

# Εισαγωγή στην Ασύρματη Ψηφιακή Επικοινωνία

Μια άποψη για την επεξεργασία σήματος

Robert W. Heath, Jr.

Απόδοση: **Αγαμέμνων Μήλιος**  
Μηχανικός Λογισμικού

 **Εκδόσεις: Μ. Γκιούρδας**

Ζωοδόχου Πηγής 70-74 – Τηλ.: 210 3630219

106 81 Αθήνα, 2018

[www.mgiurdas.gr](http://www.mgiurdas.gr)

**Τίτλος Πρωτοτύπου:**

Introduction to Wireless Digital Communication

ISBN 10: 0-13-443179-0

ISBN 13: 978-0-13-443179-6

Copyright © 2017 by Pearson Education, Inc.  
221 River Street, Hoboken, NJ 07030

Αποκλειστικότητα για την Ελληνική Γλώσσα

Εκδόσεις: **Μόσχος Γκιούρδας**



Ζωοδόχου Πηγής 70-74 – Τηλ.: 210 3630219

106 81 Αθήνα, 2018

[www.mgiurdas.gr](http://www.mgiurdas.gr)

**ISBN: 978-960-512-708-4**

Desktop Publishing: Κ. Καλαϊτζής, τηλ.: 210 2813066

Εκτύπωση: ΑΛΦΑΒΗΤΟ Α.Ε.Β.Ε., τηλ.: 210 6466086

Αναδημοσίευση του βιβλίου σε οποιαδήποτε μορφή, ολόκληρου ή μέρους, καθώς και των περιεχομένων προγραμμάτων, δεν επιτρέπεται χωρίς την έγγραφη εξουσιοδότηση του εκδότη.

---

# Περιεχόμενα

Πρόλογος	xiii
Ευχαριστίες	xvii
Λίγα λόγια για το συγγραφέα	xix
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Εισαγωγή στην ασύρματη επικοινωνία	1
1.2 Ασύρματα συστήματα	2
1.2.1 Ραδιοφωνική μετάδοση	2
1.2.2 Τηλεοπτική μετάδοση	4
1.2.3 Δίκτυα κυψελοειδούς επικοινωνίας	4
1.2.4 Ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN)	6
1.2.5 Προσωπικά δίκτυα (PAN)	8
1.2.6 Δορυφορικά συστήματα	9
1.2.7 Ασύρματα ad hoc δίκτυα	11
1.2.8 Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων	12
1.2.9 Υποβρύχια επικοινωνία	13
1.3 Επεξεργασία σήματος για ασύρματη επικοινωνία	14
1.4 Η συνεισφορά του βιβλίου	17
1.5 Περίγραμμα του βιβλίου	18
1.6 Σύμβολα και κοινός ορισμός	20
1.7 Περίληψη	22
Προβλήματα	23
<b>2 Επισκόπηση της ψηφιακής επικοινωνίας</b>	<b>27</b>
2.1 Εισαγωγή στην ψηφιακή επικοινωνία	27
2.2 Επισκόπηση ζεύξης ασύρματης ψηφιακής επικοινωνίας	28
2.3 Ασύρματο κανάλι	31
2.3.1 Προσθετικός θόρυβος	31

