



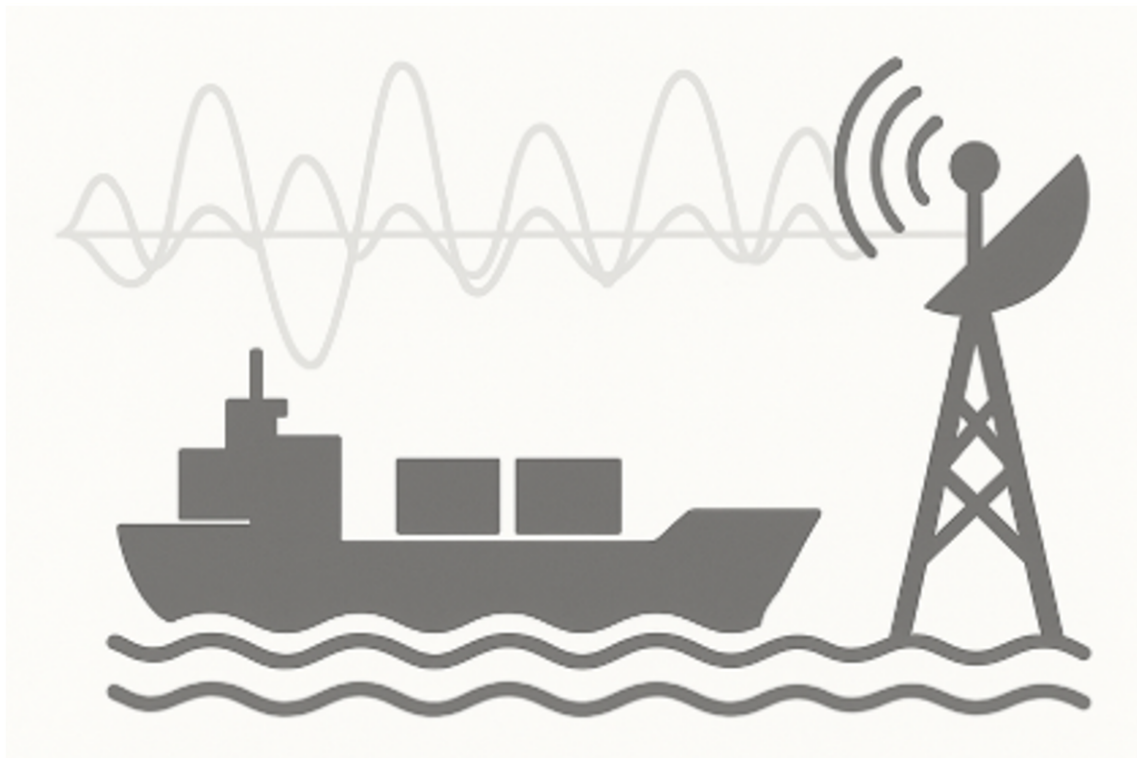
ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη Απόδοσης Προσαρμοστικής Διαμόρφωσης
και Κωδικοποίησης σε Συστήματα Επιγειων Ναυτικών
Επικοινωνιών»



Της φοιτήτριας
Αναστασία Πουλοπούλου
Αρ. Μητρώου: 517119

Επιβλέπων
Αθανάσιος Ιωσηφίδης
Αναπληρωτής Καθηγητής

15 Σεπτεμβρίου 2025

Τίτλος Δ.Ε. Μελέτη Απόδοσης Προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης
σε συστήματα επιγείων ναυτικών επικοινωνιών

Κωδικός Δ.Ε. 24243

Όνοματεπώνυμο φοιτητή/ών Αναστασία Πουλοπούλου

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Αθανάσιος Ιωσηφίδης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 03/10/2024

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 12/09/2025

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας Αναστασία Πουλοπούλου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Στην οικογένειά μου, με αγάπη και ευγνωμοσύνη για τη στήριξη σε κάθε μου βήμα.

Πρόλογος

Η επιλογή του θέματος της παρούσας πτυχιακής εργασίας, που αφορά τη μελέτη της απόδοσης προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης σε συστήματα επίγειων ναυτικών επικοινωνιών, βασίστηκε στο ενδιαφέρον μου για τον τομέα των τηλεπικοινωνιών και στις προκλήσεις που παρουσιάζονται στον ναυτιλιακό κλάδο. Η αξιοπιστία και η αποδοτικότητα των επικοινωνιακών συστημάτων αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τη ναυτιλία, γεγονός που καθιστά το αντικείμενο επίκαιρο και ουσιαστικό. Μέσα από την εκπόνηση της εργασίας αυτής μου δόθηκε η ευκαιρία να εμβαθύνω σε τεχνικές έννοιες που σχετίζονται με τη διαμόρφωση και την κωδικοποίηση, καθώς και να κατανοήσω καλύτερα την εφαρμογή τους σε πραγματικά περιβάλλοντα ναυτιλιακών επικοινωνιών. Επιπλέον, η μελέτη συνέβαλε στην ανάπτυξη δεξιοτήτων έρευνας, ανάλυσης και σύνθεσης, οι οποίες θεωρώ ότι θα αποτελέσουν πολύτιμο εφόδιο για την επαγγελματική μου πορεία.

Περίληψη

Το VDE-TER (VHF Data Exchange — Terrestrial) είναι το επίγειο υποσύστημα του VDES, που αξιοποιεί τη ζώνη VHF για ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ πλοίων και παράκτιων σταθμών. Για αξιόπιστη επικοινωνία σε μεταβαλλόμενες θαλάσσιες συνθήκες, το φυσικό επίπεδο υποστηρίζει πολλαπλούς συνδυασμούς διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (MCS), δηλαδή διαφορετικούς τρόπους μετάδοσης των bits. Απαιτείται επίσης πολιτική προσαρμογής (AMC), ώστε το σύστημα να αλλάζει MCS ανάλογα με την ποιότητα σήματος.

Στην εργασία αναπτύσσεται πλαίσιο αξιολόγησης σε MATLAB που συνδέει τη φυσική επίδοση με επιχειρησιακά μεγέθη. Στο πρώτο στάδιο υπολογίζονται καμπύλες SNR (λόγος σήματος προς θόρυβο) για τα τυποποιημένα LinkIDs (διαφορετικά MCS). Οι καμπύλες αφορούν κανάλι θορύβου (AWGN). Από αυτές εξάγονται κατώφλια SNR για στόχο PER (Packet Error Rate) $\leq 1\%$, τα οποία ορίζουν την πολιτική αντιστοίχισης SNR→MCS.

Στο δεύτερο στάδιο η AMC εφαρμόζεται σε μοντέλα διάδοσης κατά μήκος διαδρομής: two-ray και three-ray έως τη γραμμή οπτικής επαφής (LOS), και απλοποιημένο duct-only πέραν αυτής. Έτσι υπολογίζεται το SNR και στη συνέχεια ο ρυθμός μετάδοσης throughput (επιτυχώς παραληφθέντα bits ανά δευτερόλεπτο). Εξετάζονται δύο περιπτώσεις: (i) χωρίς στοχαστικές διακυμάνσεις, όπου προκύπτουν καθαρά σκαλοπάτια throughput με σαφή σημεία αλλαγής MCS, και (ii) με Rayleigh fading (τυχαίες διακυμάνσεις λόγω πολλαπλών διαδρομών), όπου οι μεταβάσεις «μαλακώνουν» και ο μέσος ρυθμός μειώνεται κοντά στο όριο LOS.

Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τον ρόλο της επιλογής MCS βάσει SNR και την εξάρτηση του throughput από την απόσταση. Παρέχεται επίσης εργαλείο χαρτογράφησης throughput από οποιοδήποτε προφίλ SNR, χρήσιμο για μελέτες link budget και ανάλυση κάλυψης. Το πλαίσιο γεφυρώνει μετρήσεις PER με AMC και διάδοση, αποδίδοντας throughput με τρόπο διαφανή και επεκτάσιμο.

Λέξεις-κλειδιά: VDE-TER, AMC, MCS, PER, SNR, AWGN, two/three-ray, evaporation duct, throughput.

«Performance Study of Adaptive Modulation and Coding in Terrestrial
Maritime Communication Systems»

«Anastasia Pouloupoulou»

Abstract

VDE-TER (VHF Data Exchange — Terrestrial) is the terrestrial component of VDES, using the VHF band for data exchange between ships and coastal stations. To maintain reliable communication under varying maritime conditions, the physical layer supports multiple Modulation and Coding Schemes (MCS), i.e., different ways of transmitting bits. An Adaptive Modulation and Coding (AMC) policy is required so that the system changes MCS according to channel quality.

This work develops an evaluation framework in MATLAB that links physical-layer performance with operational metrics. In the first stage, SNR (Signal-to-Noise Ratio) curves are computed for standardized LinkIDs (different MCS options) under an additive white Gaussian noise (AWGN) channel. From these, SNR thresholds are extracted for a target PER (Packet Error Rate) $\leq 1\%$, which define the mapping policy SNR \rightarrow MCS.

In the second stage, AMC is applied to propagation models along a route: two-ray and three-ray up to the line-of-sight (LOS), and a simplified duct-only model beyond. This yields the distance-dependent SNR and then the resulting throughput (successfully delivered bits per second). Two cases are studied: (i) without stochastic fading, where throughput shows clear step-like transitions with distinct MCS change points, and (ii) with Rayleigh fading (random fluctuations due to multipath propagation), where transitions are smoothed and the average throughput decreases near the LOS limit.

Results highlight the critical role of SNR-based MCS selection and the strong dependence of throughput on distance. An autonomous tool is also provided that maps throughput from any SNR profile, useful for link budget studies and coverage analysis. Overall, the framework bridges PER measurements with AMC and propagation to deliver throughput estimates in a transparent and extensible way.

Keywords: VDE-TER, AMC, MCS, PER, SNR, AWGN, two/three-ray, evaporation duct, throughput.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου για την καθοδήγηση, την υποστήριξη και τις χρήσιμες συμβουλές που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική τόσο σε επιστημονικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Επίσης, ευχαριστώ την οικογένειά μου για την αδιάκοπη στήριξη, την υπομονή και την ενθάρρυνσή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Χωρίς τη βοήθειά τους, η ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας δεν θα ήταν εφικτή. Κλείνοντας, θα ήθελα να υπογραμμίσω ότι η συμβολή όλων υπήρξε ουσιαστική για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	iv
Περίληψη	v
Abstract	vi
Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Σχημάτων	xii
Κατάλογος Πινάκων	xiii
Συντομογραφίες	xv
1 Εισαγωγή	1
1.1 Ιστορική Αναδρομή και Σύγχρονες Ανάγκες	1
1.2 Γενικό Πλαίσιο Ναυτικών Επικοινωνιών	2
1.3 Επίγειο Ναυτικό Κανάλι - VHF	3
1.4 Πρότυπο VDE-TER και Προσαρμοστική Διαμόρφωση - Κωδικοποίηση AMC	4
1.5 Αντικείμενο και Δομή της Εργασίας	5
2 Περιγραφή του Πρωτοκόλλου VDE-TER	7
2.1 Ορισμός και Δομή του VDES	7
2.2 Υποσυστήματα VDES και Λειτουργίες	8
2.3 Υποσύστημα VDE-TER	10
2.4 Αρχιτεκτονική και Δομή Πλαισίων	12
2.5 Μοντέλα Διάδοσης Σήματος σε Θαλάσσιο Περιβάλλον	14
2.5.1 Μοντέλο Two-Ray	14
2.5.2 Μοντέλο Three-Ray	15
2.5.3 Μοντέλο Beyond-Line-of-Sight (B-LoS)	16
2.5.4 Πρακτικές Επιπτώσεις στη Σχεδίαση και Διαστασιολόγηση Συστημάτων VDE-TER	17
2.6 Τεχνικά Χαρακτηριστικά, Μέθοδοι Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης	18
2.6.1 Κωδικοποίηση - Turbo Codes	19
2.6.2 Interleaving	23

2.6.3	Puncturing	25
2.6.4	Αποκωδικοποίηση - Turbo Codes	27
2.6.5	Συνολική Δομή Πλαισίου/Πακέτου στο VDE-TER (End-to-End Frame/Package Structure)	28
2.6.6	Μηχανισμός Adaptive Modulation and Coding (AMC)	29
3	Μοντελοποίηση του Συστήματος	31
3.1	Εισαγωγή	31
3.2	Παράμετροι MCS και Θερμικός Θόρυβος	32
3.2.1	Ρυθμός Συμβόλων (Symbol Rate, R_s , σε ksp/s)	33
3.2.2	Σχήμα Διαμόρφωσης (Modulation Order, M)	33
3.2.3	Λόγος Κωδικοποίησης (Code Rate, r)	35
3.2.4	Μήκος Πληροφορίας (Frame Length, L)	36
3.3	Interleaving, Puncturing και Turbo Coding	37
3.3.1	Interleaving	37
3.3.2	Puncturing και Προσαρμογή Ρυθμού Κωδικοποίησης	38
3.4	Μετάδοση και Αποκωδικοποίηση	40
3.5	Υπολογισμός Packet Error Rate (PER) ανά Link ID	41
3.6	Απόδοση Συστήματος	42
3.7	Μοντέλα Διάδοσης Καναλιού	43
3.7.1	Μοντέλα Δύο και Τριών Διαδρομών	43
3.7.2	Μοντέλο Beyond-Line-of-Sight (B-LoS)	44
3.8	Πολιτική MCS-SNR \rightarrow LinkID για Στόχο PER 1%	45
3.8.1	Κανόνες Επιλογής	45
3.8.2	Υλοποίηση	45
3.8.3	Σχόλιο Επί των Αποτελεσμάτων	46
3.9	Throughput vs Απόσταση (Χωρίς Rayleigh fading)	46
3.9.1	Μοντέλο Διάδοσης (Piecewise)	47
3.9.2	Επιλογή MCS και Throughput	47
3.10	Throughput vs Απόσταση (Με Rayleigh fading)	48
3.11	Throughput vs Απόσταση — post-processing («Αυτόνομο»)	48

4	Ανάλυση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης	50
4.1	PER (Packet Error Rate έναντι SNR)	50
4.2	Path Loss Two-ray και Three-ray Model	51
4.2.1	Σύγκριση 3-ray Έναντι 2-ray (Διαφορά Απωλειών)	52
4.3	Throughput vs SNR	52
4.4	Αποτελέσματα των Περιπτώσεων Throughput vs Απόσταση	53
4.4.1	Baseline: Χωρίς Rayleigh	54
4.4.2	Με Rayleigh fading	57
4.4.3	Αυτόνομο / Post-processing	61
4.4.4	Συγκριτική Ανάλυση	63
4.5	Γενικό Συμπέρασμα	64
4.6	Επίλογος	64
5	Συμπεράσματα – Συζήτηση	65
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	66
A	Κώδικας Αποτελεσμάτων AWGN (results.m)	68
B	Κώδικας Πολιτικής MCS (bestLinkIDkaluteroFigure.m)	69
Γ	Κώδικας Καναλιού (bLos.m)	73
Δ	Κώδικας Υπολογισμού Απωλειών Διάδοσης: Two-ray / Three-ray / ITU(PathLossN.m)	78
E	Κώδικας Throughput vs Απόσταση χωρίς Rayleigh (ThroughputVSdistanceNo-Rayleigh.m)	80
Z	Κώδικας Throughput vs Απόσταση με Rayleigh (ThroughputVSdistanceWithRayleigh.m)	90
H	Κώδικας Throughput vs Απόσταση Αυτόνομο (ThroughputVSdistanceSTANDALONE.m)	98
Θ	Κεντρικός Κώδικας VDE-TER: Turbo/Interleaver/Puncturing και PER (VDEter.m)	105
I	Παράδειγμα soft-LLR Αποδιαμόρφωσης (PSK) και Turbo Αποκωδικοποίησης (testpkmod.m)	108
K	Υπολογισμός Απωλειών Διάδοσης: Two-ray / Three-ray / ITU (fig5pathloss.m)	111

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Αρχιτεκτονική και λειτουργίες του συστήματος VHF Data Exchange System (VDES). Απεικονίζονται οι βασικές λειτουργικές διασυνδέσεις μεταξύ επίγειων και δορυφορικών επικοινωνιών, όπως καθορίζονται στο πρότυπο ITU-R M.2092-1. Πηγή: ITU-R M.2092-1, Figure 1 [7].	7
2.2	Κατανομή και χρήση συχνοτήτων στα υποσυστήματα του VDES σύμφωνα με το Παράρτημα 18 του ITU-R Radio Regulations. Εμφανίζονται τα κανάλια που διατίθενται για VDE-TER, VDE-SAT, AIS/ASM, καθώς και οι διαχωρισμοί για Long Range AIS και κανάλια κινδύνου (<i>Distress</i>). Πηγή: ITU-R M.2092-1, Figure 2 [7].	10
2.3	Γενική δομή slot για επίγεια μετάδοση. Περιλαμβάνει τα τμήματα ramp-up, syncword, Link ID, data symbols, ramp down και guard, καθώς και την τοποθέτηση των δεδομένων χρήστη, padding και CRC. Πηγή: ITU-R M.2092-1, Figure 4 [7].	13
2.4	Σύγκριση των απωλειών διαδρομής (path loss) μεταξύ two-ray και three-ray propagation model για ναυτικό κανάλι. Το τριών διαδρομών μοντέλο (κόκκινη καμπύλη) εμφανίζει μεγαλύτερη διακύμανση λόγω επιπρόσθετων φαινομένων fading και ducting. (Πηγή: [5]).	16
2.5	Διάγραμμα 3GPP2 Turbo code encoder με δύο RSC κωδικοποιητές, interleaver και puncturing.	20
2.6	Δομή 3GPP2 RSC encoder με τερματισμό, τρεις καταχωρητές καθυστέρησης και εξόδους X, Y_0, Y_1 .	20
2.7	Διάγραμμα 3GPP2 interleaver adresser calculator.	20
2.8	Δομή Recursive Systematic Convolutional (RSC) κωδικοποιητή σύμφωνα με το ITU-R M.2092-1 (Figure 8).	23
3.1	Σύνοψη μεθοδολογίας Κεφαλαίου 3: από την προσομοίωση PHY και τις καμπύλες PER(SNR) στην πολιτική MCS και από τα μοντέλα διάδοσης στον υπολογισμό $SNR(d)$. Η σύζευξη δίνει την επιλογή $LinkID^*(d)$ και το τελικό $T(d)$.	31
3.2	Πολιτική επιλογής MCS για στόχο $PER \leq 1\%$. Τα έγχρωμα τμήματα γαμίζουν μέχρι τη γραμμή σκαλοπατιού του αντίστοιχου $LinkID$. Οι κατακόρυφες διακεκομμένες γραμμές και οι ετικέτες ($xx.xx$ dB) σηματοδοτούν τα σημεία αλλαγής MCS.	46
4.1	PER vs SNR in AWGN Channel	50
4.2	Two-ray and Three-ray Path Loss Models	51
4.3	Διαφορά απωλειών $\Delta PL = PL_{3-ray} - PL_{2-ray}$ ως προς την απόσταση. Αρνητικές τιμές (πράσινο) υποδηλώνουν όφελος από το evaporation duct (μικρότερες απώλειες), ενώ θετικές (κόκκινο) ζημία.	52
4.4	Throughput vs SNR in AWGN Channel	53
4.5	Throughput κατά μήκος διαδρομής (χωρίς fading). Οι μεταβάσεις MCS εμφανίζονται ως ευδιάκριτα «σκαλοπάτια».	54
4.6	Throughput κατά μήκος διαδρομής (χωρίς fading) με πολιτική $PER \leq 1\%$ — μεγέθυνση στο πρώτο 1 km ώστε να αναδειχθούν οι γρήγορες μεταβολές κοντά στον πομπό.	55
4.7	Ρυθμαπόδοση $T(d)$ αν «επιβληθεί» κάθε $LinkID$ στην ίδια τροχιά SNR. Οι καμπύλες δείχνουν το ωφέλιμο εύρος αποστάσεων για κάθε MCS.	55
4.8	Best-case envelope και ενεργό MCS ($LinkID$) σε όλο το εύρος αποστάσεων.	56

4.9	Μεγέθυνση στο πρώτο 1 km (zoom 0–1 km).	56
4.10	Μέγιστο <i>throughput</i> ανά απόσταση (best-case envelope) και το αντίστοιχο ενεργό MCS (LinkID). Οι χρωματισμένες ζώνες και οι κατακόρυφες γραμμές δείχνουν τα σημεία αλλαγής MCS.	56
4.11	<i>Throughput</i> κατά μήκος διαδρομής με Rayleigh fading.	57
4.12	Τμήμα 0–20 km.	58
4.13	Τμήμα 20–50 km.	58
4.14	<i>Throughput</i> κατά μήκος διαδρομής με Rayleigh fading (πολιτική $PER \leq 1\%$) σε δύο τμήματα: (a) 0–20 km και (b) 20–50 km. Σε κάθε υπο-σχήμα εμφανίζονται οι ζώνες ενεργού MCS (LinkID), οι μεταβάσεις (διακεκομμένες κατακόρυφες) και η καμπύλη <i>throughput</i>	58
4.15	Τμήμα 50–80 km.	59
4.16	Μεγέθυνση 50–55 km (zoom).	59
4.17	<i>Throughput</i> με Rayleigh fading ($PER \leq 1\%$) στο εύρος 50–80 km και λεπτομερές zoom στο 50–55 km.	59
4.18	<i>Throughput</i> ανά LinkID σε παρουσία fading.	60
4.19	Μέγιστο <i>throughput</i> ανά απόσταση με fading.	60
4.20	<i>Throughput</i> κατά μήκος διαδρομής (πολιτική $PER \leq 1\%$). Οι ετικέτες L11/L19 δείχνουν το ενεργό MCS στα αντίστοιχα τμήματα.	61
4.21	Ρυθμαπόδοση $T(d)$ αν «επιβληθεί» κάθε LinkID κατά μήκος της ίδιας τροχιάς SNR. Οι καμπύλες δείχνουν την ιδανική συμπεριφορά ανά MCS χωρίς επιλογή.	62
4.22	Μέγιστο <i>throughput</i> ανά απόσταση (envelope). Σε κάθε d παίρνουμε το καλύτερο $T(d)$ μεταξύ όλων των LinkIDs.	62
4.23	Σύγκριση $T_{\max}(d)$ χωρίς/με Rayleigh.	63

Κατάλογος Πινάκων

2.1	Τυπικές συχνότητες καναλιών VDE-TER για Lower και Upper Leg	11
2.2	Βασικές Παράμετροι Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης του VDE-TER ανά Link ID. Πηγή: ITU-R M.2092-1, Annex 4, Table 8 [7].	12
2.3	Βασικές παράμετροι puncturing, FEC και padding ανά Link ID σύμφωνα με το ITU-R M.2092-1, Table 8 [7].	22
2.4	Παράμετροι interleaver και puncturing για διαφορετικά μήκη πληροφορίας / code rates	25
2.5	Puncturing patterns for data bit periods	26
2.6	Puncturing and repetition patterns for tail bit periods (last 6 clocks) σύμφωνα με το ITU-R M.2092-1, Annex 4, Table 6	27

3.1	Κύρια χαρακτηριστικά των Link IDs του πρωτοκόλλου VDE-TER, όπως ορίζονται στο ITU-R M.2092-1 (Annex 4) [7].	34
-----	---	----

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΠΗΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
VDES	VHF Data Exchange System
VDE-TER	VHF Data Exchange — Terrestrial (επίγεια διεπαφή του VDES)
PHY	Physical Layer (φυσικό επίπεδο)
MCS	Modulation and Coding Scheme
AMC	Adaptive Modulation and Coding (προσαρμοστική διαμόρφωση/κωδικοποίηση)
SNR	Signal-to-Noise Ratio (λόγος σήματος προς θόρυβο), σε dB
PER	Packet Error Rate (πιθανότητα σφάλματος πακέτου)
BER	Bit Error Rate (πιθανότητα σφάλματος bit)
AWGN	Additive White Gaussian Noise
LoS	Line-of-Sight (οπτική επαφή)
B-LoS	Beyond Line-of-Sight (πέραν οπτικής επαφής)
PL	Path Loss (απώλειες διάδοσης)
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power
kTB	Θερμικός θόρυβος $10 \log_{10}(kT_{\text{sys}}B)$
NF	Noise Figure (συντελεστής θορύβου)
Tx/Rx	Transmitter / Receiver (πομπός / δέκτης)
dB	Decibel (λογαριθμική μονάδα)
dBW	Decibel-watt (αναφορά στο 1 W)
dBi	decibel-isotropic (κέρδος ως προς ισοτροπική κεραία)
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
8-PSK	8-ary Phase Shift Keying
16-QAM	16-Quadrature Amplitude Modulation
FEC	Forward Error Correction
CRC	Cyclic Redundancy Check
LLR	Log-Likelihood Ratio
MAP	Maximum A Posteriori (αλγόριθμος αποκωδικοποίησης)
Rayleigh	Rayleigh fading (διάλειψη Rayleigh)
Rician	Rician fading (διάλειψη Rician)
d_{LOS}	Απόσταση γραμμής οπτικής επαφής
R	Ακτίνα Γης
R_s	Ρυθμός συμβόλων (symbol rate)

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Ιστορική Αναδρομή και Σύγχρονες Ανάγκες

Η επικοινωνία στη θάλασσα έχει μακράιωνη ιστορία, με τις πρώτες μορφές της να βασίζονται σε πρωτόγονες οπτικές μεθόδους, όπως σήματα καπνού, φωτεινά σήματα και ναυτικές σημαίες, προτού σταδιακά δώσουν τη θέση τους σε πιο εξελιγμένες τεχνολογίες επικοινωνίας [1,2]. Στις αρχές του 20ού αιώνα, η εμφάνιση της ασύρματης επικοινωνίας με ραδιοκύματα – με πρωτοπόρο τον Guglielmo Marconi – επέφερε μια επαναστατική αλλαγή, καθιστώντας δυνατή την μετάδοση μηνυμάτων Morse χωρίς καλώδια μεταξύ πλοίων και ακτών και βελτιώνοντας δραστικά την ασφάλεια και τον συντονισμό των ναυτικών επιχειρήσεων [2]. Στη συνέχεια, κατά τον 20ό αιώνα, οι τεχνολογικές εξελίξεις οδήγησαν στην ευρεία υιοθέτηση των ναυτικών συστημάτων VHF για επικοινωνία πλοίου-προς-πλοίο και πλοίου-προς-ξηρά, προσφέροντας μεγαλύτερη αξιοπιστία και εμβέλεια επικοινωνίας, ενώ παράλληλα οι δορυφορικές επικοινωνίες που εμφανίστηκαν προς τα τέλη του αιώνα επέκτειναν την κάλυψη των θαλάσσιων επικοινωνιών σε παγκόσμιο επίπεδο [1,2]. Επιπλέον, στις αρχές του 21ου αιώνα εισήχθη το Σύστημα Αυτόματης Αναγνώρισης (AIS), το οποίο έκτοτε χρησιμοποιείται ευρέως για την αυτόματη μετάδοση πληροφοριών ταυτοποίησης, θέσης και πορείας σκαφών, ενισχύοντας σημαντικά την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας μέσω της καλύτερης παρακολούθησης της κυκλοφορίας των πλοίων [1]. Η σύγχρονη ναυτιλία αποτελεί θεμέλιο του διεθνούς εμπορίου, καθώς πάνω από 80% του παγκόσμιου εμπορίου μεταφέρεται διά θαλάσσης [3]. Η τόσο μεγάλη εξάρτηση από τις θαλάσσιες μεταφορές έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη ανάγκη για ιδιαίτερα αξιόπιστες τηλεπικοινωνίες υψηλής χωρητικότητας και ταχύτητας, ώστε να ανταποκρίνονται στις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις των σύγχρονων ναυτικών επιχειρήσεων [4].

Οι σύγχρονες απαιτήσεις στις ναυτικές επικοινωνίες επικεντρώνονται στην επίτευξη υψηλών ρυθμών μεταφοράς δεδομένων σε συνδυασμό με υψηλή αξιοπιστία και ασφάλεια στην ανταλλαγή πληροφοριών, δίνοντας παράλληλα έμφαση στην ανθεκτικότητα του δικτύου απέναντι σε αντίξοες συνθήκες (όπως παρεμβολές λόγω κακοκαιρίας ή ανακλάσεις των σημάτων στην επιφάνεια της θάλασσας) [5,6]. Αυτή η ανάγκη για προηγμένες δυνατότητες επικοινωνίας γίνεται ακόμη πιο επιτακτική εξαιτίας της αυξανόμενης πολυπλοκότητας των εφαρμογών που χρησιμοποιούνται στα πλοία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η αυτόνομη ναυσιπλοΐα, η οποία απαιτεί αδιάλειπτη και αξιόπιστη συνδεσιμότητα για την ασφαλή και αποδοτική λειτουργία της [4]. Επιπλέον, η σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση της θέσης και της ταχύτητας των πλοίων μέσω προηγμένων δορυφορικών και επίγειων συστημάτων απαιτεί δίκτυα μεγαλύτερης χωρητικότητας και μειωμένης καθυστέρησης μετάδοσης, ώστε να διασφαλίζεται η άμεση απόκριση σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης [1]. Τέλος, η ολοένα αυξανόμενη χρήση έξυπνων συστημάτων πληροφόρησης και ψυχαγωγίας στα πλοία – όπως η παροχή ευρυζωνικής πρόσβασης στο διαδίκτυο και υπηρεσιών πολυμέσων για το πλήρωμα και τους επιβάτες – εντείνει περαιτέρω την απαίτηση για πιο εξελιγμένα και ευέλικτα δίκτυα επικοινωνιών [7]. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κατανάλωση δεδομένων στους εμπορικούς στόλους έχει εκτοξευθεί τις τελευταίες χρονίες, γεγονός που αντικατοπτρίζει την αυξανόμενη εξάρτηση της ναυτιλιακής βιομηχανίας από ευρυζωνικές συνδέσεις υψηλής ταχύτητας [8].

1.2 Γενικό Πλαίσιο Ναυτικών Επικοινωνιών

Οι ναυτικές επικοινωνίες συνιστούν αναγκαίο στοιχείο του διεθνούς εμπορίου, υποστηρίζοντας κρίσιμες λειτουργίες που άπτονται της ασφάλειας της ανθρώπινης ζωής στη θάλασσα (SO-LAS), της αποδοτικότητας των θαλάσσιων μεταφορών, αλλά και της προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος [1,9]. Η ασφαλής και αποτελεσματική πλοήγηση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αξιοπιστία και τη διαθεσιμότητα των ναυτικών συστημάτων επικοινωνίας, τα οποία διασφαλίζουν τη συνεχή ροή πληροφοριών μεταξύ πλοίων, παράκτιων σταθμών και φορέων διαχείρισης θαλάσσιας κυκλοφορίας. Το Διεθνές Κανονιστικό Πλαίσιο, με χαρακτηριστικότερο το SOLAS (Safety of Life at Sea), έχει θεσπίσει αυστηρές απαιτήσεις για την ύπαρξη και λειτουργία συστημάτων επικοινωνιών στα πλοία, ώστε να διασφαλίζεται τόσο η πρόληψη ατυχημάτων όσο και η ταχεία ανταπόκριση σε καταστάσεις κινδύνου [10].

Σταθεροί θεσμοί, όπως το Παγκόσμιο Ναυτικό Σύστημα Κινδύνου και Ασφάλειας - GMDSS , το Αυτόματο Σύστημα Αναγνώρισης - AIS και τα δίκτυα MF/HF/VHF, έθεσαν τις βάσεις για τη διεθνή ναυτική επικοινωνία, παρέχοντας δυνατότητες εντοπισμού, ειδοποίησης κινδύνου και βασικής ανταλλαγής δεδομένων [7, 11]. Ωστόσο, η ραγδαία ψηφιοποίηση της ναυτιλίας, η εισαγωγή των τεχνολογιών ηλεκτρονικής πλοήγησης (e-Navigation) και η εμφάνιση της έννοιας του «Διαδικτύου των Πλοίων - IoS», έχουν αναδείξει νέες απαιτήσεις για τη μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων, σε πραγματικό χρόνο και με υψηλή αξιοπιστία [1]. Η πρακτική εφαρμογή του IoS περιλαμβάνει τη συνεχή μετάδοση δεδομένων από αισθητήρες μηχανής, δεξαμενών καυσίμων και φορτίου προς τα κεντρικά γραφεία, ώστε να επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση κατανάλωσης, πρόβλεψη βλαβών και μείωση εκπομπών [12].

Συγκεκριμένα, οι σύγχρονες εφαρμογές —όπως η ανταλλαγή ψηφιακών χαρτών πλοήγησης, οι προβλέψεις μετεωρολογικών φαινομένων υψηλής ανάλυσης, τα συστήματα ευφυούς διαχείρισης στόλου, η τηλεϊατρική και η απομακρυσμένη παρακολούθηση των συνθηκών φορτίου— απαιτούν ρυθμούς μετάδοσης που υπερβαίνουν κατά πολύ τις δυνατότητες των παραδοσιακών συστημάτων [1,9]. Σε πραγματικές συνθήκες, η τηλεϊατρική μπορεί να αποδειχθεί σωτήρια, καθώς δίνει τη δυνατότητα στο πλήρωμα να επικοινωνεί μέσω βιντεοκλήσης με γιατρούς στη στεριά για άμεση διάγνωση και καθοδήγηση [8]. Παράλληλα, η ανάγκη για αδιάλειπτη και ασφαλή επικοινωνία παραμένει, δεδομένης της αυξημένης εξάρτησης των ναυτιλιακών επιχειρήσεων από ψηφιακές υποδομές.

Οι τεχνολογικοί αυτοί μετασχηματισμοί οδήγησαν τους διεθνείς οργανισμούς, όπως η ITU και ο IMO, στην ανάπτυξη νέων, πιο αποδοτικών προτύπων ψηφιακής επικοινωνίας για τη ναυτιλία. Ένα από τα πλέον σύγχρονα παραδείγματα αυτής της προσπάθειας είναι το VHF Data Exchange System - VDES, το οποίο σχεδιάστηκε ώστε να καλύψει τις αυξημένες απαιτήσεις σε ταχύτητα, αξιοπιστία και ευελιξία, προσφέροντας προηγμένες υπηρεσίες πέραν των δυνατοτήτων των παλαιότερων συστημάτων [4, 7, 11].

Όπως είναι πια φανερό, οι ναυτικές επικοινωνίες εισέρχονται σε μια περίοδο ριζικών μετασχηματισμών, όπου η ασφάλεια, η αποδοτικότητα και η καινοτομία συνυφαίνονται με τις εξελίξεις στην τεχνολογία των ασύρματων συστημάτων και τη διαρκή ανάγκη για μετάδοση δεδομένων σε δύσκολα και απρόβλεπτα θαλάσσια περιβάλλοντα [1,9]. Η τάση αυτή ευθυγραμμίζεται με τις πρωτοβουλίες για «πράσινη ναυτιλία», καθώς η αξιοποίηση εξελιγμένων επικοινωνιακών δικτύων υποστηρίζει εφαρ-

μογές εξοικονόμησης καυσίμων και μείωσης εκπομπών CO₂, συμβάλλοντας στην επίτευξη των στόχων του IMO για βιώσιμη ανάπτυξη [13].

1.3 Επίγειο Ναυτικό Κανάλι - VHF

Το κανάλι διάδοσης στη ζώνη των υπερβραχέων κυμάτων (VHF), όπου λειτουργούν τα περισσότερα επίγεια ναυτικά συστήματα, παρουσιάζει ιδιαίτερες προκλήσεις που το διαφοροποιούν σημαντικά από τα αντίστοιχα χερσαία ή αστικά κανάλια [1]. Σε ανοικτές θαλάσσιες εκτάσεις, η διάδοση του σήματος χαρακτηρίζεται κυρίως από την επικράτηση της απευθείας διαδρομής (Line of Sight – LoS), αλλά ταυτόχρονα επηρεάζεται από έντονα φαινόμενα πολλαπλών διαδρομών (multipath) λόγω της ανάκλασης των ραδιοκυμάτων στη θαλάσσια επιφάνεια [9, 11].

Επιπλέον, η ναυτική ζώνη VHF υπόκειται σε μοναδικά ατμοσφαιρικά φαινόμενα που εντείνουν τη μεταβλητότητα της διάδοσης. Σε συγκεκριμένες μετεωρολογικές συνθήκες, ειδικά όταν η υγρασία είναι υψηλή και οι θερμοκρασίες ποικίλλουν με το ύψος, εμφανίζεται το φαινόμενο του ατμοσφαιρικού αγωγού εξάτμισης - evaporation duct. Οι αγωγοί αυτοί δημιουργούν στρώματα πάνω από τη θάλασσα που “παγιδεύουν” τα ραδιοκύματα, επιτρέποντας τη μετάδοσή τους σε αποστάσεις πολύ μεγαλύτερες του οπτικού ορίζοντα - BLoS [1, 9]. Η ύπαρξη evaporation ducts μπορεί να οδηγήσει είτε σε ενίσχυση είτε σε αποδυνάμωση του σήματος, μεταβάλλοντας το μοτίβο της διάδοσης από ώρα σε ώρα ή και λεπτό σε λεπτό.

Η συμβολή της απευθείας διαδρομής, της αντανάκλασης από την κυματώδη θαλάσσια επιφάνεια και της διάδοσης μέσω αγωγού οδηγεί σε ένα πολύπλοκο σήμα στον δέκτη, το οποίο αποτελεί άθροισμα πολλών χρονικά και χωρικά μεταβαλλόμενων συνιστωσών. Το αποτέλεσμα είναι οι έντονες, συχνά ταχείες διακυμάνσεις στην ισχύ του λαμβανόμενου σήματος και στη σηματοθορυβική σχέση - SNR, φαινόμενο γνωστό ως διαλείψεις (fading) [1, 9].

Επιπρόσθετα, στο ναυτικό κανάλι εμφανίζονται φαινόμενα όπως το selective fading (συχνότητα-επιλεκτική διαλείπουσα), εξαιτίας της μεγάλης απόστασης μεταξύ πομπού-δέκτη και της κυματώδους φύσης του θαλάσσιου υποβάθρου. Παράλληλα, η απουσία πυκνής αστικής ανάκλασης και η “φτωχή” διασπορά καθιστούν το κανάλι χωρικά αραιό, δηλαδή με λίγες αλλά έντονες διαδρομές. Ταυτόχρονα, παρατηρούνται φαινόμενα Doppler, λόγω της σχετικής ταχύτητας πλοίων και κυμάτων, τα οποία προκαλούν επιπρόσθετες διακυμάνσεις στη συχνότητα του σήματος [1, 5, 9].

Η πολυπλοκότητα του ναυτικού καναλιού αντικατοπτρίζεται και στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη και προσομοίωσή του. Τα κλασικά μοντέλα δύο ή τριών ακτίνων (two-ray, three-ray), τα οποία λαμβάνουν υπόψη τόσο την απευθείας διαδρομή όσο και τις ανακλάσεις (και στον δεύτερο τύπο την επίδραση του evaporation duct), θεωρούνται βασικά για τον υπολογισμό των απωλειών διάδοσης (path loss), της εμβέλειας και της επίδοσης των επικοινωνιακών συστημάτων [1, 4, 11].

Το επίγειο ναυτιλιακό κανάλι VHF:

- Παρουσιάζει έντονη χρονική και χωρική μεταβλητότητα,

- Εμφανίζει σοβαρά φαινόμενα fading που δυσχεραίνουν τη σταθερή και αξιόπιστη επικοινωνία,
- Επηρεάζεται έντονα από περιβαλλοντικούς παράγοντες (κύματα, υγρασία, θερμοκρασία, αιολικές συνθήκες),
- Απαιτεί προσαρμοστικές τεχνικές (AMC) για να μεγιστοποιηθεί η αξιοπιστία και η χωρητικότητα του συστήματος.

Γι' αυτό και τα συστήματα σταθερού ρυθμού μετάδοσης, που σχεδιάστηκαν για πιο "στατικά" επίγεια περιβάλλοντα, αδυνατούν να προσφέρουν αξιόπιστη και αποδοτική επικοινωνία στο μεταβαλλόμενο ναυτιλιακό περιβάλλον, αναδεικνύοντας την ανάγκη για δυναμική προσαρμογή του συστήματος στα χαρακτηριστικά του καναλιού [1, 4, 5, 9, 11].

1.4 Πρότυπο VDE-TER και Προσαρμοστική Διαμόρφωση - Κωδικοποίηση AMC

Η ανάγκη για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, αυξημένη αξιοπιστία και ευελιξία στις θαλάσσιες επικοινωνίες οδήγησε την ITU στην υιοθέτηση του πρότυπου VDES, που ενσωματώνει προηγμένες τεχνολογίες τόσο στο επίγειο όσο και στο δορυφορικό σκέλος της ναυτιλιακής επικοινωνίας. Το VDE-TER διακρίνεται για την υιοθέτηση σύγχρονων αρχιτεκτονικών σε όλα τα επίπεδα του OSI, με ιδιαίτερη έμφαση στο φυσικό επίπεδο. Σε αυτό το επίπεδο, ενσωματώνονται πολλαπλές επιλογές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (MCS), όπως QPSK, 8-PSK, 16-QAM και διαφορετικά σχήματα εμπρόσθιας διόρθωσης σφαλμάτων (Forward Error Correction - FEC), καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα απαιτήσεων ως προς την ταχύτητα και την αξιοπιστία της ζεύξης [4, 5, 11]. Τα διάφορα "Link IDs" που ορίζονται στο πρότυπο αντιστοιχούν σε συγκεκριμένους συνδυασμούς διαμόρφωσης, ρυθμού συμβόλων και κωδικοποίησης.

Η τεχνολογική καινοτομία που επιτρέπει την αξιοποίηση των MCS είναι η Προσαρμοστική Διαμόρφωση και Κωδικοποίηση. Σημειώνεται ότι το πρότυπο VDES δεν ορίζει συγκεκριμένο μηχανισμό για την επιλογή σχήματος MCS ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού, αφήνοντας αυτήν την προσαρμογή στην υλοποίηση του συστήματος· επομένως, καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει η χρήση της Προσαρμοστικής Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης (AMC) [5]. Η AMC αποτελεί θεμελιώδη στρατηγική στις σύγχρονες ασύρματες επικοινωνίες, αφού δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα να αντιδρά δυναμικά στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του καναλιού [4, 5]. Συγκεκριμένα, ένας πομποδέκτης VDE-TER εκτιμά συνεχώς την ποιότητα του καναλιού, μετρώντας παραμέτρους όπως το SNR, και επιλέγει το βέλτιστο MCS που προσφέρει τη μέγιστη δυνατή ρυθμοαπόδοση (throughput) χωρίς να θυσιάζει την αξιοπιστία της επικοινωνίας.

Για παράδειγμα, όταν επικρατούν ευνοϊκές συνθήκες στο κανάλι (υψηλό SNR, μικρές διαλείψεις), επιλέγονται LinkID με υψηλή πολυπλοκότητα και χαμηλή πλεονάζουσα κωδικοποίηση (π.χ. 16-QAM, code rate 3/4), επιτυγχάνοντας μεγάλους ρυθμούς δεδομένων. Αντίθετα, όταν το κανάλι υποβαθμίζεται λόγω έντονων διαλείψεων (fading), μεγάλης απόστασης ή παρεμβολών, ο αλγόριθμος AMC στρέφεται σε πιο ανθεκτικά σχήματα, όπως QPSK με αυξημένο πλεόνασμα κωδικοποίησης (π.χ. 1/2), μειώνοντας τον ωφέλιμο ρυθμό αλλά διασφαλίζοντας την αξιόπιστη λήψη των δεδομένων [1, 4, 5].

Η υλοποίηση της AMC στο VDE-TER υποστηρίζεται από δύο κύριες προσεγγίσεις: τη στατική προσαρμογή (fixed threshold) , όπου για κάθε προκαθορισμένο όριο SNR επιλέγεται το κατάλληλο MCS [4], και δυναμικές τεχνικές βασισμένες σε μηχανική μάθηση, που ενσωματώνουν αλγορίθμους όπως το Q-learning ή το mARF και βελτιστοποιούν περαιτέρω την επιλογή MCS με βάση πραγματική ανατροφοδότηση από το κανάλι και ιστορικά δεδομένα απόδοσης [4,5].

Τα πλεονεκτήματα της AMC είναι:

- **Εξισορρόπηση ανάμεσα σε ταχύτητα και αξιοπιστία:** Το σύστημα μπορεί, σε δυσμενείς συνθήκες, να “θυσιάσει” προσωρινά τον ρυθμό μετάδοσης ώστε να διατηρήσει τη ζεύξη (LinkID) σε ακραίες συνθήκες, ενώ υπό καλές συνθήκες εκμεταλλεύεται πλήρως το διαθέσιμο περιθώριο για μέγιστη ρυθμοαπόδοση (Throughput) [4].
- **Αύξηση της συνολικής ρυθμοαπόδοσης** Η δυναμική προσαρμογή MCS μεγιστοποιεί τη μέση ρυθμοαπόδοση σε ένα χρονικά και χωρικά μεταβαλλόμενο ναυτιλιακό κανάλι, αξιοποιώντας κάθε στιγμή τις βέλτιστες δυνατές ρυθμίσεις [5].
- **Αποδοτικότερη χρήση του φάσματος και της ενέργειας** , Η αυτόματη προσαρμογή αποφεύγει περιττή σπατάλη εύρους ζώνης και ισχύος, κάτι ιδιαίτερα σημαντικό στις ναυτιλιακές εφαρμογές όπου η εξοικονόμηση ενέργειας και η υψηλή αξιοπιστία της επικοινωνίας είναι κρίσιμες [1].

Οι μελέτες απόδοσης, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε προσομοιωτικό επίπεδο, καταδεικνύουν ότι η AMC μεγιστοποιεί τη μέση ρυθμοαπόδοση και ελαχιστοποιεί τον ρυθμό σφαλμάτων πακέτων, παρέχοντας μια βέλτιστη λειτουργία για το VDE-TER υπό ρεαλιστικές συνθήκες ναυτιλιακού καναλιού [1,4,5,11].

1.5 Αντικείμενο και Δομή της Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη και αξιολόγηση της απόδοσης των διαφορετικών Σχημάτων Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης που ορίζονται στο πρότυπο VDE-TER, με έμφαση στις τεχνικές Προσαρμοστικής Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης. Η εργασία αποσκοπεί στη κατανόηση των δυνατοτήτων και των περιορισμών του συστήματος υπό ρεαλιστικές συνθήκες καναλιού, αξιοποιώντας τόσο τη θεωρία όσο και την προσομοίωση. Στο πλαίσιο αυτό, διερευνάται πώς κάθε MCS ανταποκρίνεται στις μεταβολές της ποιότητας του καναλιού (SNR), ποια είναι τα θεωρητικά και πρακτικά όρια απόδοσης και πώς η δυναμική στρατηγική AMC δύναται να βελτιστοποιήσει τη ρυθμοαπόδοση και την αξιοπιστία του συστήματος [4,5,11].

Για την επίτευξη των παραπάνω, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης σε περιβάλλον MATLAB, το οποίο επιτρέπει τη μελέτη της συμπεριφοράς των MCS σε κανάλι Προσθετικού Λευκού Γκαουσιανού Θορύβου (AWGN) , καθώς και την αξιολόγηση της απόδοσης σε όρους Ρυθμού Σφάλματος Πακέτων (PER) και πραγματικής ρυθμοαπόδοσης (throughput). Παράλληλα, ενσωματώθηκαν θεωρητικά μοντέλα απωλειών διάδοσης για να συνδεθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με

τη φυσική εμβέλεια επικοινωνίας του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ναυτιλιακού καναλιού [1, 9].

Η δομή της εργασίας οργανώνεται ως εξής:

Κεφάλαιο 2: Περιγραφή του Πρωτοκόλλου VDE-TER: Εδώ παρουσιάζονται τα βασικά τεχνικά και θεωρητικά θεμέλια του συστήματος VDE-TER, όπως ορίζονται από τη σύσταση ITU-R M.2092-1, και αναλύονται σε βάθος οι παράμετροι των διαφόρων MCS.

Κεφάλαιο 3: Μοντελοποίηση Συστήματος: Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία προσομοίωσης: το μαθηματικό πλαίσιο, οι υποθέσεις και οι διαδικασίες υπολογισμού των μετρικών απόδοσης. Επίσης, γίνεται αναλυτική αναφορά στα μοντέλα διάδοσης που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία για την προσομοίωση των απωλειών και της εμβέλειας στο ναυτικό περιβάλλον.

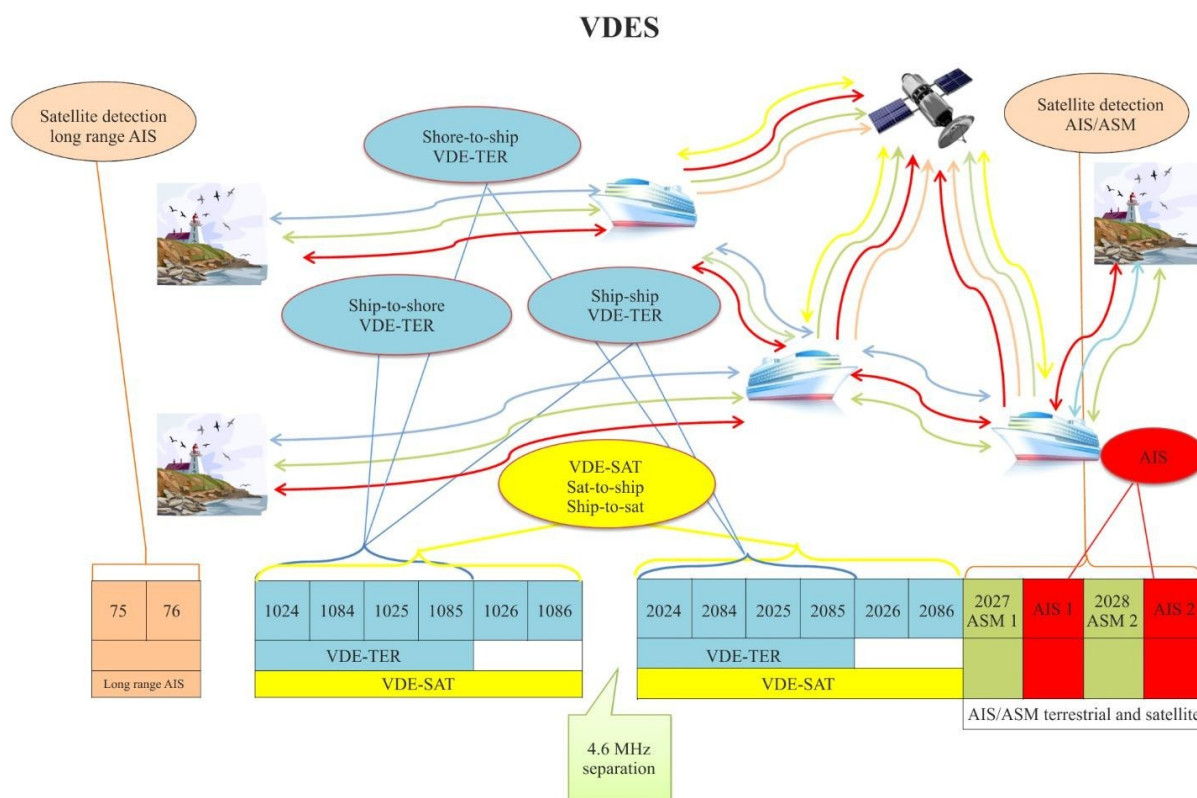
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα: Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται και ερμηνεύονται τα αριθμητικά και γραφικά αποτελέσματα της προσομοίωσης. Αρχικά, παρατίθενται οι καμπύλες του Ρυθμού Σφάλματος Πακέτων (PER) ως συνάρτηση του SNR για όλα τα εξεταζόμενα MCS, καταδεικνύοντας την ευαισθησία κάθε σχήματος στην υποβάθμιση του καναλιού. Στη συνέχεια, τα δεδομένα μετατρέπονται σε καμπύλες πραγματικής ρυθμοαπόδοσης (throughput), που αποτυπώνουν τη δυνατότητα του συστήματος να μεγιστοποιεί τη χωρητικότητα μέσω της AMC. Η ανάλυση επεκτείνεται στη συσχέτιση των αποτελεσμάτων με την απόσταση (μέσω των path loss models), επιτρέποντας τη χαρτογράφηση της θεωρητικής απόδοσης σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα - Συζήτηση: Το τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζει τα κύρια ευρήματα της εργασίας, καταγράφει τα συμπεράσματα σχετικά με τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της AMC στο VDE-TER και διατυπώνει προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Οι προτάσεις αυτές αφορούν την ενσωμάτωση πιο ρεαλιστικών μοντέλων fading, τη δοκιμή αλγορίθμων δυναμικής προσαρμογής (machine learning-based AMC), καθώς και τη διερεύνηση της επίδρασης της κινητικότητας και της πολυπλοκότητας του ναυτικού καναλιού.

