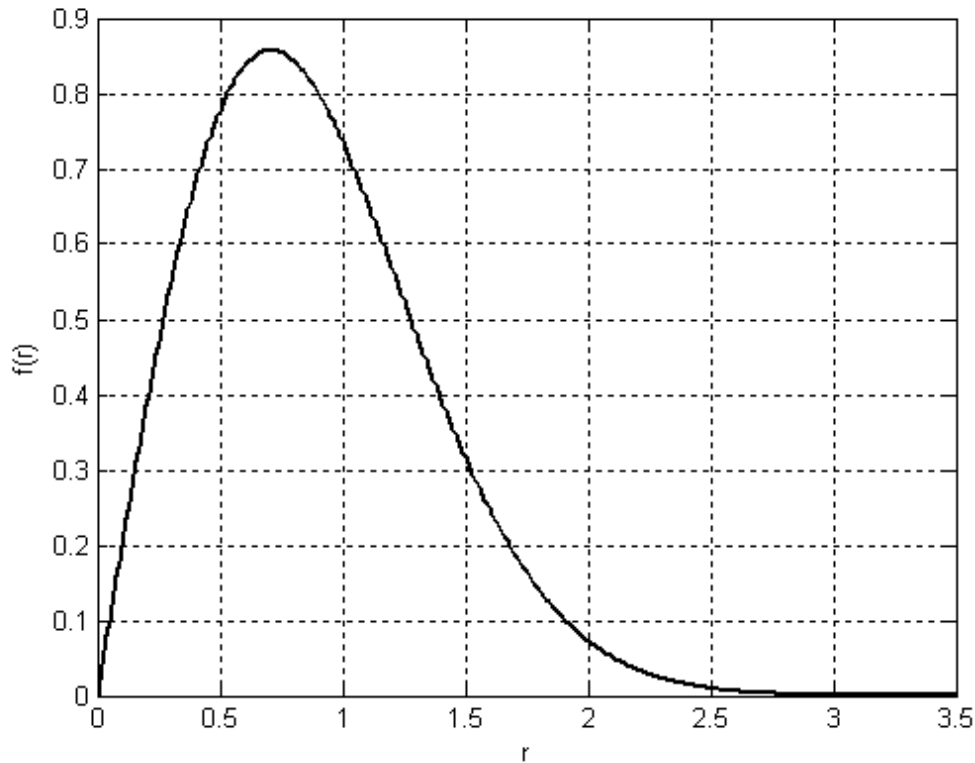
---

<sup>4</sup> Κεντρικό Οριακό Θεώρημα [Papoulis 2002]: Έστω  $\{X_n, n=1,2,\dots\}$  ακολουθία τυχαίων μεταβλητών ισόνομων και ανεξάρτητων με πεπερασμένη μέση τιμή  $\mu = E(X_n)$  και διασπορά  $\sigma^2 = V(X_n)$ . Αν  $S_n = \sum_1^n X_k$  τότε, καθώς το  $n$  τείνει στο  $\infty$ , η συνάρτηση  $Z_n = \frac{S_n - n\mu}{\sigma\sqrt{n}}$  συγκλίνει στην κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και διασπορά 1, δηλαδή,  $Z_n \sim N(0,1)$ .

όπου  $\sigma^2 = E[c_I^2] = E[c_Q^2]$ . Η σ.π.π. Rayleigh για  $\sigma^2 = 0.5$  απεικονίζεται στο Σχήμα II.1.

Η μέση ισχύς ενός σήματος το πλάτος του οποίου ακολουθεί την κατανομή Rayleigh είναι

$$P = E[a(t)^2] = E[c_I^2(t) + c_Q^2(t)] = 2\sigma^2 \quad (\text{II.10})$$



Σχήμα II.1: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Rayleigh για  $\sigma^2=0.5$

Όταν στο σήμα λήψης υπάρχει ισχυρή σταθερή συνιστώσα LOS, χρησιμοποιείται το μοντέλο Rice.

## II.2. Μοντέλο Διαύλου Rice

Σε συνέχεια της προηγούμενης ενότητας, στην περίπτωση του διαύλου που περιγράφεται με την υπόθεση κατανομής Rice, το πλάτος του σήματος λήψης κατά την  $i$ -οστή χρονική στιγμή είναι

$$a_i = \sqrt{(x_i + \beta)^2 + y_i^2} \quad (\text{II.11})$$

όπου  $\beta$  το πλάτος της LOS συνιστώσας και τα  $x_i, y_i$  ακολουθούν κανονική (Gaussian) κατανομή μηδενικής μέσης τιμής και διασποράς  $\sigma^2$ .

Ο λόγος της ισχύος της απευθείας συνιστώσας προς τη συνολική ισχύ των πολυδιαδρομικών συνιστωσών ονομάζεται παράγοντας Rice  $K$  (Ricean  $K$ -factor) και δίδεται από τη σχέση

$$K = \frac{\beta^2}{2\sigma^2} \quad (\text{II.12})$$

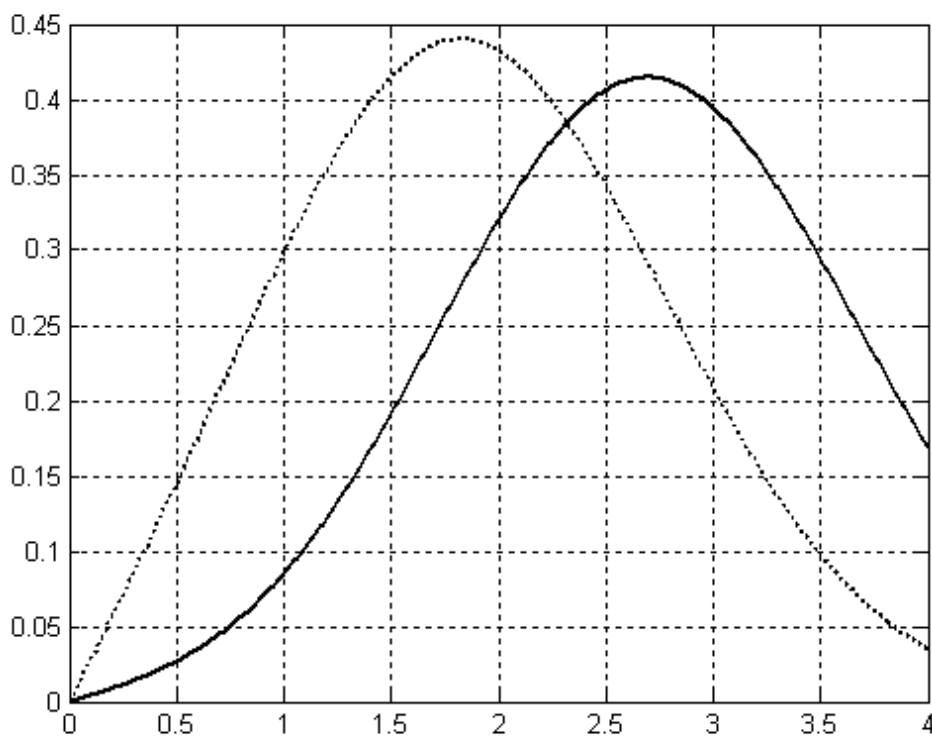
όπου  $2\sigma^2$  είναι η συνολική ισχύς των πολυδιαδρομικών συνιστωσών.

Στην περίπτωση του διαύλου που περιγράφεται με την υπόθεση κατανομής Rice, η σ.π.π. της περιβάλλουσας  $a(t)$  του διαύλου διαλείψεων δίδεται από τη σχέση [Papoulis]

$$f_A(a) = \frac{a}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{(a^2 + \beta^2)}{2\sigma^2}\right] I_0\left[\frac{a\beta}{\sigma^2}\right] \quad (\text{II.13})$$

όπου  $I_0(\cdot)$  είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου είδους μηδενικής τάξης.

Στο Σχήμα II.2 δίδεται η γραφική παράσταση της σ.π.π. της κατανομής Rice για διάφορες τιμές του παράγοντα  $K$ .



**Σχήμα II.2:** Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Rice για  $\sigma^2 = 1$  και για  $K=1$  dB (διακεκομμένη γραμμή) και  $K=5$  dB (συνεχής γραμμή)

### II.3. Μοντέλο Διαύλου Loo

Θεωρείται το άθροισμα δύο τυχαίων μεταβλητών (φασιθετών), των οποίων τα πλάτη ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή και την κατανομή Rayleigh [Bec67], αντίστοιχα, δηλαδή

$$r \exp(j\vartheta) = \beta \exp(j\varphi_0) + \gamma \exp(j\varphi) \quad (\text{II.14})$$

Στη (II.14), οι φάσεις (τυχαίες μεταβλητές)  $\phi_0$  και  $\phi$  ακολουθούν την ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα  $[0, 2\pi)$ , το πλάτος  $\beta$  τη λογαριθμοκανονική και το πλάτος  $\gamma$  τη Rayleigh κατανομή.

Αν το  $\beta$  υποτεθεί σταθερό, η δεσμευμένη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του  $a$  ακολουθεί την κατανομή Rice και δίδεται από τη (II.13). Εφαρμόζοντας το Θεώρημα Ολικής Πιθανότητας<sup>5</sup> η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του πλάτους  $r$  γίνεται

$$p(r) = \int_0^{\infty} p(r|\beta) p(\beta) d\beta \quad (\text{II.15})$$

Από τη (II.15), με αντικατάσταση της (II.13), προκύπτει

$$p(r) = r / \sigma^2 \int_0^{\infty} \exp[-(r^2 + \beta^2) / 2\sigma^2] I_0(r\beta / \sigma^2) p(\beta) d\beta \quad (\text{II.16})$$

Επειδή το πλάτος  $\beta$  ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας  $p(\beta)$  δίδεται από τη σχέση

$$p(\beta) = 1 / (\sqrt{2\pi d_0} \beta) \exp[-(\ln \beta - \mu)^2 / 2d_0] \quad (\text{II.17})$$

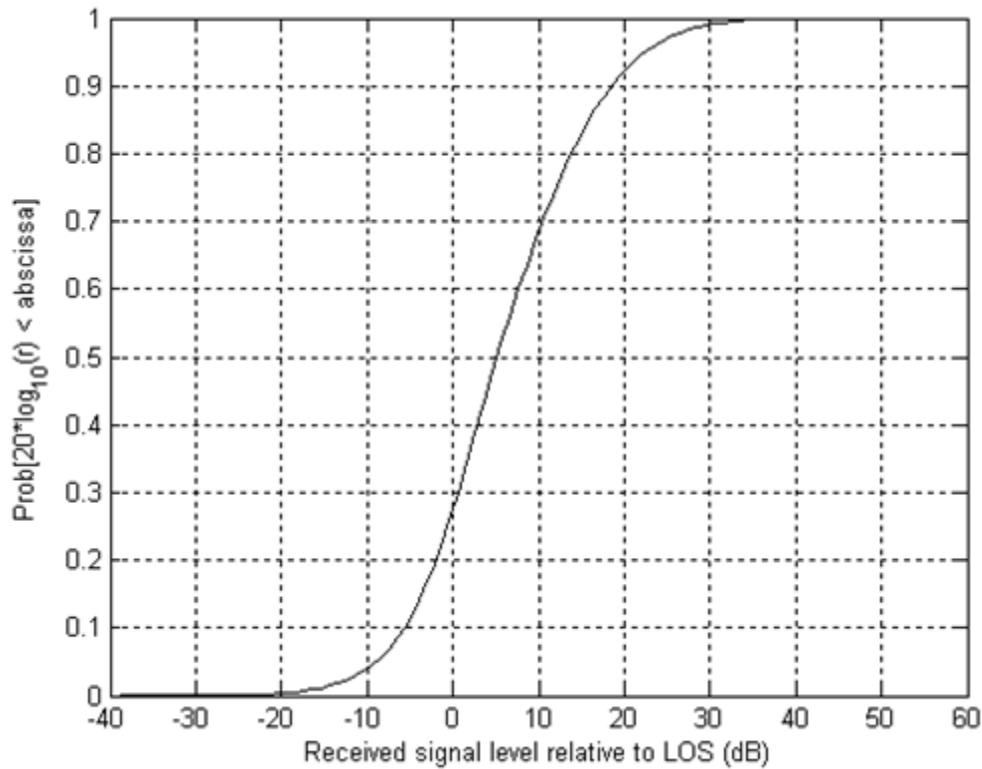
όπου  $\sqrt{d_0}$  και  $\mu$  είναι η τυπική απόκλιση και η μέση τιμή της λογαριθμοκανονικής κατανομής, αντίστοιχα.