2.3.2	Παρεμβολή	33
2.3.3	Απώλεια διαδρομής	33
2.3.4	Διάδοση πολλαπλών διαδρομών	34
2.4	Κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση πηγής	36
2.4.1	Μη απωλεστική κωδικοποίηση πηγής	36
2.4.2	Απωλεστική κωδικοποίηση πηγής	38
2.5	Κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση	40
2.6	Κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση καναλιού	41
2.7	Διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση	47
2.7.1	Διαμόρφωση ζώνης βάσης	48
2.7.2	Διαμόρφωση ζώνης διέλευσης	51
2.7.3	Αποδιαμόρφωση με θόρυβο	53
2.7.4	Αποδιαμόρφωση με ανεπάρκειες καναλιού	55
2.8	Περίληψη	57
	Προβλήματα	57
<b>3</b>	<b>Βασικές αρχές της επεξεργασίας σήματος</b>	<b>63</b>
3.1	Σήματα και συστήματα	63
3.1.1	Τύποι σημάτων και συμβολισμού	64
3.1.2	Γραμμικά χρονικά αναλλοίωτα συστήματα	64
3.1.3	Ο μετασχηματισμός Φουριέ	66
3.1.4	Εύρος ζώνης σήματος	78
3.1.5	Δειγματοληψία	82
3.1.6	Επεξεργασία ασυνεχούς χρόνου σημάτων συνεχούς χρόνου περιορισμένης ζώνης	89
3.2	Στατιστική επεξεργασία σήματος	91
3.2.1	Ορισμένες έννοιες από τις πιθανότητες	91
3.2.2	Τυχαίες διεργασίες	93
3.2.3	Ροπές τυχαίας διεργασίας	95
3.2.4	Στασιμότητα	96
3.2.5	Εργοδικότητα	101
3.2.6	Φάσμα ισχύος	103
3.2.7	Φιλτράρισμα τυχαίων σημάτων	106
3.2.8	Γκαουσιανές τυχαίες διεργασίες	110
3.2.9	Τυχαία διανύσματα και πολυμεταβλητές τυχαίες διεργασίες	111
3.3	Επεξεργασία σήματος με σήματα ζώνης διέλευσης	114
3.3.1	Αναβάθμιση–δημιουργία σήματος ζώνης διέλευσης	114
3.3.2	Υποβάθμιση – εξαγωγή μιγαδικού σήματος ζώνης βάσης από σήμα ζώνης διέλευσης	117

3.3.3	Ισοδύναμο κανάλι μιγαδικής ζώνης βάσης	119
3.3.4	Ισοδύναμο κανάλι ψευδοβασικής ζώνης	126
3.3.5	Το ισοδύναμο κανάλι ασυνεχούς χρόνου	127
3.4	Επεξεργασία πολυρρυθμικού σήματος	129
3.4.1	Δειγματοληψία υποβάθμισης	130
3.4.2	Δειγματοληψία αναβάθμισης	131
3.4.3	Πολυφασική Αποσύνθεση	133
3.4.4	Φιλτράρισμα με δειγματοληψία αναβάθμισης και δειγματοληψία υποβάθμισης	134
3.4.5	Αλλαγή του ρυθμού δειγματοληψίας	135
3.5	Γραμμική εκτίμηση	137
3.5.1	Γραμμική άλγεβρα	137
3.5.2	Λύση ελαχίστων τετραγώνων σε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων	138
3.5.3	Εκτίμηση παραμέτρων μέγιστης πιθανότητας στο AWGN	144
3.5.4	Εκτίμηση γραμμικού ελαχίστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος	145
3.6	Περίληψη	150
	Προβλήματα	151
<b>4</b>	<b>Ψηφιακή διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση</b>	<b>171</b>
4.1	Πομπός για μιγαδική διαμόρφωση πλάτους παλμού	171
4.2	Αντιστοίχιση συμβόλων και αστερισμοί	174
4.2.1	Κοινοί αστερισμοί	174
4.2.2	Μέσος συμβόλου	178
4.2.3	Ενέργεια συμβόλου	179
4.3	Υπολογισμός του εύρους ζώνης και της ισχύος του $x(t)$	182
4.4	Επικοινωνία στο κανάλι AWGN	183
4.4.1	Εισαγωγή στο κανάλι AWGN	184
4.4.2	Δέκτης για μιγαδική διαμόρφωση πλάτους παλμού σε AWGN	185
4.4.3	Σχεδιασμός σχήματος παλμού για το κανάλι AWGN	186
4.4.4	Φώραση συμβόλου στο κανάλι AWGN	193
4.4.5	Ανάλυση πιθανότητας σφάλματος συμβόλου	198
4.5	Ψηφιακή υλοποίηση σχηματισμού παλμών	202
4.5.1	Σχηματισμός παλμού μετάδοσης	202
4.5.2	Προσαρμοσμένο φιλτράρισμα δέκτη	205
4.6	Περίληψη	207
	Προβλήματα	208