Κεφάλαιο 2ο: Περιγραφή του Πρωτοκόλλου VDE-TER

2.1 Ορισμός και Δομή του VDES

Το VHF Data Exchange System - VDES, είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα επικοινωνιών που σχεδιάστηκε για να καλύψει τις αυξανόμενες ανάγκες των ναυτικών επικοινωνιών, υπερβαίνοντας τις δυνατότητες του προηγούμενου συστήματος AIS. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο ITU-R M.2092-1 [7], το VDES αξιοποιεί την περιοχή συχνοτήτων VHF, από 156,025 έως 162,025 MHz, και ενσωματώνει τέσσερα βασικά υποσυστήματα, διαμορφώνοντας ένα ενιαίο σύστημα που ενσωματώνει τις ανάγκες επικοινωνίας τόσο σε τοπικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Το εύρος συχνοτήτων που χρησιμοποιείται διασφαλίζει υψηλή συμβατότητα και ελάχιστες παρεμβολές, ενώ η βελτιωμένη τεχνολογία των καναλιών επιτρέπει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, αυξημένη χωρητικότητα και καλύτερη αξιοπιστία επικοινωνίας σε σχέση με το παλαιότερο σύστημα AIS. Έτσι, το VDES μπορεί να υποστηρίξει αποτελεσματικά ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από κρίσιμες υπηρεσίες ασφάλειας έως εξειδικευμένες επιχειρησιακές εφαρμογές, ανταποκρινόμενο στις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις της ναυτικής βιομηχανίας.



M.2092-01

Σχήμα 2.1: Αρχιτεκτονική και λειτουργίες του συστήματος VHF Data Exchange System (VDES). Απεικονίζονται οι βασικές λειτουργικές διασυνδέσεις μεταξύ επίγειων και δορυφορικών επικοινωνιών, όπως καθορίζονται στο πρότυπο ITU-R M.2092-1. Πηγή: ITU-R M.2092-1, Figure 1 [7].

Τα υποσυστήματα του VDES περιλαμβάνουν: το Automatic Identification System - AIS, το Application-Specific Messaging - ASM, το VHF Data Exchange Satellite - VDE-SAT και το

VHF Data Exchange Terrestrial – VDE-TER.

Το επίγειο τμήμα του συστήματος, το VDE-TER, είναι ειδικά σχεδιασμένο για να παρέχει αξιοπιστία στην επικοινωνία μεταξύ πλοίων (ship-to-ship), πλοίων και σταθμών ξηράς (ship-to-shore και shore-to-ship). Λειτουργεί χρησιμοποιώντας ειδικά κανάλια διπλής κατεύθυνσης (duplex) και απλής κατεύθυνσης (simplex), εύρους 100 kHz, γεγονός που επιτρέπει σημαντικά υψηλότερες ταχύτητες και μεγαλύτερη χωρητικότητα μετάδοσης δεδομένων σε σύγκριση με τα παραδοσιακά συστήματα AIS. Το VDE-TER υποστηρίζει ένα σύνολο εννέα διαφορετικών διαμορφώσεων και κωδικοποιήσεων (Link Configurations 11-19) [7], επιτρέποντας τη βέλτιστη επιλογή των κατάλληλων ρυθμίσεων ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού και τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές διαμόρφωσης περιλαμβάνουν $\pi/4$ -QPSK, 8PSK και 16QAM, παρέχοντας έτσι ευελιξία και προσαρμοστικότητα σε ποικίλα περιβάλλοντα επικοινωνίας. Επιπλέον, παρέχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης αμφίδρομης επικοινωνίας, υποστηρίζοντας έτσι προηγμένες εφαρμογές που απαιτούν δυναμική και αξιόπιστη ανταλλαγή πληροφοριών, όπως η ανταλλαγή δεδομένων αισθητήρων, αναλυτικών μετεωρολογικών πληροφοριών και υψηλής ανάλυσης εικόνων.

Η δομή του VDES είναι πλήρως συμβατή με το υπάρχον AIS, επιτρέποντας την ομαλή μετάβαση και την παράλληλη χρήση των δύο συστημάτων, εξασφαλίζοντας ότι η εισαγωγή του VDES δεν θα διαταράξει την υπάρχουσα υποδομή ναυτικών επικοινωνιών. Το πρωτόκολλο ITU-R M.2092-1 [7] ορίζει επίσης αναλυτικά τις απαιτήσεις για τον συγχρονισμό, την ακρίβεια χρονισμού και τις δομές των πλαισίων δεδομένων που χρησιμοποιούνται στο VDE-TER, διασφαλίζοντας την υψηλή απόδοση και συμβατότητα του συστήματος με διεθνή πρότυπα και πρακτικές. Συγκεκριμένα, το πλαίσιο δεδομένων στο VDE-TER χωρίζεται σε διαστήματα ενός λεπτού, αποτελούμενο από 2250 χρονικά slot, καθένα από τα οποία διαρκεί περίπου 26.667ms. Ο χρονισμός των slot είναι βάση της συντονισμένης παγκόσμιας ώρας - UTC, επιτρέποντας αξιόπιστη διαχείριση και αποφυγή συγχρούσεων δεδομένων. Επιπλέον, προβλέπονται ειδικά πρωτόκολλα για τον ακριβή έλεγχο και τη διαχείριση των πακέτων δεδομένων, καθιστώντας το σύστημα κατάλληλο για απαιτητικά σενάρια εφαρμογών υψηλής ακρίβειας και ασφάλειας.

2.2 Υποσυστήματα VDES και Λειτουργίες

Το VHF Data Exchange System αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα επικοινωνιών που συνδυάζει τέσσερα κύρια υποσυστήματα για τη διασφάλιση αξιοπιστής και αποτελεσματικής επικοινωνίας στη θάλασσα, ενσωματώνοντας τόσο επίγεια όσο και δορυφορικά μέσα [7]. Η ενοποίηση αυτών των υποσυστημάτων επιτρέπει στο VDES να προσφέρει μια ολοκληρωμένη λύση που καλύπτει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από την παρακολούθηση και ασφάλεια πλοίων μέχρι τη μετάδοση ειδικών μηνυμάτων και την επικοινωνία υψηλής χωρητικότητας δεδομένων. Ο σχεδιασμός του VDES επιτρέπει επίσης τη συμβατότητα με υφιστάμενες υποδομές AIS, εξασφαλίζοντας ομαλή μετάβαση και αξιοποίηση των υφιστάμενων τεχνολογικών υποδομών. Τα υποσυστήματα αυτά είναι:

Automatic Identification System (AIS): Το AIS αποτελεί το βασικό σύστημα αναγνώρισης και παρακολούθησης της κυκλοφορίας πλοίων, παρέχοντας συνεχώς ανανεούμενες πληροφορίες όπως την ταυτότητα (μέσω του μοναδικού αριθμού αναγνώρισης MMSI), τη γεωγραφική θέση (μέσω ενσωματωμένου συστήματος GNSS), την ταχύτητα, την κατεύθυνση, τον προορισμό και την

κατάσταση πλοήγησης κάθε πλοίου. Η μετάδοση γίνεται στη ζώνη VHF με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 9.6 kbps χρησιμοποιώντας τεχνική Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK). Η κύρια λειτουργία του AIS είναι η αύξηση της ασφάλειας στη θάλασσα μέσω της έγκαιρης και ακριβούς πληροφόρησης για την κατάσταση και τη θέση των πλοίων, συμβάλλοντας σημαντικά στην πρόληψη συγκρούσεων και την καλύτερη διαχείριση της κυκλοφορίας. Επιπλέον, η αυτόματη και συνεχής μετάδοση των πληροφοριών επιτρέπει στους ναυτικούς σταθμούς ξηράς να έχουν ολοκληρωμένη εικόνα της θαλάσσιας κίνησης σε πραγματικό χρόνο, υποστηρίζοντας έτσι προηγμένες εφαρμογές διαχείρισης κυκλοφορίας και συντονισμού έκτακτων επιχειρήσεων.

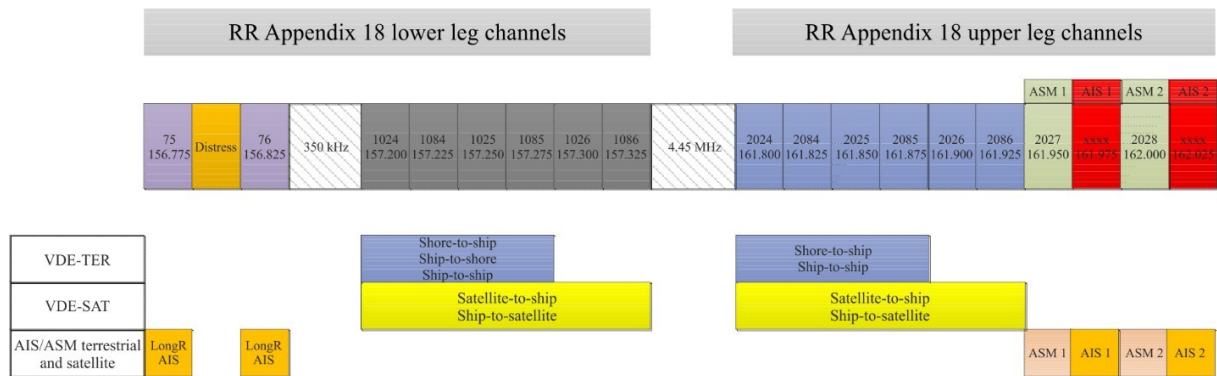
Application-Specific Messaging (ASM): Το ASM εξειδικεύεται στην αξιόπιστη μετάδοση ειδικών μηνυμάτων που εξυπηρετούν συγκεκριμένες εφαρμογές και ανάγκες, όπως μηνύματα ασφαλείας, περιβαλλοντικές ενημερώσεις, πληροφορίες σχετικά με καιρικές συνθήκες, ενημερώσεις για κίνδυνο σύγκρουσης, καθώς και ειδοποιήσεις έκτακτης ανάγκης. Επιπλέον υποστηρίζει προηγμένα πρωτόκολλα μετάδοσης που επιτρέπουν την αποτελεσματική και ασφαλή παράδοση μηνυμάτων ακόμα και σε συνθήκες αυξημένης χρήσης των καναλιών. Το ASM χρησιμοποιεί δύο ειδικά κανάλια απλής κατεύθυνσης (simplex) εύρους 25 kHz για τη μετάδοση αυτών των μηνυμάτων, γεγονός που διασφαλίζει υψηλή αξιοπιστία και μειωμένη πιθανότητα παρεμβολών με άλλες υπηρεσίες του συστήματος VDES [7]. Επιπλέον, τα μηνύματα ASM διαθέτουν δυνατότητα επιβεβαίωσης λήψης και αναμετάδοσης, παρέχοντας πρόσθετη αξιοπιστία και διασφαλίζοντας την έγκαιρη ενημέρωση των χρηστών σε κρίσιμες καταστάσεις.

VHF Data Exchange–Satellite (VDE-SAT): Το VDE-SAT παρέχει τη δυνατότητα δορυφορικής επικοινωνίας για το VDES, προσφέροντας συνεχή κάλυψη ακόμη και σε απομακρυσμένες περιοχές όπου οι επίγειες επικοινωνίες είναι περιορισμένες ή αδύνατες. Το VDE-SAT χρησιμοποιεί ειδικά κανάλια για την επικοινωνία μεταξύ πλοίων και δορυφόρων (ship-to-satellite και satellite-to-ship), γεγονός που διασφαλίζει την παγκόσμια κάλυψη και την αδιάλειπτη παρακολούθηση των πλοίων [7]. Οι δορυφορικές επικοινωνίες, λειτουργούν σε συνδυασμό με το επίγειο τμήμα του VDE-TER, ενισχύοντας την αξιοπιστία και διαθεσιμότητα του συνολικού συστήματος. Η χρήση δορυφορικών συχνοτήτων και πρωτοκόλλων επιτρέπει στο VDE-SAT να διατηρεί υψηλό επίπεδο απόδοσης ακόμα και σε συνθήκες έντονης χρήσης ή δυσμενών καιρικών συνθηκών, παρέχοντας συνεχή επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο, με δυνατότητες μετάδοσης δεδομένων υψηλής χωρητικότητας για εφαρμογές κρίσιμης σημασίας όπως η διαχείριση στόλων, η παρακολούθηση πλοίων και οι επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης.

VHF Data Exchange–Terrestrial (VDE-TER): Το VDE-TER είναι το επίγειο τμήμα του VDES, ειδικά σχεδιασμένο για μετάδοση δεδομένων υψηλής χωρητικότητας και ταχύτητας. Χρησιμοποιεί κανάλια εύρους 100 kHz σε λειτουργία απλής (simplex) ή διπλής κατεύθυνσης (duplex), επιτρέποντας υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων που μπορούν να υπερβούν σημαντικά τις δυνατότητες των παραδοσιακών συστημάτων AIS. Το VDE-TER υποστηρίζει συνολικά εννέα διαφορετικούς συνδυασμούς διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (MCS), από $\pi/4$ QPSK έως 16QAM, προσφέροντας έτσι μεγάλη ευελιξία στην επιλογή του καταλληλότερου τρόπου μετάδοσης ανάλογα με την ποιότητα του καναλιού και τις ανάγκες της εφαρμογής. Αυτή η ευελιξία το καθιστά ιδανικό για περιβάλλοντα με μεταβαλλόμενες συνθήκες επικοινωνίας, όπως είναι οι περιοχές με έντονη ναυτική δραστηριότητα ή με ιδιαίτερες καιρικές συνθήκες. Επιπρόσθετα, η λειτουργία AMC που ενσωματώνει

το VDE-TER, επιτρέπει στο σύστημα να προσαρμόζει αυτόματα τον τρόπο μετάδοσης δεδομένων, διασφαλίζοντας τη μέγιστη δυνατή απόδοση και αξιοπιστία ακόμα και σε συνθήκες έντονης διακύμανσης της ποιότητας του σήματος. Τέλος, η δυνατότητα αμφίδρομης και ταυτόχρονης επικοινωνίας ενισχύει περαιτέρω τη δυναμική και την αποτελεσματικότητα των ναυτικών επικοινωνιών, καλύπτοντας πλήρως τις σύγχρονες απαιτήσεις για υψηλή ακρίβεια και ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων.

Το VDE-TER αποτελεί τον πυρήνα του συστήματος όσον αφορά τη μετάδοση δεδομένων υψηλής χωρητικότητας. Η δυνατότητα επιλογής από ένα σύνολο εννέα διαμορφώσεων και κωδικοποιήσεων επιτρέπει την προσαρμογή του συστήματος στις εκάστοτε απαιτήσεις και συνθήκες επικοινωνίας, διασφαλίζοντας υψηλή απόδοση και αξιοπιστία σε κάθε περιβάλλον χρήσης. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο ITU-R M.2092-1 [7], οι διαφορετικές διαμορφώσεις και κωδικοποιήσεις επιλέγονται ανάλογα με την ποιότητα σήματος του καναλιού, τη διαθεσιμότητα εύρους ζώνης και τις ανάγκες της εφαρμογής, επιτρέποντας στο VDE-TER να υποστηρίζει δεδομένα με υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία ακόμη και υπό αντίξοες συνθήκες. Επιπλέον, η δυνατότητα χρήσης π/4-QPSK, 8PSK και 16QAM ενισχύει την ευελιξία και την ικανότητα προσαρμογής στις δυναμικές συνθήκες του καναλιού επικοινωνίας, ενώ η ενσωμάτωση τεχνολογίας AMC επιτρέπει την αυτόματη και σε πραγματικό χρόνο προσαρμογή του τρόπου μετάδοσης, επιτυγχάνοντας έτσι βέλτιστη απόδοση και μειωμένα ποσοστά σφαλμάτων. Αυτό καθιστά το VDE-TER ιδανική επιλογή για σύγχρονες και απαιτητικές εφαρμογές ναυτικών επικοινωνιών, όπως τη μετάδοση εικόνων υψηλής ανάλυσης, λεπτομερών μετεωρολογικών δεδομένων και κρίσιμων πληροφοριών ασφάλειας πλοήγησης.



M.2092-02

Σχήμα 2.2: Κατανομή και χρήση συχνοτήτων στα υποσυστήματα του VDES σύμφωνα με το Παράρτημα 18 του ITU-R Radio Regulations. Εμφανίζονται τα κανάλια που διατίθενται για VDE-TER, VDE-SAT, AIS/ASM, καθώς και οι διαχωρισμοί για Long Range AIS και κανάλια κινδύνου (*Distress*). Πηγή: ITU-R M.2092-1, Figure 2 [7].

2.3 Υποσύστημα VDE-TER

Το VDE-TER διακρίνεται για την ευελιξία που προσφέρει στον τρόπο λειτουργίας του, ικανοποιώντας διαφορετικά επιχειρησιακά σενάρια επικοινωνίας στη ναυτιλία. Βασίζεται σε δύο βασικές μορφές λειτουργίας: την απλής (simplex) ή διπλής κατεύθυνσης (duplex) λειτουργία, καθώς και σε προσεκτικά καθορισμένη κατανομή καναλιών στη ζώνη VHF.

Στη λειτουργία simplex, η ανταλλαγή δεδομένων πραγματοποιείται αμφίδρομα, αλλά όχι ταυτόχρονα

— τα πλοία και οι παράκτιοι σταθμοί μοιράζονται το ίδιο φάσμα συχνοτήτων, μεταδίδοντας και λαμβάνοντας σε διαφορετικούς χρονικούς διαμερισμούς (time slots). Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν η υποδομή είναι περιορισμένη ή όταν απαιτείται απλότητα στην υλοποίηση και διαχείριση των επικοινωνιακών καναλιών. Η λειτουργία simplex αξιοποιεί τα λεγόμενα κάτω τμήματος/σχέλους (lower leg) κανάλια, όπου τα ίδια κανάλια χρησιμοποιούνται τόσο για αποστολή όσο και για λήψη, αλλά με κατάλληλο χρονικό διαχωρισμό μέσω της τεχνικής TDMA. Η δομή αυτή διευκολύνει τη χρήση του φάσματος, διατηρώντας παράλληλα υψηλό βαθμό αξιοπιστίας και περιορίζοντας τις παρεμβολές, αρκεί να τηρείται ο αυστηρός χρονισμός μεταξύ των σταθμών [7].

Αντιθέτως, στη duplex λειτουργία, επιτυγχάνεται ταυτόχρονη και αμφίδρομη επικοινωνία, με τη χρήση διακριτών φασματικών περιοχών για κάθε κατεύθυνση της μετάδοσης. Τα “lower leg” κανάλια χρησιμοποιούνται για την αποστολή δεδομένων από το πλοίο προς την ξηρά (ship-to-shore), ενώ τα άνω τμήματος/σχέλους (upper leg) κανάλια αξιοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων από την ξηρά προς το πλοίο (shore-to-ship), αλλά και μεταξύ πλοίων (ship-to-ship). Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη, αυξάνοντας το συνολικό throughput του συστήματος και μειώνοντας τον χρόνο αναμονής για τη λήψη απαντήσεων. Η duplex λειτουργία είναι ιδανική για σενάρια με υψηλές απαιτήσεις διακίνησης δεδομένων ή για αποστολή κρίσιμων πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο.

Η διαχείριση του φάσματος στο VDE-TER πραγματοποιείται με βάση τα πρότυπα του Appendix 18 των διεθνών Radio Regulations¹, διασφαλίζοντας συμβατότητα και διαλειτουργικότητα σε διεθνές επίπεδο. Η κατανομή των καναλιών είναι αυστηρά καθορισμένη για να αποφευχθούν παρεμβολές και να εξυπηρετηθούν οι απαιτήσεις του ναυτιλιακού περιβάλλοντος. Τα κυριότερα κανάλια που χρησιμοποιεί το VDE-TER είναι τα εξής:

Πίνακας 2.1: Τυπικές συχνότητες καναλιών VDE-TER για Lower και Upper Leg

Leg	Κανάλι (ITU)	Συχνότητα (MHz)
Lower Leg (Simplex/Ship-to-Shore)	1024	156.025
	1025	156.050
	1084	157.225
	1085	157.250
Upper Leg (Duplex/Shore-to-Ship)	2024	161.625
	2025	161.650
	2084	162.825
	2085	162.850

Για κάθε κανάλι, το σύστημα καθορίζει επιπλέον τις παραμέτρους εύρους ζώνης, ρυθμού συμ-

¹Τα Radio Regulations αποτελούν το διεθνές νομικό πλαίσιο που υιοθετείται από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών – ITU, καθορίζοντας την κατανομή και χρήση του ραδιοφάσματος και των δορυφορικών τροχιών. Αναθεωρούνται περιοδικά στις Παγκόσμιες Διασκέψεις Ραδιοεπικοινωνιών – WRC, ώστε να διασφαλίζεται η αποφυγή παρεμβολών και η διεθνής διαλειτουργικότητα.

βόλων, διαμόρφωσης και κωδικοποίησης μέσω της αντιστοίχισης σε Link IDs (π.χ. 11–19, 35–38), με βάση τις εκάστοτε απαιτήσεις απόδοσης [7].

Πίνακας 2.2: Βασικές Παράμετροι Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης του VDE-TER ανά Link ID. Πηγή: ITU-R M.2092-1, Annex 4, Table 8 [7].

Link ID	Εύρος ζώνης (kHz)	Ρυθμός συμβόλων (ksps)	Διαμόρφωση	Κωδικός FEC	Ρυθμός κώδικα
11	25	19.2	$\pi/4$ -QPSK	Turbo	1/2
12	25	19.2	8-PSK	Turbo	3/4
13	25	19.2	16-QAM	Turbo	3/4
14	50	38.4	$\pi/4$ -QPSK	Turbo	1/2
15	50	38.4	8-PSK	Turbo	3/4
16	50	38.4	16-QAM	Turbo	3/4
17	100	76.8	$\pi/4$ -QPSK	Turbo	1/2
18	100	76.8	8-PSK	Turbo	3/4
19	100	76.8	16-QAM	Turbo	3/4

Η δυνατότητα επιλογής μεταξύ simplex ή duplex λειτουργίας προσφέρει στο VDE-TER ιδιαίτερη ευελιξία, προσαρμόζοντας δυναμικά την επικοινωνία τόσο σε συνθήκες πυκνής ναυτικής κυκλοφορίας (π.χ. λιμάνια, παράκτιες ζώνες), όσο και σε σενάρια όπου οι πόροι φάσματος είναι περιορισμένοι ή υπάρχουν αυξημένες παρεμβολές. Αυτό το επίπεδο προσαρμοστικότητας, το καθιστά βασικό πυλώνα της σύγχρονης ναυτικής επικοινωνίας, ικανό να εξυπηρετεί κρίσιμες υπηρεσίες και εφαρμογές e-navigation.

2.4 Αρχιτεκτονική και Δομή Πλαισίων

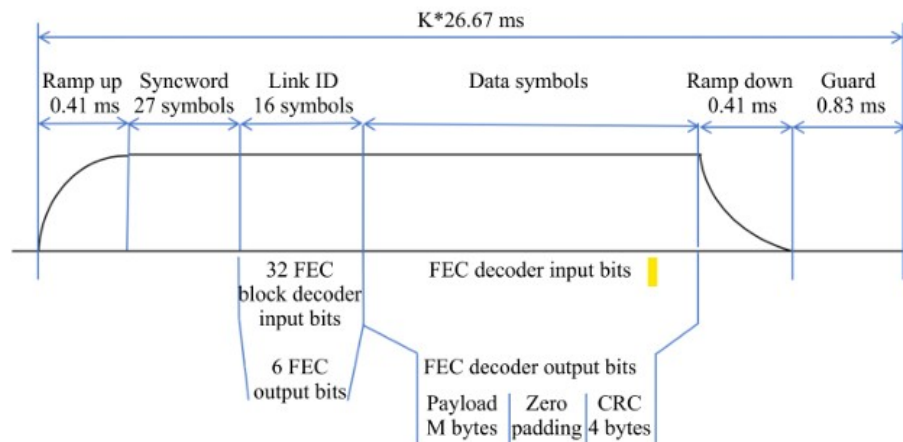
Η αρχιτεκτονική και η δομή πλαισίων του VDE-TER συνιστούν τον βασικό μηχανισμό που διασφαλίζει τη σαφή, αξιόπιστη και αποδοτική οργάνωση της μετάδοσης δεδομένων στη ναυτιλία. Το σύστημα σχεδιάστηκε έτσι ώστε να υποστηρίζει τόσο τις επίγειες όσο και τις δορυφορικές επικοινωνίες, προσφέροντας υψηλή συμβατότητα και προσαρμοστικότητα με διάφορους τύπους εξοπλισμού [7]. Η υλοποίηση στηρίζεται στο μοντέλο των επτά επιπέδων OSI, με το φυσικό επίπεδο (Physical Layer) να αναλαμβάνει τη διαμόρφωση, τη μετάδοση και τη λήψη των δεδομένων μέσω της ζώνης συχνοτήτων VHF. Ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στην ενσωμάτωση τεχνικών για τη διασφάλιση της ακεραιότητας των δεδομένων, όπως η εκτεταμένη χρήση CRC και προηγμένων τεχνολογιών διόρθωσης λαθών (FEC), ώστε το σύστημα να ανταποκρίνεται αποτελεσματικά ακόμα και σε συνθήκες έντονης παρεμβολής ή χαμηλού σήματος.

Η οργάνωση της μετάδοσης βασίζεται σε μια αυστηρά συγχρονισμένη χρονοδομή, όπου το συνολικό φάσμα χωρίζεται σε χρονικά πλαίσια (frames), καθένα εκ των οποίων διαρκεί ακριβώς ένα λεπτό. Κάθε frame υποδιαιρείται σε 2250 time slots, με διάρκεια περίπου 26.67 ms το καθένα. Ο συγχρονισμός αυτός πραγματοποιείται με βάση τον Διεθνή Συντονισμένο Χρόνο (UTC), διασφαλίζοντας την ακριβή εκκίνηση και λήξη κάθε slot και επιτρέποντας τον αποτελεσματικό διαμοιρασμό των επικοινωνιακών πόρων μεταξύ πολλαπλών σταθμών μέσω της τεχνικής TDMA. Αυτή η προσέγγιση ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο συγκρούσεων και εξασφαλίζει την αξιοπιστία της μετάδοσης, ακόμη και όταν το περιβάλλον παρουσιάζει αυξημένη κυκλοφορία ή υψηλά επίπεδα παρεμβολών.

Αναλυτικότερα, η δομή κάθε slot έχει σχεδιαστεί ώστε να εξυπηρετεί πολλαπλές τεχνικές και λειτουργικές απαιτήσεις. Στην αρχή κάθε slot, εφαρμόζεται ένα σύντομο διάστημα ramp-up, διάρκειας περίπου 417 μ s, κατά το οποίο το επίπεδο ισχύος της εκπομπής αυξάνεται σταδιακά από χαμηλή τιμή (π.χ. -50 dBc) έως σχεδόν τη μέγιστη επιτρεπτή, με σκοπό τη μείωση της εκπομπής ανεπιθύμητων παρασιτικών σημάτων και την προστασία των γειτονικών καναλιών.

Στη συνέχεια, μεταδίδεται μια ειδική εκπαιδευτική ακολουθία (training sequence), που περιλαμβάνει έναν προκαθορισμένο κώδικα συγχρονισμού (syncword), συνήθως τύπου Barker ή διπλού Barker. Η ακολουθία αυτή επιτρέπει στον δέκτη να εντοπίσει με ακρίβεια την έναρξη του slot, να ρυθμίσει το τοπικό του χρονόμετρο και να εκτιμήσει αποτελεσματικά τις ιδιότητες του καναλιού, όπως θόρυβος και παρεμβολές, ακόμη και σε συνθήκες χαμηλού SNR.

Ακολουθεί η μετάδοση του Link ID, ενός μοναδικού κωδικού 6 bit, ο οποίος προσδιορίζει το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο slot. Ο κωδικός αυτός είναι κωδικοποιημένος με τεχνικές Reed-Muller και υπόκειται σε scrambling για πρόσθετη προστασία από σφάλματα. Το βασικό τμήμα του slot είναι η περιοχή μετάδοσης των χρηστικών δεδομένων (data payload), όπου πραγματοποιείται η μεταφορά των πραγματικών πληροφοριών. Η ακεραιότητα των δεδομένων εξασφαλίζεται μέσω ενός κώδικα CRC, ενώ τα πιθανά σφάλματα κατά τη μετάδοση διορθώνονται αποτελεσματικά με τη χρήση προηγμένης τεχνολογίας FEC, όπως η Turbo coding.



M.2092-04

Σχήμα 2.3: Γενική δομή slot για επίγεια μετάδοση. Περιλαμβάνει τα τμήματα ramp-up, syncword, Link ID, data symbols, ramp down και guard, καθώς και την τοποθέτηση των δεδομένων χρήστη, padding και CRC. Πηγή: ITU-R M.2092-1, Figure 4 [7].

Η δομή κάθε slot ολοκληρώνεται με μια σύντομη περίοδο μείωσης ισχύος (ramp-down) και μια προστατευτική χρονική ζώνη (guard time), η οποία διασφαλίζει ότι δεν θα υπάρξει επικάλυψη ή παρεμβολή μεταξύ διαδοχικών slots, συμβάλλοντας έτσι στην αδιάλειπτη και καθαρή επικοινωνία. Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζεται με σαφήνεια η διαδοχική διάταξη των βασικών τμημάτων ενός slot για το επίγειο σκέλος του VDES, αναδεικνύοντας τον ρόλο κάθε φάσης για την εξασφάλιση αξιοπιστίας και απόδοσης στη μετάδοση των δεδομένων.

Η αρχιτεκτονική και η δομή πλαισίων του VDE-TER αποτελούν παράγοντα που διαμορφώνει

συνολικά την αποτελεσματικότητα του συστήματος στις πραγματικές συνθήκες της ναυσιπλοΐας. Η επιλογή της χρονοδομής σε διακριτά πλαίσια και slots προσφέρει σταθερότητα στη λειτουργία, ενώ η ακριβής αντιστοίχιση με τον παγκόσμιο χρόνο μέσω του πρωτοκόλλου TDMA διασφαλίζει ότι κάθε μετάδοση εκτελείται χωρίς αλληλοεπικάλυψη ή απώλεια συγχρονισμού. Η χρήση διακριτών time slots, σε συνδυασμό με εξειδικευμένους μηχανισμούς διαχείρισης πόρων, συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση των πιθανών συγκρούσεων και στη βελτιστοποίηση της συνολικής αξιοπιστίας του συστήματος. Παράλληλα, η εισαγωγή της εκπαιδευτικής ακολουθίας (training sequence), η αξιοποίηση του Link ID για την ευέλικτη επιλογή παραμέτρων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, καθώς και η εφαρμογή προηγμένων τεχνικών διόρθωσης λαθών (FEC), ενισχύουν περαιτέρω την ποιότητα και την ακεραιότητα των μεταδιδόμενων δεδομένων, ακόμα και υπό δυσμενείς συνθήκες καναλιού. Επιπλέον, το σύστημα δίνει τη δυνατότητα για αυτόματη προσαρμογή των παραμέτρων εκπομπής και λήψης μέσω της τεχνικής AMC, εξασφαλίζοντας τη βέλτιστη δυνατή απόδοση σε κάθε επιχειρησιακό σενάριο και περιβάλλον λειτουργίας. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική προσέγγιση αποτελεί βασικό πυλώνα της αξιοπιστίας και της αποτελεσματικότητας του VDE-TER στη σύγχρονη ναυτική επικοινωνία.

2.5 Μοντέλα Διάδοσης Σήματος σε Θαλάσσιο Περιβάλλον

Η εκτίμηση των απωλειών διαδρομής (path loss) στις ναυτικές επικοινωνίες απαιτεί μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τις ιδιαιτερότητες του θαλάσσιου καναλιού. Εξαιτίας της λείας επιφάνειας της θάλασσας και της απουσίας σημαντικών εμποδίων, τα κυρίαρχα φαινόμενα είναι η διάδοση μέσω της ευθείας οπτικής διαδρομής (LOS) και οι ανακλάσεις από την επιφάνεια του νερού, καθώς και – σε συγκεκριμένες περιπτώσεις – οι εγκλωβισμένες διαδρομές λόγω ατμοσφαιρικών φαινομένων όπως τα evaporation ducts [1] [5].

Επιπλέον, η πολυπλοκότητα του θαλάσσιου περιβάλλοντος και οι μεταβαλλόμενες συνθήκες κυκλοφορίας του έχουν αποτελέσει αντικείμενο μελέτης μέσω αριθμητικών μοντέλων και προσομοιώσεων, τα οποία συμβάλλουν στην κατανόηση των επιπτώσεων της θάλασσας στη διάδοση των σημάτων [14].

2.5.1 Μοντέλο Two-Ray

Το μοντέλο δύο διαδρομών (**two-ray model**) είναι το πλέον βασικό βελτιωμένο μοντέλο για θαλάσσιο περιβάλλον και περιγράφει την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος ως συνάρτηση της συμβολής του άμεσου κύματος και ενός κύματος που ανακλάται στη θαλάσσια επιφάνεια. Ουσιαστικά, η ένταση του λαμβανόμενου σήματος εξαρτάται από τη διαφορά φάσης μεταξύ των δύο αυτών διαδρομών, με αποτέλεσμα φαινόμενα ενίσχυσης ή εξασθένισης (constructive/destructive interference) ανάλογα με τη σχετική απόσταση και τα ύψη των κεραιών. Η μαθηματική έκφραση δίνεται ως [9]:

$$L(h_t, h_r, d) = 10 \log_{10} \left(\left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left(2 \sin \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right) \right)^2 \right) \quad (1)$$

όπου:

- h_t, h_r : Ύψος κεραίας πομπού και δέκτη (m)
- d : Απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη (m)
- λ : Μήκος κύματος (m)

Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο συμβολής, το οποίο εξαρτάται ισχυρά από τα ύψη κεραίων και την απόσταση. Σε μεγάλες αποστάσεις και μικρά ύψη κεραίας, το two-ray μοντέλο προβλέπει αύξηση της απώλειας με το d^4 αντί του d^2 που ισχύει στο ελεύθερο διάστημα (free space), γεγονός που οδηγεί σε σημαντικά υψηλότερες απώλειες σε θαλάσσιες ζεύξεις μεγάλης εμβέλειας.

2.5.2 Μοντέλο Three-Ray

Το μοντέλο τριών διαδρομών (**three-ray model**) αποτελεί επέκταση του two-ray model, λαμβάνοντας υπόψη μια τρίτη, συνήθως εγκλωβισμένη διαδρομή λόγω του φαινομένου των evaporation ducts ή ανακλάσεων σε ανώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα. Αυτή η τρίτη διαδρομή μπορεί να έχει σημαντική συμβολή, ιδίως σε περιπτώσεις που επικρατούν ευνοϊκές μετεωρολογικές συνθήκες (θερμοκρασιακές και υγρομετρικές διαστρωματώσεις), παρατείνοντας την εμβέλεια του σήματος πέρα από το γεωμετρικό ορίζοντα [15] [9].

Η μαθηματική διατύπωση του three-ray model είναι:

$$L(h_t, h_r, h_e, d) = 10 \log_{10} \left(\left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 (2(1 + \Delta))^2 \right) \quad (2)$$

όπου:

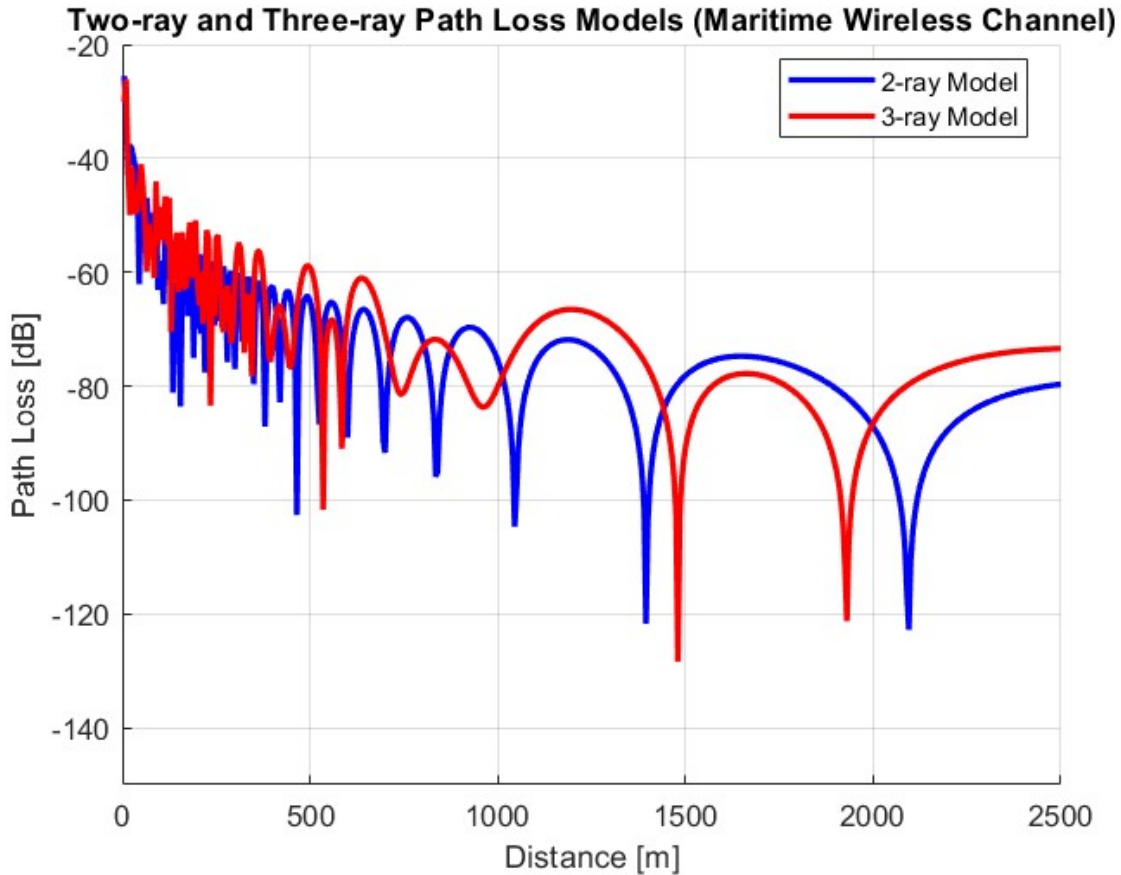
$$\Delta = 2 \sin \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right) \sin \left(\frac{2\pi (h_e - h_t)(h_e - h_r)}{\lambda d} \right) \quad (3)$$

και h_e είναι το αποτελεσματικό ύψος του evaporation duct.

- h_t, h_r : Ύψος κεραίας πομπού και δέκτη (m)
- h_e : Ύψος evaporation duct (m)
- d : Απόσταση (m)
- λ : Μήκος κύματος (m)

Η προσθήκη της τρίτης διαδρομής αυξάνει την ακρίβεια της μοντελοποίησης, ειδικά σε συνθήκες με έντονα ατμοσφαιρικά φαινόμενα, και αποτυπώνει καλύτερα το φαινόμενο των έντονων διαλείψεων της ισχύος (fading) και των σημαντικών διαφοροποιήσεων στην εμβέλεια και στην ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος στο ναυτικό περιβάλλον.

Τα μοντέλα αυτά αποτελούν τη βάση για τη διαστασιολόγηση ναυτικών επικοινωνιακών συστημάτων, την πρόβλεψη της εμβέλειας και της αξιοπιστίας, και τον ορθό σχεδιασμό μηχανισμών προσαρμογής για βέλτιστη χρήση των διαθέσιμων πόρων φάσματος. Η κατανόηση και η αξιοποίηση των two-ray και three-ray μοντέλων συμβάλλει στην καλύτερη προσαρμογή των σχημάτων διαμόρφωσης/κωδικοποίησης στις πραγματικές συνθήκες του θαλάσσιου καναλιού.



Σχήμα 2.4: Σύγκριση των απωλειών διαδρομής (path loss) μεταξύ two-ray και three-ray propagation model για ναυτικό κανάλι. Το τριών διαδρομών μοντέλο (κόκκινη καμπύλη) εμφανίζει μεγαλύτερη διακύμανση λόγω επιπρόσθετων φαινομένων fading και ducting . (Πηγή: [5])

2.5.3 Μοντέλο Beyond-Line-of-Sight (B-LoS)

Σε περιπτώσεις όπου η απόσταση είναι μεγαλύτερη από τον ορίζοντα LOS, η επικοινωνία καθίσταται δυνατή μέσω μηχανισμών κυματοδηγησης (ducting και troposcatter). Στο θαλάσσιο περιβάλλον, το evaporation duct λειτουργεί ως κυματοδηγός, επιτρέποντας την εγκλωβισμένη διάδοση πέρα από το οπτικό όριο (beyond-horizon propagation). Η ισχύς του σήματος σε B-LoS συνδέσεις εξαρτάται από το ύψος του duct, τη συχνότητα και τις μετεωρολογικές συνθήκες [9]. Η ισχύς του σήματος σε τέτοιου είδους συνδέσεις εκφράζεται συνήθως με στατιστικά μοντέλα της ITU-R, τα οποία λαμβάνουν υπόψη τον δείκτη εξασθένισης γ και στοχαστικούς όρους σκίασης [7] [9]. Έτσι αποτυπώνονται οι περιπτώσεις επικοινωνίας πέραν των 200 km, που είναι κρίσιμες για επιχειρησιακές ναυτικές εφαρμογές.

Η γενική μαθηματική προσέγγιση του B-LoS μοντέλου εκφράζεται ως:

$$L_{BLOS}(d) = A + 10\gamma \log_{10}(d) + \chi\sigma \quad (4)$$

όπου:

- A : σταθερός όρος απωλειών,
- γ : εκθετικός δείκτης εξασθένισης, και
- χ_σ : τυχαία μεταβλητή λογαριθμοκανονικής κατανομής που μοντελοποιεί τη σκίαση.

Στην πράξη, τα B-LoS μοντέλα συχνά προσεγγίζονται με βάση μετρήσεις και στατιστικά μοντέλα ITU-R για θαλάσσια διάδοση [7].

Η συμπερίληψη των B-LoS μοντέλων είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό VDE-TER ζεύξεων μεγάλης εμβέλειας, καθώς παρέχει ρεαλιστικές εκτιμήσεις για την κάλυψη σε αποστάσεις όπου τα μοντέλα LOS αποτυγχάνουν. Ειδικά στο πλαίσιο του ITU-R M.2092, η γνώση των μηχανισμών B-LoS είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της απόδοσης και την επιλογή των παραμέτρων AMC (Adaptive Modulation and Coding) σε πραγματικές συνθήκες θαλάσσιου καναλιού [?, 5].

2.5.4 Πρακτικές Επιπτώσεις στη Σχεδίαση και Διαστασιολόγηση Συστημάτων VDE-TER

Η ανάλυση των ιδιοτήτων του ναυτικού καναλιού και η εφαρμογή των προχωρημένων μοντέλων απώλειας διαδρομής αποκαλύπτουν κρίσιμες πρακτικές παραμέτρους που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση των επίγειων συστημάτων VDE-TER .

Τα μοντέλα two-ray και three-ray καταδεικνύουν ότι η απώλεια σήματος (path loss) εξαρτάται έντονα από τα ύψη των κεραιών εκπομπής και λήψης (h_t , h_r), καθώς και από τη μεταξύ τους απόσταση d . Σε μικρές αποστάσεις, το path loss προσεγγίζει το θεωρητικό του μοντέλου ελεύθερου χώρου, όμως όσο η απόσταση αυξάνεται, οι φαινόμενες απώλειες ακολουθούν ισχυρότερους ρυθμούς αύξησης (π.χ., $PL \sim d^4$). Η πρακτική συνέπεια είναι ότι, για μεγάλες θαλάσσιες αποστάσεις, απαιτείται σημαντική αύξηση της ισχύος εκπομπής ή/και των υψών των κεραιών για να διατηρηθεί επαρκές επίπεδο σήματος στο δέκτη [5], [9] [11].

Η ύπαρξη και η δυναμική δημιουργία evaporation ducts, από την άλλη, μπορεί να επιτρέψει τη διάδοση του σήματος σε αποστάσεις πολύ μεγαλύτερες της οπτικής επαφής. Αυτό, ωστόσο, συνοδεύεται από αστάθεια, καθώς το ύψος και η ένταση του duct μεταβάλλονται ραγδαία ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, τη θερμοκρασία και την υγρασία. Η πρακτική συνέπεια είναι ότι οι σχεδιαστές συστημάτων πρέπει να υπολογίζουν δυναμικά το ενδεχόμενο μακρινής διάδοσης (bLOS), να ενσωματώνουν μηχανισμούς αυτοπροσαρμογής (AMC), και να λαμβάνουν υπόψη ενδεχόμενη αυξημένη παρεμβολή από απομακρυσμένες πηγές.

Η παρουσία έντονων διαλείψεων λόγω πολλαπλών διαδρομών (reflection και ducting) απαιτεί τη χρήση σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης με αυξημένη ανθεκτικότητα. Στην πράξη, αυτό μεταφράζεται σε προτίμηση σχημάτων διαμόρφωσης χαμηλότερης τάξης (π.χ. $\pi/4$ -QPSK) και ισχυρών αλγορίθμων διόρθωσης λαθών (Turbo codes) όταν το κανάλι είναι κακό ή έντονα μεταβλητό. Αντίθετα, σε σταθερές συνθήκες (π.χ. παρουσία ισχυρού evaporation duct), μπορεί να επιλεγεί υψηλότερης τάξης διαμόρφωση (16-QAM) για αύξηση του throughput [9] , [1].

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό του ναυτικού καναλιού, η μεταβλητότητα, καθιστά επιτακτική τη

χρήση μηχανισμών δυναμικής προσαρμογής των σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (AMC), ώστε να διασφαλίζεται η αξιοπιστία και η απόδοση υπό κάθε συνθήκη. Η αναγνώριση της τρέχουσας ποιότητας καναλιού σε πραγματικό χρόνο και η αυτόματη αλλαγή παραμέτρων εξασφαλίζει την απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος, είτε το σκάφος βρίσκεται κοντά στην ακτή είτε σε απομακρυσμένα ύδατα.

Εν κατακλείδι οι αυξημένες απώλειες διαδρομής και οι χρονικές διακυμάνσεις περιορίζουν τη μέγιστη δυνατή εμβέλεια και τη χωρητικότητα του δικτύου, επιβάλλοντας τη χρήση περισσότερων σταθμών βάσης σε πολυσύχναστες περιοχές ή την ενίσχυση της ισχύος εκπομπής/λήψης. Η υιοθέτηση κατάλληλων MCS ανάλογα με την περιοχή και τις συνθήκες μεγιστοποιεί το throughput και διατηρεί την αξιοπιστία. Η εφαρμογή των θεωρητικών μοντέλων στο πραγματικό περιβάλλον υποδεικνύει ότι η επιτυχής λειτουργία των συστημάτων VDE-TER απαιτεί:

- Υψηλής ποιότητας μηχανισμούς εκτίμησης καναλιού (channel estimation).
- Εφαρμογή AMC και δυναμικής αλλαγής MCS.
- Ειδικό σχεδιασμό στις κεραίες και τις διαμορφώσεις για ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων του multipath και fading.
- Ενσωμάτωση συστημάτων καταγραφής και ελέγχου των συνθηκών καναλιού.

Αυτές οι πρακτικές διαστάσεις μετατρέπουν τη θεωρία σε επιχειρησιακό πλεονέκτημα για την ασφαλή, αξιόπιστη και αποδοτική ναυτική επικοινωνία.

2.6 Τεχνικά Χαρακτηριστικά, Μέθοδοι Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης

Σύμφωνα με το πρότυπο ITU-R M.2092-1 [7], το επίγειο σκέλος του VDE-TER ενσωματώνει ένα ευρύ φάσμα σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (Modulation and Coding Schemes – MCS), που έχουν σχεδιαστεί για να ανταποκρίνονται με ευελιξία στις απαιτήσεις της σύγχρονης ναυτικής επικοινωνίας. Τα σχήματα αυτά δεν αποτελούν απλώς θεωρητικές επιλογές, αλλά λειτουργούν ως κρίσιμοι μηχανισμοί προσαρμογής στις ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν στο θαλάσσιο περιβάλλον, όπου οι παράγοντες θόρυβος, παρεμβολές και απώλειες σήματος μεταβάλλονται δυναμικά.

Η έννοια των Modulation and Coding Schemes (MCS) αποτελεί τον πυρήνα κάθε σύγχρονου συστήματος ψηφιακών επικοινωνιών και είναι ιδιαίτερα κομβική για το VDE-TER . Ουσιαστικά, το MCS προσδιορίζει δύο κρίσιμες παραμέτρους κάθε μετάδοσης:

- **Τη διαμόρφωση:** τον τρόπο με τον οποίο τα ψηφιακά δεδομένα «μεταφράζονται» σε αναλογικό σήμα για μετάδοση στο ραδιοφωνικό κανάλι.
- **Την κωδικοποίηση:** τον τρόπο με τον οποίο ενισχύεται η ανθεκτικότητα των δεδομένων απέναντι σε σφάλματα, μέσω προσθήκης ελέγχου ή πλεονασματικών bits (error correction).

Η σωστή επιλογή MCS εξισορροπεί φασματική αποδοτικότητα (bitrate) και αξιοπιστία (error rate) . Σε ένα μεταβαλλόμενο και απαιτητικό περιβάλλον όπως το θαλάσσιο κανάλι, αυτή η εξισορρόπηση

καθορίζει αν μια μετάδοση θα φτάσει σωστά ή θα χαθεί. Η επιλογή του κατάλληλου MCS βασίζεται σε μια σειρά από τεχνικά κριτήρια, όπως η ποιότητα σήματος προς θόρυβο (Signal-to-Noise Ratio – SNR), η διαθέσιμη εύρος ζώνης, οι απαιτήσεις ως προς τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, αλλά και η ανθεκτικότητα του συστήματος σε πιθανά λάθη μετάδοσης. Στο πλαίσιο αυτό, διατίθενται διαφορετικές διαμορφώσεις — όπως $\pi/4$ - QPSK , 8-PSK και 16-QAM — που συνδυάζονται με διάφορους ρυθμούς συμβόλων (19,2, 38,4 και 76,8 ksps) και ρυθμούς κωδικοποίησης ($1/2$ και $3/4$), διαμορφώνοντας εννέα (9) βασικά σχήματα MCS (Link IDs 11-19).

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε MCS παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2. Παρατηρούμε ότι οι παράμετροι όπως το εύρος ζώνης (25, 50 ή 100 kHz), ο ρυθμός συμβόλων, το είδος της διαμόρφωσης και το ποσοστό κωδικοποίησης συνδυάζονται στρατηγικά για να προσφέρουν διαφορετικά επίπεδα φασματικής αποδοτικότητας και αξιοπιστίας.

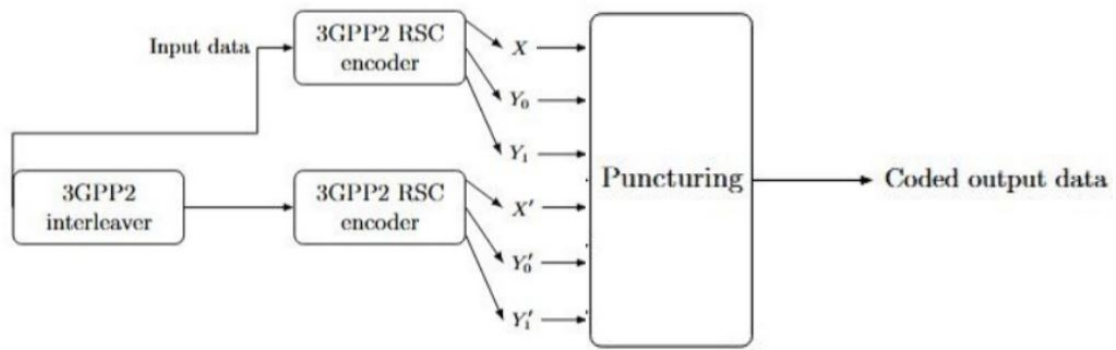
Η πραγματική σημασία αυτών των επιλογών γίνεται εμφανής μέσα από πρακτικά παραδείγματα. Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις που το πλοίο βρίσκεται κοντά στην ακτή και το κανάλι επικοινωνίας είναι «καθαρό», είναι δυνατή η επιλογή διαμόρφωσης 16-QAM με υψηλό ρυθμό συμβόλων (76,8 ksps), προσφέροντας μέγιστο ωφέλιμο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Αντίθετα, όταν το πλοίο πλέει σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε περιόδους κακοκαιρίας με έντονο θόρυβο, προτιμάται η χρήση $\pi/4$ - QPSK με χαμηλότερο ρυθμό συμβόλων και πιο συντηρητικό ρυθμό κωδικοποίησης ($1/2$), διασφαλίζοντας την ανθεκτικότητα απέναντι σε σφάλματα.