Αντικαθιστώντας τη (II.17) στη (II.16) εξάγεται η σ.π.π. της κατανομής Loo

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2 \sqrt{2\pi d_0}} \int_0^{\infty} \frac{1}{\beta} \exp\left[-\frac{(\ln \beta - \mu)^2}{2d_0} - \frac{(r^2 + \beta^2)}{2\sigma^2}\right] I_0\left(\frac{r\beta}{\sigma^2}\right) d\beta \quad (\text{II.18})$$

<sup>5</sup> Θεώρημα Ολικής Πιθανότητας [Paroulis 2002]: Αν  $B_1, B_2, \dots$  είναι μια (πεπερασμένη ή άπειρη) ακολουθία ξένων ενδεχομένων με  $\cup B_i = \Omega$  και  $P(B_i) > 0$  ( $i=1, 2, \dots$ ), τότε για κάθε ενδεχόμενο  $A$  ισχύει  $P(A) = \sum_i P(A|B_i)P(B_i)$

Στο Σχήμα Π.3 απεικονίζεται η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής Loo για μια δεδομένη τριάδα τιμών παραμέτρων της κατανομής ( $\mu, d_0, \sigma^2$ ).



**Σχήμα Π.3:** Συνάρτηση Αθροιστικής Κατανομής Loo για τιμές παραμέτρων:  $\mu=-3\text{dB}$ ,  $d_0=1\text{dB}$  και  $\sigma^2=-6\text{dB}$

Έχει αποδειχθεί [Bec67] ότι η σ.π.π. της κατανομής Loo ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή για μεγάλες τιμές του πλάτους  $r$ , ενώ για μικρές τιμές του  $r$  ακολουθεί την κατανομή Rayleigh, δηλαδή:

$$p(r) = \begin{cases} \frac{1}{r\sqrt{2\pi s}} \exp\left[-(\ln r - \mu)^2 / 2s^2\right] & , \quad r \gg \sigma \\ \frac{r}{\sigma^2} \exp\left[-r^2 / 2\sigma^2\right] & , \quad r \ll \sigma \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Για ενδιαμέσες τιμές του  $r$ , το ολοκλήρωμα της σχέσης (II.18) υπολογίζεται με αριθμητικές μεθόδους.

## Π.4. Πίνακες Τιμών Παραμέτρων για Μοντέλο Διαύλου Perez-Fontan *et al.*

Οι πίνακες τιμών που δίδονται στη συνέχεια αφορούν τιμές παραμέτρων του μοντέλου διαύλου Perez-Fontan *et al.* [Perez-Fontan 2001]. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε με



επεξεργασία των διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για λογαριασμό του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA) από το Πανεπιστήμιο του Bradford [Smith 1992] (Πίνακες II.1- II.6) και το Γερμανικό Κέντρο Αεροδιαστημικής (DLR) [Jahn 1995] (Πίνακες II.7- II.14). Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, το μοντέλο αυτό θεωρεί 1<sup>ης</sup> τάξης αλυσίδα Markov με 3 καταστάσεις διαύλου.

**Πίνακας II.1:** Πίνακες πιθανοτήτων κατάστασης W και μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων P για 1<sup>ης</sup> τάξης μοντέλο αλυσίδας Markov με 3 καταστάσεις διαύλου, για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης, S ζώνη συχνοτήτων, UT συσκευή οροφής αυτοκινήτου και αστικό περιβάλλον διάδοσης.

[P] elevation 40°	0.8628	0.0737	0.0635	[W] elevation 40°	0.4
	0.1247	0.8214	0.0539		0.2667
	0.0648	0.0546	0.8806		0.3333
[P] elevation 60°	0.8681	0.0952	0.0367	[W] elevation 60°	0.4546
	0.1300	0.8429	0.0271		0.3636
	0.0701	0.0761	0.8538		0.1818
[P] elevation 70°	0.8763	0.0724	0.0513	[W] elevation 70°	0.4666
	0.1382	0.8201	0.0417		0.2667
	0.0783	0.0533	0.8684		0.2667
[P] elevation 80°	0.8870	0.0562	0.0568	[W] elevation 80°	0.5
	0.1489	0.8039	0.0472		0.2
	0.0890	0.0371	0.8739		0.3

**Πίνακας II.2:** Πίνακες πιθανοτήτων κατάστασης W και μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων P για 1<sup>ης</sup> τάξης μοντέλο αλυσίδας Markov με 3 καταστάσεις διαύλου, για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης, S ζώνη συχνοτήτων, UT συσκευή οροφής αυτοκινήτου και προαστιακό περιβάλλον διάδοσης.

[P] elevation 40°	0.8177	0.1715	0.0108	[W] elevation 40°	0.4545
	0.1544	0.7997	0.0459		0.4545
	0.1400	0.1433	0.7167		0.091
[P] elevation 60°	0.8019	0.1314	0.0667	[W] elevation 60°	0.4
	0.1386	0.7596	0.1018		0.3333
	0.1242	0.1032	0.7726		0.2667
[P] elevation 70°	0.8019	0.1314	0.0667	[W] elevation 70°	0.4
	0.1386	0.7596	0.1018		0.3333
	0.1242	0.1032	0.7726		0.2667
[P] elevation 80°	0.7168	0.1719	0.1113	[W] elevation 80°	0.1428
	0.0535	0.8001	0.1464		0.4286
	0.0391	0.1437	0.8172		0.4286

**Πίνακας Π.3:** Πίνακες πιθανοτήτων κατάστασης W και μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων P για 1<sup>ης</sup> τάξης μοντέλο αλυσίδας Markov με 3 καταστάσεις διαύλου, για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης, S ζώνη συχνοτήτων, UT συσκευή οροφής αυτοκινήτου και περιβάλλον διάδοσης ανοιχτής περιοχής.

[P] elevation 40°	0.9530	0.0431	0.0039	[W] elevation 40°	0.5
	0.0515	0.9347	0.0138		0.375
	0.0334	0.0238	0.9428		0.125
[P] elevation 60°	0.9643	0.0255	0.0102	[W] elevation 60°	0.6
	0.0628	0.9171	0.0201		0.2
	0.0447	0.0062	0.9491		0.2
[P] elevation 70°	0.9538	0.0393	0.0069	[W] elevation 70°	0.5
	0.0523	0.9309	0.0168		0.3333
	0.0342	0.0200	0.9458		0.1667
[P] elevation 80°	0.9307	0.0590	0.0103	[W] elevation 80°	0.25
	0.0292	0.9506	0.0202		0.50
	0.0111	0.0397	0.9492		0.25

**Πίνακας Π.4:** Πίνακες πιθανοτήτων κατάστασης W και μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων P για 1<sup>ης</sup> τάξης μοντέλο αλυσίδας Markov με 3 καταστάσεις διαύλου, για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης, S ζώνη συχνοτήτων, UT συσκευή οροφής αυτοκινήτου και περιβάλλον διάδοσης ελαφράς σκίασης από δέντρα.

[P] elevation 40°	0.7193	0.1865	0.0942	[W] elevation 40°	0.3929
	0.1848	0.7269	0.0883		0.3571
	0.1771	0.0971	0.7258		0.25
[P] elevation 60°	0.7675	0.2325	0.0000	[W] elevation 60°	0.5
	0.2325	0.7675	0.0000		0.5
	0.2249	0.1381	0.6370		0.0
[P] elevation 70°	0.7369	0.1216	0.1415	[W] elevation 70°	0.4285
	0.2024	0.6620	0.1356		0.1905
	0.1947	0.0322	0.7731		0.381
[P] elevation 80°	0.7351	0.2097	0.0552	[W] elevation 80°	0.4285
	0.2006	0.7501	0.0493		0.4285
	0.1929	0.1203	0.6868		0.143

**Πίνακας Π.5:** Πίνακες πιθανοτήτων κατάστασης W και μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων P για 1<sup>ης</sup> τάξης μοντέλο αλυσίδας Markov με 3 καταστάσεις διαύλου, για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης, S ζώνη συχνοτήτων, UT συσκευή οροφής αυτοκινήτου και περιβάλλον διάδοσης ισχυρής σκίασης από δέντρα.

[P] elevation 40°	0.7792	0.0452	0.1756	[W] elevation 40°	0.0
	0.0000	0.9259	0.0741		0.5
	0.0000	0.0741	0.9259		0.5
[P] elevation 60°	0.7792	0.0452	0.1756	[W] elevation 60°	0.0
	0.0000	0.9259	0.0741		0.5
	0.0000	0.0741	0.9259		0.5
[P] elevation 70°	0.7792	0.0699	0.1509	[W] elevation 70°	0.0
	0.0000	0.9506	0.0494		0.6667
	0.0000	0.0988	0.9012		0.3333
[P] elevation 80°	0.8175	0.0730	0.1095	[W] elevation 80°	0.4167
	0.0201	0.9465	0.0334		0.25
	0.0332	0.0998	0.8670		0.3333

Πίνακας Π.6: Τριάδα στατιστικών παραμέτρων Loo ( $\alpha, \psi, MP$ ) ανά κατάσταση διαύλου για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης, διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης, UT συσκευή οροφής αυτοκινήτου και S ζώνη συχνοτήτων.

Environment	Elev.	State 1: Line-of-sight			State 2: Intermediate shadow			State 3: Deep shadow		
		$\alpha$ (dB)	$\psi$ (dB)	MP (dB)	$\alpha$ (dB)	$\psi$ (dB)	MP (dB)	$\alpha$ (dB)	$\psi$ (dB)	MP (dB)
Open	40°	0.1	0.37	-22.0	-1.0	0.5	-22.0	-2.25	0.13	-21.2
	60°	0.0	0.12	-24.9	-0.7	0.12	-26.1	-1.4	0.25	-23.1
	70°	-0.1	0.25	-22.5	-0.5	0.28	-24.5	-0.75	0.37	-23.24
	80°	0.1	0.16	-22.4	-0.4	0.15	-23.5	-0.72	0.27	-22.0
Suburban	40°	-1.0	0.5	-13.0	-3.7	0.98	-12.2	-15.0	5.9	-13.0
	60°	-0.3	0.91	-15.7	-2.0	0.5	-13.0	-3.8	0.34	-13.2
	70°	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	80°	-0.4	0.58	-13.7	-2.5	0.2	-16.0	-4.25	3.0	-25.0
Intermediate tree-shadow	40°	-0.4	1.5	-13.2	-8.2	3.9	-12.7	-17.0	3.14	-10.0
	60°	-0.2	0.75	-14.0	-3.1	1.9	-15.5	-	-	-
	70°	-0.8	0.75	-10.0	-3.3	1.1	-10.75	-7.7	2.9	-10.2
	80°	-0.6	1.87	-9.25	-2.5	1.55	-10.0	-4.6	2.0	-13.4
Heavy tree-shadow	40°	-	-	-	-10.1	2.25	-10.0	-19.0	4.0	-10.0
	60°	-	-	-	-7.7	4.0	-10.1	-10.8	2.7	-10.0
	70°	-	-	-	-4.5	4.6	-12.1	-7.5	2.0	-7.0
	80°	-0.9	3.0	-9.1	-3.1	3.4	-9.0	-8.0	5.0	-7.0
Urban	40°	-0.3	0.73	-15.9	-8.0	4.5	-19.2	-24.4	4.5	-19.0
	60°	-0.35	0.26	-16.0	-6.3	1.4	-13.0	-15.2	5.0	-24.8
	70°	-0.5	1.0	-19.0	-5.6	1.2	-10.0	-12.3	4.1	-16.0
	80°	-0.25	0.87	-21.7	-6.6	2.3	-13.0	-11.0	8.75	-24.2

Πίνακας Π.7: Πίνακες πιθανοτήτων κατάστασης W και μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων P για 1<sup>η</sup>ς τάξης μοντέλο αλυσίδας Markov με 3 καταστάσεις διαύλου, για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης, L ζώνη συχνοτήτων, UT συσκευή οροφής αυτοκινήτου και αστικό περιβάλλον διάδοσης.

[P] elevation 10°	0.9427	0.0538	0.0035	[W] elevation 10°	0.3529
	0.1364	0.6230	0.2406		0.1213
	0.0070	0.0509	0.9421		0.5258
[P] elevation 20°	0.9254	0.0694	0.0052	[W] elevation 20°	0.2628
	0.0959	0.7764	0.1277		0.1551
	0.0081	0.0282	0.9637		0.5821
[P] elevation 30°	0.8199	0.1273	0.0528	[W] elevation 30°	0.5051
	0.2551	0.4280	0.3169		0.1126
	0.1629	0.0003	0.8368		0.3823
[P] elevation 40°	0.9414	0.0567	0.0019	[W] elevation 40°	0.6821
	0.3421	0.5000	0.1579		0.0978
	0.0292	0.0468	0.9240		0.2201
[P] elevation 50°	0.9348	0.0627	0.0025	[W] elevation 50°	0.8842
	0.5313	0.4465	0.0222		0.1002
	0.2836	0.0021	0.7143		0.0156
[P] elevation 60°	0.9265	0.0704	0.0031	[W] elevation 60°	0.5688
	0.1085	0.8383	0.0532		0.3848
	0.0017	0.4785	0.5198		0.0464
[P] elevation 70°	0.8437	0.1550	0.0013	[W] elevation 70°	0.2960
	0.0781	0.8816	0.0403		0.5920
	0.0001	0.2162	0.7837		0.1120
[P] elevation 80°	0.9387	0.0613	0.0000	[W] elevation 80°	0.8125
	0.2656	0.7344	0.0000		0.1875
	0.0156	0.4844	0.5000		0.0000

**Πίνακας Π.8:** Τριάδα στατιστικών παραμέτρων Loo ( $\alpha, \psi, MP$ ) ανά κατάσταση διαύλου για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης, αστικό περιβάλλον διάδοσης, UT συσκευή οροφής αυτοκινήτου και L ζώνη συχνοτήτων.