Η ορθολογική επιλογή του MCS ανά slot και η δυνατότητα μετάβασης μεταξύ διαφορετικών σχημάτων αποτελούν το κλειδί για την προσαρμοστικότητα και την υψηλή απόδοση του συστήματος. Το VDE-TER μπορεί, για παράδειγμα, να μεταβεί αυτόματα από ένα “επιθετικό” σχήμα με υψηλή διαμόρφωση και κωδικοποίηση σε ένα πιο “συντηρητικό” μόλις διαπιστωθεί επιδείνωση των συνθηκών επικοινωνίας.

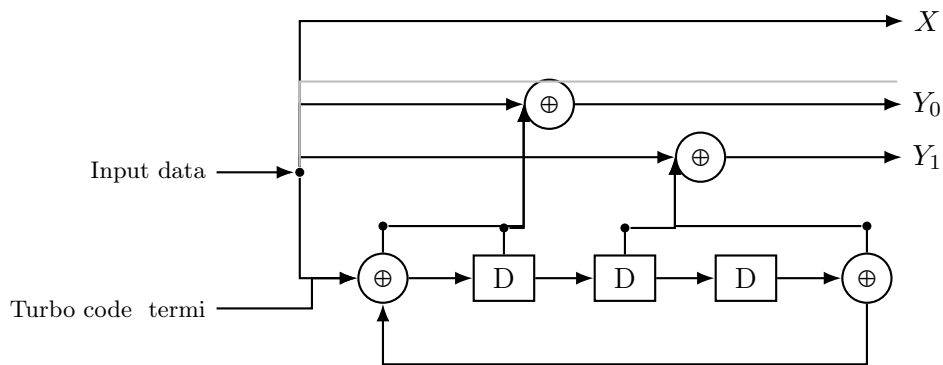
2.6.1 Κωδικοποίηση - Turbo Codes

Η τεχνική της Turbo κωδικοποίησης αποτελεί μία από τις πιο αποδοτικές μεθόδους διόρθωσης σφαλμάτων στο πεδίο των σύγχρονων τηλεπικοινωνιών και χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή αξιοπιστία μετάδοσης, όπως τα πρότυπα 3GPP2 και DVB-SH . Η προσέγγιση αυτή, που παρουσιάστηκε με μεγάλη επιτυχία από τους Berrou et al. (1993) [16], βασίζεται σε δύο βασικά συστατικά: στους Recursive Systematic Convolutional (RSC) κωδικοποιητές και στη χρήση ενός interleaver , ο οποίος αναδιατάσσει τη σειρά των bits εισόδου με τρόπο μη γραμμικό.

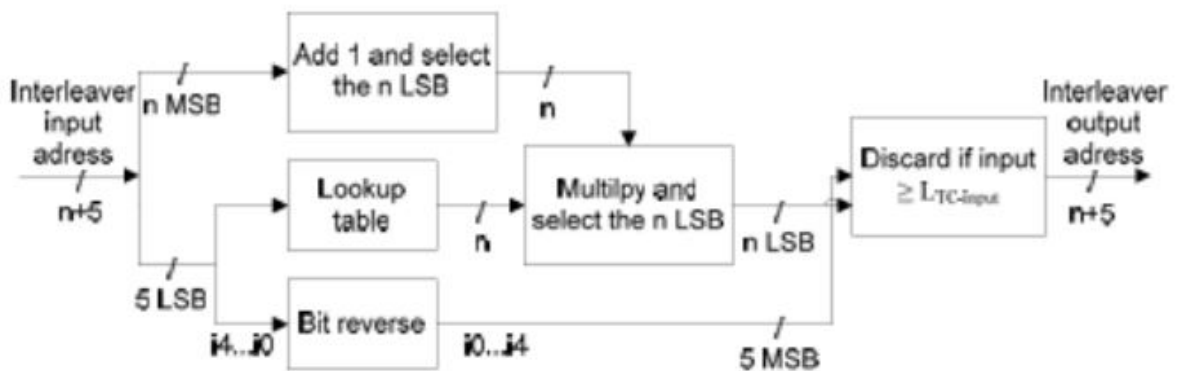
Η αξιοποίηση της τεχνικής Forward Error Correction (FEC) μέσω των Turbo Codes αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας στη μετάδοση δεδομένων του VDE-TER. Σύμφωνα με το πρότυπο ITU-R M.2092-1 (Annex 4), η αρχιτεκτονική του Turbo encoder βασίζεται στη συνεργατική λειτουργία δύο RSC κωδικοποιητών, οι οποίοι διασυνδέονται μέσω ενός ειδικά παραμετροποιημένου block interleaver για κάθε σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (MCS).



Σχήμα 2.5: Διάγραμμα 3GPP2 Turbo code encoder με δύο RSC κωδικοποιητές, interleaver και puncturing.



Σχήμα 2.6: Δομή 3GPP2 RSC encoder με τερματισμό, τρεις καταχωρητές καθυστέρησης και εξόδους X, Y_0, Y_1 .



Σχήμα 2.7: Διάγραμμα 3GPP2 interleaver addresser calculator.

Η ακολουθία της πληροφορίας αρχικά εισάγεται στον πρώτο RSC κωδικοποιητή, από τον οποίο παράγονται τα συστηματικά bits και τα αντίστοιχα parity bits. Παράλληλα, η ίδια ακολουθία υποβάλλεται σε διαδικασία interleaving μέσω του interleaver, αναδιατάσσοντας τη σειρά των bits με τέτοιο τρόπο ώστε συστάδες λαθών (burst errors) που μπορεί να εμφανιστούν κατά τη διάδοση

να διασκορπίζονται χρονικά και να καθίστανται ευκολότερα αντιμετωπίσιμες από τον δεύτερο RSC κωδικοποιητή. Έτσι, από τον δεύτερο RSC προκύπτει μια δεύτερη ακολουθία parity bits. Το συνολικό αποτέλεσμα του Turbo encoder είναι τρεις αλληλουχίες εξόδου: τα συστηματικά bits, τα parity bits του πρώτου RSC και τα parity bits του δεύτερου RSC (μετά το interleaving) [7]. Η αρχιτεκτονική αυτή παρουσιάζεται συνοπτικά στο Σχήμα 2.6, όπου απεικονίζεται η δομή υψηλού επιπέδου του Turbo encoder που εφαρμόζεται για FEC στο VDE-TER [7].

Στο επόμενο στάδιο εφαρμόζεται η διαδικασία puncturing, δηλαδή η επιλεκτική απόρριψη συγκεκριμένων parity bits σύμφωνα με μοτίβα (puncturing patterns) που ορίζονται με ακρίβεια για κάθε Link ID (Πίνακας 2.3) [7]. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την ευέλικτη ρύθμιση του τελικού ρυθμού κωδικοποίησης (code rate), ώστε το σύστημα να προσαρμόζεται σε διαφορετικές απαιτήσεις φασματικής απόδοσης και αξιοπιστίας, προσφέροντας ρυθμούς κωδικοποίησης $1/2$ ή $3/4$, ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο MCS. Επιπρόσθετα, εισάγονται ειδικά tail bits στο τέλος κάθε κωδικοποιημένης ακολουθίας για τον σωστό τερματισμό των RSC κωδικοποιητών, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου.

Η αρχιτεκτονική αυτή χαρακτηρίζεται από εξαιρετική ανθεκτικότητα στις προκλήσεις του ναυτιλιακού καναλιού, καθώς ο συνδυασμός RSC κωδικοποιητών και διαπλοκής (interleaving) επιτρέπει την αποδοτική διόρθωση ακόμη και εκτεταμένων «εκρήξεων» λαθών που προκαλούνται από θόρυβο, fading ή παρεμβολές. Τα Turbo Codes αξιοποιούν αλγορίθμους soft-in/soft-out αποκωδικοποίησης (όπως ο MAP – Maximum A Posteriori), πετυχαίνοντας επιδόσεις κοντά στο θεωρητικό όριο του Shannon. Αυτό διασφαλίζει ότι η επικοινωνία μέσω VDE-TER παραμένει αξιόπιστη ακόμη και σε συνθήκες ιδιαίτερα χαμηλού λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR), όπως απαιτείται για επιχειρησιακή ασφάλεια στη ναυσιπλοία.

Σύμφωνα με τους Hüttl et. al. [17], οι οποίοι αναλύουν εκτενώς τις επιδόσεις και τις παραμέτρους του Turbo coding, το σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι η ικανότητά της να πλησιάζει την απόδοση των θεωρητικών ορίων του καναλιού (όπως το όριο του Shannon), διατηρώντας παράλληλα σχετικά διαχειρίσιμη πολυπλοκότητα υλοποίησης.

Η τεχνική αυτή, όπως υλοποιείται στο VDE-TER, συνδυάζει υψηλή φασματική αποδοτικότητα με εξαιρετική αξιοπιστία μετάδοσης, καθιστώντας τα Turbo Codes ακρογωνιαίο λίθο της φυσικής διαστρωμάτωσης του προτύπου.

Πίνακας 2.3: Βασικές παράμετροι puncturing, FEC και padding ανά Link ID σύμφωνα με το ITU-R M.2092-1, Table 8 [7].

Link ID	11	12	13	14	15
Bandwidth (kHz)	25	25	25	50	50
Symbol rate (ksps)	19.2	19.2	19.2	38.4	38.4
Modulation	$\pi/4$ -QPSK	8-PSK	16-QAM	$\pi/4$ -QPSK	8-PSK
FEC rate	1/2	3/4	3/4	1/2	3/4
Padding + FEC tail bits	0+10	3+12	8+12	30+12	51+12
E_s/N_0 on AWGN (dB)	1.0	7.9	10.2	1.0	7.9
Symbols/burst	496	496	496	992	992
Net symbols/burst	437	437	437	917	917
Syncword size (symbols)			27		
Link ID size		16 (32,6 block code)			
Channel bits	874	1311	1748	1834	2751
FEC output bits	432	972	1296	896	2016
FEC output bytes	54	121	162	112	252

Link ID	16	17	18	19
Bandwidth (kHz)	50	100	100	100
Symbol rate (ksps)	38.4	76.8	76.8	76.8
Modulation	16-QAM	$\pi/4$ -QPSK	8-PSK	16-QAM
FEC rate	3/4	1/2	3/4	3/4
Padding + FEC tail bits	72+10	0+10	243+12	8+12
E_s/N_0 on AWGN (dB)	N/A	1.0	7.9	10.2
Symbols/burst	992	1984	1984	1984
Net symbols/burst	917	1877	1877	1877
Syncword size (symbols)		27		
Link ID size		16 (32,6 block code)		
Channel bits	3668	3754	5631	7508
FEC output bits	2688	1872	4032	5616
FEC output bytes	336	234	504	702

Η βασική μονάδα κωδικοποίησης του Turbo Encoder αποτελείται από δύο Recursive Systematic Convolutional (RSC) κωδικοποιητές, που ορίζονται από τη μεταβιβαστική συνάρτηση [7]:

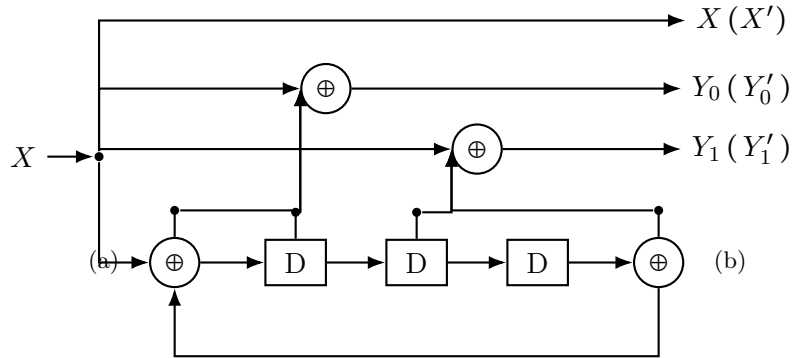
$$G(D) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{n_0(D)}{d(D)} & \frac{n_1(D)}{d(D)} \end{bmatrix}$$

με:

$$n_0(D) = 1 + D + D^3, \quad n_1(D) = 1 + D + D^2 + D^3, \quad d(D) = 1 + D^2 + D^3$$

Η γραφική απεικόνιση της δομής δίνεται στο Σχήμα 2.6. Κατά τη διαδικασία κωδικοποίησης, για τα πρώτα k χρονικά βήματα ο διακόπτης βρίσκεται στη θέση (a) και τα δεδομένα εισόδου

προωθούνται στον κωδικοποιητή. Για τα επόμενα έξι (6) βήματα (tail bits), ο διακόπτης πηγαίνει στη θέση (b), έτσι ώστε το trellis να τερματιστεί στη μηδενική κατάσταση, επιτρέποντας στον αποκωδικοποιητή να λειτουργήσει βέλτιστα. Τα έξοδα κάθε χρονικής στιγμής είναι τα συστηματικά bits και τα parity bits.



Σχήμα 2.8: Δομή Recursive Systematic Convolutional (RSC) κωδικοποιητή σύμφωνα με το ITU-R M.2092-1 (Figure 8).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8, για τα πρώτα k ρολόγια (bits πληροφορίας), ο διακόπτης (switch) είναι στη θέση (a), δηλαδή τα bits της πληροφορίας μπαίνουν στον κωδικοποιητή. Στη συνέχεια για τα έξι επόμενα ρολόγια (tail bits), ο διακόπτης πάει στη θέση (b), και τα bit που μπαίνουν είναι μηδενικά (ή κατάλληλες τιμές για το termination), ώστε να τερματιστεί σωστά το trellis. Τέλος η έξοδος (output) αποτελείται από το συστηματικό bit (X) και τα parity bits (Y_0, Y_1).

2.6.2 Interleaving

Η διαδικασία interleaving αποτελεί θεμελιώδη τεχνική που χρησιμοποιείται εκτενώς στα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με έντονο fading, όπως το ναυτιλιακό κανάλι που μελετάται στην παρούσα εργασία. Συγκεκριμένα, στην προσαρμοστική διαμόρφωση του συστήματος VDE-TER, το interleaving έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς βοηθά στην κατανομή των bits των μεταδιδόμενων μηνυμάτων με τέτοιο τρόπο ώστε να μειώνονται δραστικά οι επιπτώσεις από τα λεγόμενα burst errors. Αυτά τα σφάλματα είναι συχνά στο ναυτιλιακό περιβάλλον λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της θαλάσσιας διάδοσης, όπως είναι οι έντονες ανακλάσεις από την επιφάνεια της θάλασσας.

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προτύπου ITU-R M.2092-1, η διαδικασία interleaving πραγματοποιείται μέσω συγκεκριμένων αλγορίθμων που διασπείρουν διαδοχικά bits από ένα μήνυμα σε μη συνεχόμενες θέσεις. Έτσι, bits που αρχικά ήταν συνεχόμενα, κατά τη διάρκεια της μετάδοσης βρίσκονται πλέον σε απόσταση μεταξύ τους. Κατά συνέπεια, εάν εμφανιστεί ένα έντονο σφάλμα που επηρεάζει ένα σύνολο διαδοχικών bits, κατά τη διαδικασία αποδιαμόρφωσης και αποκωδικοποίησης, τα επηρεαζόμενα bits δεν ανήκουν πλέον στο ίδιο τμήμα του αρχικού μηνύματος. Ως αποτέλεσμα, μειώνεται δραστικά ο κίνδυνος απώλειας δεδομένων και διευκολύνεται η αποτελεσματική ανάκτηση του αρχικού σήματος.

Σύμφωνα με το πρότυπο ITU-R M.2092-1 (Annex 4), ο interleaver που χρησιμοποιείται στο VDE-

TER είναι τύπου block interleaver, όπου η ακολουθία εισόδου των bits αναδιατάσσεται αυστηρά σύμφωνα με έναν πίνακα μεταθέσεων (permutation table) που καθορίζεται ξεχωριστά για κάθε Link ID. Αυτή η προσεκτικά σχεδιασμένη δομή εξασφαλίζει ότι ακόμη και σε περιπτώσεις εκτεταμένων «εχρήξεων» λαθών, τα σφάλματα καταλήγουν διάσπαρτα σε διαφορετικές θέσεις μέσα στο κωδικοποιημένο πακέτο, καθιστώντας τα ευκολότερα στη διόρθωση από τον Turbo decoder. Για παράδειγμα, εάν μια αρχική ακολουθία $[b_1, b_2, \dots, b_N]$ περάσει από έναν block interleaver, η έξοδος είναι μια νέα ακολουθία $[b_{p_1}, b_{p_2}, \dots, b_{p_N}]$, όπου κάθε p_i αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη θέση σύμφωνα με τον πίνακα μεταθέσεων του εκάστοτε Link ID. Η λεπτομερής παραμετροποίηση των πινάκων αυτών παρέχεται στο Annex 4 του προτύπου, ενώ οι τιμές αυτές ενσωματώνονται τόσο στη διαδικασία κωδικοποίησης όσο και αποκωδικοποίησης, διασφαλίζοντας τη διαλειτουργικότητα μεταξύ εξοπλισμού διαφορετικών κατασκευαστών.

Η διαδικασία (*interleaving*) στο VDE-TER βασίζεται σε έναν συγκεκριμένο αλγόριθμο παραγωγής αριθμών μεταθέσεων ($\pi(s)$), που περιγράφεται ως εξής: Αρχικά, επιλέγονται πρώτοι αριθμοί p_q , $q \in \{1, \dots, 8\}$, όπως ορίζονται στον σχετικό πίνακα του προτύπου. Για κάθε θέση $s \in (1, \dots, k)$ (όπου k το συνολικό μήκος πληροφορίας), οι αριθμοί μεταθέσεων $\pi(s)$ υπολογίζονται με την παρακάτω ακολουθία βημάτων:

$$\begin{aligned} m &= (s - 1) \bmod 2 \\ i &= \left\lfloor \frac{(s - 1)}{2k_2} \right\rfloor \\ j &= \left\lfloor \frac{(s - 1)}{2} \right\rfloor - ik_2 \\ t &= (19i + 1) \bmod \left(\frac{k_1}{2} \right) \\ q &= t \bmod 8 + 1 \\ c &= (p_q j + 21m) \bmod k_2 \\ \pi(s) &= 2(t + ck_1/2 + 1) - m \end{aligned}$$

Οι παραπάνω αριθμοί μεταθέσεων πρέπει να ερμηνευθούν κατά τέτοιο τρόπο ώστε το s^{th} bit που διαβάζεται μετά το interleaving να είναι το $\pi(s)^{\text{th}}$ bit του αρχικού block πληροφορίας.

Η τεχνική interleaver είναι κρίσιμη για το ναυτιλιακό περιβάλλον, όπου οι συνθήκες του καναλιού χαρακτηρίζονται από έντονο fading, παρεμβολές και διαλείπουσες απώλειες. Μέσω της χρήσης του interleaving, το σύστημα VDE-TER αποκτά αυξημένη ανθεκτικότητα και διατηρεί την ακεραιότητα της επικοινωνίας ακόμη και κάτω από αντίξοες συνθήκες, στοιχείο ζωτικής σημασίας για εφαρμογές επιχειρησιακής ασφάλειας.

Πίνακας 2.4: Παράμετροι interleaver και puncturing για διαφορετικά μήκη πληροφορίας / code rates

LinkID	Nominal code rate	Information length	k1 k2	p1 p2 p3 p4 p5 p6 p7 p8	Puncturing ID	Tail ID
11	1/2	432	2 216	127 191 241 5 83 109 107 179	6	6a
12	3/4	972	2 486	31 37 43 47 53 59 61 67	8	8
13	3/4	1296	2 648	31 37 43 47 53 59 61 67	8	8
14	1/2	896	2 448	31 37 43 47 53 59 61 67	6	6
15	3/4	2016	4 504	31 37 43 47 53 59 61 67	8	8
16	3/4	2688	4 672	31 37 43 47 53 59 61 67	8	8
17	1/2	1872	6 312	211 61 227 239 181 79 73 193	6	6a
18	3/4	4032	4 1008	31 37 43 47 53 59 61 67	8	8
19	3/4	5616	16 351	137 101 223 41 167 131 61 47	8	8

Για κάθε MCS (Modulation and Coding Scheme), δηλαδή για κάθε Link ID, το πρότυπο ορίζει ξεχωριστά τον πίνακα interleaving, όπως φαίνεται στον πίνακα 2.4 [7].

2.6.3 Puncturing

Η διαδικασία puncturing, ή αλλιώς η επιλεκτική αφαίρεση bits, είναι μία ακόμα κρίσιμη τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως στα συστήματα κωδικοποίησης, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων VDE-TER. Η βασική φιλοσοφία του puncturing έγκειται στη μείωση των μεταδιδόμενων bits, με αποτέλεσμα την αύξηση του αποτελεσματικού ρυθμού κωδικοποίησης (effective coding rate). Αυτό πρακτικά σημαίνει πως με λιγότερα bits μπορούμε να μεταφέρουμε την ίδια πληροφορία, γεγονός που συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωση του throughput.

Σύμφωνα με το πρότυπο ITU-R M.2092-1, η διαδικασία puncturing υλοποιείται μέσω προκαθορισμένων μοτίβων που αφαιρούν με συγκεκριμένο και επαναλαμβανόμενο τρόπο ορισμένα bits από την έξοδο του Turbo Encoder. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η επιθυμητή ισορροπία μεταξύ απόδοσης (throughput) και αξιοπιστίας (Bit Error Rate - BER). Δηλαδή, ενώ τα λιγότερα bits σημαίνουν μεγαλύτερη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, η προσεκτική επιλογή του puncturing pattern διασφαλίζει πως το σύστημα παραμένει αξιόπιστο, διατηρώντας χαμηλά επίπεδα σφαλμάτων. Αυτή η στρατηγική είναι ιδιαίτερα πολύτιμη σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, χωρίς όμως να θυσιάζουν την ακρίβεια και την αξιοπιστία των πληροφοριών που μεταδίδονται.

Η τεχνική του puncturing (επιλεκτική απόρριψη bits ισοτιμίας) αποτελεί κρίσιμο μηχανισμό για τη διαμόρφωση του τελικού ρυθμού κωδικοποίησης (FEC rate) χωρίς να απαιτείται μεταβολή της βασικής δομής του Turbo encoder. Συγκεκριμένα, με το puncturing παραλείπονται (δεν μεταδίδονται) επιλεγμένα parity bits που παράγει ο κωδικοποιητής, σύμφωνα με αυστηρά προκαθορισμένα μοτίβα (puncturing patterns), όπως αυτά ορίζονται στο πρότυπο ITU-R M.2092-1 (Annex 4, Table 5) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.5.

Πίνακας 2.5: Puncturing patterns for data bit periods

Punc. pattern ID	Code rate	Punc. pattern (X; Y0; Y1; X'; Y0'; Y1' ...)
0	1/5	1;1;1;0;1;1
1	2/9	1;0;1;0;1;1 1;1;1;0;1;1 1;1;1;0;0;1 1;1;1;0;1;1
2	1/4	1;1;1;0;0;1 1;1;0;0;1;1
3	2/7	1;0;1;0;0;1 1;0;1;0;1;1 1;0;1;0;0;1 1;1;1;0;0;1
4	1/3	1;1;0;0;1;0
5	2/5	1;0;0;0;0;0 1;0;1;0;0;1 0;0;1;0;0;1 1;0;1;0;0;1 1;0;1;0;0;1 0;0;1;0;0;1 1;0;1;0;0;1 1;0;1;0;0;1 0;0;1;0;0;1 1;0;1;0;0;1 1;0;1;0;0;1 0;0;1;0;0;1
6	1/2	1;1;0;0;0;0 1;0;0;0;1;0
7	2/3	1;0;0;0;0;0 1;0;0;0;0;0 1;0;0;0;0;0 1;0;1;0;0;1
7a	2/3	1;0;0;0;0;0 1;0;0;0;0;0 1;0;0;0;0;0 1;1;0;0;1;0
7b	2/3	1;0;0;0;0;0 1;1;0;0;0;0 1;0;0;0;0;0 1;0;0;0;1;0
8	3/4	1;0;1;0;0;0 1;0;0;0;0;0 1;0;0;0;0;0 1;0;0;0;0;0 1;0;0;0;0;0 1;0;0;0;0;1
9	5/6	1;0;0;0;0;0 1;1;0;0;0;0 1;0;0;0;1;0 1;0;0;0;0;0 1;0;0;0;0;0 1;0;0;0;0;0 1;0;0;0;0;0 1;0;0;0;0;0 1;0;0;0;0;0 1;0;0;0;0;0

Κάθε συνδυασμός Link ID και επιθυμητού FEC rate αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο pattern puncturing , το οποίο καθορίζει ποια bits θα μεταδοθούν και ποια θα παραλειφθούν. Για παράδειγμα, ένα pattern τύπου [1, 0, 1, 1, 0, 1, ...] υποδηλώνει ότι μεταδίδεται το πρώτο parity bit , απορρίπτεται το δεύτερο, μεταδίδονται τα επόμενα δύο, κ.ο.κ. Το "1" συμβολίζει μετάδοση και το "0" απόρριψη.

Αυτή η προσέγγιση προσφέρει ευελιξία στην επιλογή επιπέδου προστασίας και αποτελεσματική διαχείριση φάσματος. Παρέχει τη δυνατότητα να αυξομειώνεται ο λόγος πληροφορίας/πλεονασμού, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του καναλιού και της εφαρμογής. Σε δύσκολες συνθήκες, επιλέγεται μικρότερος ρυθμός (rate), ώστε να διατηρείται υψηλό επίπεδο προστασίας από σφάλματα. Σε καλές συνθήκες καναλιού, η μετάδοση λιγότερων parity bits (μεγαλύτερος rate) επιτρέπει μεγαλύτερη φασματική αποδοτικότητα και βελτιστοποίηση της χρήσης του διαθέσιμου εύρους ζώνης.

Όπως αναφέρει χαρακτηριστικά το πρότυπο ITU-R M.2092-1, για κάθε διαφορετικό Puncturing Pattern ID ορίζεται επακριβώς το μοτίβο των tail bits που μεταδίδονται κατά τις τελευταίες έξι χρονικές περιόδους του κωδικοποιητή. Για παράδειγμα, για ρυθμό 1/5 (*Punct_Pat_ID* = 0), τα σύμβολα εξόδου *tail* για καθεμία από τις πρώτες τρεις περιόδους θα είναι *XXXY₀Y₁*, ενώ για τις τρεις τελευταίες περιόδους θα είναι *X'X'X'Y'₀Y'₁*. Ενώ για ρυθμό 2/9 (*Punct_Pat_ID* = 1), για τις δύο πρώτες περιόδους θα είναι *XXXY₀Y₁*, για την τρίτη *XXY₀Y₁*, για την τέταρτη και πέμπτη *X'X'Y'₀Y'₁*, και για την έκτη *X'X'X'Y'₀Y'₁*. Αντίστοιχα, για ρυθμό 1/4 (*Punct_Pat_ID* = 2), για καθεμία από τις τρεις πρώτες περιόδους τα *tail bits* είναι *XXY₀Y₁*, ενώ για τις τρεις τελευταίες *X'X'Y'₀Y'₁*. Όλα τα puncturing patterns για τα tail bits παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 2.6.

Πίνακας 2.6: Puncturing and repetition patterns for tail bit periods (last 6 clocks) σύμφωνα με το ITU-R M.2092-1, Annex 4, Table 6

Punct. pattern ID	Code rate	Punct./Rep. pattern (X; Y0; Y1; X'; Y0'; Y1'; ...)										
6	1/2	1;1;0;0;0;0		1;1;0;0;0;0		1;1;0;0;0;0		0;0;0;1;1;0		0;0;0;1;1;0		0;0;0;1;1;0
6a	1/2	1;1;0;0;0;0		1;1;0;0;0;0		1;0;0;0;0;0		0;0;0;1;1;0		0;0;0;1;1;0		0;0;0;1;0;0
7	2/3	1;0;0;0;0;0		1;0;1;0;0;0		1;0;1;0;0;0		0;0;0;1;0;0		0;0;0;1;0;1		0;0;0;1;0;0
7a	2/3	1;1;0;0;0;0		1;0;0;0;0;0		1;0;0;0;0;0		0;0;0;1;1;0		0;0;0;1;0;0		0;0;0;1;0;0
7b	2/3	1;1;0;0;0;0		1;1;0;0;0;0		1;1;0;0;0;0		0;0;0;1;1;0		0;0;0;1;1;0		0;0;0;1;1;0
8	3/4	1;0;1;0;0;0		1;0;1;0;0;0		1;0;1;0;0;0		0;0;0;1;0;1		0;0;0;1;0;1		0;0;0;1;0;1
8a	3/4	1;0;1;0;0;0		1;0;1;0;0;0		1;0;1;0;0;0		0;0;0;1;0;1		0;0;0;1;0;1		0;0;0;1;0;0
8b	3/4	1;0;1;0;0;0		1;0;1;0;0;0		1;0;0;0;0;0		0;0;0;1;0;1		0;0;0;1;0;1		0;0;0;1;0;0

2.6.4 Αποκωδικοποίηση - Turbo Codes

Η αποκωδικοποίηση των Turbo κωδίκων αποτελεί το πλέον κρίσιμο στάδιο στην ανάκτηση της αρχικής πληροφορίας μετά τη μετάδοση μέσω ενός θορυβώδους καναλιού, όπως το VHF θαλάσσιο κανάλι του VDE-TER. Η αποτελεσματικότητα της τεχνικής αυτής βασίζεται στον συνδυασμό της επαναληπτικής αποκωδικοποίησης (iterative decoding) και της χρήσης soft πληροφορίας (soft-in/soft-out processing), που συνιστούν βασική καινοτομία σε σχέση με τους παραδοσιακούς αλγόριθμους hard-decision decoding.

Ο Turbo αποκωδικοποιητής αποτελείται από δύο (ή περισσότερους) επιμέρους αποκωδικοποιητές, ο καθένας αντίστοιχος σε έναν από τους RSC κωδικοποιητές του Turbo encoder. Αυτοί λειτουργούν διαδοχικά και ανταλλάσσουν μεταξύ τους extrinsic information (εξωτερική πληροφορία), δηλαδή τις πιθανότητες/βέλτιστες εκτιμήσεις για κάθε bit δεδομένων, βασιζόμενοι στα παρατηρούμενα σήματα και τις αλυσίδες παραγόμενων bits.

Ο βασικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την αποκωδικοποίηση των Turbo κωδίκων είναι ο MAP (Maximum A Posteriori Probability). Ο MAP, που συχνά εφαρμόζεται στην πράξη μέσω των εκδόσεων Log-MAP ή Max-Log-MAP, υπολογίζει για κάθε bit τη λογαριθμική αναλογία πιθανοτήτων (Log-Likelihood Ratio - LLR) ότι το συγκεκριμένο bit είναι 0 ή 1, λαμβάνοντας υπόψη ολόκληρη τη διαδοχή των εισερχόμενων συμβόλων αλλά και τις a priori και a posteriori πληροφορίες που μπορεί να υπάρχουν. Με τον τρόπο αυτό, η χρήση του LLR δεν παρέχει μόνο τη δυαδική εκτίμηση της πληροφορίας, αλλά και το «βάθος της βεβαιότητας» για κάθε bit, γεγονός που ενισχύει σημαντικά την απόδοση του συστήματος υπό θορυβώδεις συνθήκες.

Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ο αλγόριθμος SOVA (Soft Output Viterbi Algorithm), ο οποίος αποτελεί μια παραλλαγή του κλασικού Viterbi. Σε αυτήν την περίπτωση, αντί για (hard decision) σε κάθε bit, ο SOVA παράγει soft πληροφορίες, επίσης υπό μορφή LLR, με βάση τη διαδρομή που ακολουθείται στο trellis και το βαθμό εμπιστοσύνης σε κάθε διακλάδωση ή απόφαση.

Κοινό χαρακτηριστικό των δύο αλγορίθμων είναι η δυνατότητα soft-in/soft-out λειτουργίας: τόσο οι εισερχόμενες όσο και οι εξερχόμενες πληροφορίες δεν είναι απλά bits, αλλά πιθανότητες ή εκτιμήσεις αυτών, γεγονός που επιτρέπει την επαναληπτική βελτίωση της αποκωδικοποίησης σε κάθε

κύκλο (iteration). Έτσι, το τελικό σύστημα γίνεται πολύ πιο ανθεκτικό στα σφάλματα που επιφέρει το κανάλι μετάδοσης, σε σύγκριση με παραδοσιακούς hard-decision αποκωδικοποιητές.

Η αποκωδικοποίηση Turbo βασίζεται στη διαδοχική εφαρμογή των δύο αποκωδικοποιητών σε πολλαπλούς κύκλους (iterations). Μετά από κάθε κύκλο, η extrinsic information που εξάγεται από τον έναν αποκωδικοποιητή μεταδίδεται ως επιπλέον πληροφορία στον επόμενο (με ή χωρίς interleaving). Αυτό επαναλαμβάνεται (συνήθως 6-10 φορές) μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση ή να ικανοποιηθεί κριτήριο διακοπής (π.χ. σταθερότητα των εκτιμήσεων).

Στο VDE-TER, η αποκωδικοποίηση Turbo γίνεται με soft information που λαμβάνεται από τους demodulators (π.χ. QPSK/8PSK/16QAM). Η ποιότητα της αποκωδικοποίησης εξαρτάται άμεσα από την ακρίβεια των LLR που παρέχονται από το φυσικό επίπεδο. Επιπλέον, τα patterns του interleaving και puncturing, όπως έχουν οριστεί ανά Link ID, είναι καθοριστικής σημασίας για τη σωστή λειτουργία του Turbo decoder. Η επαναληπτική διαδικασία αυξάνει σημαντικά την ανθεκτικότητα του συστήματος σε "εκρήξεις" λαθών (burst errors), επιτρέποντας επίδοση κοντά στο όριο του Shannon ακόμη και σε χαμηλά SNR. Το πλήθος των iterations συνιστάται να κυμαίνεται μεταξύ 6-10 για πλήρη αξιοποίηση της δυναμικής του Turbo decoding, λαμβάνοντας υπόψη όμως και τους περιορισμούς υπολογιστικής ισχύος του ναυτιλιακού εξοπλισμού.

Σε σχέση με τους παραδοσιακούς convolutional decoders, η Turbo αποκωδικοποίηση μειώνει τον ρυθμό σφαλμάτων (BER/PER) κατά 2-3 dB για δεδομένο ρυθμό κωδικοποίησης, επιτυγχάνοντας ασφαλή μετάδοση ακόμα και σε περιβάλλον με SNR της τάξης των 0-2 dB. Αυτή η βελτίωση είναι κρίσιμη για τις θαλάσσιες επικοινωνίες, όπου οι παρεμβολές και η εξασθένιση του σήματος είναι συχνό φαινόμενο.

2.6.5 Συνολική Δομή Πλαισίου/Πακέτου στο VDE-TER (End-to-End Frame/-Packet Structure)

Η ολοκληρωμένη μετάδοση δεδομένων μέσω του συστήματος VDE-TER βασίζεται σε μία αυστηρά δομημένη αλληλουχία επεξεργασίας, όπου κάθε τεχνική (διαμόρφωση, FEC, puncturing, tail bits, interleaving) διαδραματίζει διακριτό και κρίσιμο ρόλο στην τελική αξιοπιστία και αποδοτικότητα του συστήματος.

Βήματα διαμόρφωσης του πλαισίου μετάδοσης:

1. **Προσθήκη CRC (Cyclic Redundancy Check):** Στο αρχικό ωφέλιμο φορτίο δεδομένων (payload) προστίθεται ένας αλγόριθμος ανίχνευσης σφαλμάτων (CRC), ο οποίος επιτρέπει στον παραλήπτη να ανιχνεύει σφάλματα στην περιοχή δεδομένων πριν ή μετά την αποκωδικοποίηση.
2. **Κωδικοποίηση με Turbo encoder:** Το τροποποιημένο με CRC πακέτο εισέρχεται στον Turbo encoder. Ο encoder παράγει τα συστηματικά bits (πρωτότυπα δεδομένα) και δύο ακολουθίες parity bits, σύμφωνα με τη λογική των δύο RSC κωδικοποιητών.
3. **Interleaving:** Τα δεδομένα διαπλέκονται μέσω ενός ειδικά παραμετροποιημένου interleaver

(διαφορετικός ανά Link ID), με στόχο τη διασπορά των burst errors και τη βελτίωση της ανθεκτικότητας στη διόρθωση.

4. **Puncturing:** Σύμφωνα με τον πίνακα παραμέτρων ανά MCS/Link ID, εφαρμόζεται puncturing στα parity bits, ώστε να ρυθμιστεί ο τελικός ρυθμός κωδικοποίησης (1/2, 3/4 κλπ). Αυτό προσφέρει ευελιξία ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού.
5. **Προσθήκη tail bits :** Στο τέλος της κωδικοποιημένης ακολουθίας εισάγονται ειδικά tail bits, που εξασφαλίζουν τον σωστό τερματισμό των RSC κωδικοποιητών, προκειμένου ο αποκωδικοποιητής να "επιστρέψει" σε γνωστή κατάσταση.
6. **Αντιστοίχιση σε σύμβολα διαμόρφωσης (Mapping) :** Τα κωδικοποιημένα bits ομαδοποιούνται και αντιστοιχίζονται σε σύμβολα, σύμφωνα με το MCS που έχει επιλεγεί ($\pi/4$ -QPSK, 8-PSK, 16-QAM). Κάθε σύμβολο μεταφέρει διαφορετικό αριθμό bits ανάλογα με τη διαμόρφωση.
7. **Τοποθέτηση σε slot/frame (TDMA structure) :** Το τελικό πλαίσιο δεδομένων τοποθετείται σε μία χρονοθυρίδα (time slot) μέσα στο frame του TDMA. Το slot περιλαμβάνει: ramp-up, syncword, Link ID, περιοχή δεδομένων (data symbols), guard interval και, όπου απαιτείται, padding.

Η παραπάνω δομή διασφαλίζει την ανθεκτικότητα στις παρεμβολές και στις διακυμάνσεις ποιότητας του ναυτιλιακού καναλιού, επιτρέποντας στο VDE-TER να επιτυγχάνει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και αξιοπιστία ακόμη και υπό δύσκολες συνθήκες.

2.6.6 Μηχανισμός Adaptive Modulation and Coding (AMC)

Ο μηχανισμός Adaptive Modulation and Coding (AMC) αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα δομικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής του επίγειου τμήματος VDE-TER του VHF Data Exchange System (VDES), όπως ορίζεται στο πρότυπο ITU-R M.2092-1. Η λειτουργία του AMC επιτρέπει στο σύστημα να προσαρμόζει δυναμικά τόσο τη διαμόρφωση όσο και την κωδικοποίηση των δεδομένων, με βάση τις εκάστοτε συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι μετάδοσης. Παράμετροι όπως η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος, ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) και το επίπεδο παρεμβολών αξιολογούνται συνεχώς, προκειμένου να επιτυγχάνεται το βέλτιστο ισοζύγιο μεταξύ ρυθμού μετάδοσης και αξιοπιστίας επικοινωνίας.

Στην πράξη, ο μηχανισμός AMC αξιοποιεί μετρήσεις της ποιότητας του καναλιού (Channel Quality Indicator – CQI), λαμβάνοντας υπόψη μεταβλητές όπως το SNR, την ισχύ του σήματος και τις παρεμβολές, ώστε να επιλέγει αυτόματα το καταλληλότερο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (MCS). Η διαδικασία αυτή βασίζεται σε δυναμικές τεχνικές εκτίμησης καναλιού (channel estimation) και μηχανισμούς ανάδρασης (feedback), που παρέχουν σε πραγματικό χρόνο (real-time) πληροφορίες για τις επικρατούσες συνθήκες. Για παράδειγμα, σε περιβάλλον υψηλής ποιότητας καναλιού, μπορεί να επιλεγεί διαμόρφωση υψηλότερης τάξης, όπως η 16-QAM, σε συνδυασμό με μεγαλύτερο ρυθμό κωδικοποίησης (code rate), ώστε να αυξηθεί η φασματική αποδοτικότητα και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων. Αντίθετα, σε περιπτώσεις χαμηλού SNR ή έντονων παρεμβολών, το σύστημα μεταβαίνει

σε πιο συντηρητικές επιλογές, όπως διαμόρφωση χαμηλότερης τάξης ($\pi/4$ QPSK) και μικρότερο code rate, ώστε να ενισχυθεί η ανθεκτικότητα στα σφάλματα και να διασφαλιστεί η αξιοπιστία της επικοινωνίας.

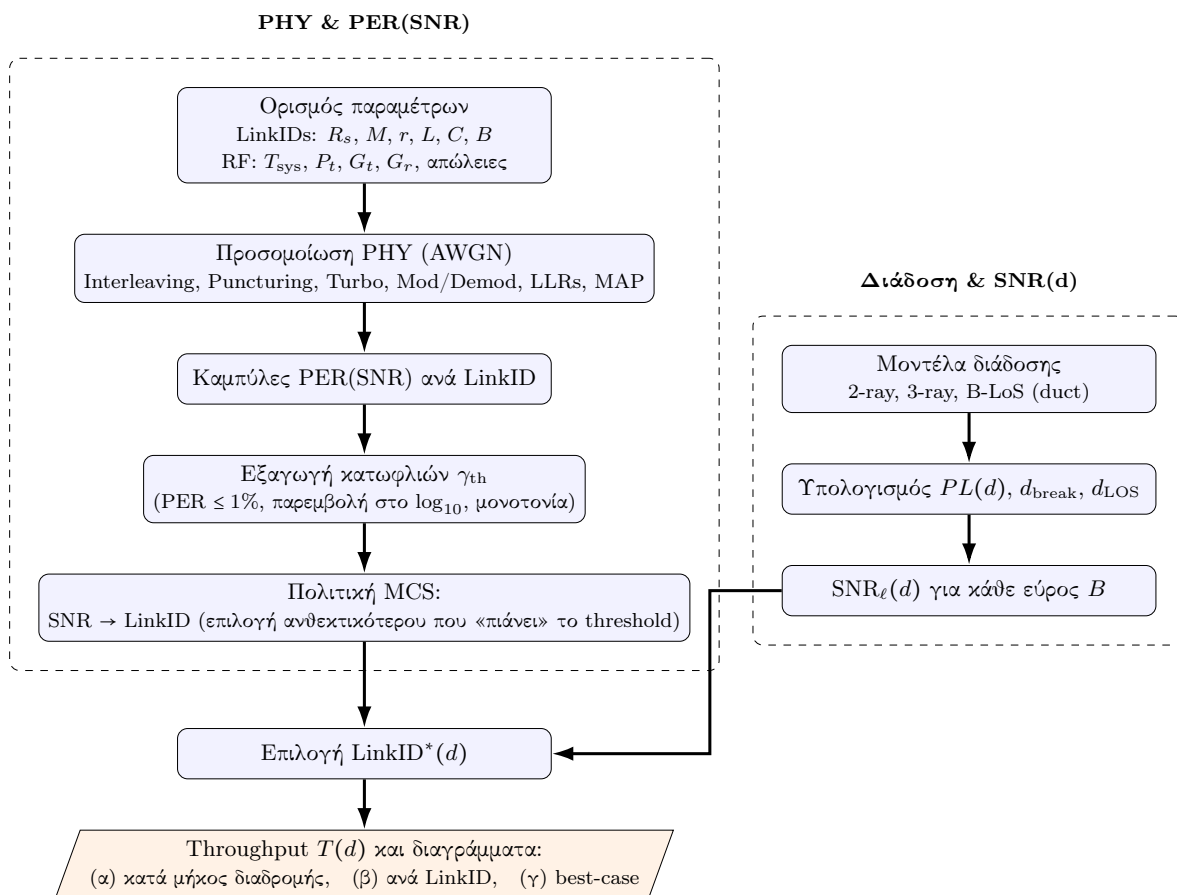
Η προσαρμοστικότητα που προσφέρει ο μηχανισμός AMC παρουσιάζει πολλαπλά πλεονεκτήματα. Πρώτον, επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση του ρυθμού δεδομένων υπό ευνοϊκές συνθήκες, ενώ ταυτόχρονα διατηρείται υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας ακόμη και σε δύσκολα κανάλια. Επιπλέον, βελτιστοποιείται η χρήση του φάσματος, καθώς οι διαθέσιμοι πόροι διαμοιράζονται πιο αποτελεσματικά μεταξύ πολλών χρηστών. Η αυτόματη προσαρμογή των παραμέτρων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης συμβάλλει επίσης στην εξοικονόμηση ενέργειας, αφού μειώνεται η απαιτούμενη ισχύς εκπομπής όταν οι συνθήκες είναι καλές, παρατείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού.

Επιπρόσθετα είναι ιδιαίτερα κατάλληλος για ναυτικά περιβάλλοντα, όπου οι συνθήκες επικοινωνίας μπορούν να μεταβληθούν απρόβλεπτα και ταχύτατα, εξαιτίας φυσικών εμποδίων (όπως νησιά ή κύματα), καιρικών φαινομένων (βροχή, ομίχλη, καταιγίδες) ή αυξημένης πυκνότητας πλοίων σε περιοχές με υψηλή ναυτιλιακή κίνηση. Η ικανότητα αυτόματης και δυναμικής προσαρμογής των ρυθμίσεων επιτρέπει τη διατήρηση σταθερής και αποδοτικής επικοινωνίας, ακόμα και υπό αντίξοες συνθήκες. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά τον AMC κρίσιμο για εφαρμογές όπου η αξιοπιστία και η διαθεσιμότητα των επικοινωνιών αποτελούν προϋπόθεση για την ασφάλεια, τη διαχείριση ναυτικών επιχειρήσεων και την αποτελεσματική μετάδοση κρίσιμων πληροφοριών.

Κεφάλαιο 3ο: Μοντελοποίηση του Συστήματος

3.1 Εισαγωγή

Η ενότητα αυτή καθορίζει το πλαίσιο και τον σκοπό της μοντελοποίησης που υλοποιείται στην παρούσα εργασία. Το πρωτόκολλο VDE-TER (VHF Data Exchange – Terrestrial) αποτελεί τμήμα της αρχιτεκτονικής VDES και στοχεύει στην αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων σε ναυτικά περιβάλλοντα, όπου οι συνθήκες διάδοσης είναι ιδιαίτερα μεταβαλλόμενες. Για την ποσοτική αξιολόγηση της απόδοσής του, αναπτύχθηκε ένα πλήρες προσομοιωτικό περιβάλλον σε MATLAB [18], το οποίο υλοποιεί όλα τα βασικά στάδια της επικοινωνίας στο φυσικό επίπεδο, με δυνατότητα παραμετροποίησης σύμφωνα με τις προδιαγραφές του ITU-R M.2092-1 [7].



Σχήμα 3.1: Σύνοψη μεθοδολογίας Κεφαλαίου 3: από την προσομοίωση PHY και τις καμπύλες PER(SNR) στην πολιτική MCS και από τα μοντέλα διάδοσης στον υπολογισμό $SNR_{\ell}(d)$. Η σύζευξη δίνει την επιλογή $LinkID^*(d)$ και το τελικό $T(d)$.

Η προσέγγιση βασίζεται στην προσομοίωση καναλιού AWGN (Additive White Gaussian Noise), το οποίο αποτελεί θεμελιώδες μοντέλο αναφοράς για τη μελέτη της απόδοσης συστημάτων ψηφιακών επικοινωνιών, καθώς επιτρέπει τον απομονωμένο έλεγχο των επιπτώσεων του θερμικού θορύβου [16]. Για κάθε Link ID του VDE-TER, ορίζεται κατάλληλο εύρος τιμών Signal-to-Noise Ratio (SNR), το οποίο καλύπτει τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας του συγκεκριμένου Modulation and Coding Scheme (MCS). Στο εύρος αυτό υπολογίζεται η συνάρτηση PER(SNR) μέσω εκτεταμένης

προσομοίωσης Monte Carlo, με στατιστικά αξιόπιστο αριθμό λαθών ανά σημείο.

Η πορεία από την φυσική επίδοση σε επίπεδο καναλιού έως την επιχειρησιακή αξιολόγηση γίνεται σε τρία διαδοχικά στάδια:

1. PER(SNR) – Μέτρηση της πιθανότητας αποτυχίας πακέτου ως συνάρτηση του SNR για κάθε MCS.
2. Throughput(SNR) – Μετατροπή των τιμών PER σε ρυθμοαπόδοση, λαμβάνοντας υπόψη τον ρυθμό συμβόλων, την τάξη διαμόρφωσης, τον ρυθμό κώδικα και την ωφέλιμη αναλογία φορτίου.
3. Εμβέλεια – Αντιστοίχιση της απόδοσης σε απόσταση μέσω μοντέλων απωλειών διάδοσης (path loss models) όπως το two-ray, το three-ray και το B-LoS με evaporation duct [11] [9].

Η όλη διαδικασία υλοποιείται με πλήρως παραμετροποιήσιμο σενάριο, όπου τα βασικά στάδια — παραγωγή τυχαίων δεδομένων, κωδικοποίηση (Turbo), διαμόρφωση, διέλευση από το κανάλι, αποδιαμόρφωση, αποκωδικοποίηση, υπολογισμός PER και τελική ανάλυση throughput και εμβέλειας — ενσωματώνονται σε ενιαίο πειραματικό πλαίσιο.

3.2 Παράμετροι MCS και Θερμικός Θόρυβος

Η αντιστοίχιση των LinkID 11–19 σε σχήματα MCS (QPSK/16QAM με ρυθμούς κωδικοποίησης 1/2–3/4) και στα εύρη ζώνης $B = \{25, 49.9, 99.8\}$ kHz ακολουθεί τις προδιαγραφές του *ITU-R M.2092-1* (Annex 1–2), όπου καθορίζονται τα τυπικά σύμβολα/δευτ., οι διαμορφώσεις και οι κατηγορίες ζώνης για VDE–TER [7]. Οι ακριβείς αριθμητικές τιμές που χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις παρατίθενται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 2.2.

Ο συνολικός θόρυβος στο δέκτη υπολογίζεται από

$$N_{\text{dBW}} = 10 \log_{10}(k T_{\text{sys}} B), \quad (5)$$

όπου k η σταθερά Boltzmann, T_{sys} η ισοδύναμη θερμοκρασία συστήματος (σε Kelvin) και B το εύρος ζώνης (σε Hz).

Αν δοθεί *noise figure* (NF), τότε η ισοδύναμη θερμοκρασία δέκτη είναι

$$T_{\text{rec}} = T_0 \left(10^{\text{NF}/10} - 1 \right), \quad T_0 = 290 \text{ K},$$

και άρα $T_{\text{sys}} = T_{\text{ant}} + T_{\text{rec}}$ [19, 20]. Στις προσομοιώσεις μας χρησιμοποιούμε απευθείας T_{sys} (αντί να προσθέτουμε NF πάνω στο N_{dBW}), ώστε να αποφεύγεται διπλομέτρηση.

Χρησιμοποιούνται $G_t=3$ dBi, $G_r=0$ dBi, $L_{\text{tx}}=L_{\text{rx}}=1.5$ dB, $L_{\text{pol}}=2$ dB και συντηρητικό περιθώριο εξασθένισης $m=6$ dB, σύμφωνα με τυπικές πρακτικές σχεδίασης για θαλάσσια κανάλια VHF, για να καλύψουμε διακυμάνσεις καναλιού και ασάφειες μοντέλου. [19]. Η διάδοση μοντελοποιείται με

δύο/τριών ακτίνων μέχρι τη γραμμή οπτικής επαφής d_{LOS} και με *duct-only* (log-distance + leakage) για $d > d_{LOS}$, κατά τη βιβλιογραφία [9].

3.2.1 Ρυθμός Συμβόλων (Symbol Rate, R_s , σε ksps)

Ο ρυθμός συμβόλων (R_s) καθορίζει το πλήθος των συμβόλων που μεταδίδονται ανά δευτερόλεπτο και αποτελεί θεμελιώδη παράμετρο σχεδιασμού σε κάθε σύστημα ψηφιακής επικοινωνίας. Η τιμή του R_s σχετίζεται άμεσα με τη φασματική αποδοτικότητα (*spectral efficiency*), δηλαδή το πόσα bits πληροφορίας μπορούν να μεταδοθούν σε ένα δεδομένο εύρος ζώνης (bandwidth).

Στο πλαίσιο της παρούσας προσομοίωσης, επιλέχθηκαν συγκεκριμένες τιμές του R_s για κάθε Link ID, όπως ακριβώς ορίζονται από το πρότυπο ITU-R M.2092-1, ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα:

- Για Link IDs 11 έως 13 ρυθμός συμβόλων $R_s = 19.2$ ksps,
- Για Link IDs 14 έως 16, ρυθμός συμβόλων $R_s = 38.4$ ksps,
- Για Link IDs 17 έως 19, ρυθμός συμβόλων $R_s = 76.8$ ksps.

Αυτές οι τιμές αντανακλούν ρεαλιστικά σενάρια λειτουργίας του VDE-TER, με χαμηλότερους ρυθμούς για βασικές υπηρεσίες και υψηλότερους για απαιτητικές εφαρμογές δεδομένων.

Η επιλογή συγκεκριμένου R_s για κάθε σενάριο της προσομοίωσης έγινε με λαμβάνοντας υπόψη τη διατήρηση της συμβατότητας με τις προδιαγραφές του προτύπου και τα πραγματικά επιχειρησιακά περιβάλλοντα, τη διερεύνηση του trade-off μεταξύ φασματικής αποδοτικότητας και ευρωστίας σε θόρυβο και παρεμβολές: υψηλότερο R_s προσφέρει αυξημένο throughput, αλλά προϋποθέτει υψηλότερο SNR για ικανοποιητική απόδοση και αυξάνει την ευαισθησία του συστήματος σε φαινόμενα fading και path loss [9], τα οποία είναι ιδιαίτερα έντονα στο ναυτικό περιβάλλον, και την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος υπό διαφορετικές απαιτήσεις ζώνης και κίνησης δεδομένων (data traffic).

Στη δική μας προσομοίωση η επιλογή των τιμών του R_s , επιτρέπει τη ρεαλιστική απεικόνιση της συμπεριφοράς του VDE-TER στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και προσφέρει δυνατότητα συγκριτικής αξιολόγησης της απόδοσης των διαφόρων Link IDs, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα θεωρητικά όρια του καναλιού όσο και τις πρακτικές προκλήσεις του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

3.2.2 Σχήμα Διαμόρφωσης (Modulation Order, M)

Στην προσομοίωση που υλοποιήθηκε, το σχήμα διαμόρφωσης (M) αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, καθώς καθορίζει τη φασματική αποδοτικότητα, την απαιτούμενη ποιότητα καναλιού (SNR) και την ανθεκτικότητα του συστήματος στις διαταραχές που χαρακτηρίζουν το ναυτικό περιβάλλον διάδοσης. Η επιλογή του κατάλληλου modulation scheme για κάθε εξεταζόμενο *Link ID* βασίστηκε στις προδιαγραφές του προτύπου ITU-R M.2092-1 και αντανακλάται στον Πίνακα 2.2.

- **Link IDs 11, 14, 17 — QPSK ($M = 4$):** Κάθε σύμβολο μεταφέρει 2 bits, προσφέροντας υψηλή ανθεκτικότητα σε θόρυβο και fading, με χαμηλές απαιτήσεις σε SNR. Η QPSK είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για απαιτητικά θαλάσσια περιβάλλοντα, όπου η διαλείπουσα οπτική επαφή, οι ισχυρές ανακλάσεις και η μεταβαλλόμενη στάθμη θορύβου καθιστούν κρίσιμη την αξιοπιστία της μετάδοσης [16]. Στην υλοποίηση, χρησιμοποιήθηκε $\pi/4$ -QPSK με Gray mapping μέσω της `pskmod/pskdemod (data,4, $\pi/4$, 'gray')` για να βελτιωθεί η απόδοση σε κανάλια με έντονες διακυμάνσεις φάσης.
- **Link IDs 12, 15, 18 — 8-PSK ($M = 8$):** Κάθε σύμβολο μεταφέρει 3 bits, επιτυγχάνοντας αυξημένη φασματική αποδοτικότητα και ρυθμοαπόδοση (throughput) σε σχέση με την QPSK. Το 8-PSK επιλέγεται σε περιπτώσεις όπου το κανάλι προσφέρει μέτριο προς υψηλό SNR, επιτρέποντας την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών χωρίς δραματική αύξηση του PER. Για λόγους συνέπειας και ακρίβειας στη σύγκριση, στα σενάρια 8-PSK υλοποιήθηκε η `pskmod/pskdemod (data,8,0, 'gray')` με Gray mapping.
- **Link IDs 13, 16, 19 — 16-QAM ($M = 16$):** Κάθε σύμβολο μεταφέρει 4 bits, παρέχοντας τη μέγιστη φασματική αποδοτικότητα ανάμεσα στα διαθέσιμα schemes, αλλά απαιτώντας υψηλές τιμές SNR για τη διατήρηση χαμηλού ρυθμού σφαλμάτων. Η 16-QAM είναι κατάλληλη για περιβάλλοντα με σταθερό και καθαρό κανάλι, όπως σε μικρές αποστάσεις ή συνθήκες ήπιας θαλάσσιας διάδοσης. Στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε `qammod/qamdemod(data, 16, "gray")` με Gray mapping, ώστε να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα λάθους λόγω γειτονικών σημείων στον αστερισμό.

Η επιλογή του M επηρεάζει άμεσα την καμπύλη PER (SNR) και κατ' επέκταση τη Throughput (SNR), καθορίζοντας το εύρος λειτουργίας και τη μέγιστη δυνατή απόδοση κάθε Link ID. Στην πράξη, η κατάλληλη επιλογή διαμόρφωσης γίνεται δυναμικά (AMC), λαμβάνοντας υπόψη τις τρέχουσες συνθήκες του καναλιού.

Πίνακας 3.1: Κύρια χαρακτηριστικά των Link IDs του πρωτοκόλλου VDE-TER, όπως ορίζονται στο ITU-R M.2092-1 (Annex 4) [7].

Link ID	R_s (ksps)	Modulation	M	Code Rate	Frame Length (L)	CRC (C)
11	19.2	QPSK	4	1/2	432	10
12	19.2	8-PSK	8	3/4	972	15
13	19.2	16-QAM	16	3/4	1296	20
14	38.4	QPSK	4	1/2	896	42
15	38.4	8-PSK	8	3/4	2016	63
16	38.4	16-QAM	16	3/4	2688	84
17	76.8	QPSK	4	1/2	1872	10
18	76.8	8-PSK	8	3/4	4032	255
19	76.8	16-QAM	16	3/4	5616	20

Περιγραφή: Ο πίνακας συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά (ρυθμός συμβόλων, διαμόρφωση, code rate, frame length και CRC) των διαθέσιμων Link IDs για το VDE-TER, σύμφωνα με το ITU-R M.2092-1. Κάθε Link ID αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο συνδυασμό modulation / coding, παρέχοντας ευέλικτη προσαρμογή του συστήματος ανάλογα με τις απαιτήσεις καναλιού και εφαρμογής.

Η υλοποίηση και αξιολόγηση των παραπάνω σχημάτων διαμόρφωσης στο πλαίσιο της προσομοίω-

σης μάς επέτρεψε να διερευνήσουμε στην πράξη το trade-off μεταξύ φασματικής αποδοτικότητας (throughput) και ανθεκτικότητας (robustness):

Όσο μεγαλύτερο το M , τόσο αυξάνεται η μεταδιδόμενη πληροφορία ανά σύμβολο, αλλά απαιτείται και υψηλότερο SNR για την επίτευξη αποδεκτής απόδοσης.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι τα σχήματα υψηλής πολυπλοκότητας, όπως το 16-QAM, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στις διακυμάνσεις του SNR που παρατηρούνται σε πραγματικά ναυτικά κανάλια, ενώ σχήματα όπως το QPSK διατηρούν υψηλή αξιοπιστία ακόμη και υπό συνθήκες έντονου θορύβου.

Η επιλογή του κατάλληλου σχήματος διαμόρφωσης για κάθε σενάριο της προσομοίωσης έγινε με γνώμονα τη ρεαλιστική αναπαράσταση των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας του συστήματος VDE-TER, επιτρέποντας τη δυναμική προσαρμογή (AMC) μεταξύ throughput και reliability ανάλογα με την εκάστοτε ποιότητα καναλιού.

3.2.3 Λόγος Κωδικοποίησης (Code Rate, r)

Ο λόγος κωδικοποίησης (r) αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους παράγοντες σχεδίασης για το σύστημα VDE-TER, καθώς καθορίζει το ποσοστό των bits πληροφορίας σε σχέση με το συνολικό πλήθος των μεταδιδόμενων bits μετά την κωδικοποίηση. Στην προσομοίωση μας, εφαρμόσαμε τους λόγους κωδικοποίησης που ορίζονται από το ITU-R M.2092-1 [7], δηλαδή:

- Για τα Link IDs 11, 14, 17 χρησιμοποιήθηκε code rate $r = 1/2$,
- Για τα Link IDs 12, 13, 15, 16, 18, 19 χρησιμοποιήθηκε code rate $r = 3/4$.

Η επιλογή αυτών των τιμών έγινε βάση του πρότυπου της ITU, προκειμένου να μελετηθεί το trade-off μεταξύ αξιοπιστίας (robustness) και ωφέλιμου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων (throughput) σε ρεαλιστικές συνθήκες καναλιού.

Χαμηλό code rate ($1/2$) σημαίνει ότι για κάθε bit πληροφορίας μεταδίδεται ένα επιπλέον bit πλεονασμού (redundancy). Αυτό ενισχύει σημαντικά τη διόρθωση λαθών μέσω των turbo codes και προσφέρει υψηλή αξιοπιστία ακόμη και σε δύσκολες συνθήκες, όπως έντονο θόρυβο ή fading — χαρακτηριστικό συχνό στα ναυτικά κανάλια επικοινωνίας. Το αντίτιμο αυτής της αυξημένης προστασίας είναι η μείωση του καθαρού throughput, καθώς λιγότερα bits πληροφορίας μεταφέρονται ανά χρονική μονάδα.

Υψηλότερο code rate ($3/4$) εφαρμόστηκε σε σενάρια όπου το SNR ήταν επαρκές (σύμφωνα με τα plots που προέκυψαν από την προσομοίωση) και το κανάλι προσέφερε συνθήκες για αποδοτικότερη εκμετάλλευση του εύρους ζώνης. Με $r = 3/4$, κάθε 3 bits πληροφορίας συνοδεύονται από μόλις 1 bit πλεονασμού. Αυτό επιτρέπει την επίτευξη υψηλότερου throughput, αλλά με σχετική μείωση της προστασίας έναντι σφαλμάτων.

Η επιλογή του κατάλληλου code rate για κάθε Link ID στην προσομοίωση έγινε έτσι ώστε να εξεταστεί το πώς μεταβάλλεται το Packet Error Rate (PER) σε συνάρτηση με το SNR για

διαφορετικά code rates, ποιο είναι το πραγματικό throughput που επιτυγχάνεται για κάθε MCS σε διαφορετικές ποιότητες καναλιού και πόσο ευαίσθητο είναι το κάθε MCS στις μεταβολές των παραμέτρων fading και path loss.

3.2.4 Μήκος Πληροφορίας (Frame Length, L)

Το μήκος πληροφορίας ή frame length (L) προσδιορίζει τον αριθμό των bits που περιέχονται σε κάθε πακέτο δεδομένων προς μετάδοση και αποτελεί μία από τις πιο καθοριστικές παραμέτρους για την απόδοση του συστήματος. Η επιλογή της τιμής του L δεν είναι τυχαία, αλλά αντανακλά τόσο τις τεχνικές απαιτήσεις του προτύπου ITU-R M.2092-1 όσο και τους στόχους του δικού μας πειραματικού σεναρίου.

Στη προσομοίωση, υλοποιήθηκαν και μελετήθηκαν frames διαφορετικού μήκους, καλύπτοντας όλο το φάσμα των επίσημων Link IDs:

- Για Link ID 11 χρησιμοποιήθηκε $L = 432$ bits,
- Για Link ID 19 φτάσαμε έως $L = 5616$ bits,
- Ενώ για τα ενδιάμεσα Link IDs αξιοποιήθηκαν όλες οι ενδιάμεσες τιμές L που καθορίζει το πρότυπο (βλ. Πίνακα 2.2).

Αυτή η παραμετρική προσέγγιση μας επέτρεψε να εξετάσουμε στην πράξη τη σχέση μεταξύ frame size, latency και error performance:

Μικρά frames (π.χ. 432 ή 896 bits): Προσφέρουν αυξημένη αξιοπιστία και χαμηλή καθυστέρηση, καθώς ο δέκτης μπορεί να επαληθεύσει και να αποκωδικοποιήσει μικρότερα πακέτα γρηγορότερα και με μικρότερη πιθανότητα να επηρεαστούν από burst errors. Αυτό είναι κρίσιμο για εφαρμογές όπου προέχει η αξιοπιστία (π.χ. συστήματα ελέγχου ή ασφαλείας στη ναυσιπλοΐα).

Μεγάλα frames (π.χ. 4032, 5616 bits): Βελτιστοποιούν τη φασματική αποδοτικότητα και το throughput, αφού σε κάθε μεταδιδόμενο frame μεταφέρεται μεγαλύτερη ποσότητα πληροφορίας. Ωστόσο, η αύξηση του μεγέθους του frame συνεπάγεται και μεγαλύτερη ευπάθεια σε burst errors – φαινόμενο συχνό στα ναυτικά VHF κανάλια, ειδικά υπό συνθήκες fading. Επίσης, η καθυστέρηση (latency) αυξάνεται, καθώς απαιτείται περισσότερος χρόνος για τη μετάδοση και επεξεργασία του κάθε frame.

Η υλοποίηση διαφορετικών frame lengths στο MATLAB μάς επέτρεψε να παρατηρήσουμε πειραματικά τα εξής:

- Όταν εφαρμόζουμε interleaving σε μεγάλα frames, διασπείρουμε τα burst errors, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητα των turbo codes και μειώνοντας το Packet Error Rate (PER) – φαινόμενο που επιβεβαιώθηκε και από τα γραφήματα PER/SNR της προσομοίωσης μας.

- Η σύγκριση μικρών και μεγάλων frames για κάθε Link ID αποκάλυψε τη διαφορά στο latency, αλλά και τη συμπεριφορά του συστήματος σε περιπτώσεις υποβάθμισης της ποιότητας του καναλιού.

3.3 Interleaving, Puncturing και Turbo Coding

Στο περιβάλλον των επίγειων ναυτικών επικοινωνιών (VDE-TER), η εμφάνιση συσσωρευμένων λαθών (*burst errors*) λόγω διαλείψεων (*fading*), παρεμβολών ή έντονων ανακλάσεων (*multipath*) αποτελεί κρίσιμο ζήτημα, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια συνεχόμενων bits εντός ενός πλαισίου (*frame*). Για την αντιμετώπιση του φαινομένου, το πρότυπο ITU-R M.2092-1 προβλέπει την εφαρμογή *interleaving*, δηλαδή της αναδιάταξης των bits σύμφωνα με συγκεκριμένο αλγόριθμο, ώστε τα διαδοχικά bits να τοποθετούνται σε απομακρυσμένες θέσεις στο τελικό bitstream. Με τον τρόπο αυτό, τα σφάλματα που προκαλούνται σε συστάδες από το κανάλι «διασπώνται» σε μεμονωμένα λάθη, τα οποία μπορούν να διορθωθούν αποτελεσματικότερα από τους αλγορίθμους προωθητικής διόρθωσης λαθών (FEC), όπως οι Turbo κώδικες. Στη δική μας προσομοίωση, το *interleaving* ενσωματώθηκε πλήρως στη διαδικασία κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης για όλα τα εξεταζόμενα Link IDs, προκειμένου να αξιολογηθεί η βελτίωση της ανθεκτικότητας του συστήματος έναντι φαινομένων *burst errors*, σε συμφωνία με τις προδιαγραφές του προτύπου.

Ο πλήρης κώδικας για Turbo encoder/decoder, interleaver, puncturing και το Monte Carlo PER παρατίθεται στο Παράρτημα Θ.

3.3.1 Interleaving

Το *interleaving* αποτελεί μία στρωματοποιημένη τεχνική αναδιάταξης των bits του frame:

- Τα bits πληροφορίας “ανακατεύονται” (σύμφωνα με συγκεκριμένο αλγόριθμο/πίνακα), ώστε διαδοχικά bits στο αρχικό frame να βρίσκονται όσο το δυνατόν μακρύτερα μεταξύ τους στη διαμορφωμένη ροή (bitstream) που θα μεταδοθεί.
- Έτσι, ακόμη και αν το κανάλι προκαλέσει μια ακολουθία σφαλμάτων (*burst*), τα λάθη “σπάνε” σε μεμονωμένα λάθη διάσπαρτα στο frame μετά το de-interleaving στον δέκτη, καθιστώντας τα πιο αντιμετωπίσιμα από τον FEC (π.χ. Turbo codes).

Στη δική μας προσομοίωση για κάθε Link ID, υλοποιήθηκε ο interleaver χρησιμοποιώντας τον μαθηματικό τύπο και τους πίνακες παραμέτρων p που ορίζει το πρότυπο ITU-R M.2092-1 (και όπως φαίνεται στο σχετικό τμήμα του MATLAB κώδικα). Τα interleaver indices (`pmatrx`) παράγονται δυναμικά με βάση το μήκος πληροφορίας L και το εκάστοτε Link ID, λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένες παραμέτρους k_1 , k_2 και πίνακες μεταβλητών p που εγγυώνται καλή διασπορά των bits εντός του frame.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα υλοποίησης είναι το ακόλουθο:

```

1 pmatrx = zeros;
2 for s = 1:InformationLength(LID)

```

```

3   m = mod(s-1,2);
4   i = floor((s-1)/(2*k2));
5   j = floor((s-1)/2)-i*k2;
6   t = mod((19*i+1),k1/2);
7   q = mod(t,8)+1;
8   c = mod(p(LID,q)*j+21*m,k2);
9   pmatrix(s) = 2*(t+c*k1/2+1)-m;
10  end

```

Listing 1: Υπολογισμός του πίνακα *pmatrix* για το κάθε Link ID

Αυτός ο τύπος δημιουργεί ένα μοναδικό “μοτίβο” αναδιάταξης για κάθε frame, συμβατό με τις απαιτήσεις του προτύπου.

Η χρήση interleaving είχε σημαντική επίδραση:

- **Στα μεγάλα frames** (π.χ. Link ID 18, 19): Η χρήση interleaver ήταν κρίσιμη για την επίτευξη χαμηλού PER, καθώς τα burst errors λόγω fading μπορούσαν να επηρεάσουν δεκάδες ή εκατοντάδες bits. Το interleaving διέσπασε αυτές τις ακολουθίες σε μεμονωμένα λάθη που διορθώθηκαν αποτελεσματικά από τον αποκωδικοποιητή turbo.
- **Στα μικρότερα frames**: Η επίδραση παρέμεινε θετική, αν και λιγότερο έντονη λόγω της μικρότερης συνολικής διάρκειας του frame, ωστόσο συνέβαλε στη σταθερότητα των επιδόσεων.

3.3.2 Puncturing και Προσαρμογή Ρυθμού Κωδικοποίησης

Στο πλαίσιο της προσομοίωσης για το VDE-TER, η διαδικασία puncturing αποτέλεσε κομβικό μηχανισμό για την προσαρμογή του ρυθμού κωδικοποίησης (code rate) των Turbo Codes χωρίς να απαιτείται αλλαγή της βασικής δομής του κωδικοποιητή.

Η κωδικοποίηση turbo, σύμφωνα με το ITU-R M.2092-1, βασίζεται σε base encoder rate-1/3. Για να επιτευχθούν υψηλότερα code rates (π.χ. 1/2, 3/4) – όπως απαιτείται για κάθε διαφορετικό Link ID – εφαρμόζεται puncturing, δηλαδή επιλεκτική διαγραφή bits από την έξοδο του encoder, με βάση συγκεκριμένα puncturing patterns.

Το pattern αποτελεί ένα δυαδικό διάνυσμα (π.χ. [1 0 1 1 ...]), όπου το 1 υποδηλώνει bit που διατηρείται και το 0 bit που διαγράφεται. Έτσι, το τελικό stream που μεταδίδεται μέσω του καναλιού περιλαμβάνει μόνο τα bits που έχουν επιλεγεί από το pattern, οδηγώντας σε βελτιστοποίηση του ωφέλιμου ρυθμού μετάδοσης ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε υπηρεσίας.

Στο MATLAB μοντέλο για κάθε Link ID, καθορίστηκαν και εφαρμόστηκαν puncturing patterns, σύμφωνα με το Annex 4 του ITU-R M.2092-1 Πίνακας 2.6:

- Για code rate 1/2 (π.χ. Link IDs 11, 14, 17): Χρησιμοποιήθηκε pattern με πυκνότητα διαγραφών τέτοια ώστε να διατηρείται μόνο το 50% των bits εξόδου του base encoder.

- Για code rate 3/4 (π.χ. Link IDs 12, 13, 15, 16, 18, 19): Εφαρμόστηκαν πιο “επιθετικά” patterns που διαγράφουν ακόμη περισσότερα bits, επιτρέποντας αύξηση του throughput.

Τα patterns αυτά ορίστηκαν με μεταβλητές DPP και εφαρμόστηκαν στις κύριες ακολουθίες bits μέσω επανάληψης του pattern (`punScheme = [punScheme, DPP]`) ώστε να καλύπτουν όλο το frame. Παράλληλα, υλοποιήθηκε ξεχωριστή λογική για τα tail bits (`DPTailPatterns` και `DPT`), καθώς αυτά διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην ομαλή ολοκλήρωση της αποκωδικοποίησης (termination of trellis). Στο τελικό βήμα ορίζονται τα indices των bits που διατηρούνται (preserved, `DPT`), τα οποία και μεταβιβάζονται στον modulator και κατόπιν στο κανάλι. Αντίστοιχα, ο αποκωδικοποιητής στον δέκτη γνωρίζει το pattern και ανασυνθέτει κατάλληλα την ακολουθία πριν εκτελέσει το turbo decoding.

Η παραπάνω υλοποίηση του puncturing επέτρεψε τη δυναμική προσαρμογή του code rate σε πραγματικό χρόνο, χωρίς τροποποίηση του hardware ή του βασικού αλγορίθμου turbo encoding και τον πειραματισμό με το trade-off μεταξύ αξιοπιστίας και throughput:

- Χαμηλός ρυθμός puncturing (code rate 1/2): Ενίσχυσε σημαντικά την ανθεκτικότητα στα σφάλματα (χαμηλό PER).
- Υψηλός ρυθμός puncturing (code rate 3/4): Βελτίωσε το throughput, αλλά αύξησε την ευαισθησία του συστήματος στα σφάλματα του καναλιού.

Ο χειρισμός των tail bits μέσω ξεχωριστού pattern αποδείχθηκε ιδιαίτερα σημαντικός για την αποφυγή σφαλμάτων τερματισμού στο decoder (ιδιαίτερα στα μεγάλα frames και στα υψηλά code rates).

Στη προσομοίωση, για κάθε Link ID, τα tail bits ορίστηκαν ώστε να εξασφαλίζεται ο τερματισμός του trellis του κωδικοποιητή στην μηδενική κατάσταση (all-zero state), όπως επιτάσσει το ITU-R M.2092-1. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη κατάλληλων bits στο τέλος κάθε frame (σύμφωνα με τα `DPTailPatterns`), που διασφαλίζουν ότι η εσωτερική κατάσταση του κωδικοποιητή είναι γνωστή στον decoder κατά την αποκωδικοποίηση.

Η σημασία του trellis termination είναι διπλή: πρώτον ξαλείφει την αβεβαιότητα στα τελευταία bits του frame, περιορίζοντας τη διάδοση λαθών κατά το decoding και δεύτερον επιτρέπει στον αποκωδικοποιητή MAP να εκκινεί και να τερματίζει τη διαδικασία με γνωστές συνθήκες, βελτιστοποιώντας την πιθανότητα σωστής αποκωδικοποίησης των bits πληροφορίας (ιδιαίτερα σε μεγάλα frames και υψηλά code rates).

Πιο συγκεκριμένα, ο Turbo encoder σχεδιάστηκε με constraint length $K = 4$. Σύμφωνα με τη θεωρία των convolutional κωδικοποιητών, κάθε encoder απαιτεί $K - 1 = 3$ tail bits για τον ορθό τερματισμό του trellis. Καθώς το Turbo scheme περιλαμβάνει δύο τέτοιους encoders, ο συνολικός αριθμός tail bits ανά frame ανέρχεται σε $2(K - 1) = 6$. Η σωστή προσθήκη αυτών των bits διασφαλίζει την επαναφορά των καταχωρητών στη μηδενική κατάσταση, διευκολύνοντας τη διαδικασία αποκωδικοποίησης MAP και διασφαλίζοντας βέλτιστη απόδοση, όπως ορίζει το ITU-R M.2092-1.

3.4 Μετάδοση και Αποκωδικοποίηση

Δημιουργία Δεδομένων (Data Generation)

Στο πρώτο στάδιο κάθε επανάληψης, παράγεται μία τυχαία ακολουθία bits που αντιπροσωπεύει το πακέτο προς μετάδοση. Το μήκος αυτής της ακολουθίας (L) καθορίζεται δυναμικά από το εκάστοτε Link ID, σύμφωνα με το ITU-R M.2092-1 (π.χ. $L = 432$ για Link ID 11, $L = 5616$ για Link ID 19). Η χρήση της εντολής `data = randi([0 1], L, 1)`; στο MATLAB διασφαλίζει τη στατιστική ανεξαρτησία των πακέτων και επιτρέπει την αξιόπιστη εκτίμηση του Packet Error Rate (PER) σε κάθε SNR. Η προσέγγιση αυτή εξομοιώνει την τυχαία φύση των πραγματικών δεδομένων που διακινούνται σε ναυτικά δίκτυα και ενσωματώνει τη δυναμική διακύμανση των traffic patterns.

Κωδικοποίηση Δεδομένων (Turbo Encoding & Modulation)

Η ακολουθία bits κωδικοποιείται με Turbo Encoder που υλοποιείται στο MATLAB μέσω του `comm.TurboEncoder`, με κατάλληλη επιλογή trellis structure (`poly2trellis(4, [13 17 15], 13)`), ορισμό των interleaver indices (υπολογιζόμενα για κάθε Link ID), καθώς και εφαρμογή των αντίστοιχων puncturing patterns (DPP, DPT).

Ακολούθως, το κωδικοποιημένο bitstream διαμορφώνεται με το εκάστοτε σχήμα διαμόρφωσης:

- Για Link IDs 11, 14, 17: QPSK ($M = 4$ σύμβολα)
- Για Link IDs 12, 15, 18: 8-PSK ($M = 8$ σύμβολα)
- Για Link IDs 13, 16, 19: 16-QAM ($M = 16$ σύμβολα)

Η επιλογή modulation γίνεται αυτόματα βάσει των παραμέτρων που ορίζει το πρότυπο για κάθε Link ID, προσφέροντας δυνατότητα μελέτης του trade-off μεταξύ φασματικής αποδοτικότητας και ευρωστίας σε θόρυβο.

Μετάδοση μέσω Καναλιού AWGN (AWGN Channel Transmission)

Το διαμορφωμένο σήμα περνά από κανάλι Additive White Gaussian Noise (AWGN) με την εντολή `awgn(modulated_data, SNRdB(ii), 'measured')`; Για κάθε τιμή SNR της περιοχής ενδιαφέροντος, εφαρμόζεται Gaussian θόρυβος, εξομοιώνοντας το πραγματικό περιβάλλον θορύβου στα ναυτικά VHF κανάλια. Αυτή η διαδικασία δίνει τη δυνατότητα καταγραφής της απόδοσης του συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες ποιότητας καναλιού και παρέχει το υπόβαθρο για συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών συνδυασμών modulation/coding (MCS) ως προς την αξιοπιστία.

Αποδιαμόρφωση και Εξαγωγή LLRs (Demodulation & LLR Calculation)

Στη λήψη, το σήμα αποδιαμορφώνεται με χρήση των συναρτήσεων `pskdemod` ή `qamdemod` (ανάλογα με το modulation), με έξοδο σε Log-Likelihood Ratios (LLRs). Τα LLRs προσφέρουν στον de-

coder πληροφορία όχι μόνο για την τιμή του κάθε bit, αλλά και για το πόσο “σίγουρη” είναι η εκτίμηση του δέκτη (π.χ. `demod_data = qamdemod(noisy_data, 8, 'gray', OutputType='llr');`). Η χρήση LLR ως είσοδο για τον Turbo Decoder υλοποιεί το βέλτιστο decoding (soft-decision), το οποίο είναι κρίσιμο για την επίτευξη των ορίων απόδοσης των turbo codes, ειδικά σε κανάλια με ισχυρό θόρυβο.

Παράδειγμα αποδιαμόρφωσης με soft LLRs (`pskmod/pskdemod`): βλ. Παράρτημα I.

Αποκωδικοποίηση Δεδομένων (Turbo Decoding)

Τα LLRs τροφοδοτούνται στον Turbo Decoder (`comm.TurboDecoder`), ο οποίος εφαρμόζει τον MAP αλγόριθμο με προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων (`NumIterations=8`). Ο αποκωδικοποιητής χρησιμοποιεί τα ίδια interleaver indices και input indices (που αντανακλούν το pattern του puncturing) όπως και ο encoder, καθώς και τους κανόνες termination του trellis. Η συνδυαστική χρήση όλων αυτών των παραμέτρων διασφαλίζει ότι η ανακατασκευή των αρχικών bits πληροφορίας προσεγγίζει το μέγιστο θεωρητικό όριο επίδοσης για τα turbo codes, ενώ η επιλογή του αριθμού επαναλήψεων βελτιστοποιεί περαιτέρω το Packet Error Rate.

Η συνολική διαδικασία μετάδοσης και αποκωδικοποίησης για κάθε packet, όπως υλοποιήθηκε στο MATLAB, παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα ???. Τα βασικά στάδια περιλαμβάνουν τη δημιουργία των τυχαίων bits, την κωδικοποίηση και διαμόρφωση, τη μετάδοση μέσω καναλιού AWGN, την αποδιαμόρφωση με εξαγωγή LLRs, την turbo αποκωδικοποίηση και τον τελικό υπολογισμό του PER.

3.5 Υπολογισμός Packet Error Rate (PER) ανά Link ID

Η προσομοίωση της απόδοσης του συστήματος VDE-TER πραγματοποιήθηκε με στόχο την αποτίμηση της αξιοπιστίας μετάδοσης δεδομένων για όλα τα διαθέσιμα σενάρια διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (Link IDs 11–19), όπως ορίζονται από το ITU-R M.2092-1. Η διαδικασία διαρθρώθηκε ως εξής:

Για κάθε Link ID καθορίστηκαν συγκεκριμένες παράμετροι που αποτυπώνουν τις ιδιότητες του συστήματος:

- SNR_{dB} : Ορίστηκε το εύρος τιμών του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR, σε dB), το οποίο καλύπτει το φάσμα τιμών που παρουσιάζει ενδιαφέρον για τη λειτουργία κάθε MCS (Modulation and Coding Scheme).
- `packet_errors`: Καταγραφή του πλήθους των λανθασμένων πακέτων για κάθε σημείο SNR.
- `packets_created`: Καταγραφή του συνολικού πλήθους των πακέτων που μεταδόθηκαν για κάθε σημείο SNR.

Οι παραπάνω μεταβλητές συμπληρώθηκαν μετά από εκτεταμένη προσομοίωση, όπου για κάθε σημείο SNR μεταδίδονταν διαδοχικά πακέτα μέχρι να συγκεντρωθεί στατιστικά αξιόπιστο πλήθος λαθών (συνήθως τουλάχιστον 100–1000 λανθασμένα packets ανά σημείο).

Για κάθε τιμή SNR και για κάθε Link ID, υπολογίστηκε το PER. Η χρήση αυστηρών στατιστικών κριτηρίων (π.χ. απαιτούμενος αριθμός λαθών ανά σημείο) διασφάλισε ότι οι εκτιμήσεις του PER είναι αντιπροσωπευτικές της πραγματικής συμπεριφοράς του συστήματος υπό κάθε διαμόρφωση και κωδικοποίηση.

Οι τιμές του PER αποτυπώθηκαν γραφικά ως προς το SNR για κάθε Link ID, χρησιμοποιώντας λογαριθμική κλίμακα στον άξονα PER (semilogy). Αυτή η επιλογή επιτρέπει την εύκολη οπτικοποίηση διαφορών σε χαμηλές τιμές PER, οι οποίες έχουν ιδιαίτερη σημασία για την αποδοτικότητα του συστήματος σε ρεαλιστικά περιβάλλοντα ναυτικής επικοινωνίας.

3.6 Απόδοση Συστήματος

Για την αξιολόγηση της απόδοσης των διαφόρων σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση όπου υπολογίζεται ο ρυθμός μεταφοράς πληροφορίας (throughput) σε συνάρτηση με την αναλογία σήματος προς θόρυβο (SNR). Συγκεκριμένα, για κάθε Link ID (11 έως 19), εισάγονται τα αντίστοιχα σύνολα παραμέτρων συστήματος, όπως ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων (R_s), το πλήθος διακριτών επιπέδων διαμόρφωσης (M), ο ρυθμός κωδικοποίησης (r), το μήκος πληροφορίας (L) και η σταθερά ελέγχου (C).

Στη συνέχεια, αξιοποιούνται τα καταγεγραμμένα δεδομένα σφαλμάτων πακέτων (packet errors) και το πλήθος μεταδιδόμενων πακέτων (packets created) για κάθε τιμή SNR, ώστε να υπολογιστεί η πιθανότητα σφάλματος πακέτου (Packet Error Rate, PER) ως συνάρτηση του SNR.

```

1 SNR_common = 0:0.1:14; %range SNR
2 for i = 1:length(params)
3     PER = packet_errors{i} ./ packets_created{i};
4     Rs = params(i,1);
5     M = params(i,2);
6     r = params(i,3);
7     L = params(i,4);
8     C = params(i,5);
9
10    throughput = (1 - PER) .* Rs .* log2(M) .* r .* ((L - C)/L) / 1000;
11    % Create a new throughput table with the common SNR
12    throughput_common = zeros(size(SNR_common));
13    [~, idx_start] = min(abs(SNR_common - SNRdB{i}(1)));
14
15    idx_end = idx_start + length(throughput) - 1;
16    if idx_end > length(SNR_common)
17        idx_end = length(SNR_common);
18        throughput = throughput(1:(idx_end-idx_start+1));
19    end
20    throughput_common(idx_start:idx_end) = throughput;
21    plot(SNR_common, throughput_common, '-', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', ['Link ID ', ←
    -num2str(i+10)]);
22 end

```

Listing 2: Κώδικας προσομοίωσης για τον υπολογισμό Throughput

Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόζεται για όλα τα εξεταζόμενα σχήματα και τα αποτελέσματα απεικονίζονται γραφικά, επιτρέποντας την άμεση σύγκριση της απόδοσης ως προς το SNR.

Η παραγωγή των καμπυλών $Throughput(SNR)$ για όλα τα LinkID δίνεται στο Παράρτημα Α.

3.7 Μοντέλα Διάδοσης Καναλιού

Χρησιμοποιούνται μοντέλα διάδοσης **two-ray** και **three-ray** για Line-of-Sight (LoS) συνδέσεις, καθώς και μοντέλο **B-LoS** για Beyond-Line-of-Sight (με evaporation duct). Ο υπολογισμός του path loss γίνεται μέσω των συναρτήσεων `pathloss.m` και `blosQ.m`.

3.7.1 Μοντέλα Δύο και Τριών Διαδρομών

Για τη μελέτη των απωλειών διάδοσης στη θαλάσσια ζώνη, εφαρμόστηκαν δύο κλασικά μοντέλα: το μοντέλο δύο διαδρομών (Two-ray) και το μοντέλο τριών διαδρομών (Three-ray). Η προσομοίωση υλοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB , λαμβάνοντας υπόψη χαρακτηριστικές παραμέτρους της περιοχής ενδιαφέροντος.

Συγκεκριμένα, η συχνότητα λειτουργίας ορίστηκε στα $f = 157$ MHz, με το μήκος κύματος λ να υπολογίζεται ως $\lambda = c/f$, όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός. Τα ύψη εκπομπής και λήψης τέθηκαν σε $h_t = 90$ m (σταθμός βάσης) και $h_r = 30$ m (πλοίο), ενώ το ύψος του evaporation duct ορίστηκε σε $h_e = 10$ m.

Οι απώλειες διάδοσης για κάθε μοντέλο υπολογίστηκαν συναρτήσει της απόστασης d μεταξύ πομπού και δέκτη, η οποία μεταβάλλεται από 1 m έως 2500 m με βήμα 1 m. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά, απεικονίζοντας τη διακύμανση της εξασθένησης σήματος (PL) ως προς την απόσταση για κάθε μοντέλο, επιτρέποντας τη σύγκριση της συμπεριφοράς τους σε τυπικές θαλάσσιες συνθήκες.

```

1 f = 157e6;           % VHF (Hz)
2 c = 3e8;            % m/s
3 lambda = c / f;     % wevelength
4 ht = 90;           % base (m)
5 hr = 30;           % ship distance (m)
6 he = 10;           % Evaporation duct (m)
7 d = 1:1:5000;
8 PL2ray = zeros(size(d));
9 PL3ray = zeros(size(d));
10 for i = 1:length(d)
11     % Two-ray
12     PL2ray(i) = 10 * log10( ((lambda / (4 * pi * d(i)))^2) * ...
13         2 * sin((2 * pi * ht * hr) / (lambda * d(i))) );
14     % Three-ray
15     phi = 2 * sin((2 * pi * ht * hr) / (lambda * d(i))) * ...
16         sin((2 * pi * (he - ht) * (he - hr)) / (lambda * d(i)));
17     PL3ray(i) = 10 * log10( ((lambda / (4 * pi * d(i)))^2) * ...
18         (2 * (1 + phi)^2) );
19 end

```

Listing 3: Υπολογισμός απωλειών διάδοσης με μοντέλα δύο και τριών διαδρομών

2

3.7.2 Μοντέλο Beyond-Line-of-Sight (B-LoS)

Για αποστάσεις μεγαλύτερες από την απόσταση οπτικής επαφής d_{LOS} , όταν η δέσμη παγιδεύεται εντός του duct, το path loss ακολουθεί νόμο ισχύος:

$$PL_{\text{duct}}(d) = PL(d_0) + 10n_{\text{duct}} \log_{10} \frac{d}{d_0}$$

όπου d_0 η απόσταση αναφοράς και n_{duct} ο εκθέτης απωλειών εντός duct (τυπικά 1.6–2.0). Η ικανότητα παγίδευσης εξαρτάται από το μισό εύρος δέσμης θ_T , που προκύπτει από τις παραμέτρους δείκτη διάθλασης n_0 και κλίσης $\frac{dn}{dz}$.

Υπολογισμός Απόστασης Οπτικής Επαφής: Η μέγιστη απόσταση οπτικής επαφής υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την καμπυλότητα της Γης:

$$d_{\text{LOS}} \approx \sqrt{h_t^2 + 2h_t R} + \sqrt{h_r^2 + 2h_r R}$$

όπου R η ακτίνα της Γης.

Μοντελοποίηση Fading: Για αποστάσεις κοντά στο d_{LOS} , το κανάλι μοντελοποιείται ως Rician με συντελεστή K που μειώνεται προοδευτικά με την απόσταση. Σε αποστάσεις πολύ μεγαλύτερες του d_{LOS} , εφαρμόζεται Rayleigh fading. Η προσθήκη fading πραγματοποιείται σε επίπεδο πλάτους σήματος πριν την εκτίμηση του SNR(d).

Σύνδεση με Υπολογισμό SNR(d): Ο υπολογισμός του SNR(d) για κάθε γωνία ανύψωσης γίνεται συνδυάζοντας:

1. Την ισχύ εκπομπής P_t (σε dBW).
2. Τα κέρδη κεραιών G_t, G_r ανά γωνία.
3. Τις απώλειες διάδοσης $PL(d)$ από τα παραπάνω μοντέλα.
4. Το θερμικό θόρυβο του συστήματος N_{sys} .

Το αποτέλεσμα $SNR(d)$ χρησιμοποιείται στα επόμενα βήματα για τη χαρτογράφηση απόδοσης σε όρους απόστασης.

²Οι αναλυτικοί κώδικες παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

3.8 Πολιτική MCS–SNR → LinkID για Στόχο PER ≤ 1%

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η κατασκευή της προσαρμογής MCS (LinkID) ως συνάρτηση του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR), με κριτήριο αξιοπιστίας PER ≤ 1%. Τα δεδομένα PER ανά LinkID προκύπτουν από τις προσομοιώσεις της προηγούμενης ενότητας (βλ. § ??), όπου για κάθε LinkID έχουμε μετρήσεις PER ως προς το SNR. Για κάθε LinkID ℓ ορίζεται ένα κατώφλι SNR $\gamma_{\text{th}}^{(\ell)}$ ως η ελάχιστη τιμή SNR για την οποία ισχύει PER ≤ 1%.

Επειδή τα διαθέσιμα δείγματα PER βρίσκονται σε διακριτά σημεία SNR, το κατώφλι εξάγεται με γραμμική παρεμβολή στο $\log_{10}(\text{PER})$ μεταξύ των δύο γειτονικών δειγμάτων που περικλείουν το 1%. Αν (x_1, y_1) και (x_2, y_2) είναι τα δύο σημεία με x_i σε dB και $y_i = \log_{10}(\text{PER}_i)$, τότε

$$\gamma_{\text{th}}^{(\ell)} = x_1 + \frac{\log_{10}(0.01) - y_1}{y_2 - y_1} (x_2 - x_1). \quad (6)$$

Για να αποφευχθούν τυχόν αναστροφές (λόγω θορυβωδών δεδομένων), επιβάλλεται προαιρετικά μονοτονία στα κατώφλια ώστε

$$\gamma_{\text{th}}^{(11)} \leq \gamma_{\text{th}}^{(12)} \leq \dots \leq \gamma_{\text{th}}^{(19)}. \quad (7)$$

3.8.1 Κανόνας Επιλογής

Δοθέντος ενός γ (SNR σε dB), επιλέγεται το πιο απαιτητικό LinkID (μεγαλύτερος δείκτης) του οποίου το κατώφλι δεν υπερβαίνεται:

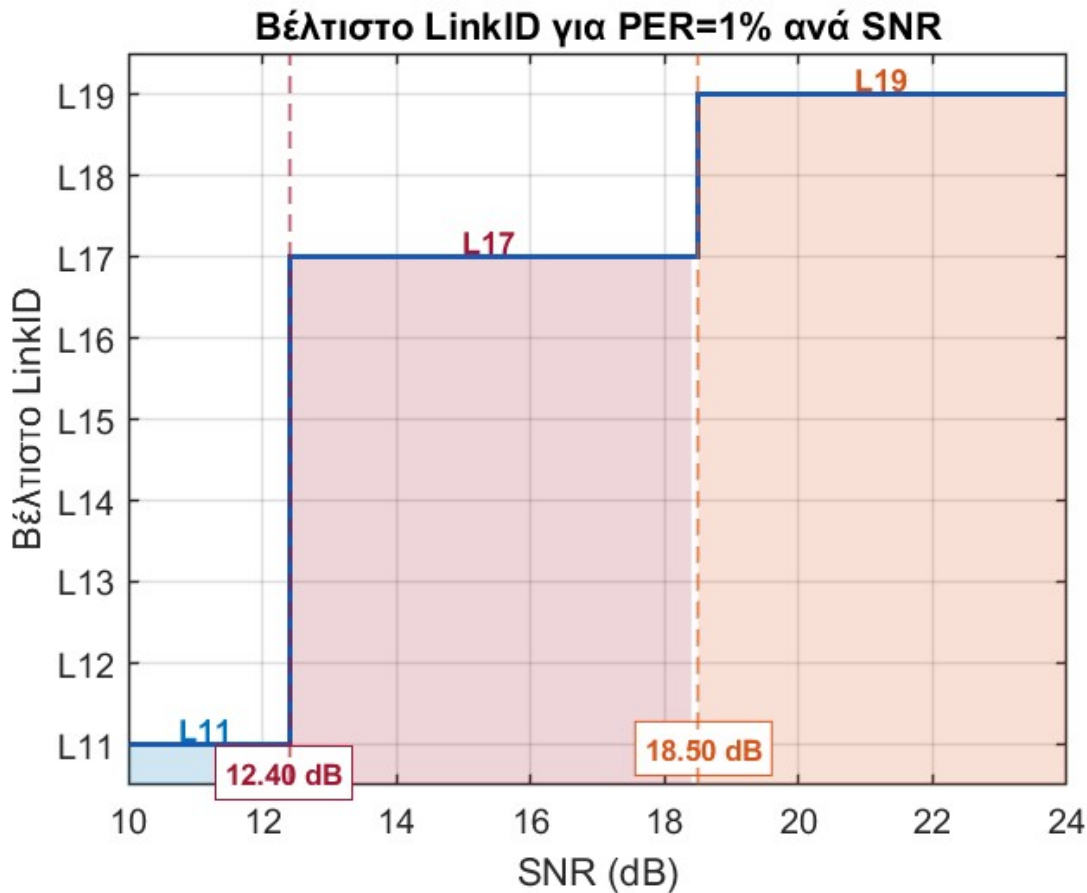
$$\text{LinkID}^*(\gamma) = \max\{ \ell \in \{11, \dots, 19\} : \gamma \geq \gamma_{\text{th}}^{(\ell)} \}. \quad (8)$$

Αν κανένα κατώφλι δεν ικανοποιείται, επιλέγεται το πιο robust (LinkID 11).

3.8.2 Υλοποίηση

Η παραπάνω διαδικασία υλοποιείται στο αρχείο `Codes/bestLinkIDkaluteroFigure.m` (πλήρης κώδικας στο Παράρτημα Β). Ο κώδικας:

- φορτώνει/ορίζει τα διανύσματα SNR και PER ανά LinkID,
- υπολογίζει τα $\gamma_{\text{th}}^{(\ell)}$ με παρεμβολή ((8)) και προαιρετική επιβολή μονοτονίας,
- αντιστοιχίζει κάθε γ ενός κοινού πλέγματος $\text{SNR}_{\text{common}}$ στο βέλτιστο LinkID,
- παράγει το τελικό διάγραμμα (ζώνες μέχρι τη γραμμή σκαλοπατιού και αριθμητικές τιμές στα thresholds).



Σχήμα 3.2: Πολιτική επιλογής MCS για στόχο $PER \leq 1\%$. Τα έγχρωμα τμήματα γεμίζουν μέχρι τη γραμμή σκαλοπατιού του αντίστοιχου LinkID. Οι κατακόρυφες διακεκομμένες γραμμές και οι ετικέτες ($xx.xx$ dB) σηματοδοτούν τα σημεία αλλαγής MCS.

3.8.3 Σχόλιο Επί των Αποτελεσμάτων.

Παρατηρείται ότι τα κατώφλια αυξάνονται με το LinkID, όπως αναμενόταν (πιο απαιτητικό MCS \Rightarrow υψηλότερο απαιτούμενο SNR για $PER \leq 1\%$). Επιπλέον, η χρήση παρεμβολής στο $\log_{10}(PER)$ οδηγεί σε πιο σταθερές τιμές κατωφλιών έναντι της αφελούς επιλογής «πρώτο δείγμα $\leq 1\%$ », ειδικά όταν η δειγματοληψία SNR είναι αραιή (π.χ. ανά 0.1 dB). Η παραγόμενη πολιτική αξιοποιείται στο επόμενο κεφάλαιο για την αποτίμηση ρυθμαπόδοσης υπό μεταβαλλόμενο SNR.

3.9 Throughput vs Απόσταση (Χωρίς Rayleigh fading)

Σε συνέχεια της πολιτικής MCS του §3.8 (στόχος $PER \leq 1\%$), χαρτογραφούμε εδώ τον ρυθμό απόδοσης (*throughput*) ως συνάρτηση της απόστασης d χωρίς στοχαστικές διακυμάνσεις καναλιού (NoRayleigh). Το αποτέλεσμα είναι «καθαρά» σκαλοπάτια throughput με σαφή σημεία αλλαγής MCS.

Είσοδοι/Παράμετροι.

- Συχνότητα $f = 157$ MHz, $\lambda = c/f$.
- Ύψη: $h_t=90$ m, $h_r=30$ m, $h_e=10$ m, καμπυλότητα Γης R .
- Ζώνες ανά LinkID: $B = \{25, 49.9, 99.8\}$ kHz (διάνυσμα B_ℓ για $\ell = 11..19$).
- Ισχύς/κέρδη/απώλειες: P_t (dBW), $G_t=3$ dBi, $G_r=0$ dBi, $L_{tx}=L_{rx}=1.5$ dB, $L_{pol}=2$ dB, περιθώριο $m=6$ dB.
- Θερμικός θόρυβος: $N_{dBW}(B_\ell) = 10 \log_{10}(k T_{sys} B_\ell)$.
- Κατώφλια MCS $\gamma_{th}^{(\ell)}$ από §3.8 (με παρεμβολή στο $\log_{10}(\text{PER})$ και μονοτονία).

Τα σχήματα παράγονται από τον `ThroughputVSdistanceNoRayleigh.m3`.

3.9.1 Μοντέλο Διάδοσης (Piecewise)

Ορίζουμε $d_{\text{break}} = \frac{4h_t h_r}{\lambda}$ και $d_{\text{LOS}} \approx \sqrt{h_t^2 + 2h_t R} + \sqrt{h_r^2 + 2h_r R}$. Το path loss υπολογίζεται κατά τμήματα:

$$\text{PL}_{2\text{-ray}}(d) = -10 \log_{10} \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left(2 \sin \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right)^2 + \varepsilon \right], \quad d < d_{\text{break}}, \quad (9)$$

$$\phi(d) = 2 \sin \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \sin \frac{2\pi (h_e - h_t)(h_e - h_r)}{\lambda d}, \quad (10)$$

$$\text{PL}_{3\text{-ray}}(d) = -10 \log_{10} \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left(2(1 + \phi(d)) \right)^2 \right], \quad d_{\text{break}} \leq d \leq d_{\text{LOS}}, \quad (11)$$

$$\text{PL}_{\text{duct}}(d) = \text{PL}(d_{\text{LOS}}^-) + 10 n_{\text{duct}} \log_{10} \frac{d}{d_0} + \alpha_{\text{km}} \frac{d - d_0}{1000}, \quad d > d_{\text{LOS}}, \quad (12)$$

με τυπικές τιμές $n_{\text{duct}} \in [1.6, 2.0]$, $\alpha_{\text{km}} \approx 0.05$ dB/km και $d_0=1000$ m. Ορίζουμε ε πολύ μικρό θετικό για αριθμητική σταθερότητα.

Υπολογισμός $\text{SNR}(d)$. Με $\text{EIRP} = P_t + G_t - L_{tx}$ και $G_{\text{path}} = G_r - L_{rx} - L_{pol}$:

$$P_r(d) [\text{dBW}] = \text{EIRP} - \text{PL}(d) + G_{\text{path}}, \quad (13)$$

$$\text{SNR}_\ell(d) [\text{dB}] = P_r(d) - N_{\text{dBW}}(B_\ell) - m, \quad \ell = 11..19. \quad (14)$$

3.9.2 Επιλογή MCS και Throughput

Στο κάθε d επιλέγουμε

$$\text{LinkID}^*(d) = \max \{ \ell : \text{SNR}_\ell(d) \geq \gamma_{th}^{(\ell)} \},$$

³Ο πλήρης κώδικας παρατίθεται στο Παράρτημα Ε.

αλλιώς $\ell=11$ αν δεν ικανοποιείται κανένα. Ο ρυθμός δίνεται από

$$T(d) = (1 - \text{PER}_\ell(\text{SNR}_\ell(d))) R_s^{(\ell)} \log_2 M^{(\ell)} r^{(\ell)} \frac{L^{(\ell)} - C^{(\ell)}}{L^{(\ell)}} / 1000 \text{ [kbps]}, \quad (15)$$

όπου οι παράμετροι (R_s, M, r, L, C) ανά ℓ είναι αυτοί του Πιν. 2.2.

Συνοψίζοντας:

1. Υπολογίζουμε $\text{PL}(d)$ με το piecewise μοντέλο (2-ray / 3-ray / duct).
2. Υπολογίζουμε $P_r(d)$ και $\text{SNR}_\ell(d)$ για κάθε ℓ με τον αντίστοιχο θόρυβο $N_{\text{dBW}}(B_\ell)$.
3. Εφαρμόζουμε τα $\gamma_{\text{th}}^{(\ell)}$ (από §3.8) και βρίσκουμε $\text{LinkID}^*(d)$.
4. Υπολογίζουμε $T(d)$ και σχεδιάζουμε τα σχήματα.

3.10 Throughput vs Απόσταση (Με Rayleigh fading)

Η ενότητα επεκτείνει τη μεθοδολογία του §3.9 εισάγοντας στοχαστικές διακυμάνσεις λόγω *Rayleigh fading*. Το υπόλοιπο pipeline (μοντέλα απωλειών 2/3-ray και duct, θερμικός θόρυβος, περιθώριο, πολιτική MCS) παραμένει αμετάβλητο.