Elevation	State 1: Line-of-sight			State 2: Intermediate sh.			State 3: Deep shadow		
	$\alpha$ (dB)	$\psi$ (dB)	MP (dB)	$\alpha$ (dB)	$\psi$ (dB)	MP (dB)	$\alpha$ (dB)	$\psi$ (dB)	MP (dB)
10°	-0.4	1.76	-13.47	-10.9	3.78	-13.0	-21.04	6.56	-25.0
20°	0.6	1.5	-11.2	-15.3	7.0	-19.9	-29.9	8.7	-24.7
30°	0.45	1.9	-16.9	-11.7	4.8	-21.3	-23.8	9.9	-22.5
40°	-0.1	1.7	-24.2	-	-	-	-	-	-
50°	0.2	2.1	-35.4	-4.2	1.95	-25.4	-6.5	1.87	-26.2
60°	-0.2	1.8	-35.4	-3.9	1.9	-31.5	-6.6	1.0	-21.0
70°	-0.5	1.8	-37.2	-4.24	1.8	-31.2	-	-	-

**Πίνακας Π.9:** Πίνακες πιθανοτήτων κατάστασης W και μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων P για 1<sup>ης</sup> τάξης μοντέλο αλυσίδας Markov με 3 καταστάσεις διαύλου, για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης, L ζώνη συχνοτήτων, UT συσκευή οροφής αυτοκινήτου και προαστιακό περιβάλλον διάδοσης.

[P] elevation 10°	0.9174	0.0512	0.0314	[W] elevation 10°	0.4389
	0.1064	0.7802	0.1134		0.2599
	0.0285	0.1151	0.8564		0.3012
[P] elevation 20°	0.9382	0.0575	0.0043	[W] elevation 20°	0.6666
	0.2040	0.5817	0.2143		0.1609
	0.0486	0.1680	0.7834		0.1725
[P] elevation 30°	0.9531	0.0350	0.0119	[W] elevation 30°	0.7467
	0.1891	0.6198	0.1911		0.1511
	0.0631	0.3065	0.6304		0.1022
[P] elevation 50°	0.7498	0.2462	0.0040	[W] elevation 50°	0.1626
	0.0479	0.9160	0.0361		0.7642
	0.0554	0.3296	0.6150		0.0732
[P] elevation 60°	0.8462	0.1538	0.0000	[W] elevation 60°	0.0275
	0.0056	0.9415	0.0529		0.7611
	0.0000	0.1900	0.8100		0.2114
[P] elevation 70°	0.8696	0.0898	0.0406	[W] elevation 70°	0.0634
	0.0106	0.9336	0.0558		0.5337
	0.0064	0.0738	0.9198		0.4029
[P] elevation 80°	1.0000	0.0000	0.0000	[W] elevation 80°	0.0000
	0.0000	0.9691	0.0309		0.8956
	0.0000	0.2632	0.7368		0.1044

**Πίνακας Π.10:** Τριάδα στατιστικών παραμέτρων Loo ( $\alpha, \psi, MP$ ) ανά κατάσταση διαύλου για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης, προαστιακό περιβάλλον διάδοσης, UT συσκευή οροφής αυτοκινήτου και L ζώνη συχνοτήτων.

Elevation	State 1: Line-of-sight			State 2: Intermediate sh.			State 3: Deep shadow		
	$\alpha$ (dB)	$\psi$ (dB)	MP (dB)	$\alpha$ (dB)	$\psi$ (dB)	MP (dB)	$\alpha$ (dB)	$\psi$ (dB)	MP (dB)
10°	-0.1	0.5	-19.0	-8.7	3.0	-12.0	-12.1	6.0	-25.0
20°	0.0	1.5	-25.0	-6.3	3.5	-20.0	-9.0	5.0	-21.0
30°	-0.5	1.0	-15.0	-4.7	1.5	-19.0	-7.0	3.0	-20.0
40°	-0.3	1.5	-14.0	-4.5	1.0	-21.0	-7.1	2.0	-21.0
50°	-0.5	1.0	-17.0	-6.5	2.5	-17.0	-14	2.5	-20.0
60°	-1.0	1.0	-15.0	-6.0	2.5	-17.0	-10.2	4.0	-15.0
70°	-0.2	0.5	-15.0	-6.0	2.1	-17.0	-11.5	2.0	-20.0

**Πίνακας Π.11: Πίνακες πιθανοτήτων κατάστασης W και μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων P για 1<sup>ης</sup> τάξης μοντέλο αλυσίδας Markov με 3 καταστάσεις διαύλου, για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης, L ζώνη συχνότητας, UT συσκευή χεριού και αστικό περιβάλλον διάδοσης.**

[P] elevation 10°	0.6667	0.2593	0.0740	[W] elevation 10°	0.0496
	0.1053	0.6447	0.2500		0.1397
	0.0023	0.0455	0.9522		0.8107
[P] elevation 20°	0.0000	0.0000	1.0000	[W] elevation 20°	0.0018
	0.0172	0.6897	0.2931		0.1058
	0.0000	0.0369	0.9631		0.8924
[P] elevation 30°	0.7145	0.2853	0.0002	[W] elevation 30°	0.1215
	0.1147	0.5726	0.3127		0.2726
	0.0056	0.1351	0.8593		0.6059
[P] elevation 40°	0.4706	0.4706	0.0588	[W] elevation 40°	0.0219
	0.0459	0.5596	0.3945		0.1403
	0.0062	0.0615	0.9323		0.8378
[P] elevation 50°	0.7291	0.1919	0.0790	[W] elevation 50°	0.0602
	0.0309	0.6256	0.3435		0.2739
	0.0117	0.1367	0.8516		0.6660
[P] elevation 60°	0.6944	0.2795	0.0261	[W] elevation 60°	0.0669
	0.0454	0.6835	0.2711		0.2863
	0.0115	0.1112	0.8773		0.6468
[P] elevation 70°	0.7117	0.1726	0.1157	[W] elevation 70°	0.0040
	0.0071	0.8272	0.1657		0.1680
	0.0000	0.0342	0.9658		0.8280
[P] elevation 80°	0.5000	0.4844	0.0156	[W] elevation 80°	0.0000
	0.0000	0.7344	0.2656		0.1875
	0.0000	0.0613	0.9387		0.8125

**Πίνακας Π.12: Τριάδα στατιστικών παραμέτρων L<sub>oo</sub> (α,ψ,MP) ανά κατάσταση διαύλου για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης, αστικό περιβάλλον διάδοσης, UT συσκευή χεριού και L ζώνη συχνότητας.**

Elevation	State 1: Line-of-sight			State 2: Intermediate sh.			State 3: Deep shadow		
	α (dB)	ψ (dB)	MP (dB)	α (dB)	ψ (dB)	MP (dB)	α (dB)	ψ (dB)	MP (dB)
10°	-0.7	1.9	-38.3	-18.4	8.6	-14.7	-24.4	9.4	-23.9
20°	0.7	2.1	-25.5	-10.0	4.9	-23.3	-25.3	7.9	-26.5
30°	0.4	2.5	-34.0	-11.5	5.4	-16.0	-19.2	7.0	-22.0
40°	-0.2	1.0	-32.9	-8.6	3.8	-16.1	-15.1	2.6	-16.0
50°	0.0	0.5	-34.5	-6.1	2.7	-17.0	-13.0	4.3	-17.7
60°	0.1	1.9	-27.2	-6.9	2.2	-18.6	-13.1	4.2	-19.7
70°	-0.7	1.8	-25.1	-5.7	1.0	-23.8	-12.7	3.2	-20.2

**Πίνακας Π.13:** Πίνακες πιθανοτήτων κατάστασης W και μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων P για 1<sup>ης</sup> τάξης μοντέλο αλυσίδας Markov με 3 καταστάσεις διαύλου, για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης, L ζώνη συχνότητων, UT συσκευή χειριού και προαστιακό περιβάλλον διάδοσης.

[P] elevation 10°	1.0000	0.0000	0.0000	[W] elevation 10°	0.0000
	0.0000	0.6393	0.3607		0.1057
	0.0000	0.0427	0.9573		0.8943
[P] elevation 20°	0.6428	0.2864	0.0708	[W] elevation 20°	0.0317
	0.0625	0.6436	0.2939		0.1692
	0.0009	0.0641	0.9350		0.7991
[P] elevation 30°	0.7495	0.2496	0.0009	[W] elevation 30°	0.0621
	0.0505	0.7377	0.2118		0.3082
	0.0000	0.1038	0.8962		0.6297
[P] elevation 40°	0.5000	0.4980	0.0020	[W] elevation 50°	0.0000
	0.0000	0.6881	0.3119		0.2143
	0.0000	0.0851	0.9149		0.7857
[P] elevation 60°	0.7625	0.1503	0.0872	[W] elevation 60°	0.0190
	0.0122	0.7775	0.2103		0.2770
	0.0016	0.0835	0.9149		0.7040
[P] elevation 70°	0.5000	0.4997	0.0003	[W] elevation 70°	0.0000
	0.0000	0.7584	0.2416		0.1571
	0.0000	0.0450	0.9550		0.8429
[P] elevation 80°	0.5000	0.4955	0.0045	[W] elevation 80°	0.0000
	0.0000	0.8190	0.1810		0.1923
	0.0000	0.0431	0.9569		0.8077

**Πίνακας Π.14:** Τριάδα στατιστικών παραμέτρων L<sub>oo</sub> (α,ψ,MP) ανά κατάσταση διαύλου για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης, προαστιακό περιβάλλον διάδοσης, UT συσκευή χειριού και L ζώνη συχνότητων.

Elevation	State 1: Line-of-sight			State 2: Intermediate sh.			State 3: Deep shadow		
	α (dB)	ψ (dB)	MP (dB)	α (dB)	ψ (dB)	MP (dB)	α (dB)	ψ (dB)	MP (dB)
10°	-0.1	0.5	-19.0	-8.1	3.5	5.7	-19.0	-12.6	-25.2
20°	-0.7	1.0	-25.2	-10.3	3.5	-12.0	-17.0	6.1	-21.5
30°	-0.5	1.0	-23.0	-10.3	4.5	-12.5	-18.0	6.1	-23.0
40°	-0.5	1.1	-24.0	-9.9	3.6	-12.0	-17.1	4.3	-21.0
50°	-0.1	1.0	-25.0	-10.2	2.0	-15.0	-18.0	4.6	-20.0
60°	-0.9	0.5	-20.0	-10.1	2.1	-14.0	-15.2	4.1	-20.0
70°	-0.2	0.5	-25.0	-8.0	2.1	-14.0	-17.6	4.0	-14.0

## Π.5. Πίνακες Τιμών Παραμέτρων για Μοντέλο Διαύλου Prieto-Cerdeira *et al.*

Οι πίνακες τιμών που δίδονται στη συνέχεια αφορούν τιμές παραμέτρων του μοντέλου διαύλου Prieto-Cerdeira *et al.* [Prieto-Cerdeira 2010]. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε με επεξεργασία των διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων που δόθηκαν ανωτέρω στην Ενότητα Π.4 για λογαριασμό του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA) [Perez-Fontan 2001]. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, το μοντέλο αυτό θεωρεί 1<sup>ης</sup> τάξης αλυσίδα Markov με 2 καταστάσεις διαύλου. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το εν λόγω μοντέλο, ο αναγνώστης παραπέμπεται στο [Prieto-Cerdeira 2010].