Μοντελοποίηση fading.

Για κάθε δειγματοληπτημένη απόσταση d παράγεται τυχαίος συντελεστής καναλιού $h(d) \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ με μοναδιαία μέση ισχύ. Ο όρος fading σε dB:

$$\Delta_{\text{fading}}(d) = 10 \log_{10} |h(d)|^2 = 20 \log_{10} |h(d)|.$$

Ο ονομαστικός λόγος SNR προσαρμόζεται:

$$\text{SNR}'_\ell(d) = \text{SNR}_\ell(d) + \Delta_{\text{fading}}(d), \quad \ell = 11..19.$$

(Η μέση ισχύς των διαλείψεων είναι ίση με τη μονάδα, αλλά η στάθμη αναφοράς παραμένει σωστή επειδή κανονικοποιούμε σε $E[|h|^2] = 1$.)

Επιλογή MCS & Throughput. Χρησιμοποιούμε τα ίδια κατώφλια $\gamma_{\text{th}}^{(\ell)}$ του §3.8 και εφαρμόζουμε την επιλογή $\text{LinkID}^*(d) = \max\{\ell : \text{SNR}'_\ell(d) \geq \gamma_{\text{th}}^{(\ell)}\}$. Ο ρυθμός $T(d)$ υπολογίζεται όπως στο §3.9. Ο πλήρης κώδικας δίνεται στο Παράρτημα Z (αρχείο `Codes/ThroughputVSdistanceRayleigh.m`). Τα διαγράμματα παρουσιάζονται στο Κεφ. 4.

3.11 Throughput vs Απόσταση — post-processing («Αυτόνομο»)

Στην «αυτόνομη» εκδοχή, το throughput υπολογίζεται με post-processing από προϋπολογισμένα μεγέθη:

1. PER(SNR) ανά LinkID (από τις Monte-Carlo προσομοιώσεις του Κεφ. 3).
2. $\text{SNR}_\ell(d)$ από τα μοντέλα απωλειών (2/3-ray, duct) και το $N_{\text{dBW}}(B_\ell)$.
3. Πολιτική MCS §3.8: κατώφλια $\gamma_{\text{th}}^{(\ell)}$ με παρεμβολή στο $\log_{10}(\text{PER})$.

Για κάθε απόσταση d :

$$\ell^* = \text{LinkID}^*(d), \quad p(d) = \text{PER}_{\ell^*}(\text{SNR}_{\ell^*}(d)), \quad T(d) = (1-p(d)) R_s^{(\ell^*)} \log_2 M^{(\ell^*)} r^{(\ell^*)} \frac{L^{(\ell^*)} - C^{(\ell^*)}}{L^{(\ell^*)}} / 1000.$$

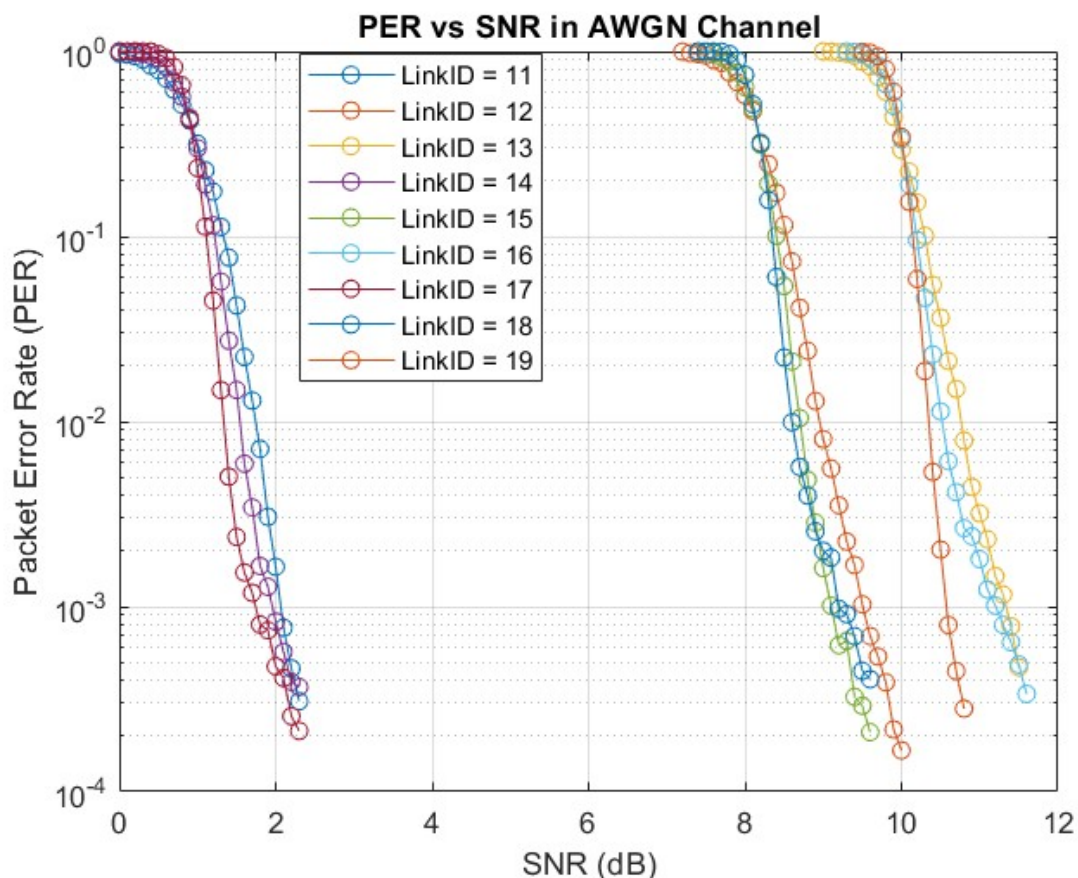
Παράγουμε τόσο τις καμπύλες ανά LinkID ($T_\ell(d)$), όσο και το μέγιστο ανά απόσταση $T_{\max}(d) = \max_\ell T_\ell(d)$. Ο πλήρης κώδικας παρατίθεται στο Παράρτημα Η. Τα σχετικά διαγράμματα δίνονται στο Κεφ. 4.

Κεφάλαιο 4ο: Ανάλυση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης

Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζεται η αξιολόγηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν την επίδοση του συστήματος ως προς το Packet Error Rate (PER), το Throughput συναρτήσει του SNR, καθώς και τις απώλειες διάδοσης (Path Loss) σύμφωνα με τα μοντέλα two-ray και three-ray.

4.1 PER (Packet Error Rate έναντι SNR)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις PER έναντι SNR συμφωνούν πλήρως με τις θεωρητικές προσδοκίες. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι για δεδομένο επίπεδο σφαλμάτων (π.χ. $PER = 10^{-2}$ ή 10^{-3}), οι υψηλότερες διαμορφώσεις (π.χ. 16-QAM) και οι υψηλότεροι ρυθμοί κωδικοποίησης απαιτούν σημαντικά υψηλότερες τιμές SNR σε σχέση με τις χαμηλότερες διαμορφώσεις (π.χ. $\pi/4$ -QPSK) και τους χαμηλότερους ρυθμούς κωδικοποίησης. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς οι υψηλότερες διαμορφώσεις μεταφέρουν περισσότερα bits ανά σύμβολο, με αποτέλεσμα να είναι πιο ευαίσθητες στον θόρυβο και να απαιτούν καλύτερες συνθήκες καναλιού (υψηλότερο SNR) για να επιτύχουν την ίδια αξιοπιστία.



Σχήμα 4.1: PER vs SNR in AWGN Channel

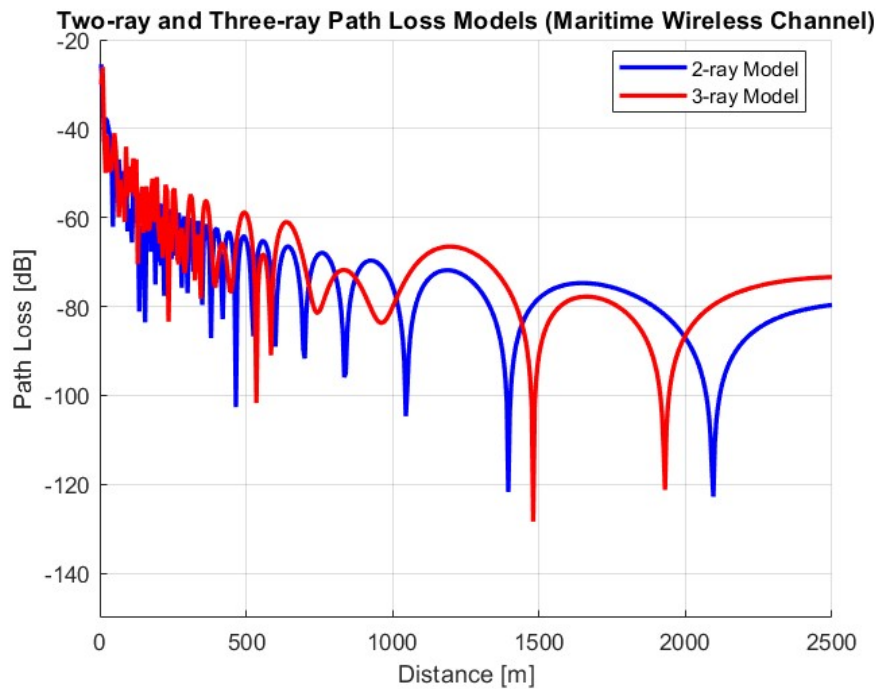
Η συσχέτιση του ρυθμού σφάλματος πακέτου (PER) με το SNR για διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης φαίνεται στο Σχ. 4.1. Με κωδικοποίηση Turbo και κανάλι AWGN,

το PER μειώνεται εκθετικά με την αύξηση του SNR, βελτιώνοντας την αξιοπιστία. Τα Link IDs διαφοροποιούνται ως προς την απαιτούμενη ελάχιστη τιμή SNR: απλούστερα σχήματα επιτυγχάνουν χαμηλό PER σε μικρότερο SNR, ενώ πιο σύνθετα (π.χ. 8-PSK, 16-QAM) απαιτούν υψηλότερο SNR. Η συμπεριφορά αυτή επιβεβαιώνει τη θεωρία ψηφιακών επικοινωνιών και την ορθότητα της προσομοίωσης.

4.2 Path Loss Two-ray και Three-ray Model

Η σύγκριση των μοντέλων διάδοσης two-ray και three-ray αναδεικνύει ουσιώδεις διαφορές. Το two-ray εμφανίζει ομαλή και προβλέψιμη αύξηση απωλειών με την απόσταση, ενώ το three-ray παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις λόγω του evaporation duct πάνω από τη θάλασσα.

Οι προσομοιώσεις επιβεβαιώνουν τη σημασία του λόγου SNR στη διαμόρφωση του Packet Error Rate (PER), του throughput και των απωλειών διάδοσης, καθώς και τον κρίσιμο ρόλο των σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (MCS). Η ανάλυση αναδεικνύει την αναγκαιότητα προσαρμοστικών στρατηγικών (AMC) για δυναμική επιλογή του καταλληλότερου MCS, ανάλογα με τις συνθήκες καναλιού.



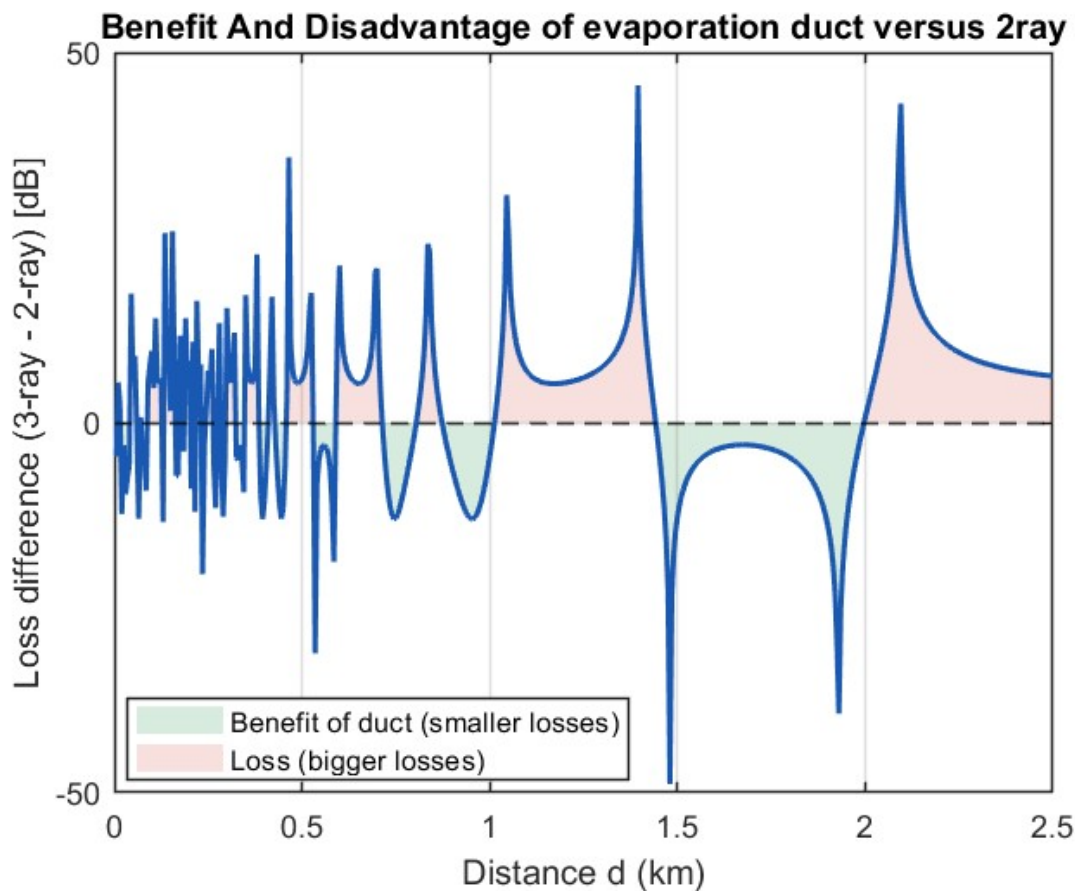
Σχήμα 4.2: Two-ray and Three-ray Path Loss Models .

4.2.1 Σύγκριση 3-ray Έναντι 2-ray (Διαφορά Απωλειών)

Για να αποτιμήσουμε το όφελος/ζημία του evaporation duct έναντι του απλού two-ray, υπολογίζουμε τη διαφορά

$$\Delta PL(d) = PL_{3\text{-ray}}(d) - PL_{2\text{-ray}}(d).$$

Αρνητικές τιμές υποδηλώνουν όφελος (μικρότερες απώλειες με 3-ray), ενώ θετικές τιμές ζημία. Το Σχ. 4.3 απεικονίζει τη $\Delta PL(d)$ με έγχρωμη σκίαση (γαλάζιο: όφελος, ροζ: ζημία). Ο κώδικας που παράγει το διάγραμμα ενσωματώνεται στο `blos.m` (Παράρτημα Γ) αμέσως μετά τον υπολογισμό των $PL_{2\text{-ray}}$ και $PL_{3\text{-ray}}$.

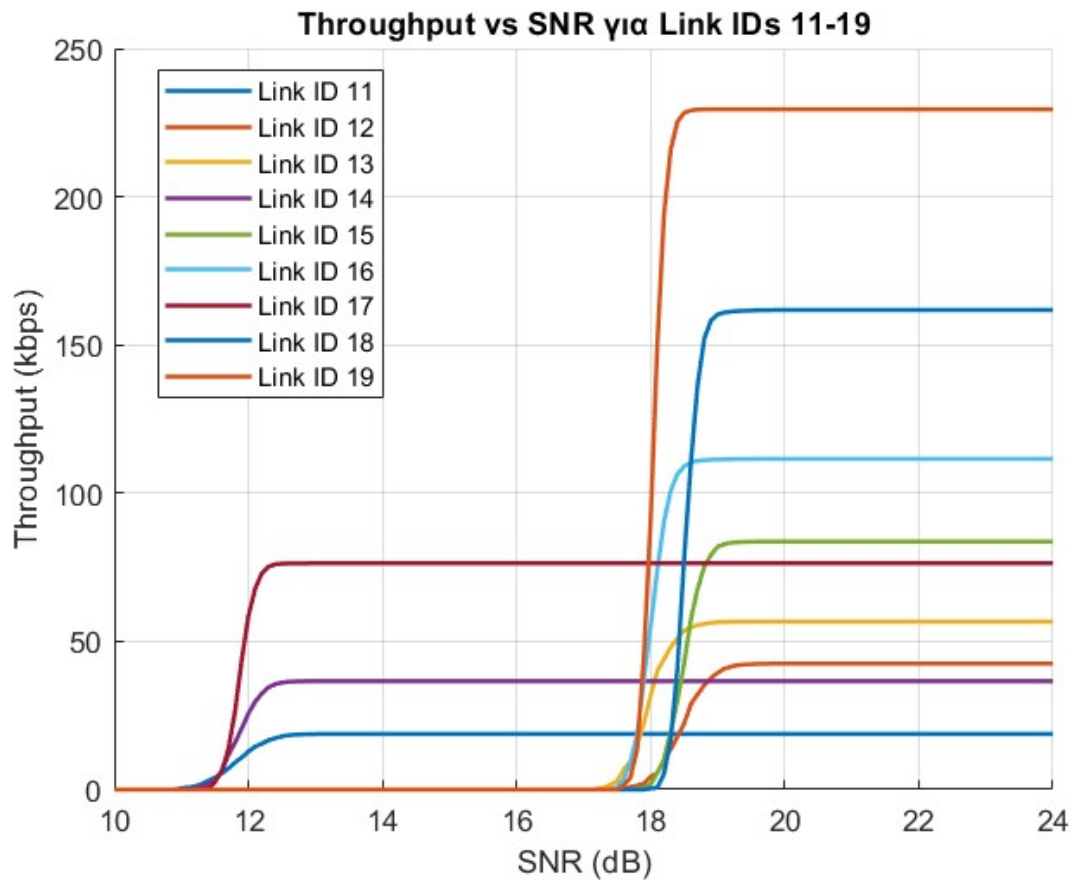


Σχήμα 4.3: Διαφορά απωλειών $\Delta PL = PL_{3\text{-ray}} - PL_{2\text{-ray}}$ ως προς την απόσταση. Αρνητικές τιμές (πράσινο) υποδηλώνουν όφελος από το evaporation duct (μικρότερες απώλειες), ενώ θετικές (κόκκινο) ζημία.

4.3 Throughput vs SNR

Η ανάλυση του throughput ως συνάρτηση του SNR αναδεικνύει ξεκάθαρα την ανάγκη για προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση (AMC). Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι για χαμηλές τιμές SNR, οι χαμηλότερες διαμορφώσεις (π.χ. π/4-QPSK) με χαμηλότερους ρυθμούς κωδικοποίησης παρέχουν υψηλότερο throughput, καθώς επιτυγχάνουν χαμηλότερο PER και συνεπώς μεγαλύτερη αξιοπιστία. Ωστόσο, καθώς το SNR αυξάνεται και οι συνθήκες του καναλιού βελτιώνονται, οι υψηλότερες διαμορφώσεις (8-PSK, 16-QAM) με υψηλότερους ρυθμούς κωδικοποίησης προσ-

φέρουν σημαντικά μεγαλύτερο throughput, λόγω της αυξημένης χωρητικότητας που παρέχουν.



Σχήμα 4.4: Throughput vs SNR in AWGN Channel .

Η παραπάνω παρατήρηση καθιστά σαφή την αναγκαιότητα της προσαρμογής του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες του καναλιού. Η χρήση AMC επιτρέπει στο σύστημα να επιλέγει δυναμικά το βέλτιστο MCS , ώστε να επιτυγχάνεται το μέγιστο δυνατό throughput για κάθε δεδομένη κατάσταση καναλιού. Η προσαρμοστική αυτή προσέγγιση είναι ιδιαίτερα σημαντική σε πραγματικά περιβάλλοντα, όπου οι συνθήκες διάδοσης μεταβάλλονται συνεχώς λόγω κινητικότητας, καιρικών συνθηκών και άλλων παραγόντων.

4.4 Αποτελέσματα των Περιπτώσεων Throughput vs Απόσταση

Στην ενότητα αυτή απεικονίζουμε τον ρυθμό απόδοσης $T(d)$ υπό την πολιτική MCS του §3.8 (στόχος $PER \leq 1\%$) για τρία σενάρια:

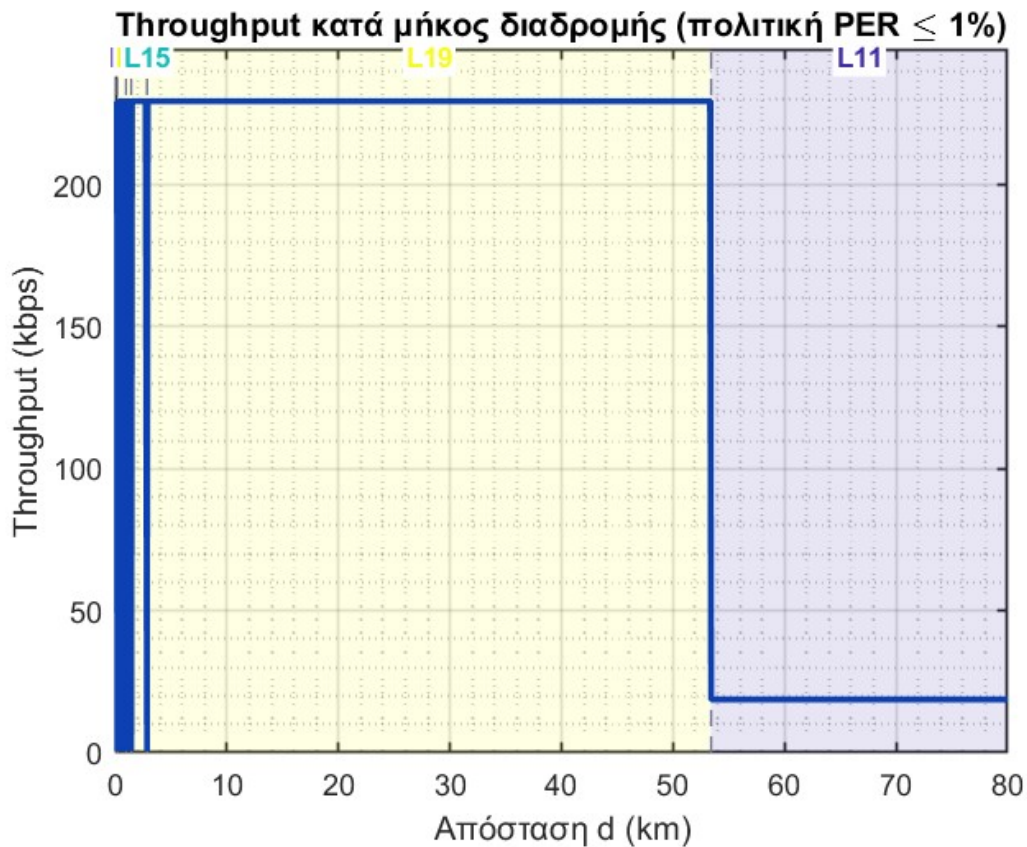
1. **Baseline χωρίς fading**, όπου οι μεταβολές οφείλονται αποκλειστικά στην γεωμετρία διάδοσης και στα κατώφλια SNR (§3.9),
2. **Με Rayleigh fading**, όπου ενσωματώνονται στοχαστικές διακυμάνσεις πλάτους που «μαλακώνουν» τα κατώφλια,

3. **Αυτόνομο (stand-alone)** σενάριο, στο οποίο τροφοδοτούμε τον αλγόριθμο με μια αυθαίρετη/μετρημένη τροχιά SNR(d) (χωρίς να δεσμευόμαστε από συγκεκριμένο path-loss μοντέλο). Το stand-alone είναι χρήσιμο για αποσύζευξη της χάραξης πολιτικής από το μοντέλο διάδοσης: επιτρέπει δοκιμές με μετρήσεις πεδίου ή εναλλακτικές τροχιές SNR, και χρήση του ίδιου κώδικα αξιολόγησης.

Για κάθε σενάριο δίνουμε (i) το συνολικό throughput κατά μήκος διαδρομής, (ii) τις καμπύλες ανά LinkID όταν «επιβληθεί» κάθε MCS, και (iii) το μέγιστο ανά απόσταση (envelope/best-case). Τα σχήματα παράγονται από τον `ThroughputVSdistanceNoRayleigh.m`⁴.

4.4.1 Baseline: Χωρίς Rayleigh

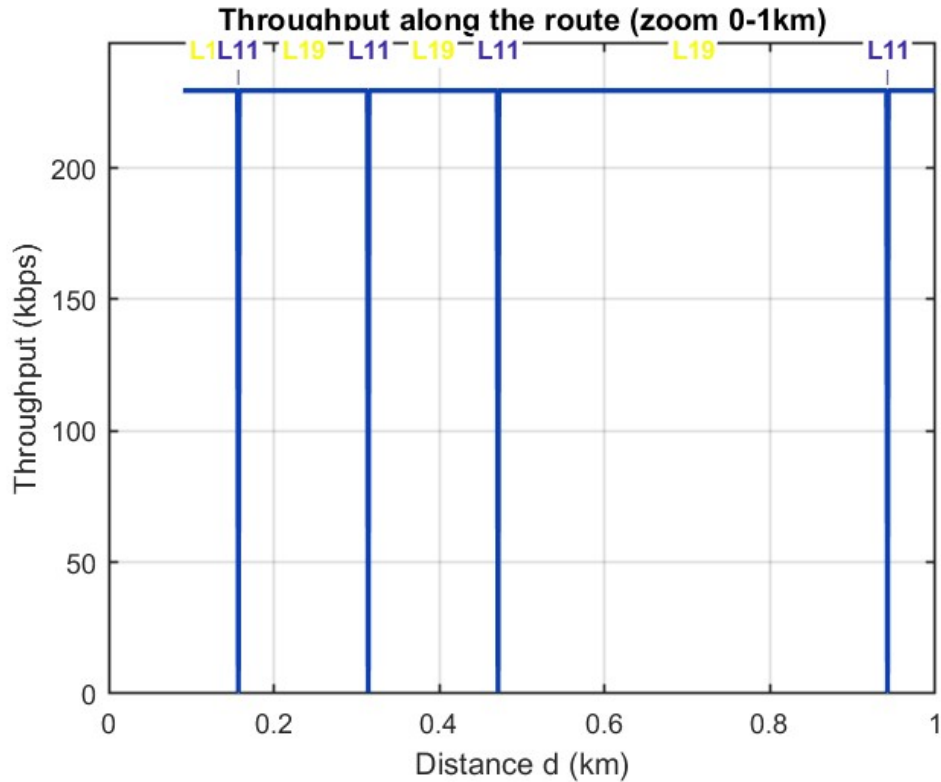
Εφαρμόζεται το piecewise μοντέλο 2-ray/3-ray/duct του §3.9, θερμικός θόρυβος ανά εύρος ζώνης και περιθώριο σχεδίασης. Δεν εισάγεται fading (`doFading=false`). Τα thresholds $\gamma_{th}^{(\ell)}$ προκύπτουν με παρεμβολή στο $\log_{10}(\text{PER})$ και επιβολή μονοτονίας.



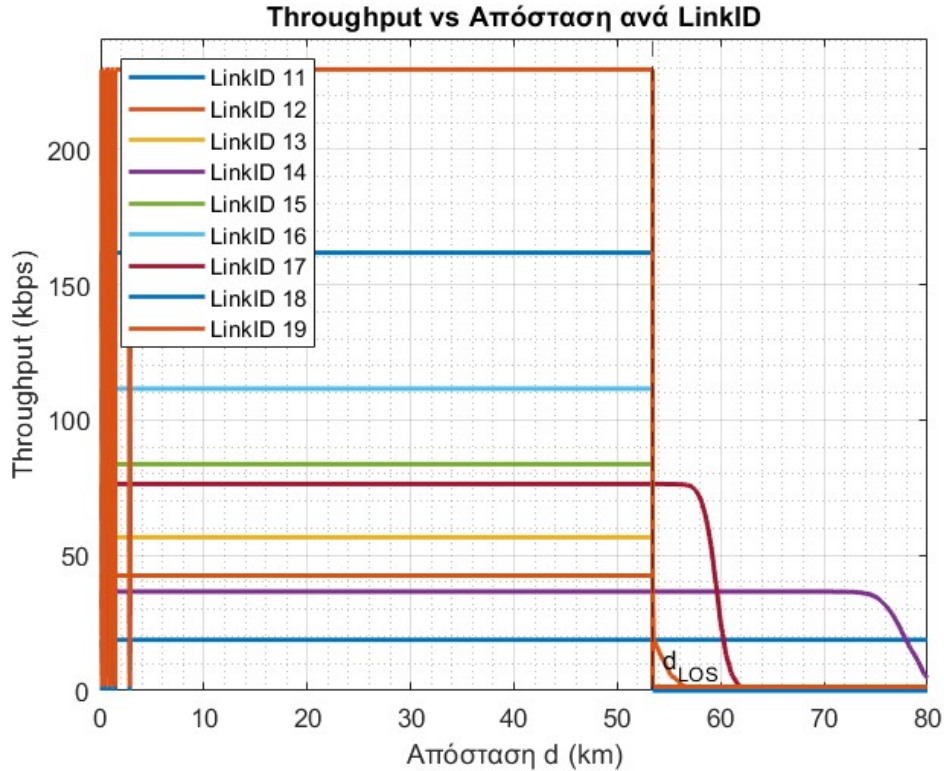
Σχήμα 4.5: Throughput κατά μήκος διαδρομής (χωρίς fading). Οι μεταβάσεις MCS εμφανίζονται ως ευδιάκριτα «σκαλοπάτια».

Σχόλιο. Οι μεταβάσεις MCS αποτυπώνονται ως «καθαρά» σκαλοπάτια. Κοντά στον πομπό ενεργοποιούνται υψηλά MCS, ενώ σε μεγαλύτερες αποστάσεις κυριαρχούν τα ανθεκτικότερα (L11–L14). Τα απότομα βυθίσματα οφείλονται σε γεωμετρικά nulls από συμβολή 2/3-ray.

⁴Ο πλήρης κώδικας παρατίθεται στο Παράρτημα Ε.

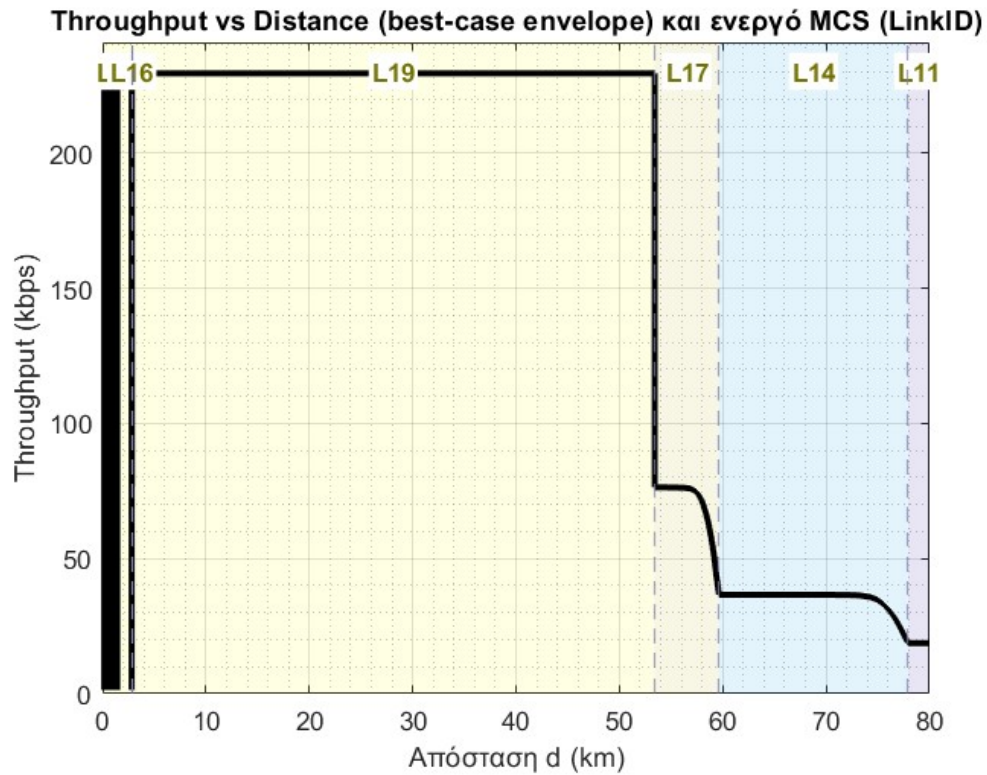


Σχήμα 4.6: Throughput κατά μήκος διαδρομής (χωρίς fading) με πολιτική $PER \leq 1\%$ — μεγέθυνση στο πρώτο 1 km ώστε να αναδειχθούν οι γρήγορες μεταβολές κοντά στον πομπό.

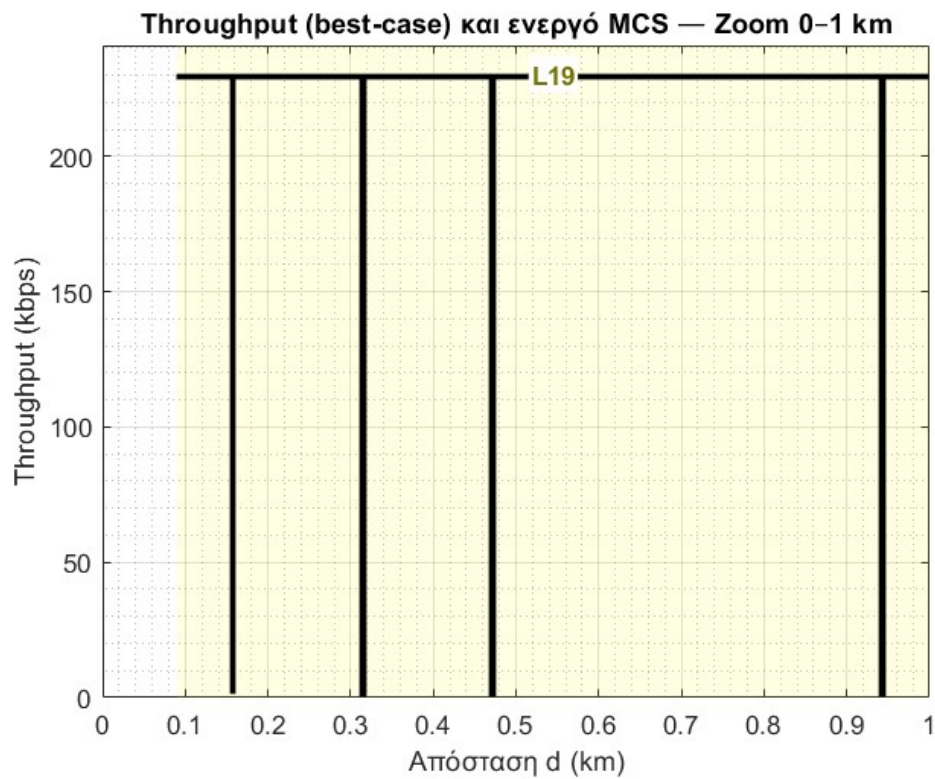


Σχήμα 4.7: Ρυθμαπόδοση $T(d)$ αν «επιβληθεί» κάθε LinkID στην ίδια τροχιά SNR. Οι καμπύλες δείχνουν το ωφέλιμο εύρος αποστάσεων για κάθε MCS.

Σχόλιο. Όσο αυξάνει το M και ο code-rate, τόσο στενεύει η περιοχή που δίνει μη-μηδενικό throughput, καθώς απαιτείται υψηλότερο SNR.



Σχήμα 4.8: Best-case envelope και ενεργό MCS (LinkID) σε όλο το εύρος αποστάσεων.



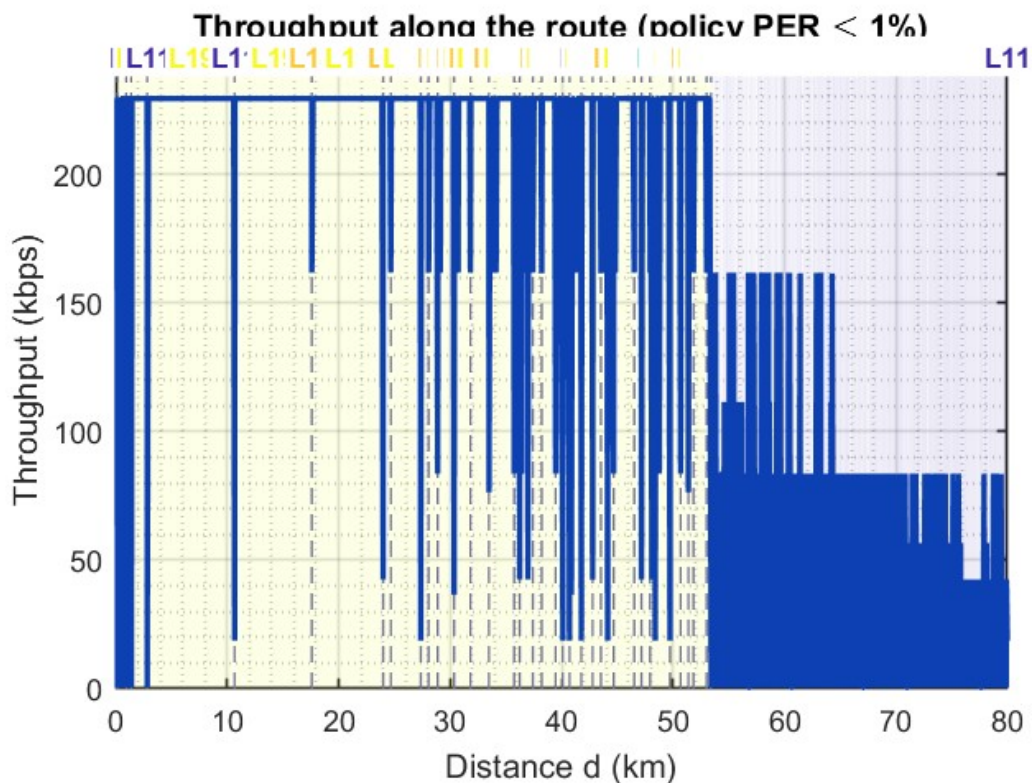
Σχήμα 4.9: Μεγέθυνση στο πρώτο 1 km (zoom 0-1 km).

Σχήμα 4.10: Μέγιστο *throughput* ανά απόσταση (best-case envelope) και το αντίστοιχο ενεργό MCS (LinkID). Οι χρωματισμένες ζώνες και οι κατακόρυφες γραμμές δείχνουν τα σημεία αλλαγής MCS.

Σχόλιο. Για να αναδειχθούν οι γρήγορες μεταβολές κοντά στον πομπό, στο Σχ. 4.9 γίνεται εστίαση στο πρώτο 1 km. Επιπλέον, μόνο για την οπτική παρουσίαση εφαρμόστηκε ήπιο φίλτρο στις απώλειες: κατώφλι 40 dB για $d \leq 100$ m και οροφή 100 dB, ώστε να αποφεύγονται ακραίες τιμές στα γραφήματα. Οι περιορισμοί αυτοί δεν επηρεάζουν τους υπολογισμούς SNR, την επιλογή MCS ή το τελικό *throughput*.

4.4.2 Με Rayleigh fading

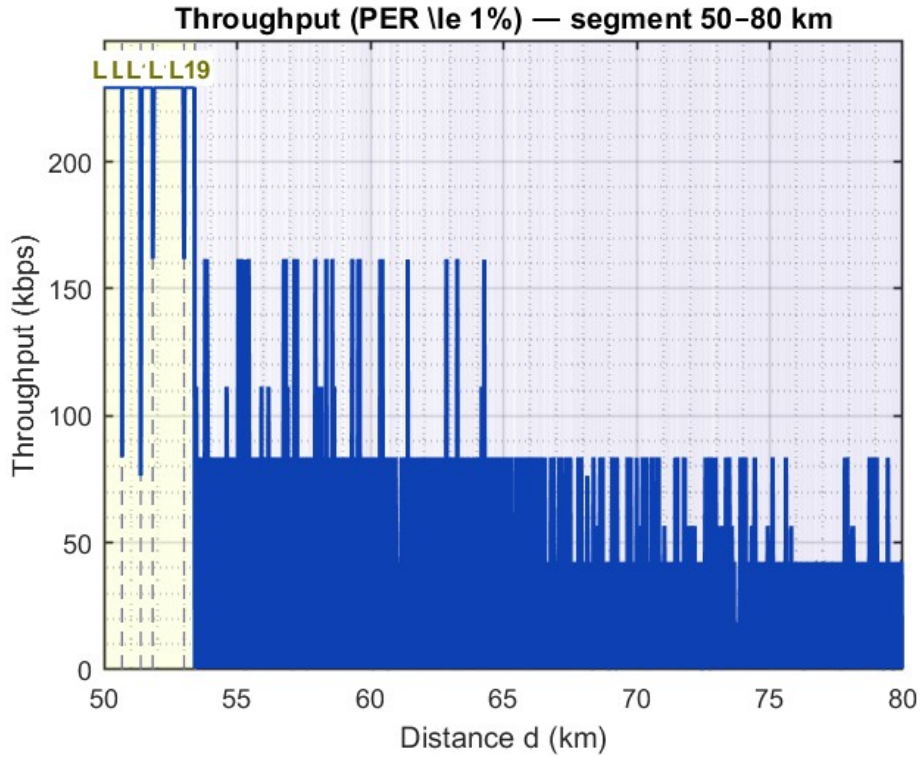
Διατηρούμε το ίδιο path-loss, αλλά ενεργοποιούμε πολλαπλασιαστικό Rayleigh (`doFading=true`) σε επίπεδο πλάτους, με αποτέλεσμα τυχαίες διακυμάνσεις SNR ανά απόσταση. Η πολιτική MCS παραμένει ίδια (στόχος PER $\leq 1\%$).



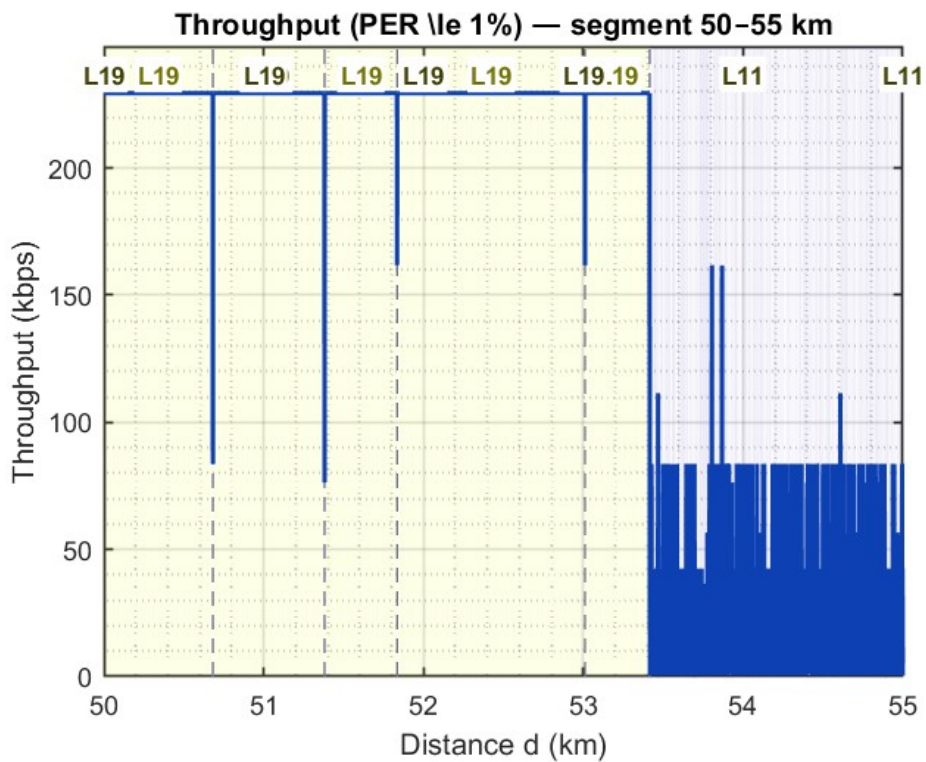
Σχήμα 4.11: Throughput κατά μήκος διαδρομής με Rayleigh fading.

Σχόλιο. Τα «σκαλοπάτια» γίνονται προοδευτικά λόγω βυθίσεων, με συχνότερες πτώσεις σε χαμηλότερα MCS. Η μέση ρυθμαπόδοση μειώνεται.

Σημείωση για την παρουσίαση. Για να βελτιωθεί η αναγνωσιμότητα των ενδείξεων MCS (LinkID) στο σενάριο με Rayleigh (πολιτική PER $\leq 1\%$), το συνολικό γράφημα που φαίνεται εδώ τεμαχίζεται σε τρία επιμέρους τμήματα: 0–20 km (Σχ. 4.12), 20–50 km (Σχ. 4.13) και 50–80 km (Σχ. 4.15), όπου απεικονίζονται οι ζώνες ενεργού MCS, οι μεταβάσεις μεταξύ τους (διακεκομμένες κατακόρυφες), και η καμπύλη *throughput*. Επιπλέον, παρατίθεται στο Σχ. 4.16 ένα τοπικό *zoom* στο διάστημα 50–55 km, το οποίο αναδεικνύει καθαρά τις συχνές εναλλαγές του ενεργού LinkID. Σε μεγαλύτερο εύρος (π.χ. 50–80 km) η εικόνα «θολώνει» λόγω της πολύ υψηλής πυκνότητας μεταβάσεων, γι' αυτό και επιλέγεται ο τεμαχισμός για καθαρότερη οπτική ερμηνεία.

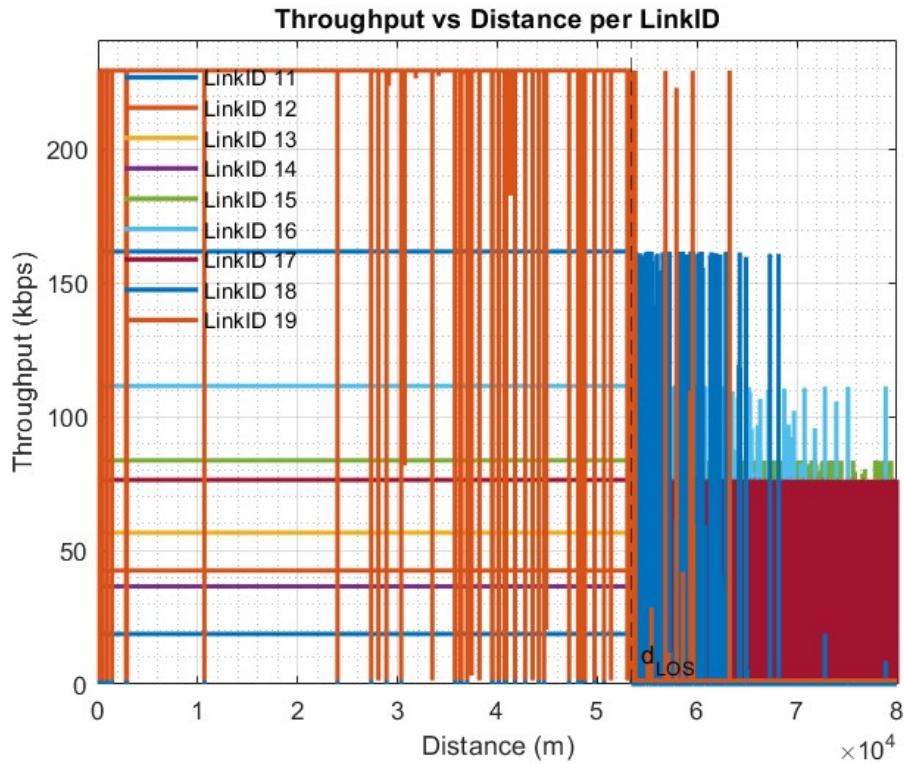


Σχήμα 4.15: Τμήμα 50–80 km.



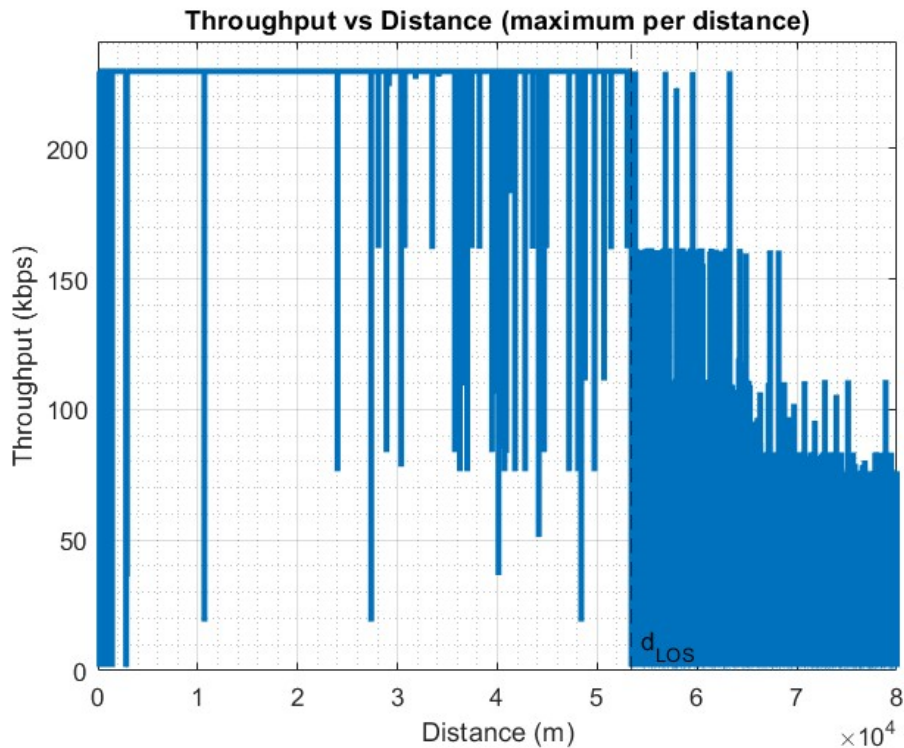
Σχήμα 4.16: Μεγέθυνση 50–55 km (zoom).

Σχήμα 4.17: Throughput με Rayleigh fading ($PER \leq 1\%$) στο εύρος 50–80 km και λεπτομερές zoom στο 50–55 km.



Σχήμα 4.18: Throughput ανά LinkID σε παρουσία fading.

Σχόλιο. Οι περιοχές όπου τα υψηλά MCS δίνουν ωφέλιμο ρυθμό συρρικνώνονται και εμφανίζουν μεγαλύτερη διασπορά τιμών λόγω τυχαίων βυθίσεων.



Σχήμα 4.19: Μέγιστο throughput ανά απόσταση με fading.

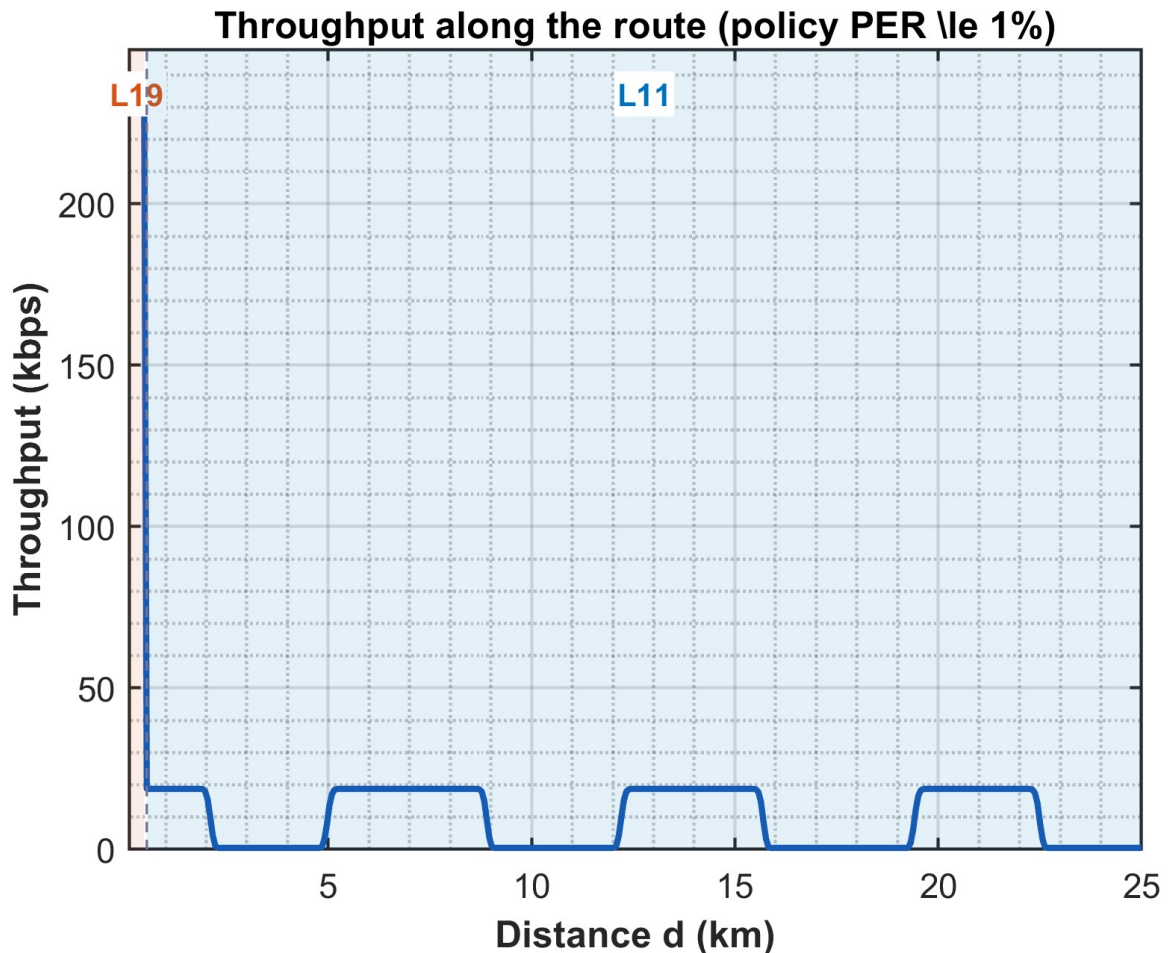
Σχόλιο. Το envelope βρίσκεται συστηματικά κάτω από το baseline, ιδιαίτερα στις μεσαίες και μεγάλες αποστάσεις όπου το Rayleigh προκαλεί συχνές βυθίσεις.

4.4.3 Αυτόνομο / Post-processing

Στο αυτόνομο σενάριο αξιοποιούμε απευθείας μια προϋπολογισμένη τροχιά $SNR(d)$ χωρίς στοχαστικό fading (No-Rayleigh), εφαρμόζοντας την πολιτική MCS του §3.8 (Στόχος $PER \leq 1\%$). Για κάθε απόσταση d επιλέγεται το πιο απαιτητικό LinkID του οποίου το κατώφλι $\gamma_{th}^{(\ell)}$ ικανοποιείται και ο ρυθμός υπολογίζεται ως

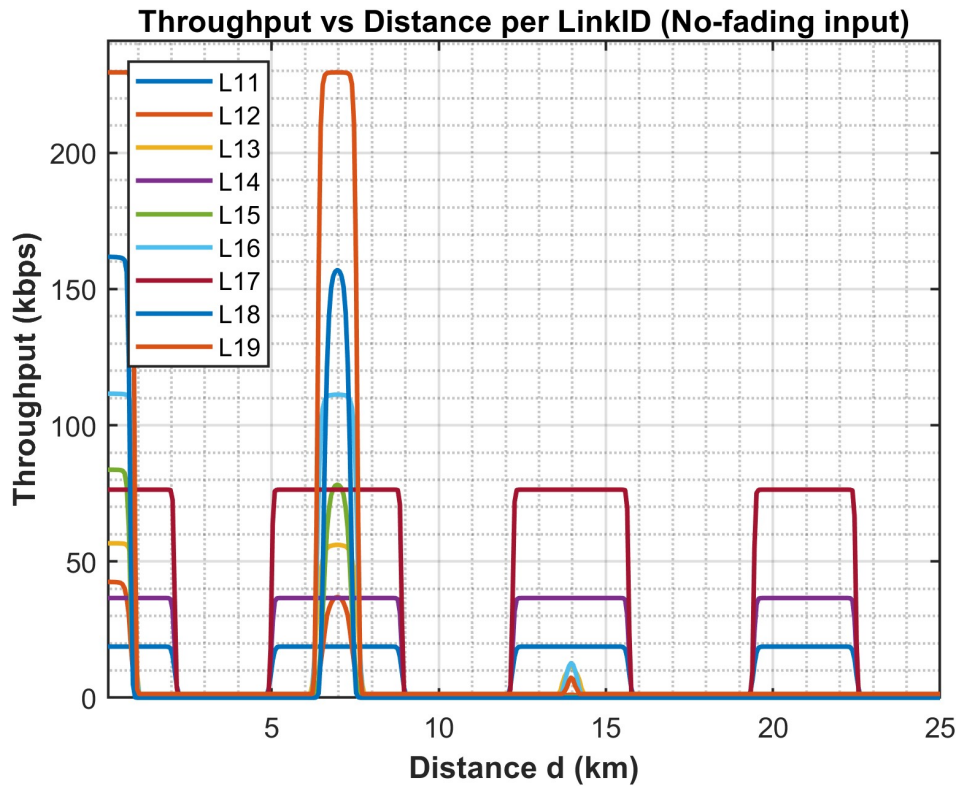
$$T(d) = (1 - PER_{\ell}(SNR_{\ell}(d))) R_s^{(\ell)} \log_2 M^{(\ell)} r^{(\ell)} \frac{L^{(\ell)} - C^{(\ell)}}{L^{(\ell)}} / 1000 \text{ [kbps]},$$

με τις φυσικές παραμέτρους ανά LinkID από τον Πίνακα 2.2. (Ο κώδικας που παράγει τα σχήματα είναι το αυτόνομο script και παρατίθεται στο Παράρτημα Η.)

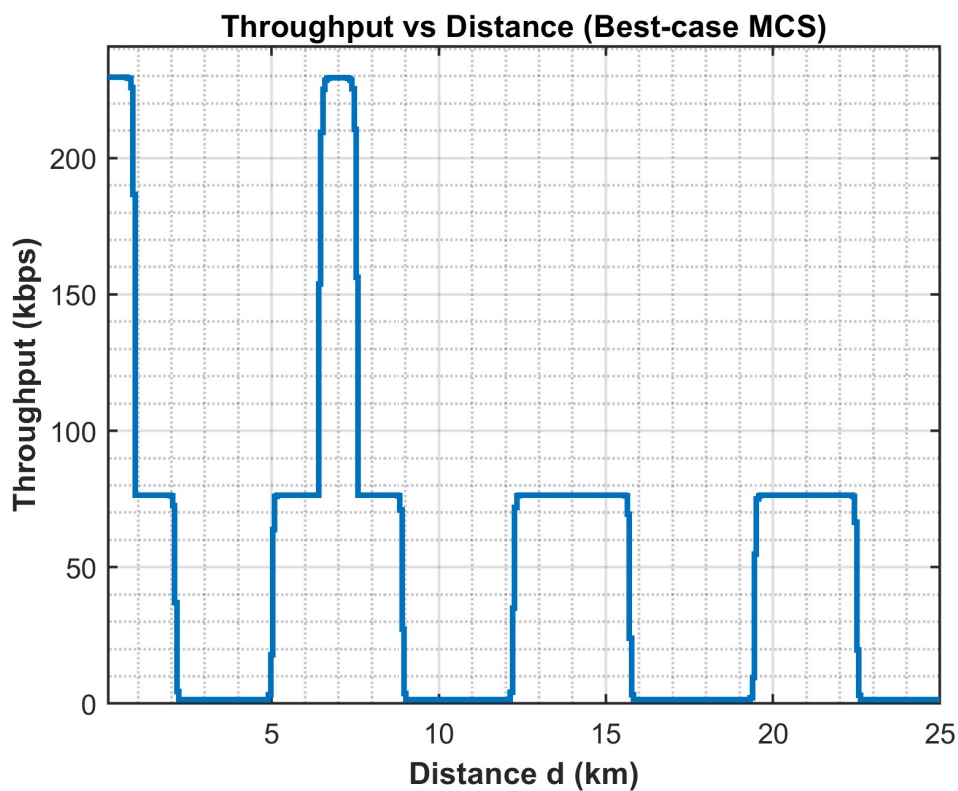


Σχήμα 4.20: Throughput κατά μήκος διαδρομής (πολιτική $PER \leq 1\%$). Οι ετικέτες L11/L19 δείχνουν το ενεργό MCS στα αντίστοιχα τμήματα.

Σχόλιο. Οι μεταβάσεις MCS εμφανίζονται ως «σκαλοπάτια» στον ρυθμό, επειδή απουσιάζει στοχαστική διακύμανση. Κοντά στον πομπό ενεργοποιείται στιγμιαία υψηλότερο MCS (π. χ. L19), ενώ στο μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής επικρατεί το πιο ανθεκτικό L11.



Σχήμα 4.21: Ρυθμαπόδοση $T(d)$ αν «επιβληθεί» κάθε LinkID κατά μήκος της ίδιας τροχιάς SNR. Οι καμπύλες δείχνουν την ιδανική συμπεριφορά ανά MCS χωρίς επιλογή.

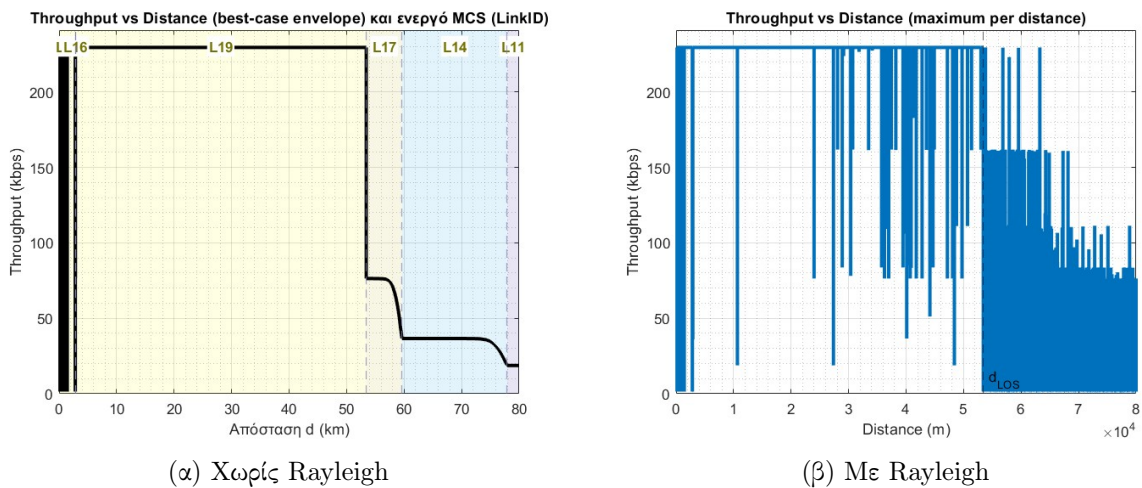


Σχήμα 4.22: Μέγιστο throughput ανά απόσταση (envelope). Σε κάθε d παίρνουμε το καλύτερο $T(d)$ μεταξύ όλων των LinkIDs.

Σχόλιο. Η καμπύλη-περίβλημα συνοψίζει τη μέγιστη εφικτή απόδοση του συστήματος για το συγκεκριμένο κανάλι: υψηλές τιμές μόνο σε πολύ μικρές αποστάσεις (ενεργοποίηση L19/L18), και στη συνέχεια μια «σκάλα» γύρω από τις τιμές που αντιστοιχούν στα L14–L11. Η απουσία Rayleigh διατηρεί τις μεταβάσεις αιχμηρές: στο 4.4.3 (με fading) οι ίδιες μεταβάσεις γίνονται πιο «μαλακές» και το envelope χαμηλώνει. Στις περιοχές όπου το SNR δεν καλύπτει το κατώφλι $PER \leq 1\%$ ούτε για το L11, το throughput ορίζεται σε μηδέν (outage), ώστε η καμπύλη να είναι συνεπής με την πολιτική $PER \leq 1\%$. Πρακτικά, εκτεταμένα “μηδενικά” μπορεί να υποδεικνύουν είτε πραγματικό κενό κάλυψης, είτε τεχνητό αποτέλεσμα δειγματοληψίας του SNR. Για αυτό εφαρμόζεται ελαφρά εξομάλυνση του SNR (π.χ. 150 m) που απομακρύνει μη-ρεαλιστικά μεγάλα outages χωρίς να αλλοιώνει τις μεταβάσεις MCS.

4.4.4 Συγκριτική Ανάλυση

Συγκρίνουμε τη μέγιστη ρυθμαπόδοση ανά απόσταση $T_{\max}(d)$ για το *Baseline* (χωρίς fading) και για *Rayleigh fading*, κρατώντας αμετάβλητα τα μοντέλα απωλειών, τον θερμικό θόρυβο και την πολιτική MCS (στόχος $PER \leq 1\%$).



Σχήμα 4.23: Σύγκριση $T_{\max}(d)$ χωρίς/με Rayleigh.

Baseline (χωρίς fading). Οι καμπύλες εμφανίζουν «καθαρά» σκαλοπάτια, με σαφή επίπεδα ρυθμαπόδοσης που αντιστοιχούν στα ενεργά MCS. Τα σημεία αλλαγής ορίζονται από τα κατώφλια SNR και από τη γεωμετρία διάδοσης (π.χ. τμήματα 2/3-ray και το d_{LOS}). Η διακύμανση είναι ελάχιστη, αφού δεν υπάρχουν στοχαστικές βυθίσεις του καναλιού.

Με Rayleigh. Το fading εισάγει τυχαίες διακυμάνσεις στο SNR, με αποτέλεσμα πιο συχνές υποβαθμίσεις σε ανθεκτικότερα MCS και εμφανή «οδοντώσεις» στο γράφημα. Η μείωση του $T_{\max}(d)$ είναι μικρή σε πολύ κοντινές αποστάσεις, αλλά γίνεται εντονότερη σε μεσαίες/μεγάλες αποστάσεις και κοντά σε περιοχές ισχυρής συμβολής, όπου ακόμη και μικρές βυθίσεις SNR αρκούν για αλλαγή MCS.

Συμπέρασμα. Το γράφημα *Baseline* λειτουργεί ως *άνω φράγμα* απόδοσης για δεδομένο μοντέλο διάδοσης και πολιτική MCS. Η περίπτωση *Rayleigh* αποτυπώνει το ρεαλιστικό επιχειρησιακό

σενάριο: χαμηλότερη μέση ρυθμοαπόδοση και μεγαλύτερη μεταβλητότητα με την απόσταση. Σχεδιαστικά, αυτό δικαιολογεί συντηρητικά περιθώρια (link margin), ισχυρό interleaving/FEC και γρήγορη προσαρμογή MCS σε περιοχές με έντονο fading.

4.5 Γενικό Συμπέρασμα

Τα αποτελέσματα της ενότητας §4.4 δείχνουν με σαφήνεια ότι:

- **Baseline χωρίς fading:** Το throughput ως προς την απόσταση εμφανίζει καθαρά “σκαλοπάτια”, τα οποία αντιστοιχούν στις μεταβάσεις MCS σύμφωνα με την πολιτική $PER \leq 1\%$. Τα σημεία αλλαγής συμπίπτουν με την πτώση του $SNR(d)$ κάτω από τα αντίστοιχα κατώφλια.
- **Με Rayleigh fading:** Οι μεταβάσεις “μαλακώνουν” και εμφανίζονται διακυμάνσεις γύρω από τα σκαλοπάτια. Η AMC τείνει να επιλέγει πιο ανθεκτικά MCS (χαμηλότερα LinkIDs), με επακόλουθη μείωση της μέσης ρυθμοαπόδοσης.
- **Ανά LinkID:** Οι επιμέρους καμπύλες επιβεβαιώνουν τη μονοτονία των κατωφλίων SNR και το trade-off φασματικής αποδοτικότητας/ευρωστίας.
- **Best-case:** Η καμπύλη μέγιστης ρυθμοαπόδοσης ανά απόσταση συμπεριφέρεται ως αναφορά (upper bound) για την αξιολόγηση εναλλακτικών πολιτικών ή παραμετροποιήσεων.

Συνολικά, η πολιτική AMC με στόχο $PER \leq 1\%$ επιτυγχάνει ισορροπία μεταξύ αξιοπιστίας και ρυθμοαπόδοσης, με αναμενόμενη υποβάθμιση υπό έντονο fading.

4.6 Επίλογος

Η ανάλυση του Κεφαλαίου 4 παρείχε μια πλήρη εικόνα της συμπεριφοράς του VDE-TER κατά μήκος διαδρομής, με και χωρίς στοχαστικές διακυμάνσεις καναλιού. Στο επόμενο κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικά ευρήματα, αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί της προτεινόμενης πολιτικής AMC και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα – Συζήτηση

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η απόδοση του φυσικού επιπέδου του VDE-TER με χρήση διαμορφώσεων QPSK, 8-PSK και 16-QAM και διαφορετικά ποσοστά κωδικοποίησης, όπως ορίζονται από τα Link IDs του προτύπου ITU-R M.2092-1. Η λειτουργία του συστήματος βασίστηκε σε κατώφλια SNR για την επιλογή του κατάλληλου MCS, με στόχο την επίτευξη Packet Error Rate (PER) μικρότερου από 1%.

Η μοντελοποίηση του καναλιού περιέλαβε τόσο κλασικά μοντέλα διάδοσης (two-ray, three-ray) όσο και επέκταση Beyond Line-of-Sight (B-LOS) μέσω evaporation duct. Επιπλέον, ελήφθησαν υπόψη οι επιδράσεις θερμικού θορύβου, καθώς και τα φαινόμενα Rayleigh/Rician fading για την προσομοίωση στοχαστικών διαλείψεων. Μέσα από αυτή τη μοντελοποίηση υπολογίστηκαν οι καμπύλες PER, τα κατώφλια SNR και τα αντίστοιχα διαγράμματα ρυθμοαπόδοσης (throughput) για κάθε Link ID.

Τα κύρια αποτελέσματα συνοψίζονται στα εξής:

- Τα κατώφλια SNR που προκύπτουν από τις καμπύλες PER είναι σαφώς διακριτά ανά Link ID και καθορίζουν μονοσήμαντα τις ζώνες λειτουργίας του κάθε MCS.
- Το three-ray και ιδιαίτερα το B-LOS μοντέλο αναδεικνύουν τις έντονες διακυμάνσεις στο $SNR(d)$, αποτυπώνοντας ρεαλιστικά την πολυδιαδρομικότητα.
- Η εισαγωγή fading μειώνει τον μέσο SNR και απαιτεί την υιοθέτηση περιθωρίου εξασθένισης (fade margin) για αξιόπιστη επικοινωνία.
- Το best-case σενάριο (χωρίς fading) λειτουργεί ως upper bound της απόδοσης, ενώ τα ρεαλιστικά σενάρια υποδεικνύουν μικρότερη αλλά πιο αντιπροσωπευτική επίδοση.

Τα παραπάνω δείχνουν ότι η μέθοδος επιλογής MCS με βάση κατώφλια SNR είναι απλή και αποδοτική, με δυνατότητα άμεσης υλοποίησης. Ωστόσο, η ακρίβεια εξαρτάται από τη σωστή εκτίμηση SNR και από την αξιοπιστία του μοντέλου καναλιού. Επιπλέον, η παραδοχή λευκού θορύβου και η χρήση στατικών fading μοντέλων μπορεί να μην αποτυπώνουν πλήρως πολύπλοκες συνθήκες παρεμβολής ή γρήγορες μεταβολές.

Τέλος, για μελλοντική εργασία προτείνονται τα εξής: ενσωμάτωση time-selective fading με Doppler, ανάπτυξη στρατηγικών με υστέρηση για αποφυγή συχνών αλλαγών MCS, συνυπολογισμός παρεμβολών και επιλογή πόρων σε multi-user σενάρια, καθώς και εφαρμογή αλγορίθμων μηχανικής μάθησης (π.χ. reinforcement learning) για βελτιστοποίηση της απόδοσης σε βάθος χρόνου. Επίσης, η αξιολόγηση με μετρήσεις πεδίου θα επιτρέψει τη βαθμονόμηση των θεωρητικών μοντέλων και την καλύτερη εκτίμηση των απαιτούμενων περιθωρίων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Alqurashi, Fahad S. and Trichili, Abderrahmen and Saeed, Nasir and Ooi, Boon S. and Alouini, Mohamed-Slim, “Maritime Communications: A Survey on Enabling Technologies, Opportunities, and Challenges,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 4, pp. 3525–3547, 2023.
- [2] SAFETY4SEA, “The evolution of maritime communications,” 09 2022. Accessed: 2025-08-31.
- [3] World Bank, “Sustainable development in shipping and ports,” 2025. States that more than 80% of goods are transported by sea. Accessed: 2025-08-31.
- [4] Zhao, Chen Song and Huai, Shuai Heng and Wang, Yu Chen and Hu, Qing, “Research on Adaptive Modulation Coding Technique in VDE-TER Multi-link Mode,” in *Proceedings of the 2023 7th International Conference on Deep Learning Technologies*, ICDLT '23, (New York, NY, USA), p. 79–84, Association for Computing Machinery, 2023.
- [5] Shim, Wooseong and Kim, Buyoung and Kim, Eui-Jik and Kim, Dongwan, “A New Link Adaptation Technique for Very High Frequency Data Exchange System in Future Maritime Communication,” *Electronics*, vol. 13, no. 2, 2024.
- [6] Choi, Jinho, “Sliding Network Coding for URLLC,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 6, pp. 4424–4433, 2022.
- [7] International Telecommunication Union (ITU), “Technical characteristics for a VHF data exchange system in the VHF maritime mobile band,” no. ITU-R M.2092-1, 2022. Available at:

url<https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2092-1-202202-I/en> [Accessed 24 June 2025].
- [8] Inmarsat, “Inmarsat study reveals surge in maritime data usage as connectivity increases,” 08 2022. Accessed: 2025-08-31.
- [9] Wang, Jue and Zhou, Haifeng and Li, Ye and Sun, Qiang and Wu, Yongpeng and Jin, Shi and Quek, Tony Q. S. and Xu, Chen, “Wireless Channel Models for Maritime Communications,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 68070–68088, 2018.
- [10] International Maritime Organization, “International convention for the safety of life at sea (solas), consolidated edition 2022.” [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-\(SOLAS\),-1974.aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS),-1974.aspx), 2022. Accessed: 2025-08-31.
- [11] Bronk, Krzysztof and Koncicki, Patryk and Lipka, Adam and Rutkowski, Dominik and Wereszko, Błażej, “Simulation and Measurement Studies of The Vdes System’s Terrestrial Component,” *Polish Maritime Research*, vol. 26, no. 1, pp. 95–106, 2019.

- [12] A. Giannopoulos, P. Gkonis, A. Kalafatelis, N. Nomikos, S. Spantideas, P. Trakadas, and T. Syriopoulos, “From 6g to seax-g: Integrated 6g tn/ntn for ai-assisted maritime communications — architecture, enablers, and optimization problems,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 13, no. 6, p. 1103, 2023. (Νέα πηγή).
- [13] International Maritime Organization, “e-navigation strategy implementation plan (sip).” <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/eNavigation.aspx>, 2023. Accessed: 2025-08-31.
- [14] Zalesny, Vladimir and Agoshkov, Valeriy and Shutyaev, Victor and Parmuzin, Eugene and Zakharova, Natalia, “Numerical Modeling of Marine Circulation with 4D Variational Data Assimilation,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, no. 7, 2020.
- [15] Meng, Yu Song and Lee, Yee Hui, “Measurements and Characterizations of Air-to-Ground Channel Over Sea Surface at C-Band With Low Airborne Altitudes,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 4, pp. 1943–1948, 2011.
- [16] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, “Near shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes. 1,” in *Proceedings of ICC '93 - IEEE International Conference on Communications*, vol. 2, pp. 1064–1070 vol.2, 1993.
- [17] Ondřej Hüttl and Tomáš Kratochvíl, “DVB-SH Forward Error Correction Implementation in Matlab,” in *Technical Computing Bratislava 2010*, no. 1, (Bratislava), pp. 41–46, RT Systems, s.r.o., 2010.
- [18] MathWorks, *Communications Toolbox™ Documentation*. The MathWorks, Inc., 2022. Retrieved from <https://www.mathworks.com/products/communications.html>.
- [19] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2 ed., 2002.
- [20] B. Sklar, *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2 ed., 2001.

Παράρτημα Α: Κώδικας Αποτελέσματος AWGN (results.m)

```
1 clear
2 close all
3 clc
4
5 % Link ID =11
6 SNRdB11 = 0:0.1:2.5;
7 packet_errors = [500,500,500,500,500,500,500,500,500,500,250,250,250,250,250,...
8     100,100,100,100,100,100,100,100,100,100,0,0];
9 packets_created = [513,519,530,553,596,632,702,805,970,1182,788,1098,1431,2221,...
10     3252,2358,4477,7704,14064,32718,60942,129982,215802,324447,30749,0];
11 PER11 = packet_errors./packets_created;
12
13
14 % Link ID =12
15 SNRdB12 = 7.2:0.1:10; %
16 packet_errors = [500,500,500,500,500,500,500,500,500,500,500,250,250,250,...
17     250,250,100,100,100,100,100,100,100,100,100,100,100];
18 packets_created = [501,511,516,526,557,576,651,734,863,1049,1556,2034,1452,2168,3407,6076,...
19     10363,7748,12449,17938,28366,44502,59591,97289,144472,186192,256537,461128,598373];
20 PER12 = packet_errors./packets_created;
21 %
22 % Link ID =13
23 SNRdB13 = 9:0.1:11.5;
24 packet_errors = [500,500,500,500,500,500,500,500,500,500,250,250,250,250,250,...
25     100,100,100,100,100,100,100,100,100,100,100];
26 packets_created = [500,502,506,514,527,567,602,686,826,1129,853,1114,1637,...
27     2476,4569,2751,4708,6671,12665,22588,31328,43278,68381,86167,128057,213101];
28 PER13 = packet_errors./packets_created;
29 %
30
31 % Link ID =14
32 SNRdB14 = 0:0.1:2.5;
33 packet_errors = [600,600,600,600,600,600,600,600,600,600,350,350,350,350,350,...
34     200,200,100,100,100,100,100,100,100,100,0,0];
35 packets_created = [603,602,608,616,632,654,723,877,1054,1371,1168,1837,3044,...
36     6133,12806,13506,33800,29145,60306,78178,120555,175712,254954,271671,24198,0];
37 PER14 = packet_errors./packets_created;
38
39 % Link ID =15
40 SNRdB15 = 7.4:0.1:9.6; %
41 packet_errors = [1000,1000,1000,1000,1000,1000,1000,1000,1000,1000,500,500,500,...
42     500,500,200,200,200,200,100,100,100,100,100];
43 packets_created = [1003,1008,1021,1073,1141,1301,1559,2035,3188,5199,4949,9261,...
44     23651,47840,103275,70328,123826,197561,323300,153135,307430,343425,477223,772494];
45 PER15 = packet_errors./packets_created;
46
47
48 % Link ID =16
49 SNRdB16 = 9.3:0.1:11.6; %
50 packet_errors = [500,500,500,500,500,500,500,500,500,500,250,250,250,250,250,...
51     100,100,100,100,100,100,100,100,100];
```

```

52 packets_created = [500,504,516,547,600,751,987,1493,2634,5236,5366,10858,22042,...
53     40952,60233,37695,41713,55380,80907,98733,125710,155713,205594,296457];
54 PER16 = packet_errors./packets_created;
55
56 % Link ID =17
57 SNRdB17 = 0:0.1:2.5;
58 packet_errors = [500,500,500,500,500,500,500,500,500,250,250,250,250,250,...
59     100,100,100,100,100,100,100,100,81,0,0];
60 packets_created = [500,500,500,501,501,517,543,607,762,1164,1067,2210,5554,...
61     16915,49654,42058,65371,84298,125071,134385,210413,243269,390840,380325,0,0];
62 PER17 = packet_errors./packets_created;
63
64 % Link ID =18
65 SNRdB18 = 7.4:0.1:9.6; %
66 packet_errors = [500,500,500,500,500,500,500,500,500,250,250,250,250,250,...
67     100,100,100,100,100,100,100,100,100];
68 packets_created = [500,500,501,502,517,559,669,966,1568,3180,4137,11279,25228,...
69     44008,62860,39182,50006,54402,102809,109891,144391,222584,246760];
70 PER18 = packet_errors./packets_created;
71
72 % % Link ID =19
73 SNRdB19 = 9.5:0.1:10.8;
74 packet_errors =[500,500,500,500,500,500,500,500,500,279,250,400,189];
75 packets_created = [503,509,532,623,827,1449,3254,8480,26687,93574,137362,...
76     314370,891527,672371];
77 PER19 = packet_errors./packets_created;
78
79
80 figure
81 semilogy(SNRdB11, PER11(1:length(SNRdB11)), '-o'); hold on;
82 semilogy(SNRdB12, PER12(1:length(SNRdB12)), '-o'); hold on;
83 semilogy(SNRdB13, PER13(1:length(SNRdB13)), '-o'); hold on;
84 semilogy(SNRdB14, PER14(1:length(SNRdB14)), '-o'); hold on;
85 semilogy(SNRdB15, PER15(1:length(SNRdB15)), '-o'); hold on;
86 semilogy(SNRdB16, PER16(1:length(SNRdB16)), '-o'); hold on;
87 semilogy(SNRdB17, PER17(1:length(SNRdB17)), '-o'); hold on;
88 semilogy(SNRdB18, PER18(1:length(SNRdB18)), '-o'); hold on;
89 semilogy(SNRdB19, PER19(1:length(SNRdB19)), '-o'); hold on;
90 xlabel('SNR (dB)');
91 ylabel('Packet Error Rate (PER)');
92 title('PER vs SNR in AWGN Channel');
93 legend('LinkID = 11','LinkID = 12','LinkID = 13','LinkID = 14','LinkID = 15','LinkID = 16',
94     '-16','LinkID = 17','LinkID = 18','LinkID = 19');
95 axis([0 12 1e-4 1]);
96 grid on;

```

Παράρτημα Β: Κώδικας Πολιτικής MCS (bestLinkIDkaluteroFigure.m)

```

1 %Genikos stowos script: Na vrei gia kathe SNR poio LinkID (MCS) tirei PER1% me ti megaliteri ←
   →fasmatikiki apodotikotita
2 %kai na to xartografisei ws veltisto.

```

```

3 %Pigi dedomenon: results.txt (PER arrays)
4
5 clear; clc; %close all;
6
7 SNR_adj = { %Orizo SNR_adj (kelia): gia kathe LinkID , kathe stoixeio einai dianisma SNR sta ←
  → opoia exw adistoixes times PER.
8 [ 11.0 11.1 11.2 11.3 11.4 11.5 11.6 11.7 11.8 11.9 12.0 12.1 12.2 12.3 12.4 12.5 12.6 ←
  → 12.7 12.8 12.9 13.0 13.1 13.2 13.3 13.4 13.5 ], % Link ID 11 (P_out = 12.5 W)
9 [ 17.6 17.7 17.8 17.9 18.0 18.1 18.2 18.3 18.4 18.5 18.6 18.7 18.8 18.9 19.0 19.1 19.2 ←
  → 19.3 19.4 19.5 19.6 19.7 19.8 19.9 20.0 20.1 20.2 20.3 20.4 ], % Link ID 12 (P_out = ←
  → 11.0 W)
10 [ 17.1 17.2 17.3 17.4 17.5 17.6 17.7 17.8 17.9 18.0 18.1 18.2 18.3 18.4 18.5 18.6 18.7 ←
  → 18.8 18.9 19.0 19.1 19.2 19.3 19.4 19.5 19.6 ], % Link ID 13 (P_out = 6.5 W)
11 [ 11.0 11.1 11.2 11.3 11.4 11.5 11.6 11.7 11.8 11.9 12.0 12.1 12.2 12.3 12.4 12.5 12.6 ←
  → 12.7 12.8 12.9 13.0 13.1 13.2 13.3 13.4 13.5 ], % Link ID 14 (P_out = 12.5 W)
12 [ 17.8 17.9 18.0 18.1 18.2 18.3 18.4 18.5 18.6 18.7 18.8 18.9 19.0 19.1 19.2 19.3 19.4 ←
  → 19.5 19.6 19.7 19.8 19.9 20.0 ], % Link ID 15 (P_out = 11.0 W)
13 [ 17.4 17.5 17.6 17.7 17.8 17.9 18.0 18.1 18.2 18.3 18.4 18.5 18.6 18.7 18.8 18.9 19.0 ←
  → 19.1 19.2 19.3 19.4 19.5 19.6 19.7 ], % Link ID 16 (P_out = 6.5 W)
14 [ 11.0 11.1 11.2 11.3 11.4 11.5 11.6 11.7 11.8 11.9 12.0 12.1 12.2 12.3 12.4 12.5 12.6 ←
  → 12.7 12.8 12.9 13.0 13.1 13.2 13.3 13.4 13.5 ], % Link ID 17 (P_out = 12.5 W)
15 [ 17.8 17.9 18.0 18.1 18.2 18.3 18.4 18.5 18.6 18.7 18.8 18.9 19.0 19.1 19.2 19.3 19.4 ←
  → 19.5 19.6 19.7 19.8 19.9 20.0 ], % Link ID 18 (P_out = 11.0 W)
16 [ 17.6 17.7 17.8 17.9 18.0 18.1 18.2 18.3 18.4 18.5 18.6 18.7 18.8 18.9 ], % Link ID 19 ←
  → (P_out = 6.5 W)
17 };
18
19 PER = { %Orizo PER (kelia) me ta adistoixa digmata PER gia kathe ena apo ta SNR_adj{i}. %
20 % Merikes oyures exoun NaN gia na markaroun oti den uparxoun alla samples h oti ftasame ←
  → se PER0.
21 [ 0.9747 0.9634 0.9434 0.9042 0.8389 0.7911 0.7123 0.6211 0.5155 0.4230 0.3173 0.2277 ←
  → 0.1747 0.1126 0.0769 0.0424 0.0223 0.0130 0.0071 0.0031 0.0016 0.0008 0.0005 0.0003 ←
  → 0.0000 NaN ], % Link ID 11
22 [ 0.9980 0.9785 0.9690 0.9506 0.8977 0.8681 0.7680 0.6812 0.5794 0.4766 0.3213 0.2458 ←
  → 0.1722 0.1153 0.0734 0.0411 0.0241 0.0129 0.0080 0.0056 0.0035 0.0022 0.0017 0.0010 ←
  → 0.0007 0.0005 0.0004 0.0002 0.0002 ], % Link ID 12
23 [ 1.0000 0.9960 0.9881 0.9728 0.9488 0.8818 0.8306 0.7289 0.6053 0.4429 0.2931 0.2244 ←
  → 0.1527 0.1010 0.0547 0.0364 0.0212 0.0150 0.0079 0.0044 0.0032 0.0023 0.0015 0.0012 ←
  → 0.0008 0.0005 ], % Link ID 13
24 [ 0.9950 0.9967 0.9868 0.9740 0.9494 0.9174 0.8299 0.6842 0.5693 0.4376 0.2997 0.1905 ←
  → 0.1150 0.0571 0.0273 0.0148 0.0059 0.0034 0.0017 0.0013 0.0008 0.0006 0.0004 0.0004 ←
  → 0.0000 NaN ], % Link ID 14
25 [ 0.9970 0.9921 0.9794 0.9320 0.8764 0.7686 0.6414 0.4914 0.3137 0.1923 0.1010 0.0540 ←
  → 0.0211 0.0105 0.0048 0.0028 0.0016 0.0010 0.0006 0.0007 0.0003 0.0003 0.0002 ], % ←
  → Link ID 15
26 [ 1.0000 0.9921 0.9690 0.9141 0.8333 0.6658 0.5066 0.3349 0.1898 0.0955 0.0466 0.0230 ←
  → 0.0113 0.0061 0.0042 0.0027 0.0024 0.0018 0.0012 0.0010 0.0008 0.0006 0.0005 0.0003 ], ←
  → % Link ID 16
27 [ 1.0000 1.0000 1.0000 0.9980 0.9980 0.9671 0.9208 0.8237 0.6562 0.4296 0.2343 0.1131 ←
  → 0.0450 0.0148 0.0050 0.0024 0.0015 0.0012 0.0008 0.0007 0.0005 0.0004 0.0003 0.0002 NaN ←
  → NaN ], % Link ID 17
28 [ 1.0000 1.0000 0.9980 0.9960 0.9671 0.8945 0.7474 0.5176 0.3189 0.1572 0.0604 0.0222 ←
  → 0.0099 0.0057 0.0040 0.0026 0.0020 0.0018 0.0010 0.0009 0.0007 0.0004 0.0004 ], % ←

```

```

    →Link ID 18
29 [ 0.9940 0.9823 0.9398 0.8026 0.6046 0.3451 0.1537 0.0590 0.0187 0.0053 0.0020 0.0008 ←
    →0.0004 0.0003 ], % Link ID 19
30 };
31
32 SNR_common = 10:0.1:24; %Orismos koinou plegmatos SNR
33
34 %BHMA 1
35 %Ypologismos thresholds ana LinkID opou PER=1% (0.01)
36 SNR_thresholds = nan(1, 9); %Desmepsi me NaN (an den vrethei threshold)
37 for i = 1:9
38     per = PER{i}; % seira PER gia to LinkID i
39     snr = SNR_adj{i}; % antoistixo SNR
40     idx = find(per <= 0.01, 1, 'first'); % Thesi lhs epiteuxis stoxou PER=1%
41     if ~isempty(idx) % An uparxei tetoio digma
42         SNR_thresholds(i) = snr(idx); % apothikeuse to SNR-threshold
43     end
44 end
45
46
47 %BHMA 2
48 %Xartografisi kathe SNR sto SNR_common se veltisto LinkID
49 % Dialego to pio apaititiko (megalitero i) LinkID tou opoiou to threshold
50 %den kseperna to trexon SNR (to teleutaio pou ikanopoietai).
51 % An kanena den ikanopoietai, peftoume sto pio "robust" LinkID 11.
52
53 optimal_LinkID = zeros(size(SNR_common)); % Gemizei me times 11..19
54 for k = 1:length(SNR_common) % Gia kathe simeio SNR
55     snr_now = SNR_common(k); % Trexon SNR
56     idx = find(snr_now >= SNR_thresholds, 1, 'last'); % Teleutaio threshold pou pianetai
57     if isempty(idx) % An den pianetai kanena threshold
58         optimal_LinkID(k) = 11; % fallback: LinkID 11, epilekse to 11
59     else
60         optimal_LinkID(k) = idx + 10; % Metatopisi giati i=1 adistoixei se LinkID 11
61     end
62 end
63
64
65 %BHMA 3
66 % (SNR -> Optimal LinkID) me:
67 % Gemisma tou kathe skalopatiou,
68 % Skalopatia policy,
69 % Kathetes stis pragmatikes allages MCS + Kathara labels thresholds.
70
71 figure; hold on; grid on;
72
73 % --- Data for plotting ---
74 id = optimal_LinkID(:); % L11..L19 (Diakrites times)
75 snr = SNR_common(:); % Plegma SNR
76
77 % --- Tmimata opou o LinkID menei statheros ---
78 chg = find(diff(id)~=0); % indices allagon LinkID
79 seg_start = [1; chg+1]; % arxes tmimaton

```

```

80 seg_end = [chg; numel(id)];           % teloi tmimaton
81
82 % --- Xromata gia LinkID 11..19 ---
83 cmap = lines(9);
84 linkColor = @(L) cmap(L-10,:);       % 11->1 xroma, , 19->9
85
86 % --- 1) Gemisma mexri ti grammi tou ekastote LinkID ---
87 y0 = 10.5;                           % vasi tou y-aksona
88 for s = 1:numel(seg_start)
89     L = id(seg_start(s));               % LinkID sto tmima
90     x1 = snr(seg_start(s));
91     x2 = snr(seg_end(s));
92     yL = L;                             % Skalopati
93     % Polugono gemisma
94     patch([x1 x2 x2 x1], [y0 y0 yL yL], linkColor(L), ...
95           'FaceAlpha', 0.18, 'EdgeColor', 'none');
96
97     % Label "Lx" sto kentro tou tmimatos
98     xc = 0.5*(x1+x2);
99     text(xc, L+0.18, sprintf('L%d', L), ...
100          'HorizontalAlignment','center','FontWeight','bold', ...
101          'Color', linkColor(L), 'FontSize', 11);
102 end
103
104 % --- 2) Skalopatia ---
105 stairs(snr, id, 'LineWidth', 1.8, 'Color', [0.10 0.35 0.70]);
106
107 % --- 3) Kathetes kai arithmitikes times sta pragmatika change points ---
108 xchg = snr(chg+1);                     % SNR opou allazei o LinkID
109
110 % Theseis Y gia ennalagi
111 ySlots = [10.65, 10.95, 11.25, 11.55];
112
113 % Elaxisti orizodia apostasi (se dB)
114 dx_min = 0.08;
115
116 % Oria axona x
117 xl = [min(snr) max(snr)];
118 xpad = 0.12; % mikro perithorio sta akra
119
120 for k = 1:numel(xchg)
121     L_next = id(chg(k)+1);               % LinkID meta thn allagi
122     col = linkColor(L_next);             % xroma neas zonis
123
124     % Katakorifi grammi allagis
125     xline(xchg(k), '--', 'Color', col, 'LineWidth', 1.0, 'HandleVisibility','off');
126
127     % Dinamiki orizodia metatopisi label, analoga me tin apostasi apo to
128     % proigoumeno
129     if k == 1, d_prev = inf; else, d_prev = xchg(k) - xchg(k-1); end
130     side = 1 - 2*mod(k,2);               % +1, -1, +1, -1, ...
131     dx = side * max(dx_min, 0.25 - max(0,d_prev)/2);
132

```

```

133 % Prosorini thesi label
134 xlbl = xchg(k) + dx;
135 ylbl = ySlots( mod(k-1, numel(ySlots)) + 1 );
136
137 % Clamp oste na mi ugenoun ektos orion / na mi kollane ston aksona
138 xlbl = min(max(xlbl, xl(1)+xpad), xl(2)-xpad);
139
140 % An einai polu konta me to proigoumeno, saediase "leader line"
141 needLeader = (k > 1) && (abs(xchg(k) - xchg(k-1)) < 0.15);
142 if needLeader
143     plot([xchg(k) xlbl], [ylbl ylbl], '-','Color', col, 'LineWidth', 0.8, ...
144         'HandleVisibility','off');
145 end
146
147 % Arithmitiki timi threshold me pinakaki (eukrinia)
148 text(xlbl, ylbl, sprintf('%.2f dB', xchg(k)), ...
149     'HorizontalAlignment','center', 'VerticalAlignment','middle', ...
150     'FontSize', 10, 'FontWeight','bold', 'Color', col, ...
151     'BackgroundColor','w', 'Margin', 3, 'EdgeColor', col, ...
152     'Clipping','on');
153 end
154
155 % --- 4) Aisthitiki / Aksones ---
156 xlim([min(snr) max(snr)]);
157 ylim([10.5 19.5]);
158 yticks(11:19); yticklabels("L"+string(11:19));
159 xlabel('SNR (dB)'); ylabel('LinkID');
160 title('LinkID PER=1% SNR');
161 set(gca,'FontSize',12,'Box','on','LineWidth',0.9);
162 set(gcf,'Color','w'); % katharo leuko fonto figure (gia export)
163
164 % Provoli olon ton thresholds sto Command parathiro gia reporting/elegxo
165 disp('SNR thresholds (PER <= 1%) LinkID:');
166 for i = 1:9
167     fprintf('LinkID %2d: %.2f dB\n', i+10, SNR_thresholds(i));
168 end

```

Παράρτημα Γ: Κώδικας Καναλιού (bLos.m)

```

1 %% SNR(d) LOS (three-ray) + B-LOS (evaporation duct) Eniaio script
2 clear; clc; close all;
3
4 %% Calculate the SNR as a function of distance for various elevation angles,
5 %% both within line of sight (LOS) using a 3-ray model,
6 %% and beyond the horizon (B-LOS) inside the evaporation duct.
7 %% The graph at the end shows SNR(d) for all angles plus focus.
8
9 %% --- Statheres/Parametroi Sistimatos ---
10 f = 157e6; % Frequency VHF (Hz)
11 c = 3e8; % Taxitita fotos (m/s)
12 lambda = c / f; % Mikos kimatos (m)

```

```

13
14 B = 25e3; % Euros zonis (Hz)
15 k = 1.38e-23; % Boltzmann stathera(J/K)
16 Tsys = 1058.8; % Sinoliki thermokrasia thorivou (K)
17 Nsys_dBW = 10*log10(k*Tsys*B); % Isxis thorivou se dBW
18
19 Pt_dBW = 10*log10(6); % Isxis ekpompis 6 W dBW
20 Lsys = 0; % Systemikes apoleies (dB)
21
22 % Kerdi keraion (elevation pattern pompou + Kerdos Dekti)
23 angles = [0 10 20 30 40 50 60 70 80 90]; % elevation (deg)
24 Gt_dBi = [3 3 2.5 1 0 -1.5 -3 -4 -10 -20]; % Pompos (endiktik pattern)
25 Gr_dBi = 0; % Kerdos Dektis
26
27 %Ypsi kereon & duct
28 ht = 90; % Ypsos keraias vashs (m)
29 hr = 30; % Ypsos keraias ploiou (m)
30 he = 10; % Ypsos evaporation duct (m)
31
32 % Apostasi sarosis
33 d = 1:1:80000; % 1 m ews 80 km (vima 0.5 km peripou)
34 %Apo thn douleia ksero oti me VHF synnohtes epitrepete mexri 30NM apo thn
35 %akth meta ypoxreounte gia egkatastash MF/HF stathmou 30NM me 120NM, den
36 %epsaksa gia kapoio paper h thn ypourgiki apofasi gia na to epivevaionei
37
38 R = 6371000; % Aktina ghs (m)
39
40 % Fading rithmisi: Rician konta sto dLOS -> Rayleigh makria
41 useFading = true;
42 KO_dB = 8; % K-factor konta sto dLOS ( dB)
43
44 % B-LOS (duct) rithmiseis
45 n_duct = 1.6; % ekthetis aposvesis entos duct (1.21 idanika ~2 realistika)
46 d0 = 1000; % reference apostasi gia PL (m)
47 PLd0_FS = -10*log10((lambda/(4*pi*d0))^2); % FSPL @ d0 (dB)
48 n0 = 1.0; % diktis diathlasis ~1
49 dn_dz = -3e-8; % klisi dn/dz (1/m), ruthmizomeni
50 theta_tol_deg = 0.0; % anoxi trapping (deg)
51
52 %% --- Ypologismos orizonta (dLOS) me kampilotita ghs ( m) ---
53 % dLOS = sqrt(ht^2+2*ht*R) + sqrt(hr^2+2*hr*R); % akrivis
54 % dLOS 3.57*(sqrt(ht)+sqrt(hr)) km %isodinami klasiki prosegisi
55 dLOS = sqrt(ht^2+2*ht*R) + sqrt(hr^2+2*hr*R);
56
57 %% --- THREE-RAY: Path Loss & SNR entos orizonta ---
58 PL3ray = zeros(numel(angles), numel(d)); % Path loss 3-ray (dB)
59 SNR_LOS_dB = zeros(numel(angles), numel(d)); % SNR LOS (dB)
60
61 for a = 1:numel(angles)
62 for i = 1:numel(d)
63 % three-ray "fasi" (sumpagis morfh opws exei ylopoiithe)
64 phi = 2 * sin((2*pi*ht*hr)/(lambda*d(i))) * ...
65 sin((2*pi*(he-ht)*(he-hr))/(lambda*d(i)));

```

```

66
67     % PL_3ray(d) se dB (arnitiko FSPL + oros 3-ray),
68     PL3 = -10*log10((lambda/(4*pi*d(i)))^2) ...
69         -10*log10((2*(1+phi)^2)); % = FSPL(d) + epipleon oros
70     PL3ray(a,i) = PL3;
71
72     % SNR entos orizoda (prosorina gia oles tis apostaseis)
73     SNR_LOS_dB(a,i) = Pt_dBW + Gt_dBi(a) + Gr_dBi - Lsys - PL3 - Nsys_dBW;
74 end
75 end
76
77 %% --- B-LOS: trapping beamwidth & path loss pera dLOS ---
78 % half-beamwidth duct ( rad): _T,max sqrt( 2 * ( (1/n0)*dn/dz + 1/R ) * (ht -
    -he) )
79 thetaHalf_rad = sqrt( max(0, 2*((1/n0)*dn_dz + 1/R) * (ht - he) ) );
80 thetaHalf_deg = thetaHalf_rad * 180/pi;
81
82 SNR_blos_dB = SNR_LOS_dB; % Vasi: oti vrikame LOS
83 % tha antikatastathei gia d > dLOS
84
85 for a = 1:numel(angles)
86     theta_tx_deg = angles(a); % elevation tis desmis
87     inTrapping = abs(theta_tx_deg) <= (thetaHalf_deg + theta_tol_deg);
88
89     for i = 1:numel(d)
90         if d(i) <= dLOS
91             % Entos LOS: kratame three-ray SNR
92             SNR_blos_dB(a,i) = SNR_LOS_dB(a,i);
93
94         else
95             % Pera apo dLOS: B-LOS leitourgia duct an planei h gonía
96             if inTrapping
97                 % Path loss entos duct: PL(d) = PL(d0) + 10*n_duct*log10(d/d0)
98                 PLb = PLd0_FS + 10*n_duct*log10(d(i)/d0);
99
100                % Mikrokimatiki dialipsi/small-scale fading se dB
101                % (Rician konta sto dLOS Rayleigh makria)
102                if useFading
103                    if d(i) <= dLOS
104                        KdB = KO_dB;
105                    elseif d(i) <= 3*dLOS
106                        KdB = KO_dB * (1 - (d(i)-dLOS)/(2*dLOS));
107                    else
108                        KdB = -Inf; % Rayleigh
109                    end
110                    if isfinite(KdB)
111                        K = 10^(KdB/10);
112                        s = sqrt(K/(K+1));
113                        sigma = 1/sqrt(2*(K+1));
114                        h = s + sigma*(randn()+1i*randn()); % Rician complex gain
115                    else
116                        sigma = 1/sqrt(2);
117                        h = sigma*(randn()+1i*randn()); % Rayleigh

```

```

118         end
119         fad_dB = 20*log10(abs(h));           % Se dB
120     else
121         fad_dB = 0;
122     end
123     % "Ofelimi" meiosi apoleion apo fading ( dB)
124     PLb_eff = PLb - fad_dB;   % prosthetiko se dB (meiosi apoleion otan fad_dB>0)
125
126     % SNR      B-LOS (entos duct)
127     SNR_blos_dB(a,i) = Pt_dBW + Gt_dBi(a) + Gr_dBi - Lsys - PLb_eff - Nsys_dBW;
128
129     else
130         % ekstos trapping polu megali eksastensis
131         PLb = PLd0_FS + 10*4.0*log10(d(i)/d0) + 60; %skliri aposvesi
132         SNR_blos_dB(a,i) = Pt_dBW + Gt_dBi(a) + Gr_dBi - Lsys - PLb - Nsys_dBW;
133     end
134 end
135 end
136 end
137
138 %% --- Figures SNR vs Distance (all the angles) ---
139 figure; hold on; grid on;
140 cols = lines(numel(angles));
141 for a = 1:numel(angles)
142     plot(d/1000, SNR_blos_dB(a,:), 'LineWidth', 1.6, 'Color', cols(a,:), ...
143         'DisplayName', sprintf('Elevation %d', angles(a)));
144 end
145 xline(dLOS/1000, 'k--', 'd_{LOS}');
146 xlabel('Distance (km)'); ylabel('SNR (dB)');
147 title('SNR vs Distance (LOS + B-LOS)');
148 legend('Location','best');
149
150 %% --- Focus: SNR vs Distance 20 (indicative)---
151 idx20 = find(angles==20,1);
152 if ~isempty(idx20)
153     figure; grid on; hold on;
154     plot(d/1000, SNR_blos_dB(idx20,:), 'LineWidth', 2);
155     xline(dLOS/1000, 'k--', 'd_{LOS}');
156     xlabel('Distance (km)'); ylabel('SNR (dB)');
157     title('SNR vs Distance for elevation 20 (LOS + B-LOS)');
158 end
159
160 %% --- SNR vs Time for ship movement ---
161 doTime = true;
162 if doTime
163     v = 6;           % m/s
164     t = 0:1:2500;   % s
165     d0_move = 100;  % Arxiki apostasi (m)
166     d_move = d0_move + v*t; % apostasi ston xrono
167
168     SNR_move = nan(numel(angles), numel(t));
169     for a = 1:numel(angles)
170         theta_tx_deg = angles(a);