**Πίνακας Π.15: Πίνακες πιθανοτήτων κατάστασης W και μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων P για 1<sup>ης</sup> τάξης μοντέλο αλυσίδας Markov με 2 καταστάσεις διαύλου, για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης, UT συσκευή οροφής αυτοκινήτου, διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης και S ζώνη συχνοτήτων.**

<i>P</i>		State 1	State 2	<i>P</i>		State 1	State 2
<i>p</i> 11	<i>p</i> 12	$\mu$	$\mu$	<i>p</i> 11	<i>p</i> 12	$\mu$	$\mu$
<i>p</i> 21	<i>p</i> 22	$\sigma$	$\sigma$	<i>p</i> 21	<i>p</i> 22	$\sigma$	$\sigma$
Intermediate Tree shadowed 40°				Urban 70°			
0.6	0.4	20.6567	26.8488	0.9155	0.0845	29.6944	25.5591
0.1935	0.8065	4.8098	3.7554	0.2069	0.7931	9.5977	6.9865
Intermediate Tree shadowed 60°				Urban 80°			
0.8276	0.1724	25.5278	26.2933	0.9268	0.0732	29.7295	22.1986
0.2	0.8	7.5421	4.1951	0.2667	0.7333	11.9671	6.8103
Intermediate Tree shadowed 70°				Suburban 40°			
0.8406	0.1594	26.3678	24.73	0.9066	0.0934	27.6756	25.9979
0.2439	0.7561	7.5895	4.7864	0.124	0.876	10.5979	9.7671
Heavy Tree-Shadowed 40°				Suburban 60°			
0.7513	0.2487	22.3722	25.3825	0.887	0.113	28.0033	25.4416
0.1778	0.8222	7.7248	7.7526	0.121	0.879	9.0263	9.7479
Heavy Tree-Shadowed 60°				Suburban 80°			
0.6935	0.3065	21.1108	23.9265	0.7149	0.2851	21.7268	23.033
0.2328	0.7672	6.9241	7.0633	0.2065	0.7935	6.2475	7.2238
Heavy Tree-Shadowed 80°				Open rural 40°			
0.8704	0.1296	27.5148	22.0332	0.9293	0.0707	27.2143	37.4747
0.2171	0.7829	8.8646	8.3327	0.0221	0.9779	12.2861	14.3632
Light Tree-Shadowed 60°				Open rural 60°			
0.8049	0.1951	23.8583	25.6092	0.8968	0.1032	26.2824	28.341
0.1481	0.8519	8.0189	7.9735	0.0351	0.9649	11.1701	14.2473
Urban 40°				Open rural 80°			
0.9155	0.0845	26.5354	30.9363	0.8585	0.1415	26.1196	31.0366
0.0811	0.9189	10.3825	8.9651	0.0586	0.9414	9.437	11.1846
Urban 60°							
0.9043	0.0957	26.505	25.3297				
0.2	0.8	9.0036	6.9144				



**Πίνακας Π.16:** Τριάδα στατιστικών παραμέτρων  $L_{00}$  ( $\alpha, \psi, MP$ ) ανά κατάσταση διαύλου για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης, διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης, UT συσκευή οροφής αυτοκινήτου και S ζώνη συχνοτήτων.

Scenario	Elevation	State	$M_A$			$\Sigma_A (\mu_2)$			$\Sigma_A (\sigma_2)$			MP		
			$\mu_1$	$\sigma_1$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$\mu_3$	$\sigma_3$		
Intermediate tree shadowed	40	1	-0.3534	0.2198	0.1366	-0.0754	0.3631	-0.7478	-0.6613	-0.0615	-14.1667	1.6422		
	60	2	-9.6427	2.4876	-0.0302	-0.5337	0.7417	0.0337	0.4363	1.613	-14.3846	1.6093		
	60	1	-0.9914	0.3894	0.6458	1.6841	1.8242	0.0728	0.3421	0.38	-10.2	3.084		
	70	2	-5.2672	1.3666	-0.0357	-0.8572	-1.3569	0.0203	0.1313	0.419	-10	1.4142		
	40	1	0.37	0.4168	-0.2826	0.4096	0.7505	0.0868	-0.1429	0.0814	-9.7273	1.6181		
	80	2	-4.4451	2.2565	-0.0924	-1.0971	-0.7964	0.0863	0.8628	2.3401	-9.3636	1.4334		
Heavy tree-shadowed	40	1	-4.0557	1.0843	-0.0127	0.0104	2.6821	0.0337	0.2136	0.699	-12.2083	3.3003		
	60	2	-8.2585	1.0004	0.1006	1.5844	9.3947	0.0924	1.5971	7.3515	-12.8542	2.1536		
	60	1	-5.588	0.6856	-0.4013	-4.2046	-8.4302	0.0508	0.4393	1.4119	-10.7742	2.0034		
	80	2	-9.0922	0.9991	-0.4197	-7.9256	-34.0731	-0.0249	-0.4003	-1.1502	-12.4426	2.172		
Light tree-shadowed	60	1	-4.3433	0.6032	0.186	1.6251	5.5675	0.1045	0.8498	1.956	-11.3214	1.2488		
	80	2	-7.7759	1.1915	-0.047	-1.0147	-2.1749	-0.0035	0.0094	0.8236	-12.2414	1.5505		
Urban	40	1	0.3708	0.1745	4.2871	-4.0807	1.1733	-0.1068	-0.0509	0.0766	-17.25	1.669		
	60	2	-0.6146	0.3155	2.9369	4.9046	2.4678	0.3772	0.7684	0.38	-16.1111	2.0276		
	40	1	0.0586	0.6404	0.2837	0.0905	0.4704	-0.0638	0.0044	0.0473	-15.7778	4.4096		
	60	2	-9.7143	7.2610	-0.0024	-0.2411	0.5636	0.018	0.196	0.7561	-16.8571	8.9336		
	60	1	-0.7979	0.5787	0.3606	0.9572	1.2722	-0.4472	-0.6539	0.0404	-14.75	5.6036		
	70	2	-5.7548	4.5841	-0.0803	-1.7413	-5.811	0.0052	0.1889	1.58	-11.8182	5.0362		
	40	1	-0.1696	0.2899	3.4901	0.4838	0.4882	0.556	-0.5749	0.0805	-16.625	6.6748		
	80	2	-4.2472	4.212	-0.105	-1.28	-2.0482	0.01556	0.2317	0.8077	-15	5.3666		
Suburban	40	1	-0.132	0.3835	0.165	0.104	0.4799	-0.2407	-0.1212	0.053	-15.6	4.7656		
	60	2	-3.8113	4.1457	-0.0672	-0.7424	0.1643	0.025	0.4532	1.9276	-12.2222	5.7397		
	40	1	-2.3553	0.9962	-0.0522	0.0569	1.7999	-0.0046	-0.0865	0.0401	-23.3438	5.5742		
	60	2	-6.3961	2.5466	0.0076	-0.3422	-0.3842	0.0335	0.729	4.006	-24.6129	5.7889		
	40	1	-0.8377	0.7241	0.0432	0.3944	1.2329	0.0132	0.0526	0.2896	-19.9706	5.3228		
	60	2	-3.9767	1.6285	-0.0518	-1.0835	-1.6244	-0.0594	-0.5254	-0.3656	-19.5714	4.6671		
	40	1	0.0141	0.6167	-0.0246	-0.0745	1.2703	-0.07	-0.2257	0.4183	-13.8571	2.3237		
	60	2	-2.4336	0.9094	-0.1106	-1.0836	-0.3666	-0.0778	-0.4133	-0.0252	-14.6286	2.8036		
Open rural	40	1	0.2237	0.2111	0.3246	0.1419	0.1262	0.1038	-0.1173	0.0391	-27.3077	2.2871		
	60	2	-0.9379	1.0087	-0.1131	-0.845	-0.1786	-0.007	-0.1288	-0.0342	-27.7143	3.0742		
	40	1	0.1789	0.1913	1.4914	-0.4858	0.1876	-0.234	0.0934	0.0247	-30.375	1.3601		
	60	2	-0.3288	0.5366	1.4185	2.1654	0.818	0.2624	0.4413	0.1711	-29.875	2.6802		
	40	1	0.1867	0.1155	-1.8497	1.0743	0.1344	-2.1108	0.95	-0.0149	-27.8667	2.7131		
	60	2	-0.3362	0.2001	0.1597	-0.1319	0.2341	-0.4706	-0.3925	-0.0057	-27.3103	2.3007		



**Πίνακας Π.17: Πίνακες πιθανοτήτων κατάστασης W και μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων P για 1<sup>ης</sup> τάξης μοντέλο αλυσίδας Markov με 2 καταστάσεις διαύλου, για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης, UT συσκευή οροφής αυτοκινήτου, διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης και L ζώνη συχνοτήτων.**

<i>P</i>		State 1	State 2	<i>P</i>		State 1	State 2
<i>p</i> 11	<i>p</i> 12	$\mu$	$\mu$	<i>p</i> 11	<i>p</i> 12	$\mu$	$\mu$
<i>p</i> 21	<i>p</i> 22	$\sigma$	$\sigma$	<i>p</i> 21	<i>p</i> 22	$\sigma$	$\sigma$
Suburban 10°				Urban 10°			
0.9025	0.0975	27.2749	29.5369	0.9304	0.0696	28.1814	33.1215
0.104	0.896	10.7657	8.7293	0.0282	0.9718	11.4176	15.3122
Suburban 20°				Urban 20°			
0.9287	0.0713	28.4108	28.5458	0.933	0.067	31.5516	34.2158
0.1187	0.8813	11.6658	8.1245	0.0287	0.9713	10.4	13.6944
Suburban 30°				Urban 30°			
0.8826	0.1174	26.7638	26.4675	0.9244	0.0756	30.9548	26.491
0.097	0.903	9.7592	10.5743	0.0831	0.9169	9.4008	12.0441
Suburban 40°				Urban 40°			
0.9508	0.0492	32.7529	24.4185	0.8469	0.1531	26.2034	24.6816
0.2169	0.7831	11.8872	7.2542	0.1508	0.8492	8.4229	9.7189
Suburban 50°				Urban 50°			
0.9549	0.0451	32.8016	28.5854	0.9418	0.0582	30.4796	24.6616
0.108	0.892	13.7821	9.4247	0.1205	0.8795	12.4701	10.4833
Suburban 60°				Urban 60°			
0.8969	0.1031	26.6178	25.8372	0.9057	0.0943	27.7964	26.4727
0.0669	0.9331	11.3373	12.5046	0.0872	0.9128	9.8788	11.4614
Suburban 70°				Urban 70°			
0.8182	0.1818	26.2994	25.6259	0.9153	0.0847	26.7241	26.5942
0.0719	0.9281	7.0701	13.5604	0.2069	0.7931	12.2441	5.5562

Πίνακας Π.18: Τριάδα στατιστικών παραμέτρων  $L_{00}$  ( $\alpha, \psi, MP$ ) ανά κατάσταση διαύλου για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης, διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης, UT συσκευή οροφής αυτοκινήτου και  $L$  ζώνη συχνοτήτων.

Scenario	Elevation	State	$M_A$			$\Sigma_A (\mu_2)$			$\Sigma_A (\sigma_2)$			MP		
			$\mu_1$	$\sigma_1$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$\mu_3$	$\sigma_3$		
Suburban	10	1	-0.9504	1.2878	-0.0172	0.1695	1.5283	-0.0068	-0.0788	0.3057	-16.6923	2.2959		
		2	-8.3501	4.0782	-0.0472	-1.1268	-1.9445	0.0116	0.2495	2.117	-18.375	2.2036		
	20	1	0.4684	0.9425	0.0731	0.0443	0.9933	0.0751	-0.1767	0.3171	-16.2353	2.742		
		2	-5.0217	3.7691	-0.0347	-0.7085	0.5519	0.0036	0.1994	2.179	-17.303	2.3912		
	30	1	2.7434	0.4394	0.0649	-0.0503	0.3612	0.0754	-0.5449	1.1282	-15.1111	1.6174		
		2	0.6886	1.3949	0.1908	-0.5835	1.1959	-0.0809	-0.2003	0.5274	-16.5143	1.5973		
	40	1	-0.5678	1.0171	-0.5276	0.0176	1.6204	-0.1793	-0.202	0.3532	-15.4737	1.3892		
		2	-4.3282	1.895	-0.1764	-2.3734	-3.9952	-0.0734	-0.7714	-1.019	-16.1667	2.8543		
	50	1	-4.4401	1.1294	-0.1558	-0.9844	0.0069	0.0737	0.618	1.4301	-17.3158	1.9164		
		2	-7.9096	1.7564	0.0558	1.0721	7.0015	-0.0139	-0.1285	0.4979	-18.2	2.9665		
60	1	-4.9179	0.8428	0.3336	2.7614	6.6119	-0.0013	-0.1222	-0.3072	-17.8696	1.7915			
	2	-7.1892	1.3098	-0.2031	-3.78	-15.4007	0.1058	1.7213	7.2241	-18.2083	2.5191			
70	1	-3.0045	0.5354	-0.1076	-0.6189	0.1005	-0.1507	-1.1235	-1.7175	-19.0833	1.6214			
	2	-5.2149	1.2966	0.3277	3.0716	7.778	0.0755	0.7824	2.0895	-19.8333	1.4035			
Urban	10	1	0.2184	0.6922	-0.1567	0.5098	0.7901	0.0752	-0.2157	0.1484	-16.5	1.6733		
		2	-7.1769	7.0481	0.0028	-0.1232	2.52	0.0254	0.4778	2.5351	-19.1765	4.1267		
	20	1	1.6347	0.7289	0.2295	-0.6923	1.4968	-0.0668	0.1814	0.0617	-14.4	2.3845		
		2	-7.3602	8.3122	0.0336	0.6476	5.0807	0.0114	0.2544	1.6159	-17.6875	5.3006		
	30	1	0.6654	0.7078	0.1295	-0.0708	1.1233	0.2161	-0.3451	0.375	-14.5714	2.3322		
		2	-5.8977	6.2547	-0.0161	-0.4911	0.4836	0.006	0.1813	1.6177	-17.0385	3.6275		
	50	1	0.6238	0.3596	-0.2199	0.5374	0.4706	-0.6289	0.8781	0.0055	-15.7333	2.7535		
		2	-0.7777	0.4845	-0.5273	-1.7461	-0.0874	-0.3505	-0.7465	-0.0967	-16.2903	2.2538		
	40	1	0.2686	0.9372	-0.0231	0.2051	1.0277	-0.0464	0.0119	0.2733	-13.3929	2.6295		
		2	-2.0561	0.869	-0.1087	-0.7923	0.0824	-0.0593	-0.2208	0.221	-13.4074	3.0033		
60	1	-1.1547	0.6892	0.1955	0.6995	1.2252	-0.0316	-0.1776	0.0127	-15.15	1.8432			
	2	-2.9808	0.7644	0.4796	2.7062	4.5609	0.2823	1.9858	3.5121	-15.8	1.9894			
70	1	-1.0993	0.7167	-0.1203	-0.2418	0.807	0.2989	0.2614	0.0245	-16.6667	2.0656			
	2	-2.8032	0.5258	-1.4072	-8.826	-12.7832	0.0982	0.6371	1.033	-16.3333	0.8165			