```

```

171     inTrapping = abs(theta_tx_deg) <= (thetaHalf_deg + theta_tol_deg);
172
173     for k_ = 1:numel(t)
174         di = d_move(k_);
175         % three-ray PL entos LOS
176         phi = 2 * sin((2*pi*ht*hr)/(lambda*di)) * ...
177             sin((2*pi*(he-ht)*(he-hr))/(lambda*di));
178         PL3 = -10*log10((lambda/(4*pi*di))^2) ...
179             -10*log10((2*(1+phi)^2));
180         SNR_tmp = Pt_dBW + Gt_dBi(a) + Gr_dBi - Lsys - PL3 - Nsys_dBW;
181
182         % B-LOS an exei kseperastei o orizontas
183         if di > dLOS
184             if inTrapping
185                 PLb = PLd0_FS + 10*n_duct*log10(di/d0);
186                 if useFading
187                     if di <= dLOS
188                         KdB = K0_dB;
189                     elseif di <= 3*dLOS
190                         KdB = K0_dB * (1 - (di-dLOS)/(2*dLOS));
191                     else
192                         KdB = -Inf;
193                     end
194                     if isfinite(KdB)
195                         K = 10^(KdB/10);
196                         s = sqrt(K/(K+1));
197                         sigma = 1/sqrt(2*(K+1));
198                         h = s + sigma*(randn()+1i*randn());
199                     else
200                         sigma = 1/sqrt(2);
201                         h = sigma*(randn()+1i*randn());
202                     end
203                     fad_dB = 20*log10(abs(h));
204                 else
205                     fad_dB = 0;
206                 end
207                 PLb_eff = PLb - fad_dB;
208                 SNR_tmp = Pt_dBW + Gt_dBi(a) + Gr_dBi - Lsys - PLb_eff - Nsys_dBW;
209             else
210                 PLb = PLd0_FS + 10*4.0*log10(di/d0) + 60;
211                 SNR_tmp = Pt_dBW + Gt_dBi(a) + Gr_dBi - Lsys - PLb - Nsys_dBW;
212             end
213         end
214         SNR_move(a,k_) = SNR_tmp;
215     end
216 end
217
218 figure; hold on; grid on;
219 for a = 1:numel(angles)
220     plot(t, SNR_move(a,:), 'LineWidth', 1.2, 'DisplayName', sprintf('%d', angles(a)));
221 end
222 xlabel('Time (s)'); ylabel('SNR (dB)');
223 title('SNR during the movement (LOS + B-LOS)');

```

```

224     legend('Location','best');
225
226     % Focus for 20
227     if ~isempty(idx20)
228         figure; grid on; hold on;
229         plot(t, SNR_move(idx20,:), 'LineWidth', 2);
230         xlabel('Time (s)'); ylabel('SNR (dB)');
231         title('SNR(t)      elevation 20 (LOS + B-LOS)');
232     end
233 end

```

Παράρτημα Δ: Κώδικας Υπολογισμού Απωλειών Διάδοσης: Two-ray / Three-ray / ITU(PathLossN.m)

```

1 %% PathLoss.m           2-ray   3-ray           (
2 %Stoxos: pologismos apoleion diadosis (Path Loss) sunartisi tis apostasia
3 %gia ta montela two-ray (epipedi thalassa) kai three-ray (me evaporation duct).
4 %Paragei grafima PL(d).
5
6 clear; clc; close all;
7
8 % Statheres
9 f = 157e6;             % Suwnotita VHF (Hz)
10 c = 3e8;              % Taxutita fotos (m/s)
11 lambda = c / f;      % Mhkos Kumatos (m)
12
13 % Ypsoi keraion kai evaporation duct
14 ht = 100;            % Ypsos pompou (m)
15 hr = 40;             % Ypsos pompou (m)
16 he = 60;            % Ypsos evaporation duct (m)
17
18 % Dianisma Apostaseon
19 d = 0:5:2500;
20
21 % Arxikopoiisi pinakon
22 PL2ray = zeros(size(d));
23 PL3ray = zeros(size(d));
24
25 for i=1:length(d)
26     % Two-ray Path Loss
27     PL2ray(i) = 10 .* log10(((lambda ./ (4 .* pi .* d(i))).^2) .* (2 .* sin((2 .* pi .* ht .* ←
→hr) ./ (lambda .* d(i))))).^2);
28
29     % Three-ray Path Loss
30     phi = 2 .* sin((2 .* pi .* ht .* hr) ./ (lambda .* d(i))) .* sin((2 .* pi .* (he - ht) .* ←
→(he - hr)) ./ (lambda .* d(i)));
31     PL3ray(i) = 10 .* log10(((lambda ./ (4 .* pi .* d(i))).^2) .* (2 .* (1 + phi).^2));
32 end
33
34 figure; hold on;
35 plot(d, PL2ray, 'b-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '2-ray Model');

```

```

36 plot(d, PL3ray, 'r-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '3-ray Model');
37
38 grid on;
39 xlabel('Distance [m]');
40 ylabel('Path Loss [dB]');
41 title('Two-ray and Three-ray Path Loss Models (Maritime Wireless Channel)');
42 legend('Location','best');
43 axis([0 2500 -150 -20]);
44
45 %% --- Deutero Grafima: Diafora 3-ray 2-ray dB ---
46
47 % Orismos: PL = PL_3ray PL_2ray.
48 % An PL > 0 to 3-ray epei Megaliteres apoleies (xeirotero apo 2-ray).
49 % An PL < 0 to 3-ray epei Mikroteres apoleies (ofelos/kerdos apo to duct).
50
51 d_km = d(:)/1000; % Metatropi apo m se km gia ton aksona x
52 dPL = PL3ray(:) - PL2ray(:); % Diafora se dB
53
54 figure; hold on; box on; grid on;
55
56 % --- Gemisma perioxon: galazio=ofelos (arnitiko), Roz=zimia (thetiko)
57 pos = dPL; pos(pos<0) = 0; % Thetika tmimata (zimia)
58 neg = dPL; neg(neg>0) = 0; % Arnitika tmimata (ofelos)
59
60 hPos = area(d_km, pos, 'FaceColor',[0.85 0.33 0.31], ... % Roz
61 'FaceAlpha',0.18, 'EdgeColor','none', 'ShowBaseLine','off');
62 hNeg = area(d_km, neg, 'FaceColor',[0.22 0.60 0.35], ... % Galazio
63 'FaceAlpha',0.20, 'EdgeColor','none', 'ShowBaseLine','off');
64
65 % Kampuli sto epano meros gia katharo perigramma
66 plot(d_km, dPL, 'Color',[0.10 0.35 0.70], 'LineWidth',1.8);
67
68 % Grammi 0 gia optiko simeio anaforas
69 yline(0,'k--','LineWidth',1.0,'HandleVisibility','off');
70
71 % Aksones & Titloi
72 xlabel('Distance d (km)');
73 ylabel('Loss difference (3-ray - 2-ray) [dB]');
74 title('Benefit And Disadvantage of evaporation duct versus 2ray');
75
76 % Simeiosi gia to prosimo
77 text(0.02,0.04,'Negative: benefit duct Possitive: Loss', ...
78 'Units','normalized','FontSize',10,'Color',[0.25 0.25 0.25]);
79
80 % Ypommima: Prota "ofelos meta "zimia"
81 legend([hNeg hPos], {'Benefit of duct (smaller losses)', ...
82 'Loss (bigger losses)'}, ...
83 'Location','best');
84
85 set(gca,'LineWidth',0.9,'FontSize',11);
86 set(gcf,'Color','w');

```

Παράρτημα Ε: Κώδικας Throughput vs Απόσταση χωρίς Rayleigh (ThroughputVSdistanceNoRayleigh.m)

```

1 clear; clc; close all;
2
3 %% ----- Statheres / Rythmiseis -----
4
5 f = 157e6;           % Frequency VHF (Hz)
6 c = 3e8;            % Speed of light (m/s)
7 lambda = c / f;     % Wavelength(m)
8
9 % Bandwidths gia kathe LinkID (se kHz, opos sta apotelesmata)
10 B = [25,25,25,49.9,49.9,49.9,99.8,99.8,99.8]; % Bandwidth kHz
11 B_Hz = B*1e3;
12 %% ----- Thermikos thoryvos (kTB) + Noise Figure -----
13 k = 1.380649e-23; % Boltzmann [J/K]
14 Tsys = 1058.8; % Kelvin (
15     →
16     )
17 Ntot_dBW = 10*log10(k*Tsys.*B_Hz); % 1x9 dBW ( +50 dB)
18
19 %% ----- Isxys / Kerdi / Zwtm -----
20 P_out = [12.5,11,6.5,12.5,11,6.5,12.5,11,6.5]; % W
21 Pt_dBW = 10*log10(P_out); % Transmission power 12.5, 11 , 6.5W -
22 disp('Pt_dBW = ')
23 disp(Pt_dBW)
24
25 Gr_dBi = 0;
26 Gt_dBi = 3; %gain angles 0o , ITU - Table 14
27
28 Ltx_dB = 1.5; Lrx_dB = 1.5; Lpol_dB = 2.0; % realistic losses
29 Lsys = 0; % System losses(dB)
30
31 %% ----- Geometria / Dromos -----
32 R = 6371008.8; %Geometry R _ earth
33 ht = 90; hr = 30; he = 10;
34 d = ht:1:80000;
35
36 % Sima simasiun metava8mishs montelou
37 dBreak=4*ht*hr/lambda; %wang2018 ref.[30]
38 disp('dBreak = ')
39 disp(dBreak);
40
41 dLos = sqrt(ht^2 + 2*ht*R)+sqrt(hr^2 +2*hr*R); %wang2018 eq.(4)
42 disp('dLos')
43 disp(dLos);
44
45 %% ====
46 counter = 0;
47 for i=1:length(d)
48     if d(i)<dBreak
49         %2-ray PL(i) = - 10 .* log10(((lambda ./ (4 .* pi .* d(i))).^2) .* 2 .* sin((2 .* pi ←
50         → .* ht .* hr) ./ (lambda .* d(i))));

```

```

48     % 2-ray (power): tetragonizoume ton oro simvolis gia na einai panta 0
49     PL(i) = -10 .* log10( ((lambda./(4.*pi.*d(i))).^2) .* ( ←
→2.*sin((2.*pi.*ht.*hr)./(lambda.*d(i))) ).^2 + eps );
50
51
52     elseif d(i)<dLos
53         %3-ray
54         phi = 2 .* sin((2 .* pi .* ht .* hr) ./ (lambda .* d(i))) .* sin((2 .* pi .* (he ←
→ ht) .* (he - hr)) ./ (lambda .* d(i)));
55         PL(i) = -10 .* log10(((lambda ./ (4 .* pi .* d(i))).^2) .* (2 .* (1 + phi)).^2);
56
57     else
58         % --- duct-only (log-distance + leakage) ---
59         % Vasikes parametroi
60         n_duct = 1.8;           % exhibitor
61         alpha_km = 0.05;       % dB km
62         d0 = 1000;             % m (reference)
63
64         % find the nearest point and the PL value there
65         near = find(d < dLos,1,'last');
66         PLO = PL(near);        % value from 3-ray at the boundary
67
68         % final duct-only price
69         PL(i)= PLO + 10*n_duct*log10(d(i)/d0) + alpha_km*((d(i) - d0)/1000);
70     end
71     counter = counter + 1;
72 end
73 disp('counter = ')
74 disp(counter);
75
76 %% ----- PRESENTATION-ONLY CAPS-----%%
77 presentationalCaps = true;    %
78 PL_MIN_NEAR = 40;            % dB, bottom
79 PL_MAX_SHOW = 100;          % dB, top
80 D_NEAR_CAP = 100;           % m, first meter
81
82 PL_plot = PL;
83 if presentationalCaps
84     di = d(:);                % d meters
85     near = di <= D_NEAR_CAP;   % First meters
86     PL_plot(near) = max(PL_plot(near), PL_MIN_NEAR); % >= 40 dB closer
87     PL_plot      = min(PL_plot, PL_MAX_SHOW);      % <= 100 dB
88 end
89 PL_plot = PL;
90 if presentationalCaps
91     di = d(:);                % d
92     near = di <= D_NEAR_CAP;   %
93     PL_plot(near) = max(PL_plot(near), PL_MIN_NEAR); % >= 40 dB
94     PL_plot      = min(PL_plot, PL_MAX_SHOW);      % <= 100 dB
95 end
96 %% ----- SNR(d) gia 9 LinkIDs -----
97
98 LinkID = [11:19];

```

```

99
100 % --- SNR calculation for various LinkIDs ---
101
102 SNR_dB = zeros(length(LinkID), length(d));
103 EIRP_dBW = Pt_dBW + Gt_dBi - Ltx_dB; % 1x9 dBW
104
105 %% === LINK-BUDGET =====
106 margin_dB = 6; % sintiritiko perithorio fading/thalasion sunthikon
107 EIRP_dBW = Pt_dBW + Gt_dBi - Ltx_dB; % 1x9 dBW
108 Gpath_dB = Gr_dBi - Lrx_dB - Lpol_dB; % Sinolikes lipsis (dB)
109 %% ----
110 %for a = 1:length(LinkID)
111 % Pr_dBW = EIRP_dBW(a) - PL.' + Gr_dBi - Lrx_dB - Lpol_dB;
112 % SNR_dB(a,:) = Pr_dBW - Ntot_dBW(a); % noise, dBW
113 %end
114 for a = 1:length(LinkID)
115 % Isxis sti lipsi
116 Pr_dBW = EIRP_dBW(a) - PL.' + Gpath_dB; % dBW
117 % SNR me perithorio
118 SNR_dB(a,:) = Pr_dBW - Ntot_dBW(a) - margin_dB; % dB
119 end
120
121 %% extra
122 % Gia asfaleia, an kati emeine migadiko/Inf, ginetai asfales gia to plotting
123 SNR_dB = real(SNR_dB);
124 SNR_dB(~isfinite(SNR_dB)) = NaN;
125
126 %% Extra
127 % === #6: Rayleigh fading pano sta SNR ===
128 doFading = false; % An true energopoieitai
129 if doFading
130 Nsamp = size(SNR_dB,2);
131 h = (randn(1,Nsamp) + 1j*randn(1,Nsamp))/sqrt(2); % Rayleigh
132 fading_dB = 20*log10(abs(h)); % se dB
133 for i = 1:9
134 SNR_dB(i,:) = SNR_dB(i,:) + fading_dB; % prosthiki sto kathe LinkID
135 end
136 end
137
138 %%
139
140 figure; hold on; grid on;
141 for a = 1:length(LinkID)
142 plot(d, SNR_dB(a,:), 'LineWidth', 1.2);
143 end
144 xlabel('Distance (m)');
145 ylabel('SNR (dB)');
146 title('SNR vs Distance');
147
148
149 %% --- Movement - time ---
150 v = 15; % m/s
151 t = 0:1:4000; % s

```

```

152 d_movement = 100 + v*t; % m
153
154 SNR_t = interp1(d, SNR_dB.', d_movement, 'linear', 'extrap').'; % 9xNt
155
156 % SNR(t) LinkIDs
157 figure; hold on; grid on;
158 for a = 1:numel(LinkID)
159     plot(t, SNR_t(a,:), 'LineWidth', 1.2, 'DisplayName', sprintf('LinkID %d', LinkID(a)));
160 end
161 xlabel('Time (s)'); ylabel('SNR (dB)');
162 title('SNR above the movement');
163 legend('Location','best');
164
165 %% Extra===== #5: THROUGHPUT vs DISTANCE (gia PER<=1%) =====
166
167 % --- PER(SNR) kampiles L11..L19 apo ta apotelesmata---
168 SNRdB_cell = { ...
169     0:0.1:2.5, 7.2:0.1:10, 9.0:0.1:11.5, ...
170     0:0.1:2.5, 7.4:0.1:9.6, 9.3:0.1:11.6, ...
171     0:0.1:2.5, 7.4:0.1:9.6, 9.5:0.1:10.8 };
172 PER_cell = { ...
173 [0.9747 0.9634 0.9434 0.9042 0.8389 0.7911 0.7123 0.6211 0.5155 0.4230 0.3173 0.2277 0.1747 ←
    -0.1126 0.0769 0.0424 0.0223 0.0130 0.0071 0.0031 0.0016 0.0008 0.0005 0.0003 0.0000 ←
    →NaN], ...
174 [0.9980 0.9785 0.9690 0.9506 0.8977 0.8681 0.7680 0.6812 0.5794 0.4766 0.3213 0.2458 0.1722 ←
    -0.1153 0.0734 0.0411 0.0241 0.0129 0.0080 0.0056 0.0035 0.0022 0.0017 0.0010 0.0007 ←
    -0.0005 0.0004 0.0002 0.0002], ...
175 [1.0000 0.9960 0.9881 0.9728 0.9488 0.8818 0.8306 0.7289 0.6053 0.4429 0.2931 0.2244 0.1527 ←
    -0.1010 0.0547 0.0364 0.0212 0.0150 0.0079 0.0044 0.0032 0.0023 0.0015 0.0012 0.0008 ←
    -0.0005], ...
176 [0.9950 0.9967 0.9868 0.9740 0.9494 0.9174 0.8299 0.6842 0.5693 0.4376 0.2997 0.1905 0.1150 ←
    -0.0571 0.0273 0.0148 0.0059 0.0034 0.0017 0.0013 0.0008 0.0006 0.0004 0.0004 0.0000 ←
    →NaN], ...
177 [0.9970 0.9921 0.9794 0.9320 0.8764 0.7686 0.6414 0.4914 0.3137 0.1923 0.1010 0.0540 0.0211 ←
    -0.0105 0.0048 0.0028 0.0016 0.0010 0.0006 0.0007 0.0003 0.0003 0.0002], ...
178 [1.0000 0.9921 0.9690 0.9141 0.8333 0.6658 0.5066 0.3349 0.1898 0.0955 0.0466 0.0230 0.0113 ←
    -0.0061 0.0042 0.0027 0.0024 0.0018 0.0012 0.0010 0.0008 0.0006 0.0005 0.0003], ...
179 [1.0000 1.0000 1.0000 0.9980 0.9980 0.9671 0.9208 0.8237 0.6562 0.4296 0.2343 0.1131 0.0450 ←
    -0.0148 0.0050 0.0024 0.0015 0.0012 0.0008 0.0007 0.0005 0.0004 0.0003 0.0002 NaN NaN], ...
180 [1.0000 1.0000 0.9980 0.9960 0.9671 0.8945 0.7474 0.5176 0.3189 0.1572 0.0604 0.0222 0.0099 ←
    -0.0057 0.0040 0.0026 0.0020 0.0018 0.0010 0.0009 0.0007 0.0004 0.0004], ...
181 [0.9940 0.9823 0.9398 0.8026 0.6046 0.3451 0.1537 0.0590 0.0187 0.0053 0.0020 0.0008 0.0004 ←
    -0.0003] };
182
183 % --- Shift ton SNR plegmaton logo isxios ana LinkID ---
184 SNR_adj = cell(1,9);
185 for i=1:9
186     SNR_adj{i} = SNRdB_cell{i} + Pt_dBW(i); % szetiki metatopisi ana LinkID
187 end
188
189 % --- Thresholds PER<=1% (se log10(PER)) ---
190 SNR_thr = nan(1,9);
191 for i = 1:9

```

```

192     snr = SNR_adj{i}(:); per = PER_cell{i}(:);
193     n = min(numel(snr),numel(per)); snr = snr(1:n); per = per(1:n);
194     m = ~isnan(snr) & ~isnan(per) & per>0; snr=snr(m); per=per(m);
195     if isempty(snr), continue; end
196     hi = find(per<=0.01,1,'first');
197     if ~isempty(hi)
198         if hi==1
199             SNR_thr(i) = snr(1);
200         else
201             x1=snr(hi-1); x2=snr(hi); y1=log10(per(hi-1)); y2=log10(per(hi));
202             SNR_thr(i) = x1 + (log10(0.01)-y1)*(x2-x1)/(y2-y1);
203         end
204     end
205 end
206 for i=2:9
207     if ~isnan(SNR_thr(i-1)) && ~isnan(SNR_thr(i))
208         SNR_thr(i) = max(SNR_thr(i), SNR_thr(i-1)); %
209     end
210 end
211
212 % --- Epilogi LinkID & Throughput(d) ---
213 d_km = d(:)'/1000;
214 N = numel(d_km);
215 LID = 10*ones(1,N); % default L11
216 T_kbps = zeros(1,N);
217
218 % Parametroi PHY
219 params = [ ...
220     19200, 4, 1/2, 432, 10; 19200, 8, 3/4, 972, 15; 19200, 16, 3/4, 1296, 20; ...
221     38400, 4, 1/2, 896, 42; 38400, 8, 3/4, 2016, 63; 38400, 16, 3/4, 2688, 84; ...
222     76800, 4, 1/2, 1872, 10; 76800, 8, 3/4, 4032,255; 76800, 16, 3/4, 5616, 20 ];
223
224 for k = 1:N
225     ii = find(SNR_dB(:,k) >= SNR_thr(:), 1, 'last');
226     if ~isempty(ii), LID(k) = 10+ii; else, LID(k) = 11; end
227
228     i = LID(k)-10;
229     g = SNR_dB(i,k);
230     Rs = params(i,1); M=params(i,2); r=params(i,3); Lb=params(i,4); Cb=params(i,5);
231     eff = (Lb-Cb)/Lb;
232     p = perAt(LID(k), g, SNR_adj, PER_cell);
233     T_kbps(k) = max(0, (1-p)*Rs*log2(M)*r*eff/1000);
234 end
235
236 % ===== FIGURE 3: Throughput (PER<=1%) me zones =====
237 % prepei na exoun ypologistei: d_km, T_kbps, LID
238 assert(exist('T_kbps','var')==1 && exist('LID','var')==1, 'Vale to Figure 3 meta ton ←
    →ypologismo T_kbps/LID');
239
240 % chromata (an den exeis thesis struct)
241 if exist('turbo','builtin'), cmap = turbo(9); else, cmap = parula(9); end
242 linkColor = @(L) cmap(L-10,:);
243

```

```

244 % segmentation gia tis zones ana LinkID
245 chg      = find(diff(LID)~=0);
246 seg_start = [1, chg+1];
247 seg_end   = [chg, numel(LID)];
248 Y0 = 0;
249 Y1 = 1.08*max(T_kbps,[],'omitnan');    % y-ori gia ta patches
250
251 f3 = figure('Name','Throughput_PER1_policy','NumberTitle','off','Color','w');
252 hold on; box on; grid on; grid minor;
253
254 % background patches ana LinkID
255 counterPatches=0;
256 for s = 1:numel(seg_start)
257     i1 = seg_start(s);
258     i2 = seg_end(s);
259     L = LID(i1);
260     x1 = d_km(i1);
261     x2 = d_km(i2);
262     patch([x1 x2 x2 x1],[Y0 Y0 Y1 Y1], linkColor(L), ...
263           'FaceAlpha',0.12,'EdgeColor','none','HandleVisibility','off');
264     counterPatches = counterPatches + 1;
265 end
266 disp('counterPatches = ')
267 disp(counterPatches)
268
269 % --- kathetes oria me ariosi---
270 xx = d_km(chg+1);          % theseis allagis
271 minSep = 0.2;             % elaxisti apoklisi metaxy katheton (km)
272 keep = [true, diff(xx) >= minSep];
273 xx = xx(keep);
274
275 % Periorismos to poly-poly
276 maxLines = 80;
277 if numel(xx) > maxLines
278     idx = round(linspace(1, numel(xx), maxLines));
279     xx = xx(idx);
280 end
281
282 % mia drawing klisi gia OLES tis kathetes (oudeptero xrwma: grazi)
283 line([xx; xx], [Y0+zeros(size(xx)); Y1*ones(size(xx))], ...
284      'LineStyle','--', 'Color', [0.4 0.4 0.6], 'LineWidth', 0.8);
285
286 % Gia na min fainetai na kollaei
287 drawnow limitrate
288
289 % i kyria kampyli throughput
290 plot(d_km, T_kbps, 'LineWidth', 2.2, 'Color', [0.05 0.25 0.70]);
291
292 % etiketes "L11..L19" pano apo tis zones
293 yL = 0.965*Y1;
294 for s = 1:numel(seg_start)
295     i1 = seg_start(s);
296     i2 = seg_end(s);

```

```

297     L = LID(i1);
298     xm = 0.5*(d_km(i1)+d_km(i2));
299     text(xm, yL, sprintf('L%d',L), 'Color', linkColor(L), ...
300           'FontWeight','bold', 'HorizontalAlignment','center', ...
301           'VerticalAlignment','bottom', 'BackgroundColor','w', 'Margin',1, ...
302           'Clipping','on');
303 end
304
305 % axones / titlos / oria
306 xlabel('Distance d (km)','FontWeight','bold');
307 ylabel('Throughput (kbps)','FontWeight','bold');
308 title('Throughput along the route (policy PER \leq 1%)','FontWeight','bold');
309 xlim([0 80]); % bale to range pou thes
310 ylim([0 max(1, Y1)]); % asfaleia gia y
311 drawnow;
312 %% ===== Figure 3A Zoom 0 1 km ===== %% Last Change
313 figure('Color','w','Name','Throughput (PER<=1%) zoom 01 km');
314 hold on; grid on; box on;
315
316 plot(d_km, T_kbps, 'LineWidth', 2.0);
317 xlim([0 1]); % <<< ZOOM 1 km
318 ylim([0, max(1, 1.08*max(T_kbps,[],'omitnan'))]);
319 xlabel('Distance d (km)'); ylabel('Throughput (kbps)');
320 title('Throughput along the route Zoom 0 1 km');
321
322 %% If max(T_kbps)=0 or any(isfinite)=0,
323 [min(T_kbps) max(T_kbps) any(isfinite(T_kbps))]
324 size(T_kbps), size(d_km)
325
326 % --- lektes kathetes grammes, arketa arainomenes ---
327
328 xx = d_km(chg+1); % theseis allagis (km)
329 minSep = 0.2; % elaxisti apochi metaxy katheton (km)
330 xx = xx([true, diff(xx) >= minSep]);
331
332 maxLines = 80; % an einai polles, kratame mexri 80
333 if numel(xx) > maxLines
334     xx = xx(round(linspace(1,numel(xx),maxLines)));
335 end
336
337 Y0 = 0; Y1 = 1.08*max(T_kbps); % y-orio ton katheton
338 % ena MONO graphics object anti gia xiliades xline()
339 line([xx; xx], [Y0*ones(size(xx)); Y1*ones(size(xx))], ...
340       'LineStyle','--','Color',[0.45 0.45 0.6], 'LineWidth',0.8, ...
341       'HandleVisibility','off');
342 drawnow limitrate
343
344 plot(d_km, T_kbps, 'LineWidth',2.0, 'Color',[0.05 0.25 0.70]);
345 yL = 0.965*Y1;
346 for s=1:numel(seg_start)
347     i1=seg_start(s); i2=seg_end(s); L=LID(i1); xm=0.5*(d_km(i1)+d_km(i2));
348     text(xm, yL, sprintf('L%d',L),'Color',linkColor(L),'FontWeight','bold',...
349           'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignment','bottom',...

```

```

350         'BackgroundColor','w','Margin',1,'Clipping','on');
351 end
352 xlabel('Distance d (km)'); ylabel('Throughput (kbps)');
353 title('Throughput along the route (policy PER \leq 1%)');
354 set(gca,'LineWidth',1.0,'FontSize',11);
355 %% ===== 5B. Throughput per LinkID kata mikos apostasis (oles oi kampiles) =====
356 d_km = d(:)'/1000;           % aksonas se km
357 dLos_km = dLos/1000;
358
359 N = numel(d_km);
360 T_per = nan(9, N);           % 9xN: throughput for every LinkID separte
361
362 for i = 1:9                   % i=1..9 <=> L=11..19
363     L = 10 + i;
364     Rs = params(i,1); M = params(i,2); r = params(i,3);
365     Lb = params(i,4); Cb = params(i,5);
366     eff = (Lb - Cb) / Lb;     % ofelimo payload (CRC/overhead)
367
368     for k = 1:N
369         g = SNR_dB(i,k);      % SNR tou idiou LinkID sto k
370         if ~isfinite(g), T_per(i,k) = NaN; continue; end
371         p = perAt(L, g, SNR_adj, PER_cell); % PER apo tis kampiles
372         T_per(i,k) = max(0, (1-p) * Rs * log2(M) * r * eff / 1000); % kbps
373     end
374 end
375
376 % --- Plot: oles oi kampiles ana LinkID ---
377 figure('Color','w'); hold on; box on; grid on; grid minor;
378 if exist('turbo','builtin'), cmap = turbo(9); else, cmap = lines(9); end
379 for i = 1:9
380     plot(d_km, T_per(i,:), 'LineWidth', 1.7, 'Color', cmap(i,:));
381 end
382 xline(dLos_km,'--k','d_{LOS}','LabelOrientation','horizontal',...
383       'LabelVerticalAlignment','bottom','Alpha',0.6);
384
385 xlabel('Distance d (km)'); ylabel('Throughput (kbps)');
386 title('Throughput vs Distance per LinkID');
387 legend("LinkID 11","LinkID 12","LinkID 13","LinkID 14","LinkID 15", ...
388       "LinkID 16","LinkID 17","LinkID 18","LinkID 19", ...
389       'Location','northwest');
390 ylim([0, 1.05*max(T_per(:), [], 'omitnan')]);
391 xlim([0, ceil(max(d_km)/5)*5]);
392
393 %% ===== 5C. Throughput vs Distance max per distance (best-case) =====
394 T_best = max(T_per, [], 1); % se kathe km, pernoume to kalutero LinkID
395 % == Poio LinkID (MCS) petivainei to best-case ==
396 [~, bestIdx] = max(T_per, [], 1); % indices 1..9
397 bestLID = 10 + bestIdx;       % 11..19
398
399 % Oria zonan
400 chg = find(diff(bestLID)~=0);
401 seg_start = [1, chg+1];
402 seg_end = [chg, numel(d_km)];

```

```

403 xchg = d_km(chg+1);
404
405 % Collors
406 if exist('turbo','builtin'), cmap = turbo(9); else, cmap = parula(9); end
407 linkColor = @(L) cmap(L-10,:); % L=11..19 -> 1..9
408
409 % === FIGURE: best-case envelope ===
410 figure('Color','w'); hold on; box on; grid on; grid minor;
411
412 % Oria gia patches/labels
413 Y0 = 0;
414 Y1 = 1.05*max(T_best,[],'omitnan');
415
416 % 1) (patches) LinkID
417 for s = 1:numel(seg_start)
418     i1 = seg_start(s); i2 = seg_end(s);
419     L = bestLID(i1); % LinkID
420     x1 = d_km(i1); x2 = d_km(i2);
421     patch([x1 x2 x2 x1], [Y0 Y0 Y1 Y1], linkColor(L), ...
422         'FaceAlpha',0.12, 'EdgeColor','none', 'HandleVisibility','off');
423 end
424
425 % 2) best-case envelope
426 stairs(d_km, T_best, 'k', 'LineWidth', 2.2);
427
428 % 3) LinkID change
429 if ~isempty(xchg)
430     xline(xchg,'--','Color',[0.5 0.5 0.7],'LineWidth',0.8,'HandleVisibility','off');
431 end
432
433 % 4) Labels "L11..L19"
434 yLab = 0.98*Y1;
435 for s = 1:numel(seg_start)
436     i1 = seg_start(s); i2 = seg_end(s);
437     xm = 0.5*(d_km(i1)+d_km(i2));
438     text(xm, yLab, sprintf('L%d', bestLID(i1)), ...
439         'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignment','top', ...
440         'FontWeight','bold','Color',[0.45 0.45 0.0], ...
441         'BackgroundColor','w','Margin',1,'Clipping','on');
442 end
443
444 xlabel('Distance d (km)'); ylabel('Throughput (kbps)');
445 title('Throughput vs Distance (best-case envelope) and active MCS (LinkID)');
446 ylim([0, Y1]); xlim([0, ceil(max(d_km)/5)*5]);
447 %% ===== BEST-CASE + MCS ZONES Zoom 0 1 km =====
448 in1 = d_km <= 1; % For first 1 km
449 dk = d_km(in1);
450 Tb = T_best(in1);
451 Lk = bestLID(in1); % LinkID at 01 km
452
453 figure('Color','w','Name','Best-case + MCS (zoom 01 km)');
454 hold on; box on; grid on; grid minor;
455

```

```

456 % Collors
457 if exist('turbo','builtin'), cmap = turbo(9); else, cmap = parula(9); end
458 linkColor = @(L) cmap(L-10,:);
459
460 % Oria Y gia patches/labels
461 Y0 = 0;
462 Y1 = 1.05*max(Tb,[],'omitnan');
463
464 % Zones change the LinkID
465 chg = find(diff(Lk)~=0);
466 seg_start = [1, chg+1];
467 seg_end = [chg, numel(dk)];
468
469 % 1) Zones per LinkID (patches)
470 for s = 1:numel(seg_start)
471     i1 = seg_start(s); i2 = seg_end(s);
472     L = Lk(i1);
473     x1 = dk(i1); x2 = dk(i2);
474     patch([x1 x2 x2 x1], [Y0 Y0 Y1 Y1], linkColor(L), ...
475         'FaceAlpha',0.12, 'EdgeColor','none', 'HandleVisibility','off');
476 end
477
478 % 2) Best-case envelope (stairs)
479 stairs(dk, Tb, 'k', 'LineWidth', 2.2);
480
481 % 3) MCS
482 if ~isempty(chg)
483     xchg = dk(chg+1);
484     xline(xchg,'--','Color',[0.5 0.5 0.7],'LineWidth',0.8,'HandleVisibility','off');
485 end
486
487 % 4) Labels "L11..L19" oria
488 yLab = 0.98*Y1;
489 for s = 1:numel(seg_start)
490     i1 = seg_start(s); i2 = seg_end(s);
491     xm = 0.5*(dk(i1)+dk(i2));
492     if (dk(i2)-dk(i1)) >= 0.03 % Dikse label mono an zoni >30 m
493         text(xm, yLab, sprintf('L%d', Lk(i1)), ...
494             'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignment','top', ...
495             'FontWeight','bold','Color',[0.45 0.45 0.0], ...
496             'BackgroundColor','w','Margin',1,'Clipping','on');
497     end
498 end
499
500 xlim([0 1]);
501 ylim([0 Y1]);
502 xlabel('Distance d (km)'); ylabel('Throughput (kbps)');
503 title('Throughput (best-case) and active MCS Zoom 01 km');
504
505
506 %% === Local function: PER(SNR) interpolation for LinkID ===
507 function p = perAt(L, g, SNR_adj, PER_cell)
508

```

```

509     i   = L - 10;                               % index 1..9
510     snr = SNR_adj{i}(:);
511     per = PER_cell{i}(:);
512
513     n = min(numel(snr), numel(per));
514     snr = snr(1:n); per = per(1:n);
515     keep = isfinite(snr) & isfinite(per) & (per > 0);
516     snr = snr(keep); per = per(keep);
517
518     if isempty(snr), p = 1; return; end
519
520     if g <= snr(1)
521         p = per(1); p = min(max(p,0),1); return;
522     end
523     if g >= snr(end)
524         p = per(end); p = min(max(p,0),1); return;
525     end
526
527     hi = find(snr >= g, 1, 'first');
528     lo = hi - 1;
529     x1 = snr(lo); x2 = snr(hi);
530     y1 = log10(per(lo)); y2 = log10(per(hi));
531     p = 10.^( y1 + (g - x1) * (y2 - y1) / (x2 - x1) );
532     p = min(max(p,0),1);
533 end

```

Παράρτημα Ζ: Κώδικας Throughput vs Απόσταση με Rayleigh (ThroughputVSdistanceWithRayleigh.m)

```

1 clear; clc; close all;
2
3 %% ----- RYTHMISEIS EMFANISIS / EPILOGES (katharotita) -----
4 style.fontSize   = 11;           % megethos grammatoseiras
5 style.lwMain     = 2.0;         % line width kentrikis kampylis
6 style.alphaZone  = 0.10;       % diafaneia gia tis zunes
7 style.minSepKm   = 0.4;        % elaxisti apostasi metaxy katheton (km)
8 style.maxVLines  = 40;         % megisto plithos katheton pou tha meinei
9 xmax_km_to_show = 80;         % ori aksona X sta throughput plots (km)
10
11 doFading        = true;        % false an den theleis Rayleigh pano sto SNR
12 showZones       = true;        % zunes background ana LinkID sto Fig.3
13 showVlines      = true;        % kathetes sta oria allagis LinkID sto Fig.3
14
15 %% ----- STATHERES RF / ZWNE -----
16 f = 157e6;      % synnotita VHF (Hz)
17 c = 3e8;        % taxytita fotos (m/s)
18 lambda = c / f; % mikos kimatos (m)
19
20 B   = [25,25,25, 49.9,49.9,49.9, 99.8,99.8,99.8]; % bandwidths (kHz)
21 B_Hz = B*1e3;   % se Hz
22

```

```

23 %% ---- Thermal noise (kTB) + Receiver Noise Figure ----
24 k = 1.380649e-23; % Boltzmann [J/K]
25 Tsys = 1058.8; % systimiki thermiki thoryvos (K)
26 Ntot_dBW = 10*log10(k*Tsys.*B_Hz); % thermikos thoryvos (dBW) ana LinkID
27
28 %% ----- Isxys / Kerdi / Zwtm -----
29 P_out = [12.5,11,6.5, 12.5,11,6.5, 12.5,11,6.5]; % isxyis ekpompis (W)
30 Pt_dBW = 10*log10(P_out); % se dBW
31 Gt_dBi = 3; Gr_dBi = 0; % kerdi (dBi)
32 Ltx_dB = 1.5; Lrx_dB = 1.5; Lpol_dB = 2.0; % apoleies (dB)
33 margin_dB = 6; % perithwrio link-budget (dB)
34
35 %% ----- GEOMETRIA / DIADROMI -----
36 R = 6371008.8; % aktina gis (m)
37 ht = 90; hr = 30; he = 10; % ypsih
38 d = ht:1:80000; % apostasi (m) me vima 1m
39
40 dBreak = 4*ht*hr/lambda; % orio 2-ray/3-ray
41 dLos = sqrt(ht^2 + 2*ht*R) + sqrt(hr^2 + 2*hr*R); % LOS orio
42
43 %% ----- PATH LOSS: 2-ray / 3-ray / duct -----
44 PL = zeros(size(d)); % pinakas path loss (dB)
45 for i = 1:numel(d)
46     if d(i) < dBreak
47         % 2-ray se ISXYS (na min vgei armhtiko) -> tetragonizoume ton oro
48         PL(i) = -10*log10( ((lambda/(4*pi*d(i)))^2) * ...
49             ( 2*sin(2*pi*ht*hr/(lambda*d(i))) )^2 + eps );
50     elseif d(i) < dLos
51         % 3-ray
52         phi = 2 * sin(2*pi*ht*hr/(lambda*d(i))) * ...
53             sin(2*pi*(he-ht)*(he-hr)/(lambda*d(i)));
54         PL(i) = -10*log10( ((lambda/(4*pi*d(i)))^2) * (2*(1+phi))^2 );
55     else
56         % duct-only (log-distance + leakage)
57         n_duct = 1.8; % exponent
58         alpha_km = 0.05; % dB/km leakage
59         d0 = 1000; % m (reference)
60         near = find(d < dLos,1,'last'); % teleutaio simeio prin LOS orio
61         PLO = PL(near); % PL sto orio
62         PL(i) = PLO + 10*n_duct*log10(d(i)/d0) + alpha_km*((d(i)-d0)/1000);
63     end
64 end
65
66 %% ----- SNR(d) GIA 9 LinkIDs -----
67 LinkID = 1:9; % 9 modes
68 EIRP_dBW = Pt_dBW + Gt_dBi - Ltx_dB; % dBW
69 Gpath_dB = Gr_dBi - Lrx_dB - Lpol_dB; % dB
70
71 SNR_dB = zeros(numel(LinkID), numel(d));
72 for a = 1:numel(LinkID)
73     Pr_dBW = EIRP_dBW(a) - PL.' + Gpath_dB; % isxyis liptis (dBW)
74     SNR_dB(a,:) = Pr_dBW - Ntot_dBW(a) - margin_dB; % SNR (dB)
75 end

```

```

76 SNR_dB = real(SNR_dB); SNR_dB(~isfinite(SNR_dB)) = NaN;      % asfaleia
77
78 % Proairetiko Rayleigh fading pano sto SNR (0 dB meso)
79 if doFading
80     rng(1);          % anaparagogi
81     Nsamp    = size(SNR_dB,2);
82     h        = (randn(1,Nsamp)+1j*randn(1,Nsamp))/sqrt(2); % Rayleigh CN(0,1)
83     fading_dB = 20*log10(abs(h));          % se dB
84     SNR_dB   = SNR_dB + fading_dB;        % idio fade se ola
85 end
86
87 %% ----- FIGURE 1: SNR vs apostasi -----
88 f1 = figure('Color','w','Name','Figure 1: SNR vs Distance','NumberTitle','off');
89 hold on; grid on;
90 for a = 1:numel(LinkID)
91     plot(d/1000, SNR_dB(a,:), 'LineWidth',1.0);          % X se km gia katharotita
92 end
93 xlabel('Apostasi d (km)'); ylabel('SNR (dB)');
94 title('SNR vs Apostasi');
95 set(gca,'FontSize',style.fontSize);
96
97 %% ----- (Proairetiko) SNR vs Xronos -----
98 v = 15; t = 0:1:4000; d_movement = 100 + v*t;          % 15 m/s
99 SNR_t = interp1(d, SNR_dB.', d_movement, 'linear', 'extrap').';
100 f2 = figure('Color','w','Name','Figure 2: SNR vs Time','NumberTitle','off');
101 hold on; grid on;
102 for a = 1:numel(LinkID)
103     plot(t, SNR_t(a,:), 'LineWidth', 1.0, ...
104          'DisplayName', sprintf('LinkID %d', LinkID(a)));
105 end
106 xlabel('Xronos (s)'); ylabel('SNR (dB)'); title('SNR kata tin kinisi');
107 legend('Location','best'); set(gca,'FontSize',style.fontSize);
108
109 %% ----- PER(SNR) kampiles (apo apotelesmata) -----
110 SNRdB_cell = { ...
111     0:0.1:2.5, 7.2:0.1:10, 9.0:0.1:11.5, ...
112     0:0.1:2.5, 7.4:0.1:9.6, 9.3:0.1:11.6, ...
113     0:0.1:2.5, 7.4:0.1:9.6, 9.5:0.1:10.8 };
114 PER_cell = { ...
115     [0.9747 0.9634 0.9434 0.9042 0.8389 0.7911 0.7123 0.6211 0.5155 0.4230 0.3173 0.2277 0.1747 ←
116     →0.1126 0.0769 0.0424 0.0223 0.0130 0.0071 0.0031 0.0016 0.0008 0.0005 0.0003 0.0000 ←
117     →NaN], ...
118     [0.9980 0.9785 0.9690 0.9506 0.8977 0.8681 0.7680 0.6812 0.5794 0.4766 0.3213 0.2458 0.1722 ←
119     →0.1153 0.0734 0.0411 0.0241 0.0129 0.0080 0.0056 0.0035 0.0022 0.0017 0.0010 0.0007 ←
120     →0.0005 0.0004 0.0002 0.0002], ...
121     [1.0000 0.9960 0.9881 0.9728 0.9488 0.8818 0.8306 0.7289 0.6053 0.4429 0.2931 0.2244 0.1527 ←
122     →0.1010 0.0547 0.0364 0.0212 0.0150 0.0079 0.0044 0.0032 0.0023 0.0015 0.0012 0.0008 ←
123     →0.0005], ...
124     [0.9950 0.9967 0.9868 0.9740 0.9494 0.9174 0.8299 0.6842 0.5693 0.4376 0.2997 0.1905 0.1150 ←
125     →0.0571 0.0273 0.0148 0.0059 0.0034 0.0017 0.0013 0.0008 0.0006 0.0004 0.0004 0.0000 ←
126     →NaN], ...
127     [0.9970 0.9921 0.9794 0.9320 0.8764 0.7686 0.6414 0.4914 0.3137 0.1923 0.1010 0.0540 0.0211 ←
128     →0.0105 0.0048 0.0028 0.0016 0.0010 0.0006 0.0007 0.0003 0.0003 0.0002], ...

```

```

120 [1.0000 0.9921 0.9690 0.9141 0.8333 0.6658 0.5066 0.3349 0.1898 0.0955 0.0466 0.0230 0.0113 ←
    -0.0061 0.0042 0.0027 0.0024 0.0018 0.0012 0.0010 0.0008 0.0006 0.0005 0.0003], ...
121 [1.0000 1.0000 1.0000 0.9980 0.9980 0.9671 0.9208 0.8237 0.6562 0.4296 0.2343 0.1131 0.0450 ←
    -0.0148 0.0050 0.0024 0.0015 0.0012 0.0008 0.0007 0.0005 0.0004 0.0003 0.0002 NaN NaN], ...
122 [1.0000 1.0000 0.9980 0.9960 0.9671 0.8945 0.7474 0.5176 0.3189 0.1572 0.0604 0.0222 0.0099 ←
    -0.0057 0.0040 0.0026 0.0020 0.0018 0.0010 0.0009 0.0007 0.0004 0.0004], ...
123 [0.9940 0.9823 0.9398 0.8026 0.6046 0.3451 0.1537 0.0590 0.0187 0.0053 0.0020 0.0008 0.0004 ←
    -0.0003] ];
124
125 % shift SNR plegmaton kata Pt_dBW ana LinkID (schetiki metatopisi)
126 SNR_adj = cell(1,9);
127 for i = 1:9, SNR_adj{i} = SNRdB_cell{i} + Pt_dBW(i); end
128
129 % thresholds PER<=1% (log10-interp)
130 SNR_thr = nan(1,9);
131 for i = 1:9
132     snr = SNR_adj{i}(:); per = PER_cell{i}(:);
133     n = min(numel(snr),numel(per)); snr=snr(1:n); per=per(1:n);
134     m = ~isnan(snr) & ~isnan(per) & per>0; snr=snr(m); per=per(m);
135     if isempty(snr), continue; end
136     hi = find(per<=0.01,1,'first');
137     if ~isempty(hi)
138         if hi==1, SNR_thr(i) = snr(1);
139         else
140             x1=snr(hi-1); x2=snr(hi); y1=log10(per(hi-1)); y2=log10(per(hi));
141             SNR_thr(i) = x1 + (log10(0.01)-y1)*(x2-x1)/(y2-y1);
142         end
143     end
144 end
145 for i=2:9, if ~isnan(SNR_thr(i-1)) && ~isnan(SNR_thr(i)), ←
    -SNR_thr(i)=max(SNR_thr(i),SNR_thr(i-1)); end, end
146
147 %% ----- THROUGHPUT(d) me politikiki PER<=1% -----
148 d_km = d(:)'/1000; % X se km
149 N = numel(d_km);
150 LID = 10*ones(1,N); % default L11
151 T_kbps = zeros(1,N);
152
153 % PHY [Rs, M, r, L, C]
154 params = [ ...
155     19200, 4, 1/2, 432, 10; 19200, 8, 3/4, 972, 15; 19200, 16, 3/4, 1296, 20; ...
156     38400, 4, 1/2, 896, 42; 38400, 8, 3/4, 2016, 63; 38400, 16, 3/4, 2688, 84; ...
157     76800, 4, 1/2, 1872, 10; 76800, 8, 3/4, 4032,255; 76800, 16, 3/4, 5616, 20 ];
158
159 for k = 1:N
160     ii = find(SNR_dB(:,k) >= SNR_thr(:), 1, 'last'); % teleutaio pou planei PER<=1%
161     if ~isempty(ii), LID(k) = 10+ii; else, LID(k) = 11; end
162     i = LID(k)-10; g = SNR_dB(i,k);
163     Rs = params(i,1); M=params(i,2); r=params(i,3); Lb=params(i,4); Cb=params(i,5);
164     eff = (Lb-Cb)/Lb;
165     p = perAt(LID(k), g, SNR_adj, PER_cell);
166     T_kbps(k) = max(0, (1-p)*Rs*log2(M)*r*eff/1000);
167 end

```

```

168
169 %% ----- FIGURE 3: Throughput (politiki PER<=1%) -----
170 if exist('turbo','builtin'), cmap=turbo(9); else, cmap=parula(9); end
171 linkColor = @(L) cmap(L-10,:);
172 chg      = find(diff(LID)~=0);          % theseis allagis LinkID
173 seg_start = [1, chg+1]; seg_end = [chg, numel(LID)];
174 Y0=0; Y1 = 1.08*max(T_kbps,[],'omitnan');
175
176 f3 = figure('Color','w','Name','Figure 3: Throughput policy','NumberTitle','off');
177 hold on; box on; grid on; grid minor;
178
179 % zunes background (kathares)  ekτος legend
180 if showZones
181     for s = 1:numel(seg_start)
182         i1=seg_start(s); i2=seg_end(s); L=LID(i1);
183         x1=d_km(i1); x2=d_km(i2);
184         patch([x1 x2 x2 x1],[Y0 Y0 Y1 Y1],linkColor(L), ...
185             'FaceAlpha',style.alphaZone,'EdgeColor','none','HandleVisibility','off');
186     end
187 end
188
189 % kathetes oria allagis me ariosi  ekτος legend
190 if showVlines && ~isempty(chg)
191     xx = d_km(chg+1);          % theseis (km)
192     xx = xx([true, diff(xx)>=style.minSepKm]); % arainoume poly-pyknh periptwsi
193     if numel(xx) > style.maxVLines % tetoia pou thn kathara
194         xx = xx(round(linspace(1,numel(xx),style.maxVLines)));
195     end
196     line([xx; xx], [Y0+zeros(size(xx)); Y1*ones(size(xx))], ...
197         'LineStyle','--','Color',[0.45 0.45 0.6], 'LineWidth',0.8, 'HandleVisibility','off');
198 end
199
200 % kentriki kampyli throughput
201 plot(d_km, T_kbps, 'LineWidth', style.lwMain, 'Color',[0.05 0.25 0.70]);
202
203 % etiketes L11..L19 pano apo zunes
204 yL = 0.965*Y1;
205 for s=1:numel(seg_start)
206     i1=seg_start(s); i2=seg_end(s); L=LID(i1);
207     xm=0.5*(d_km(i1)+d_km(i2));
208     text(xm, yL, sprintf('L%d',L),'Color',linkColor(L),'FontWeight','bold', ...
209         'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignment','bottom', ...
210         'BackgroundColor','w','Margin',1,'Clipping','on');
211 end
212
213 xlabel('Distance d (km)'); ylabel('Throughput (kbps)');
214 title('Throughput along the route (policy PER \leq 1%)');
215 xlim([0 xmax_km_to_show]); ylim([0 max(1,Y1)]);
216 set(gca,'FontSize',style.fontSize,'LineWidth',1);
217
218
219 %% ===== Figure 3B ( Rayleigh)  3 seperate segments =====
220

```

```

221 % --- STYLE defaults
222 if ~exist('style','var') || ~isstruct(style), style = struct; end
223 if ~isfield(style,'alphaZone'), style.alphaZone = 0.12; end
224 if ~isfield(style,'lwMain'), style.lwMain = 2.2; end
225 if ~isfield(style,'minSepKm'), style.minSepKm = 0.2; end
226 if ~isfield(style,'maxVLines'), style.maxVLines = 80; end
227 if ~isfield(style,'minLabelWidthKm'), style.minLabelWidthKm = 0.30; end
228 if ~isfield(style,'fontSize'), style.fontSize = 11; end
229
230 % Xromata LinkID
231 if ~exist('linkColor','var')
232     if exist('turbo','builtin'), cmap = turbo(9); else, cmap = parula(9); end
233     linkColor = @(L) cmap(L-10,:); % L=11..19 -> index 1..9
234 end
235
236 % === Klisi 3 kseworista FIGURES ===
237 plot_segment(0, 20, 'Figure 3B.1 (020 km)', 'Figures/Thru_PER1_Rayleigh_seg_0_20km.jpg', ...
238     d_km, T_kbps, LID, showZones, showVlines, style, linkColor);
239
240 plot_segment(20, 50, 'Figure 3B.2 (2050 km)', 'Figures/Thru_PER1_Rayleigh_seg_20_50km.jpg', ...
241     d_km, T_kbps, LID, showZones, showVlines, style, linkColor);
242
243 plot_segment(50, 80, 'Figure 3B.3 (5080 km)', 'Figures/Thru_PER1_Rayleigh_seg_50_80km.jpg', ...
244     d_km, T_kbps, LID, showZones, showVlines, style, linkColor);
245
246 %% === Extra segment 50 55 km ===
247 styleZoom = style;
248 styleZoom.minLabelWidthKm = 0.03;
249 styleZoom.minSepKm = 0.05;
250 styleZoom.maxVLines = 150;
251
252 stepKm = 1;
253
254 plot_segment(50, 55, 'Figure 3B.4 (5055 km)', ...
255     'Figures/Thru_PER1_Rayleigh_zoom_50_55km.jpg', ...
256     d_km, T_kbps, LID, showZones, showVlines, styleZoom, linkColor, stepKm);
257
258 %% ===== 5B. Throughput vs Distance per LinkID (clean, m) =====
259 % proypotheseis: exoun idi ypologisthei SNR_dB (9xN), params, SNR_adj, PER_cell,
260 % kai ta d (se metra) kai dLos (se metra)
261 d_m = d(:).'; % axonas se metra (opos sta screenshots)
262 dLos_m = dLos; % metra
263 N = numel(d_m);
264 T_per = nan(9, N); % 9xN throughput gia kathe LinkID kseworista
265
266 for i = 1:9 % i=1..9 <=> L=11..19
267     L = 10 + i; % to antistoixο LinkID
268     Rs = params(i,1); M = params(i,2); % symbol rate, modulation
269     r = params(i,3); % coding rate
270     Lb = params(i,4); Cb = params(i,5); % frame bytes / overhead
271     eff = (Lb - Cb) / Lb; % ofelimo payload pososto
272
273     for k = 1:N

```

```

274     g = SNR_dB(i,k);           % SNR tou idiou LinkID sto shmeio k
275     if ~isfinite(g), T_per(i,k) = NaN; continue; end
276     p = perAt(L, g, SNR_adj, PER_cell);           % PER apo tis kampyles
277     T_per(i,k) = max(0,(1-p)*Rs*log2(M)*r*eff/1000); % kbps
278     end
279 end
280
281 % Plot me skalomata (stairs) gia katharo "MCS step" look
282 fig4 = figure('Name','Fig4_Throughput_per_LinkID','Color','w');
283 hold on; box on; grid on; grid minor;
284 if exist('turbo','builtin'), cmap = turbo(9); else, cmap = lines(9); end
285 for i = 1:9
286     stairs(d_m, T_per(i,:), 'LineWidth', 2.0, 'Color', cmap(i,:), ...
287         'DisplayName', sprintf('LinkID %d', 10+i));
288 end
289 xline(dLos_m,'--k','d_{LOS}', ...
290     'HandleVisibility','off', ...           % na mi mpei sto legend (oxi "data1")
291     'LabelOrientation','horizontal', ...
292     'LabelVerticalAlignment','bottom', ...
293     'Alpha',0.6);
294
295 xlabel('Distance (m)'); ylabel('Throughput (kbps)');
296 title('Throughput vs Distance per LinkID');
297 legend('Location','northwest'); legend boxoff;
298 xlim([0, max(d_m)]);
299 ylim([0, 1.05*max(T_per(:), [], 'omitnan')]);
300
301 %% ===== 5C. Throughput vs Distance maximum per distance (clean) =====
302 T_best = max(T_per, [], 1);           % se kathe apostasi, to kalytero LinkID
303
304 fig5 = figure('Name','Fig5_Throughput_best','Color','w');
305 hold on; box on; grid on; grid minor;
306 stairs(d_m, T_best, 'LineWidth', 2.2); % skalomata gia katharo step-plot
307 xline(dLos_m,'--k','d_{LOS}', 'HandleVisibility','off', ...
308     'LabelOrientation','horizontal', 'LabelVerticalAlignment','bottom', 'Alpha',0.6);
309
310 xlabel('Distance (m)'); ylabel('Throughput (kbps)');
311 title('Throughput vs Distance (maximum per distance)');
312 xlim([0, max(d_m)]);
313 ylim([0, 1.05*max(T_best, [], 'omitnan')]);
314
315
316 %% Local function: Drawing for 1 segment
317 function plot_segment(xl, xr, figName, fileName, d_km, T_kbps, LID, ...
318     showZones, showVlines, style, linkColor, stepKm)
319
320     if nargin < 12 || isempty(stepKm), stepKm = 0; end %
321
322     Y0 = 0; Y1 = 1.08*max(T_kbps, [], 'omitnan');
323
324     idx = (d_km >= xl) & (d_km <= xr);
325     dk = d_km(idx); Tk = T_kbps(idx); Lk = LID(idx);
326

```

```

327     chgL = find(diff(Lk)~=0);
328     seg_start = [1, chgL+1];
329     seg_end   = [chgL, numel(Lk)];
330
331     figure('Color','w','Name',figName,'NumberTitle','off');
332     hold on; box on; grid on; grid minor;
333
334     % 1) Zones LinkID
335     if showZones && ~isempty(dk)
336         for s = 1:numel(seg_start)
337             i1 = seg_start(s); i2 = seg_end(s);
338             L = Lk(i1);
339             x1 = dk(i1); x2 = dk(i2);
340             patch([x1 x2 x2 x1],[Y0 Y0 Y1 Y1], linkColor(L), ...
341                 'FaceAlpha',style.alphaZone, 'EdgeColor','none', ...
342                 'HandleVisibility','off');
343         end
344     end
345
346     % 2)
347     if showVlines && ~isempty(chgL)
348         xx = dk(chgL+1);
349         xx = xx([true, diff(xx) >= max(0.1, style.minSepKm/2)]);
350         if numel(xx) > style.maxVLines
351             xx = xx(round(linspace(1,numel(xx),style.maxVLines)));
352         end
353         line([xx; xx],[Y0+zeros(size(xx)); Y1*ones(size(xx))], ...
354             'LineStyle','--','Color',[0.45 0.45 0.6],'LineWidth',0.8, ...
355             'HandleVisibility','off');
356     end
357
358     % 3)
359     plot(dk, Tk, 'LineWidth', style.lwMain, 'Color', [0.05 0.25 0.70]);
360
361     % 4) Labels L11..L19
362     yLab = 0.98*Y1;
363     for s = 1:numel(seg_start)
364         i1 = seg_start(s); i2 = seg_end(s);
365         if (dk(i2)-dk(i1)) >= style.minLabelWidthKm
366             xm = 0.5*(dk(i1)+dk(i2));
367             text(xm, yLab, sprintf('L%d', Lk(i1)), ...
368                 'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignment','top', ...
369                 'FontWeight','bold','Color',[0.45 0.45 0.0], ...
370                 'BackgroundColor','w','Margin',1,'Clipping','on');
371         end
372     end
373
374     if stepKm > 0
375         xs = ceil(xl/stepKm)*stepKm : stepKm : floor(xr/stepKm)*stepKm;
376         for x = xs
377             [~, j] = min(abs(dk - x));
378             text(dk(j), yLab, sprintf('L%d', Lk(j)), ...
379                 'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignment','top', ...