## Παράρτημα III. Λογαριθμοκανονική Κατανομή

### III.1. Μονοδιάστατη Λογαριθμοκανονική Κατανομή

#### III.1.1. Ορισμός Μονοδιάστατης Λογαριθμοκανονικής Κατανομής

Έστω ότι η τ.μ.  $X$  ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή  $\mu$  και τυπική απόκλιση  $\sigma$ . Η σ.π.π. της τ.μ.  $X$  είναι

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (\text{III.1})$$

Η τ.μ.

$$Y = g(X) = e^X \quad (\text{III.2})$$

ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή, της οποίας η σ.π.π υπολογίζεται κατωτέρω.

Η εξίσωση  $y=g(x)=e^x$  για  $y>0$  έχει αντίστροφη συνάρτηση  $x=g^*(y)=\ln y$ . Συνεπώς ισχύει

$$f_Y(y) = f_X(g^*(y)) \left| \frac{dg^*(y)}{dy} \right| = \frac{f_X(g^*(y))}{|g'(x)|} \Rightarrow$$
$$f_Y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot y} \exp\left[-\frac{(\ln y - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad y>0 \quad (\text{III.3})$$

Ορίζοντας

$$\mu = \ln Y_m \quad (\text{III.4}\alpha)$$

$$\sigma = S_Y \quad (\text{III.4}\beta)$$

η σ.π.π. της τ.μ.  $Y$  γράφεται

$$f_Y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot S_Y \cdot y} \exp\left[-\frac{(\ln y - \ln Y_m)^2}{2S_Y^2}\right] \quad (\text{III.5})$$

όπου  $Y_m, S_Y$  οι παράμετροι της κατανομής.

#### III.1.2. Ολοκληρώματα Μονοδιάστατης Λογαριθμοκανονικής Κατανομής

Έστω ότι η τ.μ.  $Y$  ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους  $Y_m, S_Y$ .

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω είναι φανερό ότι η τ.μ.

$$X = \frac{\ln Y - \ln Y_m}{S_Y} \quad (\text{III.6})$$

ακολουθεί την τυπική κανονική κατανομή  $N(\mu=0, \sigma=1)$ , οπότε ισχύει

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{x^2}{2}\right] \quad (\text{III.7})$$

Συνεπώς, ο υπολογισμός της πιθανότητας οποιουδήποτε ενδεχομένου για την τ.μ.  $X$  που αντιστοιχεί σε ολοκλήρωση της σ.π.π.  $f_X(x)$  στο χωρίο που καθορίζεται από το ενδεχόμενο, γίνεται ως εξής:

$$P(A < X < B) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_A^B \exp\left[-\left(\frac{x^2}{2}\right)\right] dx \quad (\text{III.8})$$

Εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό

$$z = \frac{u}{\sqrt{2}} \quad (\text{III.9})$$

προκύπτει ότι

$$P(A < X < B) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_{A/\sqrt{2}}^{B/\sqrt{2}} \exp(-z^2) dz \quad (\text{III.10})$$

Συνεπώς, με βάση τον ορισμό της συμπληρωματικής συνάρτησης σφάλματος  $\text{erfc}(\cdot)$  ισχύει

$$P(A < X < B) = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{A}{\sqrt{2}}\right) - \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{B}{\sqrt{2}}\right) \quad (\text{III.11})$$

### III.1.3. Ροπές Μονοδιάστατης Λογαριθμοκανονικής Κατανομής

Οι κεντρικές ροπές της τ.μ.  $Y$  ορίζονται ως εξής

$$m_k = E[Y^k] = E[e^{kX}] \quad (\text{III.12})$$

Από τον ορισμό της λογαριθμοκανονικής κατανομής προκύπτει ότι η τ.μ.  $X = \ln Y$  ακολουθεί την κανονική κατανομή. Η ροπογεννήτρια συνάρτηση της κανονικής μεταβλητής είναι ίση με

$$\Phi(s) = E(e^{sX}) = \exp\left(\mu \cdot s + \frac{1}{2} \cdot \sigma^2 \cdot s^2\right) \quad (\text{III.13})$$

Επομένως

$$m_k = E[e^{kX}] = \exp\left(\mu \cdot k + \frac{1}{2} \cdot \sigma^2 \cdot k^2\right)$$

(III.14)

όπου  $\mu$ ,  $\sigma$  η μέση τιμή και τυπική απόκλιση της τ.μ.  $X$ . Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (III.4) η σχέση (III.14) γίνεται

$$m_k = Y^m \exp\left(\frac{k^2 S_Y^2}{2}\right) \quad (\text{III.15})$$

Θέτοντας  $Y=R$  και  $k=b$  ή  $k=2b$  προκύπτουν οι σχέσεις (I.24). Η μέση τιμή και τυπική απόκλιση της λογαριθμοκανονικής κατανομής βρίσκονται ως εξής:

$$\mu_Y = E[Y] = m_1 \Rightarrow$$

$$\mu_Y = Y_m \exp\left(\frac{S_Y^2}{2}\right) \quad (\text{III.16})$$

$$\sigma_Y^2 = E[Y^2] - (E[Y])^2 = m_2 - m_1^2 = Y_m^2 \exp(2 \cdot S_Y^2) - Y_m^2 \exp(S_Y^2) \Rightarrow$$

$$\sigma_Y^2 = Y_m^2 \cdot \exp(S_Y^2) \cdot (\exp S_Y^2 - 1) \quad (\text{III.17})$$

Θέτοντας  $\mu_Y = \mu_a$ ,  $\sigma_Y = \sigma_a$ ,  $Y_m = A_m$  και  $S_Y = S_a$  στις σχέσεις (III.16) και (III.17) προκύπτουν οι σχέσεις (I.25).

## III.2. Δισδιάστατη Λογαριθμοκανονική Κατανομή

### III.2.1. Ορισμός Δισδιάστατης Λογαριθμοκανονικής Κατανομής

Η δισδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή ορίζεται μέσω της δισδιάστατης κανονικής κατανομής. Αν οι τ.μ.  $X_1, X_2$  ακολουθούν από κοινού κανονική κατανομή, η από κοινού σ.π.π. είναι

$$f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho_n^2}} \exp\left\{-\frac{Q(x_1, x_2)}{2 \cdot (1-\rho_n^2)}\right\} \quad (\text{III.18})$$

όπου έχει οριστεί

$$Q(x_1, x_2) = \frac{(x_1 - \mu_1)^2}{\sigma_1^2} - 2\rho_n \frac{(x_1 - \mu_1) \cdot (x_2 - \mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(x_2 - \mu_2)^2}{\sigma_2^2} \quad (\text{III.19})$$

Ο συντελεστής συσχέτισης  $\rho_n$  των τ.μ.  $X_1, X_2$  ορίζεται ως εξής

$$\rho_n = \frac{E[X_1 X_2] - \mu_1 \mu_2}{\sigma_1 \sigma_2} \quad (\text{III.20})$$

Έστω οι τ.μ.

$$Y_1 = e^{X_1} \quad (\text{III.21}\alpha)$$

$$Y_2 = e^{X_2} \quad (\text{III.21}\beta)$$

Από αυτές προκύπτει το σύστημα

$$\begin{cases} y_1 = e^{x_1} \\ y_2 = e^{x_2} \end{cases}$$

Λύνοντας το ανωτέρω σύστημα για  $y_1, y_2 > 0$  προκύπτει η μοναδική λύση

$$x_1 = \ln y_1$$

$$x_2 = \ln y_2$$

Η Ιακωβιανή ορίζουσα του μετασχηματισμού είναι ίση με

$$J(x_1, x_2) = \begin{vmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial x_1} & \frac{\partial y_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial y_2}{\partial x_1} & \frac{\partial y_2}{\partial x_2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} e^{x_1} & 0 \\ 0 & e^{x_2} \end{vmatrix} \Rightarrow J(x_1, x_2) = e^{x_1} e^{x_2} \quad (\text{III.22})$$

Συνεπώς η από κοινού σ.π.π. των  $Y_1, Y_2$  προσδιορίζεται ως εξής

$$f_{Y_1 Y_2}(y_1, y_2) = \frac{f_{X_1 X_2}(x_1, x_2)}{|J(x_1, x_2)|} \Rightarrow$$

$$f_{Y_1 Y_2}(y_1, y_2) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot y_1 \cdot y_2 \cdot \sqrt{1 - \rho_n^2}} \exp \left\{ -\frac{Q'(y_1, y_2)}{2 \cdot (1 - \rho_n^2)} \right\} \quad (\text{III.23})$$

όπου

$$Q(y_1, y_2) = \frac{(\ln y_1 - \mu_1)^2}{\sigma_1^2} - 2\rho_n \frac{(\ln y_1 - \mu_1) \cdot (\ln y_2 - \mu_2)}{\sigma_1 \sigma_2} + \frac{(\ln y_2 - \mu_2)^2}{\sigma_2^2} \quad (\text{III.24})$$

Αν ορισθούν οι εξής παράμετροι

$$\mu_1 = \ln Y_{m1} \quad (\text{III.25α})$$

$$\mu_2 = \ln Y_{m2} \quad (\text{III.25β})$$

$$\sigma_1 = S_{Y1} \quad (\text{III.25γ})$$

$$\sigma_2 = S_{Y2} \quad (\text{III.25δ})$$

τότε η από κοινού σ.π.π. των τ.μ.  $Y_1, Y_2$  εκφράζεται ως εξής

$$f_{Y_1 Y_2}(y_1, y_2) = \frac{1}{2\pi \cdot S_{Y1} \cdot S_{Y2} \cdot y_1 \cdot y_2 \cdot \sqrt{1 - \rho_n^2}} \exp \left\{ -\frac{Q'(y_1, y_2)}{2 \cdot (1 - \rho_n^2)} \right\} \quad (\text{III.26})$$

όπου

$$Q'(y_1, y_2) = \frac{\ln \frac{y_1}{Y_{m1}}}{S_{Y1}^2} - 2 \cdot \rho_n \frac{\ln \frac{y_1}{Y_{m1}} \cdot \ln \frac{y_2}{Y_{m2}}}{S_{Y1} \cdot S_{Y2}} + \frac{\ln \frac{y_2}{Y_{m2}}}{S_{Y2}^2} \quad (\text{III.27})$$

και  $Y_{m1}, Y_{m2}, S_{Y1}, S_{Y2}$  και  $\rho_n$  οι παράμετροι της κατανομής.

### III.2.2. Ολοκληρώματα Δισδιάστατης Λογαριθμοκανονικής Κατανομής

Έστω ότι οι τ.μ.  $Y_1, Y_2$  ακολουθούν την από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους  $Y_{m1}, Y_{m2}, S_{Y1}, S_{Y2}$  και  $\rho_n$ . Από τον ορισμό της λογαριθμοκανονικής κατανομής προκύπτει ότι οι τ.μ

$$X_1 = \frac{\ln Y_1 - \ln Y_{m1}}{S_{Y1}} \quad (\text{III.28}\alpha)$$

$$X_2 = \frac{\ln Y_2 - \ln Y_{m2}}{S_{Y2}} \quad (\text{III.28}\beta)$$

έχουν την εξής από κοινού σ.π.π.

$$f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_n^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(x_1^2 - 2\rho_n x_1 x_2 + x_2^2\right)\frac{1}{1-\rho_n^2}\right] \quad (\text{III.29})$$

Η ανωτέρω σ.π.π. μπορεί να εκφραστεί με τη βοήθεια της περιθώριας σ.π.π.  $f_{X_2}(x_2)$  και της υπό συνθήκη σ.π.π.  $f_{X_1|X_2}(x_1, x_2)$ . Από τη σχέση (III.29) προκύπτει

$$f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x_2^2}{2}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi(1-\rho_n^2)}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(x_1^2 - 2\rho_n x_1 x_2 + x_2^2\right) + \frac{x_2^2}{2}\right] \Rightarrow$$

$$f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x_2^2}{2}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi(1-\rho_n^2)}} \cdot \exp\left[-\frac{(x_1 - \rho_n x_2)^2}{2(1-\rho_n^2)}\right] \quad (\text{III.30})$$

Ωστόσο, ισχύουν οι εξής σχέσεις

$$f_{X_1}(x_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{2}\right) \equiv N(0,1) \quad (\text{III.31}\alpha)$$

$$f_{X_1|X_2}(x_1, x_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sqrt{1-\rho_n^2}} \exp\left[-\frac{(x_1 - \rho_n x_2)^2}{2(1-\rho_n^2)}\right] \equiv N(\rho_n x_2, \sqrt{1-\rho_n^2}) \quad (\text{III.31}\beta)$$

Οπότε ισχύει

$$f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) = f_{X_1}(x_1) \cdot f_{X_2|X_1}(x_1, x_2) = f_{X_2}(x_2) \cdot f_{X_1|X_2}(x_1, x_2) = f_{X_2, X_1}(x_2, x_1) \quad (\text{III.32})$$

Ο υπολογισμός της πιθανότητας οποιουδήποτε ενδεχομένου για το ζεύγος των τ.μ.  $X_1, X_2$  που αντιστοιχεί σε ολοκλήρωση της από κοινού σ.π.π. στο χωρίο που καθορίζεται από το ενδεχόμενο, διευκολύνεται με την εφαρμογή της προηγούμενης ιδιότητας και είναι

$$\begin{aligned}
P(A_1 < X_1 < B_1, A_2 < X_2 < B_2) &= \int_{A_1}^{B_1} dx_1 \int_{A_2}^{B_2} dx_2 f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) = \\
&= \int_{A_1}^{B_1} dx_1 f_{X_1}(x_1) \int_{A_2}^{B_2} dx_2 f_{X_2/X_1}(x_1, x_2) = \\
&= \int_{A_1}^{B_1} dx_1 f_{X_1}(x_1) \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{A_2 - \rho_n x_1}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}} \right) - \operatorname{erfc} \left( \frac{B_2 - \rho_n x_1}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}} \right) \right] = \quad (III.33) \\
&= \int_{A_2}^{B_2} dx_2 f_{X_2}(x_2) \int_{A_1}^{B_1} dx_1 f_{X_1/X_2}(x_1, x_2) = \\
&= \int_{A_2}^{B_2} dx_2 f_{X_2}(x_2) \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{A_1 - \rho_n x_2}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}} \right) - \operatorname{erfc} \left( \frac{B_1 - \rho_n x_2}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}} \right) \right]
\end{aligned}$$

### III.2.3. Ροπές Δισδιάστατης Λογαριθμοκανονικής Κατανομής

Έστω ότι οι τ.μ.  $Y_1, Y_2$  ακολουθούν την από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή. Η από κοινού μέση τιμή, ως δευτεροβάθμια ροπή, ορίζεται ως εξής

$$\mu_{11} = E[Y_1 Y_2] = E[e^{X_1 + X_2}] \quad (III.34)$$

ενώ οι τ.μ.  $X_1 = \ln Y_1, X_2 = \ln Y_2$  ακολουθούν την από κοινού κανονική κατανομή.

Η ροπογεννήτρια συνάρτηση της δισδιάστατης κανονικής κατανομής των τ.μ.  $X_1, X_2$  ισούται με

$$\Phi(s_1, s_2) = E[\exp(s_1 X_1 + s_2 X_2)] \Rightarrow$$

$$\Phi(s_1, s_2) = \exp(\mu_1 s_1 + \mu_2 s_2) \cdot \exp\left(\frac{s_1^2 \sigma_1^2 + 2 \cdot \rho_n \sigma_1 \sigma_2 \cdot s_1 s_2 + s_2^2 \sigma_2^2}{2}\right) \quad (III.35)$$

Θέτοντας  $s_1 = s_2 = 1$  λαμβάνεται

$$m_{11} = E[\exp(X_1 + X_2)] = \exp(\mu_1 + \mu_2) \cdot \exp\left(\frac{\sigma_1^2 + 2 \cdot \rho_n \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2}{2}\right) \quad (III.36)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (III.25) η έκφραση (III.36) γίνεται

$$m_{11} = Y_{m1} Y_{m2} \cdot \exp\left(\frac{S_{Y1}^2 + 2 \cdot \rho_n S_{Y1} S_{Y2} + S_{Y2}^2}{2}\right) \quad (III.37)$$



Ο συντελεστής συσχέτισης των τ.μ.  $Y_1, Y_2$  υπολογίζεται με βάση τη σχέση

$$\rho_{Y_1 Y_2} = \frac{E[Y_1 \cdot Y_2] - \mu_{Y_1} \cdot \mu_{Y_2}}{\sigma_{Y_1} \cdot \sigma_{Y_2}} \quad (\text{III.38})$$

Αν εισαχθούν στην ανωτέρω έκφραση η σχέση (III.37) καθώς και οι σχέσεις (III.16) και (III.17) προκύπτει

$$\rho_n = \frac{\ln \left[ 1 + \rho_{Y_1 Y_2} \sqrt{(\exp(S_{Y_1}^2) - 1) \cdot (\exp(S_{Y_2}^2) - 1)} \right]}{S_{Y_1} \cdot S_{Y_2}} \quad (\text{III.39})$$

η οποία σχέση συνδέει το συντελεστή συσχέτισης  $\rho_n$  του κανονικού ζεύγους τ.μ.  $X_1, X_2$  με τον αντίστοιχο  $\rho_{Y_1 Y_2}$  του λογαριθμοκανονικού ζεύγους  $Y_1, Y_2$ .



## Παράρτημα IV. Έκφραση Πίνακα Μεταβλητότητας για Χωρική Συσχέτιση Διαλείψεων Μικρής Κλίμακας

Στο Παράρτημα αυτό αποδεικνύονται οι σχέσεις (5.18)-(5.19),(5.25)-(5.26) και (5.31) για τους πίνακες μεταβλητότητας που περιγράφουν τη χωρική συσχέτιση διαλείψεων μικρής κλίμακας στις αντίστοιχες περιπτώσεις των υπό μελέτη MIMO LMS διαύλων. Χωρίς απώλεια της γενικότητας, αποδεικνύεται η σχέση (5.19) που ισχύει για τη χωρική συσχέτιση διαλείψεων μικρής κλίμακας στην πλευρά λήψης στην περίπτωση του υπό μελέτη MIMO LMS διαύλου με διαφορισμό πόλωσης ενώ οι υπόλοιπες σχέσεις προκύπτουν εύκολα αντιστοίχως.

Συνεπώς, ο πίνακας μεταβλητότητας  $\tilde{\mathbf{R}}_{rx}$  για τη χωρική συσχέτιση διαλείψεων μικρής κλίμακας στην πλευρά λήψης για MIMO LMS δίαυλο με διαφορισμό πόλωσης ορίζεται ως εξής

$$\tilde{\mathbf{R}}_{rx} = E[\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H] \quad (\text{IV.1})$$

όπου

$$\tilde{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \tilde{h}_{11} & \tilde{h}_{12} \\ \tilde{h}_{21} & \tilde{h}_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.2})$$

Με βάση τις (IV.1)-(IV.2) και τη σχέση (5.8), προκύπτει ότι

$$\tilde{\mathbf{R}}_{rx} = E[\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H] = \begin{bmatrix} \tilde{h}_{11} & \tilde{h}_{12} \\ \tilde{h}_{21} & \tilde{h}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{h}_{11} & \tilde{h}_{21} \\ \tilde{h}_{12} & \tilde{h}_{22} \end{bmatrix} \Rightarrow \quad (\text{IV.3})$$

$$\tilde{\mathbf{R}}_{rx}(1,1) = E[\tilde{h}_{11}\tilde{h}_{11} + \tilde{h}_{12}\tilde{h}_{12}] = MP \cdot (1 - \gamma) + MP \cdot \gamma = MP \quad (\text{IV.4}\alpha)$$

$$\tilde{\mathbf{R}}_{rx}(1,2) = E[\tilde{h}_{11}\tilde{h}_{21} + \tilde{h}_{12}\tilde{h}_{22}] = E[\tilde{h}_{11}\tilde{h}_{21}] + E[\tilde{h}_{12}\tilde{h}_{22}] \quad (\text{IV.4}\beta)$$

$$\tilde{\mathbf{R}}_{rx}(2,1) = E[\tilde{h}_{21}\tilde{h}_{11} + \tilde{h}_{22}\tilde{h}_{12}] = E[\tilde{h}_{21}\tilde{h}_{11}] + E[\tilde{h}_{22}\tilde{h}_{12}] \quad (\text{IV.4}\gamma)$$

$$\tilde{\mathbf{R}}_{rx}(2,2) = E[\tilde{h}_{21}\tilde{h}_{21} + \tilde{h}_{22}\tilde{h}_{22}] = MP \cdot (1 - \gamma) + MP \cdot \gamma = MP \quad (\text{IV.4}\delta)$$

Από τις βασικές θεωρήσεις ότι  $E[\tilde{h}_{11}\tilde{h}_{21}] = E[\tilde{h}_{12}\tilde{h}_{22}]$ ,  $E[\tilde{h}_{21}\tilde{h}_{11}] = E[\tilde{h}_{22}\tilde{h}_{12}]$ , και από τον ορισμό του συντελεστή χωρικής συσχέτισης διαλείψεων μικρής κλίμακας στην πλευρά λήψης

$$\tilde{\rho}_{rx} = \frac{E[\tilde{h}_{11}\tilde{h}_{21}]}{\sqrt{E[\tilde{h}_{11}]E[\tilde{h}_{21}]}} = \frac{E[\tilde{h}_{12}\tilde{h}_{22}]}{\sqrt{E[\tilde{h}_{12}]E[\tilde{h}_{22}]}} \quad (\text{IV.5})$$

προκύπτει ότι

$$E[\tilde{h}_{11}\tilde{h}_{21}] + E[\tilde{h}_{12}\tilde{h}_{22}] = 2\tilde{\rho}_{rx}\sqrt{E[\tilde{h}_{11}]E[\tilde{h}_{21}]} = 2\tilde{\rho}_{rx}MP\sqrt{(1-\gamma)\gamma} \quad (\text{IV.6})$$

Με βάση τις σχέσεις (IV.3)-(IV.6), η (IV.1) γράφεται τελικά υπό τη μορφή

$$\tilde{\mathbf{R}}_{rx} = E[\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H] = MP \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2\sqrt{(1-\gamma)\gamma}\tilde{\rho}_{rx} \\ 2\sqrt{(1-\gamma)\gamma}\tilde{\rho}_{rx} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.7})$$

Η (IV.7) πρόκειται για τη σχέση (5.19). Με αντίστοιχη διαδικασία προκύπτουν οι υπόλοιπες σχέσεις (5.18),(5.25)-(5.26) και (5.31) για τους πίνακες μεταβλητότητας που περιγράφουν τη χωρική συσχέτιση διαλείψεων μικρής κλίμακας.