```

```

380         'FontWeight','bold','Color',[0.25 0.25 0.0], ...
381         'BackgroundColor','w','Margin',1,'Clipping','on');
382     end
383 end
384
385 xlim([xl xr]); ylim([0, max(1,Y1)]);
386 xlabel('Distance d (km)'); ylabel('Throughput (kbps)');
387 title(sprintf('Throughput (PER \le 1%%) segment %g%g km', xl, xr));
388 set(gca,'FontSize',style.fontSize,'LineWidth',1);
389
390 end
391 %% ----- Local function: PER interpolation -----
392 function p = perAt(L, g, SNR_adj, PER_cell)
393     % perAt: epistrefei PER gia LinkID L (11..19) sto SNR g (dB) me log10-interp
394     i = L - 10;
395     snr = SNR_adj{i}(:); per = PER_cell{i}(:);
396     n = min(numel(snr),numel(per)); snr=snr(1:n); per=per(1:n);
397     m = ~isnan(snr) & ~isnan(per); snr=snr(m); per=per(m);
398     if isempty(snr), p=1; return; end
399     if g<=snr(1), p=per(1); p=min(max(p,0),1); return; end
400     if g>=snr(end), p=per(end); p=min(max(p,0),1); return; end
401     hi=find(snr>=g,1,'first'); lo=hi-1;
402     y1=log10(per(lo)); y2=log10(per(hi)); x1=snr(lo); x2=snr(hi);
403     p = 10.^( y1 + (g-x1)*(y2-y1)/(x2-x1) ); p=min(max(p,0),1);
404 end

```

Παράρτημα Η: Κώδικας Throughput vs Απόσταση Αυτόνομο (ThroughputVSdistanceSTANDALONE.m)

```

1  %% ===== AUTONOMO: Throughput vs Apostasi me politiki PER<=1% (3 figures) =====
2  % - Leitoyrgei me duo periptwseis dedomenwn:
3  % Case A: exeis SNR_dB (9xN) & d (m) -> SNR ana LinkID se kathe shmeio
4  % Case B: exeis snr_path_dB (1xN) & d_km h' d -> ena koino SNR monopati
5  % - Paragei 3 swmata (A/B/C) me onomata arxeiwn katallhla gia LaTeX.
6  % - Asfaleia: real(), NaN gia mi-peperasmena, ligoteris kathetes grammes.
7
8  % --- Clean up (MONO sta topika dedomena gia asfaleia plotting)
9  if exist('SNR_dB','var')
10     SNR_dB = real(SNR_dB);
11     SNR_dB(~isfinite(SNR_dB)) = NaN;
12 end
13 if exist('snr_path_dB','var')
14     snr_path_dB = real(snr_path_dB);
15     snr_path_dB(~isfinite(snr_path_dB)) = NaN;
16 end
17
18 % -----
19 % 0) KAMPYLES PER(SNR) apo metriseis ENSOMATWMENES EDW
20 % -----
21 SNRdB_cell = { ...
22     0:0.1:2.5, 7.2:0.1:10, 9.0:0.1:11.5, ...

```

```

23 0:0.1:2.5, 7.4:0.1:9.6, 9.3:0.1:11.6, ...
24 0:0.1:2.5, 7.4:0.1:9.6, 9.5:0.1:10.8 };
25
26 PER_cell = { ...
27 [0.9747 0.9634 0.9434 0.9042 0.8389 0.7911 0.7123 0.6211 0.5155 0.4230 0.3173 0.2277 0.1747 ←
    -0.1126 0.0769 0.0424 0.0223 0.0130 0.0071 0.0031 0.0016 0.0008 0.0005 0.0003 0.0000 ←
    -NaN], ...
28 [0.9980 0.9785 0.9690 0.9506 0.8977 0.8681 0.7680 0.6812 0.5794 0.4766 0.3213 0.2458 0.1722 ←
    -0.1153 0.0734 0.0411 0.0241 0.0129 0.0080 0.0056 0.0035 0.0022 0.0017 0.0010 0.0007 ←
    -0.0005 0.0004 0.0002 0.0002], ...
29 [1.0000 0.9960 0.9881 0.9728 0.9488 0.8818 0.8306 0.7289 0.6053 0.4429 0.2931 0.2244 0.1527 ←
    -0.1010 0.0547 0.0364 0.0212 0.0150 0.0079 0.0044 0.0032 0.0023 0.0015 0.0012 0.0008 ←
    -0.0005], ...
30 [0.9950 0.9967 0.9868 0.9740 0.9494 0.9174 0.8299 0.6842 0.5693 0.4376 0.2997 0.1905 0.1150 ←
    -0.0571 0.0273 0.0148 0.0059 0.0034 0.0017 0.0013 0.0008 0.0006 0.0004 0.0004 0.0000 ←
    -NaN], ...
31 [0.9970 0.9921 0.9794 0.9320 0.8764 0.7686 0.6414 0.4914 0.3137 0.1923 0.1010 0.0540 0.0211 ←
    -0.0105 0.0048 0.0028 0.0016 0.0010 0.0006 0.0007 0.0003 0.0003 0.0002], ...
32 [1.0000 0.9921 0.9690 0.9141 0.8333 0.6658 0.5066 0.3349 0.1898 0.0955 0.0466 0.0230 0.0113 ←
    -0.0061 0.0042 0.0027 0.0024 0.0018 0.0012 0.0010 0.0008 0.0006 0.0005 0.0003], ...
33 [1.0000 1.0000 1.0000 0.9980 0.9980 0.9671 0.9208 0.8237 0.6562 0.4296 0.2343 0.1131 0.0450 ←
    -0.0148 0.0050 0.0024 0.0015 0.0012 0.0008 0.0007 0.0005 0.0004 0.0003 0.0002 NaN NaN], ...
34 [1.0000 1.0000 0.9980 0.9960 0.9671 0.8945 0.7474 0.5176 0.3189 0.1572 0.0604 0.0222 0.0099 ←
    -0.0057 0.0040 0.0026 0.0020 0.0018 0.0010 0.0009 0.0007 0.0004 0.0004], ...
35 [0.9940 0.9823 0.9398 0.8026 0.6046 0.3451 0.1537 0.0590 0.0187 0.0053 0.0020 0.0008 0.0004 ←
    -0.0003] ...
36 };
37
38 % Isxyis ekpompis ana LinkID (mono gia SNR shift stis kampyles PER)
39 P_out = [12.5, 11, 6.5, 12.5, 11, 6.5, 12.5, 11, 6.5]; % L11..L19
40
41 % Parametroi PHY ana LinkID: [Rs, M, r, L, C]
42 params = [ ...
43 19200, 4, 1/2, 432, 10; 19200, 8, 3/4, 972, 15; 19200, 16, 3/4, 1296, 20; ...
44 38400, 4, 1/2, 896, 42; 38400, 8, 3/4, 2016, 63; 38400, 16, 3/4, 2688, 84; ...
45 76800, 4, 1/2, 1872, 10; 76800, 8, 3/4, 4032,255; 76800, 16, 3/4, 5616, 20 ];
46
47 % -----
48 % 1) Ypologismos thresholds PER<=1% (me shift isxyos + log10-interpolation)
49 % -----
50 SNR_adj = cell(1,9); % per-LinkID kampyles SNR (me power shift)
51 for i = 1:9
52 SNR_adj{i} = SNRdB_cell{i} + 10*log10(P_out(i));
53 end
54
55 SNR_thr = nan(1,9); % katwfli ana LinkID (PER<=1%)
56 for i = 1:9
57 snr = SNR_adj{i}(:); per = PER_cell{i}(:);
58 n = min(numel(snr), numel(per));
59 snr = snr(1:n); per = per(1:n);
60 m = ~isnan(snr) & ~isnan(per) & per>0;
61 snr = snr(m); per = per(m);
62 if isempty(per), continue; end

```

```

63 hi = find(per<=0.01,1,'first'); % prwto shmeio me PER<=1%
64 if ~isempty(hi)
65     if hi==1
66         SNR_thr(i) = snr(1);
67     else
68         x1=snr(hi-1); x2=snr(hi);
69         y1=log10(per(hi-1)); y2=log10(per(hi));
70         SNR_thr(i) = x1 + (log10(0.01)-y1)*(x2-x1)/(y2-y1);
71     end
72 end
73 end
74 % Monotonia (midenizoume pithanes anastrofes)
75 for i = 2:9
76     if ~isnan(SNR_thr(i-1)) && ~isnan(SNR_thr(i))
77         SNR_thr(i) = max(SNR_thr(i), SNR_thr(i-1));
78     end
79 end
80
81 % -----
82 % 2) Eisodos diadromis: Case A (SNR_dB & d) h' Case B (snr_path_dB & d_km/d)
83 % -----
84 haveA = exist('SNR_dB','var') && ~isempty(SNR_dB) && exist('d','var') && ~isempty(d);
85 haveB = exist('snr_path_dB','var') && ~isempty(snr_path_dB) && (exist('d_km','var') || ←
    → ~exist('d','var'));
86
87 if ~(haveA || haveB)
88     % fallback demo an den yparxei tipota sto workspace
89     warning('Den vrethikan SNR_dB/d oute snr_path_dB/d_km. Ftiaxnw demo diadromi.');
```

```

90     d_km = linspace(0.1, 25, 400);
91     snr_path_dB = 14 + 6*cos(2*pi*d_km/7) - 4*(d_km/25);
92     haveB = true;
93 end
94
95 % -----
96 % 3) Ypologismos LID(d) kai Throughput(d)
97 % -----
98 if haveA
99     % === Case A: eweis 9xN SNR se kathe shmeio kai apostaseis se metra ===
100     N = size(SNR_dB,2);
101     x_km = (d(:).')/1000;
102     % Epilegoyme to teleytaio (pion aparaitaitai SNR) poy pieta to threshold
103     eligible = bsxfun(@ge, SNR_dB, SNR_thr(:)); % 9xN logiko
104     idxLast = ones(1,N); % default L11
105     for k = 1:N
106         ii = find(eligible(:,k), 1, 'last');
107         if ~isempty(ii), idxLast(k) = ii; end
108     end
109     LID = 10 + idxLast; % 11..19
110
111     % Throughput se kathe shmeio (me PER interpol sto SNR tou idioy Link)
112     T_kbps = zeros(1,N);
113     for k = 1:N
114         i = idxLast(k);
```

```

115     g = SNR_dB(i,k);
116     [Rs,M,r,Lb,Cb] = deal(params(i,1), params(i,2), params(i,3), params(i,4), params(i,5));
117     eff = (Lb - Cb)/Lb;
118     p = perAt(10+i, g, SNR_adj, PER_cell);
119     T_kbps(k) = max(0, (1 - p)*Rs*log2(M)*r*eff/1000);
120 end
121
122 % Gia to Figure-B/C tha xreiasstoume kai T_per ana LinkID:
123 T_per = nan(9,N);
124 for i = 1:9
125     gvec = SNR_dB(i,:); % SNR toy sygkekrimenou Link
126     [Rs,M,r,Lb,Cb] = deal(params(i,1), params(i,2), params(i,3), params(i,4), params(i,5));
127     eff = (Lb - Cb)/Lb;
128     for k = 1:N
129         g = gvec(k);
130         if ~isfinite(g), continue; end
131         p = perAt(10+i, g, SNR_adj, PER_cell);
132         T_per(i,k) = max(0, (1 - p)*Rs*log2(M)*r*eff/1000);
133     end
134 end
135
136 else
137     % === Case B: exeis ena koino SNR monopati G(d) kai d_km/d ===
138     if ~exist('d_km','var') || isempty(d_km)
139         x_km = (d(:).')/1000;
140     else
141         x_km = d_km(:).';
142     end
143     G = snr_path_dB(:).';
144
145     smoothWinKm = 0.15; %example 150 m
146     if smoothWinKm > 0 && numel(G) > 3
147         dx = median(diff(x_km)); % ~km
148         w = max(1, round(smoothWinKm/dx));
149         if w > 1
150             G = movmean(G, w);
151         end
152     end
153
154     N = numel(G);
155     LID = zeros(1,N); % 0 => no MCS has PER<=1%
156     T_kbps = zeros(1,N);
157
158     for k = 1:N
159         g = G(k);
160         idx = find(g >= SNR_thr, 1, 'last'); % last MCS who catches threshold
161         if isempty(idx)
162             % none MCS has PER<=1% -> zero throughput right
163             LID(k) = 0;
164             T_kbps(k) = 0;
165             continue
166         end
167

```

```

168     L = 10 + idx;      % 11..19
169     LID(k) = L;
170
171     i = L-10;
172     [Rs,M,r,Lb,Cb] = deal(params(i,1), params(i,2), params(i,3), params(i,4), params(i,5));
173     eff = (Lb - Cb) / Lb;
174     p = perAt(L, g, SNR_adj, PER_cell);
175     T_kbps(k) = max(0, (1 - p) * Rs * log2(M) * r * eff / 1000);
176 end
177
178 % Gia Figure-B/C: ypologizoume T_per ana LinkID sto idio G(d)
179 T_per = nan(9,N);
180 for i = 1:9
181     [Rs,M,r,Lb,Cb] = deal(params(i,1), params(i,2), params(i,3), params(i,4), params(i,5));
182     eff = (Lb - Cb) / Lb;
183     for k = 1:N
184         g = G(k);
185         if ~isfinite(g), continue; end
186         p = perAt(10+i, g, SNR_adj, PER_cell);
187         T_per(i,k) = max(0, (1 - p) * Rs * log2(M) * r * eff / 1000);
188     end
189 end
190 end
191
192
193 % LID & Throughput (xrhsimopoioume to idio G gia ola ta LinkIDs)
194 N = numel(G);
195 LID = zeros(1,N);
196 T_kbps = zeros(1,N);
197 for k = 1:N
198     g = G(k);
199     idx = find(g >= SNR_thr, 1, 'last');
200     L = 11; if ~isempty(idx), L = idx + 10; end
201     LID(k) = L;
202
203     i = L-10;
204     [Rs,M,r,Lb,Cb] = deal(params(i,1), params(i,2), params(i,3), params(i,4), params(i,5));
205     eff = (Lb - Cb)/Lb;
206     p = perAt(L, g, SNR_adj, PER_cell);
207     T_kbps(k) = max(0, (1 - p)*Rs*log2(M)*r*eff/1000);
208 end
209
210 % Gia Figure-B/C: ypologizoume T_per ana LinkID sto idio G(d)
211 T_per = nan(9,N);
212 for i = 1:9
213     [Rs,M,r,Lb,Cb] = deal(params(i,1), params(i,2), params(i,3), params(i,4), params(i,5));
214     eff = (Lb - Cb)/Lb;
215     for k = 1:N
216         g = G(k);
217         if ~isfinite(g), continue; end
218         p = perAt(10+i, g, SNR_adj, PER_cell);
219         T_per(i,k) = max(0, (1 - p)*Rs*log2(M)*r*eff/1000);
220     end

```

```

221     end
222
223 %% 4A) FIGURE-A: Throughput kata mikos diadromis + zunes LinkID
224
225 if ~exist('Figures','dir'), mkdir Figures; end
226 cmap = lines(9); linkColor = @(L) cmap(L-10,:);
227
228 fA = figure('Color','w','Name','ThroughputAlongRoute_STANDALONE');
229 hold on; box on; grid on; grid minor;
230 plot(x_km, T_kbps, 'LineWidth',2.0, 'Color',[0.10 0.35 0.70]);
231
232 % Skiasi zunwn ana LinkID (ligotera kathetes)
233 chg      = find(diff(LID)~=0);
234 seg_start = [1, chg+1];
235 seg_end   = [chg, numel(LID)];
236 Y0=0; Y1 = 1.08*max(T_kbps,[],'omitnan');
237
238 for s=1:numel(seg_start)
239     i1=seg_start(s); i2=seg_end(s); L=LID(i1);
240     x1=x_km(i1); x2=x_km(i2);
241     patch([x1 x2 x2 x1],[Y0 Y0 Y1 Y1], linkColor(L), ...
242           'FaceAlpha',0.10,'EdgeColor','none','HandleVisibility','off');
243     text(0.5*(x1+x2), 0.92*Y1, sprintf('L%d',L), 'Color', linkColor(L), ...
244          'FontWeight','bold', 'HorizontalAlignment','center', ...
245          'VerticalAlignment','bottom', 'BackgroundColor','w', 'Margin',1, 'Clipping','on');
246 end
247
248 % Kathetes me arazwsi (oxi xiliades xline)
249 xx = x_km(chg+1);
250 minSep = 0.2; % km
251 if ~isempty(xx)
252     keep = [true, diff(xx) >= minSep];
253     xx = xx(keep);
254     line([xx; xx],[Y0+0*xx; Y1+0*xx],'LineStyle','--','Color',[0.45 0.45 0.6], ...
255          'LineWidth',0.8,'HandleVisibility','off');
256 end
257
258 xlabel('Distance d (km)','FontWeight','bold');
259 ylabel('Throughput (kbps)','FontWeight','bold');
260 title('Throughput along the route (policy PER \le 1%)','FontWeight','bold');
261 xlim([min(x_km) max(x_km)]); ylim([0, Y1]);
262 set(gca,'LineWidth',1.0,'FontSize',11);
263 exportgraphics(fA,'Figures/FigA.ThroughputAlongRoute_STANDALONE.jpg','Resolution',300);
264
265 %% 4B) FIGURE-B: Throughput vs apostasi ANA LinkID (oles oi kampyles)
266
267 fB = figure('Color','w','Name','ThroughputPerLink_STANDALONE');
268 hold on; box on; grid on; grid minor;
269 if exist('turbo','builtin'), cmapB = turbo(9); else, cmapB = lines(9); end
270 for i = 1:9
271     plot(x_km, T_per(i,:), 'LineWidth', 1.8, 'Color', cmapB(i,:));
272 end
273 xlabel('Distance d (km)','FontWeight','bold');

```

```

274 ylabel('Throughput (kbps)', 'FontWeight', 'bold');
275 title('Throughput vs Distance per LinkID (No-fading input)', 'FontWeight', 'bold');
276 legend("L11", "L12", "L13", "L14", "L15", "L16", "L17", "L18", "L19", 'Location', 'northwest');
277 ylim([0, 1.05*max(T_per(:), [], 'omitnan')]);
278 xlim([min(x_km) max(x_km)]);
279 set(gca, 'LineWidth', 1.0, 'FontSize', 11);
280 exportgraphics(fB, 'Figures/FigB.ThroughputVSDistancePerLink_STANDALONE.jpg', 'Resolution', 300);
281
282 %% 4C) FIGURE-C: Best-case (megisto ana d) us skali (stairs)
283
284 T_best = max(T_per, [], 1);      % megisti timi se kathe d
285 fC = figure('Color', 'w', 'Name', 'ThroughputBestCase_STANDALONE');
286 hold on; box on; grid on; grid minor;
287 stairs(x_km, T_best, 'LineWidth', 2.2);
288 xlabel('Distance d (km)', 'FontWeight', 'bold');
289 ylabel('Throughput (kbps)', 'FontWeight', 'bold');
290 title('Throughput vs Distance (Best-case MCS)', 'FontWeight', 'bold');
291 ylim([0, 1.05*max(T_best, [], 'omitnan')]);
292 xlim([min(x_km) max(x_km)]);
293 set(gca, 'LineWidth', 1.0, 'FontSize', 11);
294 exportgraphics(fC, 'Figures/FigC.ThroughputVSDistanceMAX_STANDALONE.jpg', 'Resolution', 300);
295
296 % Mikro summary sto Command Window
297 fprintf('Throughput(d): mean=%.1f kbps | min=%.1f | max=%.1f | figures: A/B/C ok\n', ...
298     mean(T_kbps, 'omitnan'), min(T_kbps), max(T_kbps));
299
300 %% 4D) FIGURE-D: Active MCS vs Distance (stairs, y=11..19)
301
302 fD = figure('Color', 'w', 'Name', 'ActiveMCSvsDistance_STANDALONE');
303 hold on; box on; grid on; grid minor;
304
305 % LID: 0 no choice (outage)
306 stairs(x_km, max(0, LID), 'LineWidth', 2.0, 'Color', [0.10 0.35 0.70]);
307
308 % Without MCS (LID=0)
309 if any(LID==0)
310     Y0=0; Y1=20;
311     mask = (LID==0);
312     chg = find(diff([0 mask 0])~=0);
313     for s=1:2:numel(chg)
314         i1=chg(s); i2=chg(s+1)-1;
315         patch([x_km(i1) x_km(i2) x_km(i2) x_km(i1)], [Y0 Y0 Y1 Y1], [0.85 0.85 0.85], ...
316             'FaceAlpha', 0.4, 'EdgeColor', 'none', 'HandleVisibility', 'off');
317     end
318 end
319
320 ylim([10.5 19.5]); yticks(11:19);
321 xlabel('Distance d (km)', 'FontWeight', 'bold');
322 ylabel('Active MCS (LinkID)', 'FontWeight', 'bold');
323 title('Active MCS vs Distance (policy PER \le 1%)', 'FontWeight', 'bold');
324 xlim([min(x_km) max(x_km)]);
325 set(gca, 'LineWidth', 1.0, 'FontSize', 11);
326 exportgraphics(fD, 'Figures/FigD.ActiveMCSvsDistance_STANDALONE.jpg', 'Resolution', 300);

```

```

327
328
329 % ----- Topiki synartisi: PER interpolation -----
330 function p = perAt(L, g, SNR_adj, PER_cell)
331 % perAt: Epistrefei PER gia LinkID L (11..19) sto SNR g [dB], me log10-interp.
332     i = L - 10;
333     snr = SNR_adj{i}(:); per = PER_cell{i}(:);
334     m = ~isnan(snr) & ~isnan(per);
335     snr = snr(m); per = per(m);
336     if isempty(snr), p = 1; return; end
337     if g <= snr(1)
338         p = per(1);
339     elseif g >= snr(end)
340         p = per(end);
341     else
342         hi = find(snr>=g,1,'first'); lo = hi-1;
343         x1=snr(lo); x2=snr(hi); y1=log10(per(lo)); y2=log10(per(hi));
344         p = 10.^( y1 + (g-x1)*(y2-y1)/(x2-x1) );
345     end
346     p = min(max(p,0),1);
347 end

```

Παράρτημα Θ: Κεντρικός Κώδικας VDE-TER: Turbo/Interleaver/Puncturing και PER (VDEter.m)

```

1 clear;
2 close all;
3 clc
4
5 % Initialization
6 SNRdB = 7.4:.1:10; % SNR dB
7 % SNR = 10.^(0.1*SNRdB); % SNR
8 LinkID = 15; %[11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]; % (MCS)
9 LID = LinkID(1)-10;
10 k1k2 = [2,216;2,486;2,648;2,448;4,504;4,672;6,312;4,1008;16,351];
11 InformationLength = [432,972,1296,896,2016,2688,1872,4032,5616];
12 %Rs = [19.2, 19.2, 19.2, 38.4, 38.4, 38.4, 76.8, 76.8, 76.8]; % (ksps)
13 %BW = [25,25,25,49.9,49.9,49.9,99.8,99.8,99.8]; % Bandwidth
14 % M = [4, 8, 16, 4, 8, 16, 4, 8, 16];
15 %r = [1/2, 3/4, 3/4, 1/2, 3/4, 3/4, 1/2, 3/4, 3/4]; % FEC
16 %L = [496, 496, 496, 992, 992, 992, 1984, 1984, 1984];
17 %n = [432, 432, 432, 896, 896, 896, 1872, 1792, 1872]; % Net symbols
18 %Nbit = [432, 972, 1296, 896, 2016, 2688, 1872, 4032, 5616];
19
20 %% Interleaving per Link ID
21 p = [127,191,241,5,83,109,107,179;
22     31,37,43,47,53,59,61,67;
23     31,37,43,47,53,59,61,67;
24     31,37,43,47,53,59,61,67;
25     31,37,43,47,53,59,61,67;
26     31,37,43,47,53,59,61,67;

```

```

27     211,61,227,239,181,79,73,193;
28     31,37,43,47,53,59,61,67;
29     137,101,223,41,67,131,61,47];
30 k1 = k1k2(LID,1);
31 k2 = k1k2(LID,2);
32 pmatrix = zeros;
33 for s = 1:InformationLength(LID)
34     m = mod(s-1,2);
35     i = floor((s-1)/(2*k2));
36     j = floor((s-1)/2)-i*k2;
37     t = mod((19*i+1),k1/2);
38     q = mod(t,8)+1;
39     c = mod(p(LID,q)*j+21*m,k2);
40     pmatrix(s) = 2*(t+c*k1/2+1)-m;
41 end
42
43 %% Data puncturing per Link ID
44 DPPatterns = [6,8,8,6,8,8,6,8,8];
45 if DPPatterns(LID) == 6
46     DPP = [1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,1,0];
47 else
48     DPP = [1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,1];
49 end
50 totalEncData = 1:6*InformationLength(LID);
51 numoftimes = length(totalEncData)/length(DPP);
52 punScheme = [];
53 for ii = 1:numoftimes
54     punScheme = [punScheme,DPP];
55 end
56 preserved = totalEncData.*punScheme;
57 xx = find(preserved==0);
58 preserved(xx) = [];
59 %% Data puncturing of tail bits
60 DPTailPatterns = [6.1,8,8,6,8,8,6.1,8,8];
61 if DPTailPatterns(LID) == 6
62     DPT = 6*InformationLength(LID)+[1,2,4,5,7,8,10,11,13,14,16,17];
63 elseif DPTailPatterns(LID) == 6.1
64     DPT = 6*InformationLength(LID)+[1,2,4,5,7,10,11,13,14,16];
65 else
66     DPT = 6*InformationLength(LID)+[1,3,4,6,7,9,10,12,13,15,16,18];
67 end
68 % OutIndices = [preserved, length(totalEncData)+1:length(totalEncData)+18];
69 OutIndices = [preserved, DPT];
70
71 %%
72 packet_errors = zeros(1, length(SNRdB));
73 bit_errors = zeros(1, length(SNRdB));
74 bit_errors2 = zeros(1, length(SNRdB));
75 packets_created = zeros(1, length(SNRdB));
76 bits_created = zeros(1, length(SNRdB));
77 %Turbo Encoder - Decoder
78 % trellis = poly2trellis(4, [13 17 15]); % Trellis structure
79 L = InformationLength(LID);

```

```

80 InterLvrIndices = pmatrix; %[3 1 2 4];%randperm(L);
81 trellis = poly2trellis(4, [13 17 15], 13); % Trellis structure
82 % trellis.numInputSymbols = 2; % is this necessary?
83 % trellis.numOutputSymbols = 8; % is this necessary?
84
85 turboEncoder = comm.TurboEncoder('TrellisStructure', trellis);
86 turboEncoder.InterleaverIndices = InterLvrIndices;
87 turboEncoder.OutputIndicesSource = 'Property';
88 turboEncoder.OutputIndices = OutIndices;
89 % turboEncoder = comm.TurboEncoder('TrellisStructure', trellis, 'InterleaverIndices', ←
    →InterLvrIndices, 'OutputIndices', OutIndices);
90 % turboDecoder = comm.TurboDecoder('TrellisStructure', trellis, 'InterleaverIndices', ←
    →InterLvrIndices, 'InputIndices', OutIndices, 'NumIterations', 4);
91 turboDecoder = comm.TurboDecoder('TrellisStructure', trellis);
92 turboDecoder.InterleaverIndices = InterLvrIndices;
93 turboDecoder.InputIndicesSource = 'Property';
94 turboDecoder.InputIndices = OutIndices;
95 turboDecoder.NumIterations = 8;
96
97
98 for ii = 1:length(SNRdB)
99     required_errors = 100;
100     if ii <= 15
101         required_errors =250;
102     end
103     if ii <= 10
104         required_errors = 500;
105     end
106
107     % Loop
108     while packet_errors(ii) < required_errors
109         bits_created(ii) = bits_created(ii) + L;
110         packets_created(ii) = packets_created(ii) + 1;
111         data = randi([0 1], L, 1);
112         encoded_data = turboEncoder(data); % Turbo Encoder
113
114         % /4 QPSK
115         % modulated_data = pskmod(encoded_data, 4, pi/4, 'gray','InputType','bit');
116
117         % 8-PSK
118         % modulated_data = pskmod(encoded_data, 8, 0, 'gray',InputType='bit');
119         modulated_data = qammod(encoded_data, 8, 'gray',InputType='bit');
120
121         % 16-QAM
122         % modulated_data = qammod(encoded_data, 16, 'gray',InputType='bit');
123
124         % AWGN
125         noisy_data = awgn(modulated_data, SNRdB(ii), 'measured');
126
127         % /4 QPSK
128         % demod_data = pskdemod(noisy_data, 4, pi/4, 'gray', 'OutputType','llr');
129         % demod_data2 = pskdemod(noisy_data, 4, pi/4, 'gray', OutputType='bit');
130         % bit_errors2(ii) = bit_errors2(ii) + biterr(encoded_data,demod_data2);

```

```

131
132     % 8-PSK
133     % demod_data = pskdemod(noisy_data, 8, 0, 'gray', OutputType='llr');
134     % demod_data2 = pskdemod(noisy_data, 8, 0, 'gray', OutputType='bit');
135     % bit_errors2(ii) = bit_errors2(ii) + biterr(encoded_data,demod_data2);
136     demod_data = qamdemod(noisy_data, 8, 'gray', OutputType='llr');
137
138     % 16-QAM
139     % demod_data = qamdemod(noisy_data, 16, 'gray', OutputType='llr');
140
141     % Turbo (MAP algorithm)
142     decoded_data = turboDecoder(-demod_data); % Turbo Decoder
143
144     if ~isequal(data, decoded_data)
145         packet_errors(ii) = packet_errors(ii) + 1;
146         % bit_errors(ii) = bit_errors(ii) + biterr(data,decoded_data);
147     end
148     fprintf("SNR = %d, Packets transmitted = %d, Packet errors = %d, PER = ←
→%f\n",SNRdB(ii),packets_created(ii), ←
→packet_errors(ii),packet_errors(ii)/packets_created(ii));
149     % fprintf("SNR = %d, Bits transmitted = %d, Bit errors = %d, BER = ←
→%f\n",SNRdB(ii),bits_created(ii), bit_errors(ii),bit_errors(ii)/bits_created(ii));
150     end
151 end
152
153 % PER
154 PER = packet_errors ./ packets_created;
155
156 % PER vs SNR
157 figure;
158 semilogy(SNRdB, PER(1:length(SNRdB)), '-o');
159 xlabel('SNR (dB)');
160 ylabel('Packet Error Rate (PER)');
161 title('PER vs SNR in AWGN Channel');
162 axis([0 10 1e-4 1]);
163 grid on;

```

Παράρτημα I: Παράδειγμα soft-LLR Αποδιαμόρφωσης (PSK) και Turbo Αποκωδικοποίησης (testpkmod.m)

```

1 clear all; close all; clc;
2 %rng(2025);
3
4 % Initialization
5 SNRdB = 0.0:1:2.3; % SNR dB (perioidi LinkID=15)
6 LinkID = 11; % [11..19]
7 LID = LinkID(1)-10;
8 k1k2 = [2,216;2,486;2,648;2,448;4,504;4,672;6,312;4,1008;16,351];
9 InformationLength = [432,972,1296,896,2016,2688,1872,4032,5616];
10
11 %% Interleaving per Link ID

```

```

12 p = [127,191,241,5,83,109,107,179;
13     31,37,43,47,53,59,61,67;
14     31,37,43,47,53,59,61,67;
15     31,37,43,47,53,59,61,67;
16     31,37,43,47,53,59,61,67;
17     31,37,43,47,53,59,61,67;
18     211,61,227,239,181,79,73,193;
19     31,37,43,47,53,59,61,67;
20     137,101,223,41,67,131,61,47];
21 k1 = k1k2(LID,1);
22 k2 = k1k2(LID,2);
23
24 L = InformationLength(LID);
25 pmatrix = zeros(1, L);
26 for s = 1:L
27     m = mod(s-1,2);
28     i = floor((s-1)/(2*k2));
29     j = floor((s-1)/2)-i*k2;
30     t = mod((19*i+1),k1/2);
31     q = mod(t,8)+1;
32     c = mod(p(LID,q)*j+21*m,k2);
33     pmatrix(s) = 2*(t+c*k1/2+1)-m;
34 end
35
36 %% Data puncturing per Link ID
37 DPPatterns = [6,8,8,6,8,8,6,8,8];
38 if DPPatterns(LID) == 6
39     DPP = [1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,1,0];
40 else
41     DPP = [1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1];
42 end
43 totalEncData = 1:6*L;
44 numoftimes = length(totalEncData)/length(DPP);
45 punScheme = [];
46 for ii = 1:numoftimes
47     punScheme = [punScheme, DPP];
48 end
49 preserved = totalEncData.*punScheme;
50 preserved(preserved==0) = [];
51
52 %% Data puncturing of tail bits
53 DPTailPatterns = [6.1,8,8,6,8,8,6.1,8,8];
54 if DPTailPatterns(LID) == 6
55     DPT = 6*L+[1,2,4,5,7,8,10,11,13,14,16,17];
56 elseif DPTailPatterns(LID) == 6.1
57     DPT = 6*L+[1,2,4,5,7,10,11,13,14,16];
58 else
59     DPT = 6*L+[1,3,4,6,7,9,10,12,13,15,16,18];
60 end
61 OutIndices = [preserved, DPT];
62
63 %% Counters
64 packet_errors = zeros(1, length(SNRdB));

```

```

65 packets_created = zeros(1, length(SNRdB));
66 bits_created = zeros(1, length(SNRdB));
67
68 %% Turbo Encoder - Decoder
69 InterLvrIndices = pmatrix;
70 trellis = poly2trellis(4, [13 17 15], 13);
71
72 turboEncoder = comm.TurboEncoder('TrellisStructure', trellis);
73 turboEncoder.InterleaverIndices = InterLvrIndices;
74 turboEncoder.OutputIndicesSource = 'Property';
75 turboEncoder.OutputIndices = OutIndices;
76
77 turboDecoder = comm.TurboDecoder('TrellisStructure', trellis);
78 turboDecoder.InterleaverIndices = InterLvrIndices;
79 turboDecoder.InputIndicesSource = 'Property';
80 turboDecoder.InputIndices = OutIndices;
81 turboDecoder.NumIterations = 8;
82
83 %% Kiria prosomoiosi
84 for ii = 1:length(SNRdB)
85     required_errors = 100;
86     if ii <= 15, required_errors = 250; end
87     if ii <= 10, required_errors = 500; end
88
89     while packet_errors(ii) < required_errors
90         bits_created(ii) = bits_created(ii) + L;
91         packets_created(ii) = packets_created(ii) + 1;
92
93         % (1) Plesio bits pliroforias
94         data = randi([0 1], L, 1);
95
96         % (2) Turbo kodikopoiisi (me puncturing)
97         encoded_data = turboEncoder(data); % bitstream      puncturing
98
99         % ===== 8-PSK me akaireous =====
100        % Group se 3ades (Gray). An oxi pollaplasio tou 3, kane padding.
101        M = 4; kbits = 2;
102        Lenc = numel(encoded_data);
103        pad = mod(-Lenc, kbits); % 0,1,2
104        enc_pad = [encoded_data; zeros(pad,1,'like',encoded_data)];
105
106        % bits -> integers (Gray order via left-msb)
107        tmp = reshape(enc_pad, kbits, []).';
108        ints_gray = bi2de(tmp, 'left-msb'); % 0..7
109
110        % ( ) Modulation: pskmod(ints, M, phase, 'gray')
111        modulated_data = pskmod(ints_gray, M, pi/4, 'gray');
112
113        % ===== KANALI =====
114        % ( ) AWGN (measured)
115        noisy_data = awgn(modulated_data, SNRdB(ii), 'measured');
116
117        % ( ) Ektimisi pragmatikis diasmoras thoriou (NoiseVariance=N0)

```

```

118     noise_est = noisy_data - modulated_data;
119     NoiseVariance = var(noise_est); % complex variance
120
121     % ===== APODIAMORFOSI =====
122     % ( ) Soft LLR ana simvolon
123     llr_sym = pskdemod(noisy_data, M, pi/4, 'gray', ...
124         'OutputType','llr', 'NoiseVariance', NoiseVariance, ...
125         'OutputDataType','double');
126     % Metatropi LLRs simvolon LLRs bits: 3 LLRs ana simvolon, seiriaka
127     llr_bits = reshape(llr_sym.', 1, []); % [1 x 3*Nsym]
128     llr_bits = llr_bits(:);
129
130     % Kopse to padding (epistrofi sto arwiko mikos punctured stream)
131     demod_data = llr_bits(1:Lenc);
132     % =====
133
134     % (3) Turbo apokodikopoihsh (MAP)
135     decoded_data = turboDecoder(-demod_data);
136
137     % (4) PER
138     if ~isequal(data, decoded_data)
139         packet_errors(ii) = packet_errors(ii) + 1;
140     end
141 end
142
143 fprintf("SNR = %.1f dB, Packets = %d, Errors = %d, PER = %.4g\n", ...
144     SNRdB(ii), packets_created(ii), packet_errors(ii), ...
145     packet_errors(ii)/packets_created(ii));
146 end
147
148 % PER
149 PER = packet_errors ./ packets_created;
150
151 % Grafima: PER vs SNR
152 figure;
153 semilogy(SNRdB, PER, '-o');
154 xlabel('SNR (dB)'); ylabel('Packet Error Rate (PER)');
155 title('PER vs SNR in AWGN Channel (LinkID=15, 8-PSK)');
156 axis([min(SNRdB) max(SNRdB) 1e-4 1]);
157 grid on;

```

Παράρτημα Κ: Υπολογισμός Απωλειών Διάδοσης: Two-ray / Three-ray / ITU (fig5pathloss.m)

```

1 clear; clc; close all;
2
3 %% === Parametroi ===
4 f = 157e6; % Frequency: 5.2 GHz
5 c = 3e8; % Speed of light (m/s)
6 lambda = c / f; % Wavelength (m)
7

```

```

8 Pt_dBm = 36;           % Isxis ekpompis apo to arthro
9 ht = 40;             % Ypsos pompou (onboard)
10 hr = 100;           % Ypsos dekti
11
12 he = 60;            % Ypsos evaporation duct
13 d = 1:1:2500;       % Apostasi 1m ews 2500m
14
15 %% === Calculate PL2 (Two-ray) ===
16 PL2 = zeros(size(d));
17 for i = 1:length(d)
18     PL2(i) = -10 .* log10(((lambda ./ (4 .* pi .* d(i))).^2) .* (2 .* sin((2 .* pi .* ht .* ←
    →-hr) ./ (lambda .* d(i))))).^2); % -10 * log10((lambda / (4*pi*r))^2 * (phi^2));
19 end
20 Pr2 = Pt_dBm - PL2;
21
22 %% === Calculate PL3 (Three-ray) ===
23 PL3 = zeros(size(d));
24 for i = 1:length(d)
25     phi = 2 .* sin((2 .* pi .* ht .* hr) ./ (lambda .* d(i))) .* sin((2 .* pi .* (he - ht) .* ←
    →-(he - hr)) ./ (lambda .* d(i)));
26     PL3(i) = -10 .* log10(((lambda ./ (4 .* pi .* d(i))).^2) .* (2 .* (1 + phi).^2)); % -10 * ←
    →log10((lambda / (4*pi*r))^2 * (2*(1 + phi)^2));
27 end
28 Pr3 = Pt_dBm - PL3;
29
30 %% === ITU model (empirical) ===
31 n = 1.5; % path loss exponent (n<2 (apo paragrafo meta thn (3)_wireless)
32 PL_ITU = 20*log10(4*pi/lambda) + 10*n*log10(d);
33 Pr_ITU_50 = Pt_dBm - PL_ITU;
34 Pr_ITU_10 = Pr_ITU_50 - 8; % 10% periptosi (worst)
35 Pr_ITU_1 = Pr_ITU_50 - 14; % 1% periptosi (worst)
36
37
38 figure; hold on; grid on;
39
40 rng(1);
41 measurement_noise = randn(1, length(d)) * 3; % 3 dB
42 Pr_measured = Pr3 + measurement_noise;
43
44 % Kampiles
45 semilogx(d, Pr_measured, 'r', 'LineWidth', 1, 'DisplayName', 'Measurement (simulated)');
46 semilogx(d, Pr3, 'g', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'LoS + specular + scattering');
47 semilogx(d, Pr2, 'b', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'LoS + specular');
48 semilogx(d, Pr_ITU_50, 'k-', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', 'ITU model (50%)');
49 semilogx(d, Pr_ITU_10, 'k--', 'LineWidth', 1.2, 'DisplayName', 'ITU model (10%)');
50 semilogx(d, Pr_ITU_1, 'k:', 'LineWidth', 1.2, 'DisplayName', 'ITU model (1%)');
51 yline(-100, '--', 'Noise Floor (-100 dBm)', 'LabelVerticalAlignment','bottom');
52
53 xlabel('Distance [km]');
54 ylabel('Received Power [dBm]');
55 title('Received Power vs. Distance');
56 legend('Location', 'southwest');
57 axis([0 2500 -110 20]);

```

Παράρτημα Α: Υπολογισμός Throughput ως Συνάρτηση του SNR (throughput-functionofSNR.m)

```

1 clear; clc; %close all;
2
3 SNRdB = {
4     0:0.1:2.5, 7.2:0.1:10, 9:0.1:11.5, 0:0.1:2.5, 7.4:0.1:9.6, ...
5     9.3:0.1:11.6, 0:0.1:2.5, 7.4:0.1:9.6, 9.5:0.1:10.8
6 };
7 SNR_common = 10:0.1:24; % Common range from 0 to 14 dB
8 P_out = [12.5, 11, 6.5, 12.5, 11, 6.5, 12.5, 11, 6.5];
9
10 %Parameters: Rs, M, r, L, C
11 params = [
12     19200, 4, 1/2, 432, 10; %11
13     19200, 8, 3/4, 972, 15; %12
14     19200, 16, 3/4, 1296, 20; %13
15     38400, 4, 1/2, 896, 42; %14
16     38400, 8, 3/4, 2016, 63; %15
17     38400, 16, 3/4, 2688, 84; %16
18     76800, 4, 1/2, 1872, 10; %17
19     76800, 8, 3/4, 4032, 255; %18
20     76800, 16, 3/4, 5616, 20; %19
21 ];
22
23 %Data from result.m
24 packet_errors = { [500,500,500,500,500,500,500,500,500,500,250,250,250,250,250,...
25 100,100,100,100,100,100,100,100,100,0,0],
26     [500,500,500,500,500,500,500,500,500,500,500,250,250,250,250,100,...
27     100,100,100,100,100,100,100,100,100,100,100],
28     [500,500,500,500,500,500,500,500,500,500,250,250,250,250,100,100,100,...
29     100,100,100,100,100,100,100,100],
30     [600,600,600,600,600,600,600,600,600,600,350,350,350,350,350,200,200,100,...
31     100,100,100,100,100,100,0,0],
32     [1000,1000,1000,1000,1000,1000,1000,1000,1000,1000,1000,500,500,500,500,...
33     200,200,200,200,100,100,100,100,100],
34     [500,500,500,500,500,500,500,500,500,500,250,250,250,250,250,100,100,100,...
35     100,100,100,100,100,100],
36     [500,500,500,500,500,500,500,500,500,500,250,250,250,250,250,100,100,100,...
37     100,100,100,100,100,81,0,0],
38     [500,500,500,500,500,500,500,500,500,500,250,250,250,250,250,100,100,100,...
39     100,100,100,100,100],
40     [500,500,500,500,500,500,500,500,500,500,279,250,400,189]
41 };
42
43 packets_created = { ←
44     → [513,519,530,553,596,632,702,805,970,1182,788,1098,1431,2221,3252,2358,4477,...
45     7704,14064,32718,60942,129982,215802,324447,30749,0],
46     [501,511,516,526,557,576,651,734,863,1049,1556,2034,1452,2168,3407,6076,10363,7748,...
47     12449,17938,28366,44502,59591,97289,144472,186192,256537,461128,598373],
48     [500,502,506,514,527,567,602,686,826,1129,853,1114,1637,2476,4569,2751,4708,6671,12665,...
     22588,31328,43278,68381,86167,128057,213101],

```

```

49     [603,602,608,616,632,654,723,877,1054,1371,1168,1837,3044,6133,12806,13506,33800,29145,...
50     60306,78178,120555,175712,254954,271671,24198,0],
51     [1003,1008,1021,1073,1141,1301,1559,2035,3188,5199,4949,9261,23651,47840,103275,70328,...
52     123826,197561,323300,153135,307430,343425,477223,772494],
53     [500,504,516,547,600,751,987,1493,2634,5236,5366,10858,22042,40952,60233,37695,41713,...
54     55380,80907,98733,125710,155713,205594,296457],
55     [500,500,500,501,501,517,543,607,762,1164,1067,2210,5554,16915,49654,42058,65371,84298,...
56     125071,134385,210413,243269,390840,380325,0,0],
57     [500,500,501,502,517,559,669,966,1568,3180,4137,11279,25228,44008,62860,39182,50006,...
58     54402,102809,109891,144391,222584,246760],
59     [503,509,532,623,827,1449,3254,8480,26687,93574,137362,314370,891527,672371]
60     };
61
62 figure; hold on; grid on;
63 for i = 1:length(params)
64
65     PER = packet_errors{i} ./ packets_created{i};
66     Rs = params(i,1);
67     M = params(i,2);
68     r = params(i,3);
69     L = params(i,4);
70     C = params(i,5);
71
72     throughput = (1 - PER) .* Rs .* log2(M) .* r .* ((L - C)/L) ./1000;
73
74     % SNR adjustment due to power
75     SNR_adj = SNRdB{i} + 10 * log10(P_out(i));
76
77     % New throughput vector with zeros
78     throughput_common = zeros(size(SNR_common));
79
80     %I find the exact start and end positions
81     [~, idx_start] = min(abs(SNR_common - SNR_adj(1)));
82     idx_end = idx_start + length(throughput) - 1;
83
84     %Check to ensure it does not exceed the length
85     if idx_end > length(SNR_common)
86         idx_end = length(SNR_common);
87         throughput = throughput(1:(idx_end-idx_start+1));
88     end
89
90     throughput_common(idx_start:idx_end) = throughput;
91
92     % We fill the remaining interval after the last value.
93     n=0;
94     while (isnan(throughput(end)) )
95         throughput(end) = throughput(end-n);
96         n=n+1;
97     end
98     %disp(n)
99     throughput_common(idx_end-n+1:end) = throughput(end);
100

```

```
101     plot(SNR_common, throughput_common, '-', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', ['Link ID ', ←
      →num2str(i+10)]);
102 end
103
104 xlabel('SNR (dB)');
105 ylabel('Throughput (kbps)');
106 title('Throughput vs SNR for Link IDs 11-19');
107 legend('Location', 'best');
```