## Παράρτημα V. Ορισμοί και Πράξεις Πινάκων

Στο Παράρτημα αυτό δίνονται ορισμοί και μαθηματικές πράξεις πινάκων που απορρέουν από τη θεωρία Γραμμικής Άλγεβρας [Meyer 2000].

$$\text{Έστω ο πίνακας } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ \cdot & & & \\ \cdot & & & \\ a_{M1} & \dots & \dots & a_{MN} \end{bmatrix} \text{ διαστάσεων } M \times N,$$

$$\text{και ο πίνακας } \mathbf{B} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1Q} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2Q} \\ \cdot & & & \\ \cdot & & & \\ a_{P1} & \dots & \dots & a_{PQ} \end{bmatrix} \text{ διαστάσεων } P \times Q.$$

$\mathbf{A}^T$  : Ο ανάστροφος του πίνακα  $\mathbf{A}$  διαστάσεων  $N \times M$  και ισούται με:

$$\mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & \dots & a_{M1} \\ a_{12} & a_{22} & \dots & a_{M2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{1N} & a_{2N} & \dots & a_{MN} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{A}^H$  : Ο ανάστροφος συζυγής (ή ερμιτιανός) του πίνακα  $\mathbf{A}$  διαστάσεων  $N \times M$  και ισούται με:

$$\mathbf{A}^H = \begin{bmatrix} a_{11}^* & a_{21}^* & \dots & a_{M1}^* \\ a_{12}^* & a_{22}^* & \dots & a_{M2}^* \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{1N}^* & a_{2N}^* & \dots & a_{MN}^* \end{bmatrix}$$

$\text{tr}(\mathbf{A})$  : Το ίχνος του πίνακα  $\mathbf{A}$  (όπου  $N=M$ ) και ισούται με:  $\text{tr}(\mathbf{A}) = \sum_{i=1}^N a_{ii}$

$\det(\mathbf{A})$  : Η ορίζουσα του πίνακα  $\mathbf{A}$  (συμβολίζεται και ως  $\det(\mathbf{A}) = |\mathbf{A}|$ )

$\|\mathbf{A}\|_F$  : Η Frobenius νόρμα του πίνακα  $\mathbf{A}$  και ισούται με:  $\|\mathbf{A}\|_F = \left[ \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (|a_{ij}|^2) \right]^{1/2}$

$\text{vec}(\mathbf{A})$  : Ο πίνακας-στήλη που προκύπτει από τη μετατροπή του πίνακα  $\mathbf{A}$  σε διάνυσμα με την τοποθέτηση της στήλης  $i+1$  κάτω από τη στήλη  $i$  και ισούται με:

$$\text{vec}(\mathbf{A}) = [a_{11} \ a_{21} \ \dots \ a_{M1} \ a_{12} \ a_{22} \ \dots \ a_{M2} \ \dots \ a_{1N} \ a_{2N} \ \dots \ a_{MN}]^T$$

$\otimes$  : Το γινόμενο Kronecker μεταξύ δύο πινάκων που ορίζεται από τη σχέση

$$\mathbf{A} \otimes \mathbf{B} = \begin{bmatrix} a_{11} \cdot \mathbf{B} & a_{12} \cdot \mathbf{B} & \dots & a_{1N} \cdot \mathbf{B} \\ a_{21} \cdot \mathbf{B} & a_{22} \cdot \mathbf{B} & \dots & a_{2N} \cdot \mathbf{B} \\ \cdot & & & \\ \cdot & & & \\ a_{M1} \cdot \mathbf{B} & \dots & \dots & a_{MN} \cdot \mathbf{B} \end{bmatrix}$$

Ο πίνακας  $\mathbf{A} \otimes \mathbf{B}$  που προκύπτει από το γινόμενο Kronecker είναι διαστάσεων  $(M \cdot P) \times (N \cdot Q)$

## **Βιογραφικό Σημείωμα του ΥΔ κ. Κωνσταντίνου Π. Λιώλη**

Ο Υποψήφιος Διδάκτορας κ. Κωνσταντίνος Π. Λιώλης γεννήθηκε στην Αθήνα το Σεπτέμβριο 1981. Τον Ιούνιο 1999 αποφοίτησε από το 3<sup>ο</sup> Γενικό Λύκειο Χαλανδρίου με βαθμό απολυτηρίου 18 9/11 (Άριστα) και το Σεπτέμβριο 1999 πέτυχε μέσω Πανελληνίων Εξετάσεων και με σειρά κατάταξης 34<sup>ος</sup> την εισαγωγή του στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (ΣΗΜΜΥ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Τον Ιούλιο 2004 έλαβε το Δίπλωμα Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών από το ΕΜΠ με βαθμό 8.78 (Λίαν Καλώς). Η Διπλωματική Εργασία του με τίτλο «Μείωση Επίδρασης Παρεμβολών σε Κυψελωτό Σύστημα LMDS με Χρήση Τεχνικής Διαφορικής Λήψης Κελιού» πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του Καθηγητή ΕΜΠ κ. Παναγιώτη Γ. Κωττή και βαθμολογήθηκε με 10 (Άριστα). Από τη Διπλωματική Εργασία του προέκυψαν οι επιστημονικές δημοσιεύσεις [Π10],[Σ19] (βλ. Προσάρτημα). Για τη δημοσίευσή του [Σ19] ο κ. Λιώλης έλαβε το 3<sup>ο</sup> Βραβείο Καλύτερης Φοιτητικής Δημοσίευσης στο διεθνές έγκριτο επιστημονικό συνέδριο με κριτές IEEE RAWCON 2006.

Το Σεπτέμβριο 2004 έγινε δεκτός με Πλήρη Υποτροφία (Research Assistantship, RA) στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια UCSD (University of California San Diego) των ΗΠΑ από όπου το Μάρτιο 2006 έλαβε το Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης (Master of Science) στην επιστήμη του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού με ειδίκευση στις Ψηφιακές Επικοινωνίες και βαθμό 3.5/4.0 (Λίαν Καλώς). Παράλληλα, κατά το διάστημα από Σεπτέμβριο 2004 έως Μάρτιο 2006, εργάστηκε ως Βοηθός Ερευνητής στο Ινστιτούτο Τεχνολογιών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών (California Institute for Telecommunications and Information Technology, Cal-IT<sup>2</sup>) του Πανεπιστημίου UCSD. Η Μεταπτυχιακή Εργασία του στο Πανεπιστήμιο UCSD με τίτλο «Application of MIMO Theory to the Analysis of Broadband Fixed Wireless Access Diversity Systems Above 10GHz» πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του Καθηγητή UCSD κ. Bhaskar D. Rao, IEEE Fellow, και βαθμολογήθηκε με 4.0/4.0 (Άριστα). Από την ερευνητική εμπειρία του στο Πανεπιστήμιο UCSD προέκυψαν οι επιστημονικές δημοσιεύσεις [Π7],[Σ17],[Σ18] (βλ. Προσάρτημα).

Τον Ιούνιο 2006 έλαβε Υποτροφία Νεαρού Αποφοίτου (Young Graduate Traineeship, YGT) από το Κέντρο Διαστημικής Έρευνας και Τεχνολογίας του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (European Space Agency - European Space Research and Technology Centre, ESA/ESTEC), που εδρεύει στο Noordwijk της Ολλανδίας, όπου και εργάστηκε έως το

Φεβρουάριο 2008 ως Μηχανικός Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων. Κατά το διάστημα αυτό ασχολήθηκε ενεργά με την τεχνική υποστήριξη ερευνητικών προγραμμάτων στο γνωστικό αντικείμενο των ψηφιακών δορυφορικών επικοινωνιών και συμμετείχε ενεργά σε διεθνείς ομάδες προτυποποίησης των δορυφορικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων DVB-SH και DVB-RCS+M. Από την ερευνητική εμπειρία του στο ESA/ESTEC προέκυψαν οι επιστημονικές δημοσιεύσεις [Σ11],[Σ13],[Σ14] (βλ. Προσάρτημα).

Παράλληλα, το Δεκέμβριο 2006 έγινε δεκτός ως Υποψήφιος Διδάκτορας της ΣΗΜΜΥ του ΕΜΠ με απόφαση της Γενικής Συνέλευσης της Σχολής στη γνωστική περιοχή «Ασύρματα Ευρυζωνικά Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα». Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της Διατριβής του στο ΕΜΠ έχει ασχοληθεί ενεργά με την τεχνική υποστήριξη ερευνητικών προγραμμάτων στο γνωστικό αντικείμενο των δορυφορικών επικοινωνιών και έχει συνεισφέρει στη διαμόρφωση προτύπων της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών ITU-R. Επίσης, έχει συνεργασθεί με τους κ.κ. Παναγιώτη Γ. Κωττή, Καθηγητή ΕΜΠ, και Αθανάσιο Δ. Παναγόπουλο, Λέκτορα ΕΜΠ, για τη συν-επίβλεψη δύο (2) Διπλωματικών Εργασιών. Από την ερευνητική εμπειρία του στο πλαίσιο εκπόνησης της Διατριβής του έχουν προκύψει οι επιστημονικές δημοσιεύσεις [Π2],[Π3],[Π4],[Π5],[Π6],[Π7],[Π8],[Π9],[Σ6],[Σ7],[Σ8],[Σ9],[Σ10],[Σ12],[Σ14],[Σ15],[Σ16] (βλ. Προσάρτημα).

Παράλληλα, από το Φεβρουάριο 2008 έως και σήμερα, εργάζεται στο Τμήμα Έρευνας και Ανάπτυξης (Research & Development, R&D) της εταιρίας Space Hellas AE αρχικά ως Μηχανικός R&D Συστημάτων και στη συνέχεια ως Υπεύθυνος Έργων R&D. Κύρια ενασχόλησή του αποτελεί η διαχείριση και η τεχνική υποστήριξη R&D έργων στο γνωστικό αντικείμενο των Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών (ΤΠΕ). Από την ερευνητική εμπειρία του στη Space Hellas έχουν προκύψει οι επιστημονικές δημοσιεύσεις [Σ1],[Σ2],[Σ3],[Σ4],[Σ5],[Σ11] (βλ. Προσάρτημα). Επίσης, από το Νοέμβριο 2009 έως και σήμερα, στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Τεχνολογικής Πλατφόρμας ISI (Integral SatCom Initiative) που έχει συσταθεί στο 7<sup>ο</sup> Πρόγραμμα Πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την προώθηση των δορυφορικών επικοινωνιών, συντονίζει ενεργά τις ερευνητικές προσπάθειες της ISI σχετικά με το ρόλο των δορυφορικών δικτύων στο Μελλοντικό Διαδίκτυο (Future Internet) (βλ. π.χ., [A1],[A2],[Σ1],[Σ3],[Σ5]).

Συνολικά, στο πλαίσιο της ανωτέρω πολυετούς διεθνούς ερευνητικής και εργασιακής εμπειρίας του, ο κ. Λιώλης έχει δημοσιεύσει είκοσι οκτώ (28) εργασίες σε διεθνή έγκριτα επιστημονικά περιοδικά με κριτές και ανακοινώσεις σε πρακτικά διεθνών έγκριτων επιστημονικών συνεδρίων με κριτές. Επίσης, είναι συν-συγγραφέας ενός (1) κεφαλαίου



που, έπειτα από επιτυχή κρίση, συμπεριλήφθηκε στο διεθνές επιστημονικό βιβλίο με τίτλο “Digital Video”, Εκδόσεις IN-TECH, 2010. Επιπλέον, έχει οκτώ (8) τεχνικές συνεισφορές στις διεθνείς ομάδες προτυποποίησης τηλεπικοινωνιών DVB-SH, DVB-RCS+M και ITU-R. Είναι κριτής σε διάφορα διεθνή έγκριτα επιστημονικά περιοδικά, όπως π.χ., IEEE Transactions on Wireless Communications, IEEE Transactions on Communications, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, IEEE Communications Letters, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Springer Wireless Networks, Wireless Personal Communications, καθώς και σε διάφορα διεθνή έγκριτα επιστημονικά συνέδρια, όπως π.χ., FUNEMS 2011, IEEE ASMS/SPSC 2010, PSATS 2009, IEEE VTC 2008, IEEE ISSSTA 2008, IEEE ASMS 2008, ESA SPSC 2008. Επίσης, έχει διατελέσει Μέλος Τεχνικής Επιτροπής σε διάφορα διεθνή επιστημονικά συνέδρια σχετικά με Τεχνολογίες Πληροφορικής και Επικοινωνιών, όπως π.χ., FUNEMS 2011, IEEE ASMS/SPSC 2010, PSATS 2009, ESA SPSC 2008. Επιπλέον, έχει ενεργό συμμετοχή σε περισσότερα από είκοσι (20) R&D προγράμματα σχετικά με Τεχνολογίες Πληροφορικής και Επικοινωνιών.

Ο κ. Κωνσταντίνος Π. Λιώλης είναι Μέλος του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας (ΤΕΕ) και Φοιτητικό Μέλος του διεθνούς Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών IEEE.

## Κατάλογος Δημοσιεύσεων του ΥΔ κ. Κωνσταντίνου Π. Λιώλη

### ➤ Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Έγκριτα Επιστημονικά Περιοδικά με Κριτές:

- [Π1] P.-D.M. Arapoglou, **K.P. Liolis**, and A.D. Panagopoulos, “Railway Satellite Channel at Ku Band and Above: Composite Dynamic Modeling for the Design of Fade Mitigation Techniques”, *Wiley’s International Journal of Satellite Communications and Networking*, in press, 2011.
- [Π2] A. Pérez-Neira, C. Ibars, J. Serra, A. del Coso, J. Gómez-Vilardebó, M. Caus, and **K.P. Liolis**, “MIMO Channel Modeling and Transmission Techniques for Multi-Satellite and Hybrid Satellite-Terrestrial Mobile Networks”, *Elsevier’s Physical Communication*, Vol.4, Issue 2, pp. 127-139, June 2011.
- [Π3] **K.P. Liolis**, A.D. Panagopoulos, and P.G. Cottis, “Bit Error Outage over SIMO Spatially Correlated Rain Fading Channels”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 53, no.3, pp. 204-209, June 2011.
- [Π4] **K.P. Liolis**, J. Gómez-Vilardebó, E. Casini, and A. Pérez-Neira, “Statistical Modeling of Dual-Polarized MIMO Land Mobile Satellite Channels”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 58, no. 11, pages 3077-3083, November 2010.
- [Π5] P.-D.M. Arapoglou, **K.P. Liolis**, M. Bertinelli, A.D. Panagopoulos, P.G. Cottis, and R. De Gaudenzi, “MIMO over Satellite: A Review”, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol.13 No.1, 1<sup>st</sup> Quarter 2011.
- [Π6] **K.P. Liolis**, A.D. Panagopoulos, and S. Scalise, “On the Combination of Tropospheric and Local Environment Propagation Effects for Mobile Satellite Systems above 10GHz”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 3, pp. 1109–1120, 2010.
- [Π7] **K.P. Liolis**, A.D. Panagopoulos, P.G. Cottis, and B.D. Rao, “On the Applicability of MIMO Principle to 10-66GHz BFWA Networks: Capacity Enhancement through Spatial Multiplexing and Interference Reduction through Selection Diversity”, *IEEE Transactions on Communications*, vol.57, no.2, February 2009.
- [Π8] **K.P. Liolis**, A.D. Panagopoulos, and P.G. Cottis, “Multi-Satellite MIMO Communications at Ku Band and Above: Investigations on Spatial Multiplexing

for Capacity Improvement and Selection Diversity for Interference Mitigation”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Special Issue on Satellite Communications*, vol. 2007, doi:10.1155/2007/59608, 2007.

- [Π9] A.D. Panagopoulos, **K.P. Liolis**, and P.G. Cottis, “Rician K-Factor Distribution in Broadband Fixed Wireless Access Channels under Rain Fades”, *IEEE Communications Letters*, vol. 11, no. 4, pp. 301-303, April 2007.
- [Π10] A.D. Panagopoulos, **K.P. Liolis**, and P.G. Cottis, “Cell-Site Diversity Against Co-Channel Interference in LMDS Networks”, *Wireless Personal Communications*, vol. 39, no. 2, pp. 183-198, October 2006.

➤ Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Έγκριτα Επιστημονικά Συνέδρια με Κριτές:

- [Σ1] **K.P. Liolis**, V.A. Siris, and G.C. Polyzos, “On Satellite-assisted Publish-Subscribe Future Network Architectures for Smart M2M Applications”, in Proc. *6<sup>th</sup> Future Internet Cluster Workshop (FICW)*, co-located with Future Internet Assembly (FIA), Poznan, Poland, October 2011.
- [Σ2] H. Pensas, A.-M. Vainio, T. Kivimäki, **K. Liolis**, B. Wimmer, S. Laitinen, G. Kouvatseas, L. Kaila, J. Vanhala, “AMCOSOP: A Social Networking System for the Elderly”, in Proc. *15<sup>th</sup> MindTrek Conference*, Finland, September 2011.
- [Σ3] N. Chuberre, M. Piccinni, J.-F. Boutillon, A. Alvaro-Sanchez, J.M. Rodriguez Bejarano, and **K.P. Liolis**, “SatCom Systems in the Context of Future Internet-enabled Smart Infrastructures”, in Proc. *5<sup>th</sup> Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS2010) & 11<sup>th</sup> Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC2010)*, Cagliari, Italy, September 2010.
- [Σ4] **K.P. Liolis**, S. Pantazis, V. Gennatos, S. Costicoglou, I. Andrikopoulos, “An Automated Fire Detection and Alerting Application based on Satellite and Wireless Communications”, in Proc. *5<sup>th</sup> Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS2010) & 11<sup>th</sup> Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC2010)*, Cagliari, Italy, September 2010.
- [Σ5] **K.P. Liolis**, N. Chuberre, I. Andrikopoulos, and M. Piccinni, “On a Future Internet Architecture Augmented by Satellite Networks”, in Proc. *19<sup>th</sup> Future Network & Mobile Summit (FUNEMS2010)*, Florence, Italy, June 2010.
- [Σ6] **K.P. Liolis**, A.D. Panagopoulos, P.-D.M. Arapoglou, and S. Scalise, “Rician K-Factor Statistics for Accurate Land Mobile Satellite Channel Modeling at Ku

- Band and Above in Temperate and Tropical Climatic Regions”, in Proc. *COST Action IC0802, MCM2*, Toulouse, France, November 2009.
- [Σ7] P.-D.M. Arapoglou, **K.P. Liolis**, and A.D. Panagopoulos, “A Comprehensive Time Series Synthesizer of the Railway Satellite Channel at Ku band and Above for Analyzing Fade Mitigation Techniques”, in Proc. *COST Action IC0802, MCM2*, Toulouse, France, November 2009.
- [Σ8] **K.P. Liolis**, J. Gómez-Vilardebó, E. Casini, and A. Pérez-Neira, “On the Statistical Modeling of MIMO Land Mobile Satellite Channels: A Consolidated Approach”, in Proc. *27<sup>th</sup> AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC2009)*, Edinburgh, UK, June 2009.
- [Σ9] **K.P. Liolis**, A.D. Panagopoulos, and P.-D.M. Arapoglou, “An Analytical Unifying Approach for Outage Capacity Achieved in SIMO and MISO Broadband Satellite Channel Configurations”, in Proc. *3<sup>rd</sup> European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP2009)*, Berlin, Germany, March 2009.
- [Σ10] A.D. Panagopoulos, **K.P. Liolis**, and P.-D.M. Arapoglou, “Dynamic channel modeling of line-of-sight mobile satellite links at Ku band and above”, in Proc. *ESA Workshop on Radiowave Propagation Models, Tools and Data for Space Systems*, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, December 2008.
- [Σ11] **K.P. Liolis**, and N.S. Alagha, “On 64-APSK Constellation Design Optimization”, in Proc. *10<sup>th</sup> International Workshop on Signal Processing for Space Communications (SPSC2008)*, Rhodes, Greece, October 2008.
- [Σ12] **K.P. Liolis**, I. Andrikopoulos, and P.G. Cottis, “On Statistical Modeling and Performance Evaluation of SIMO Land Mobile Satellite Channels”, in Proc. *4<sup>th</sup> Advanced Satellite Mobile Systems Conference (ASMS 2008)*, Bologna, Italy, August 2008.
- [Σ13] **K.P. Liolis**, A. Bolea-Alamanac, C. Morlet, and A. Ginesi, “Applicability of Fade Mitigation Techniques to Mobile DVB-S2/RCS Satellite Systems: Accent on Railway Scenario”, in Proc. *2007 Int’l Workshop on Satellite and Space Communications (IWSSC2007)*, Salzburg, Austria, September 2007.
- [Σ14] **K.P. Liolis**, A. Bolea-Alamanac, R. Prieto-Cerdeira, A.D. Panagopoulos, and A. Martellucci, “On the Relation between Mobility and Rainfall Effects in Ku/Ka-band Line-of-Sight Land Mobile Satellite Channels: An Analytical Statistical

Approach”, in Proc. *2007 Int’l Workshop on Satellite and Space Communications (IWSSC2007)*, Salzburg, Austria, September 2007.

- [Σ15] **K.P. Liolis**, A.D. Panagopoulos, and P.G. Cottis, “Outage Capacity Statistics of MIMO Satellite Networks Operating at Ka Band and Above”, in Proc. *2006 Ka and Broadband Communications Conference*, Naples, Italy, September 2006.
- [Σ16] **K.P. Liolis**, A.D. Panagopoulos, and P.G. Cottis, “Rician K-Factor Statistics for Broadband Fixed Wireless Access Accurate Channel Modeling”, in Proc. *2006 IEEE Antennas and Propagation Society Int’l Symposium*, Albuquerque, USA, July 2006.
- [Σ17] **K.P. Liolis**, and B.D. Rao, “Application of MIMO Theory to the Analysis of Broadband Fixed Wireless Access Diversity Systems Above 10GHz”, in Proc. *2006 IEEE Antennas and Propagation Society Int’l Symposium*, Albuquerque, USA, July 2006.
- [Σ18] Z. Cao, N. Das, **K.P. Liolis**, M. Almgren, and B.D. Rao, “System Level Design Methodology for Wireless MIMO Prototyping”, in Proc. *2006 IEEE Radio and Wireless Symposium (RAWCON)*, San Diego, USA, January 2006.
- [Σ19] **K.P. Liolis**, A.D. Panagopoulos, and P.G. Cottis, “Use of Cell-Site Diversity to Mitigate Co-Channel Interference in 10-66GHz Broadband Fixed Wireless Access Networks”, **3<sup>rd</sup> Place Best Student Paper Award**, in Proc. *2006 IEEE Radio and Wireless Symposium (RAWCON)*, San Diego, USA, January 2006.

➤ **Κεφάλαια σε Διεθνή Επιστημονικά Βιβλία:**

- [B1] **K.P. Liolis**, R. De Gaudenzi, N. Alagha, A. Guillen i Fabregas, and A. Martinez, “Amplitude Phase Shift Keying Constellation Design and its Applications to Satellite Digital Video Broadcasting”, *Digital Video*, ISBN 978-3-902613-44-8, IN-TECH, 2010.

➤ **Τεχνικές Συνεισφορές σε Διεθνείς Οργανισμούς Προτυποποίησης Τηλεπικοινωνιών:**

- [ΠΡ1] NTUA/Greece, “A Unified Methodology for the Prediction of the Impact of the Spatial Non-Uniformity of Rain Attenuation in Multiple-Hop Terrestrial Networks”, **ITU-R**, Study Group 3, Working Party 3M, Doc. 3M/21-E, May 2008.

- [**ΠΠ2**] ESA/ESTEC, “**Mobile DVB-RCS: DVB-S2 LDPC Code Shortening for Latency Reduction in SCPC-based Return Link Mode**”, RCS0798, TM-RCS Ad-Hoc Group Meeting 44, September 2007.
- [**ΠΠ3**] ESA/ESTEC, “**Mobile DVB-RCS: Applicability of Fade Mitigation Techniques to Mobile DVB-S2/RCS Systems: Focus on Railway Scenario**”, RCS0736, TM-RCS Ad-Hoc Group Meeting 41, April 2007.
- [**ΠΠ4**] ESA/ESTEC, “ESA Work on the Assessment of **DVB-SH** Solutions for B3GHz Systems”, SSP0120, TM-SSP Ad-Hoc Group Meeting 09, November 2006.
- [**ΠΠ5**] ESA/ESTEC, “ESA Work on the Assessment of **DVB-SH** Solutions for B3GHz Systems”, SSP0100, TM-SSP Ad-Hoc Group Meeting 08, October 2006.
- [**ΠΠ6**] NTUA/Greece, “Physical prediction model for differential rain attenuation distribution of converging terrestrial links”, **ITU-R**, Study Group 3, Working Party 3M, Annex 12 to 3M/178, November 2006.
- [**ΠΠ7**] ESA/ESTEC, “ESA Work on the Assessment of **DVB-SH** Solutions for B3GHz Systems”, SSP0079, TM-SSP Ad-Hoc Group Meeting 07, September 2006.
- [**ΠΠ8**] ESA/ESTEC, “ESA Work on the Assessment of **DVB-SH** Solutions for B3GHz Systems”, SSP0062, TM-SSP Ad-Hoc Group Meeting 06, September 2006.

➤ **Άλλες Διεθνείς Δημοσιεύσεις, Τεχνικές Αναφορές και Μελέτες:**

- [**A1**] FP7 ICT European Technology Platforms (eMobility, EPoSS, **ISI**, NEM, NESSI, Photonics21), “The Cross-ETP Strategic Research Agenda on Future Internet”, version 1.1, January 2010 [Available on-line at EU Future Internet portal: <http://www.future-internet.eu> ]
- [**A2**] FP7 ICT European Technology Platforms (eMobility, EPoSS, **ISI**, NEM, NESSI), “The Cross-ETP Vision Document on Future Internet”, version 1.0, January 2009 [Available on-line at EU Future Internet portal: <http://www.future-internet.eu> ]
- [**A3**] **K.P. Liolis**, and N.S. Alagha, “Optimization Results for 64-APSK Constellation Design”, Technical Consultancy Report to EU Industry, ESA/ESTEC, Noordwijk, Netherlands, October 2007.

➤ **Διατριβές:**

- [Δ1] **Κ.Π. Λιώλης**, “Μείωση Επίδρασης Παρεμβολών σε Κυψελωτό Δίκτυο LMDS με Χρήση Τεχνικής Διαφορικής Λήψης Κελιού”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Ιούλιος 2004.
- [Δ2] **Κ.Ρ. Liolis**, “Applicability of MIMO Techniques to Millimeter-Wave Broadband Fixed Wireless Access Systems”, *M.Sc. Thesis*, University of California-San Diego (UCSD), CA, USA, March 2006.