<b>5</b>	<b>Χειρισμός ανεπαρκειών</b>	<b>219</b>
5.1	Ασύρματα κανάλια επίπεδης συχνότητας	220
5.1.1	Μοντέλο ασυνεχούς χρόνου για διάλειαση επίπεδης συχνότητας	220
5.1.2	Συγχρονισμός συμβόλων	222
5.1.3	Συγχρονισμός πλαισίων	227
5.1.4	Εκτίμηση καναλιών	230
5.1.5	Εξισορρόπηση	233
5.1.6	Συγχρονισμός μετατόπισης φέρουσας συχνότητας	235
5.2	Εξισορρόπηση επιλεκτικών ως προς τη συχνότητα καναλιών	241
5.2.1	Μοντέλο ασυνεχούς χρόνου για επιλεκτική ως προς τη συχνότητα διάλειαση	241
5.2.2	Γραμμικοί εξισορροπητές στο πεδίο χρόνου	243
5.2.3	Γραμμική εξισορρόπηση στο πεδίο συχνοτήτων με SC-FDE	248
5.2.4	Γραμμική εξισορρόπηση στο πεδίο συχνοτήτων με OFDM	254
5.3	Εκτίμηση επιλεκτικών ως προς τη συχνότητα καναλιών	259
5.3.1	Εκτίμηση καναλιών ελαχίστων τετραγώνων στο πεδίο χρόνου	259
5.3.2	Εκτίμηση καναλιών ελαχίστων τετραγώνων στο πεδίο συχνοτήτων	265
5.3.3	Άμεσος εξισορροπητής ελαχίστων τετραγώνων	269
5.4	Διόρθωση της μετατόπισης φέρουσας συχνότητας σε επιλεκτικά ως προς τη συχνότητα κανάλια	270
5.4.1	Υπόδειγμα για μετατόπιση συχνότητας σε επιλεκτικά ως προς τη συχνότητα κανάλια	270
5.4.2	Αναθεώρηση εκτίμησης μονής συχνότητας	271
5.4.3	Εκτίμηση μετατόπισης συχνότητας και συγχρονισμού πλαισίων χρησιμοποιώντας περιοδική ακολουθία εκπαίδευσης για συστήματα μονής φέρουσας	272
5.4.4	Εκτίμηση μετατόπισης συχνότητας και συγχρονισμού πλαισίων χρησιμοποιώντας περιοδική ακολουθία εκπαίδευσης για συστήματα OFDM	277
5.5	Εισαγωγή στην ασύρματη διάδοση	282
5.5.1	Μηχανισμοί διάδοσης	282
5.5.2	Μοντελοποίηση διάδοσης	283
5.6	Μοντέλα καναλιών μεγάλης κλίμακας	285
5.6.1	Μοντέλο ελεύθερου χώρου Friis	285
5.6.2	Μοντέλο απώλειας διαδρομής λογαριθμικής απόστασης	287
5.6.3	Μοντέλο απώλειας διαδρομής LOS/NLOS	290
5.6.4	Ανάλυση απόδοσης συνυπολογίζοντας την απώλεια διαδρομής	291
5.7	Επιλεκτικότητα διάλειασης μικρής κλίμακας	292
5.7.1	Εισαγωγή στην επιλεκτικότητα	293

5.7.2	Επιλεκτική ως προς τη συχνότητα διάλειαψη	295
5.7.3	Επιλεκτική ως προς τον χρόνο διάλειαψη	298
5.7.4	Μοντέλα σημάτων για επιλεκτικότητα καναλιών	300
5.8	Μοντέλα καναλιών μικρής κλίμακας	302
5.8.1	Μοντέλα καναλιών επίπεδης διάλειαψης	303
5.8.2	Μοντέλα καναλιών επιλεκτικά ως προς τη συχνότητα	304
5.8.3	Ανάλυση απόδοσης με μοντέλα καναλιών διαλείψεων	306
5.9	Περίληψη	309
	Προβλήματα	310
<b>6</b>	<b>Επικοινωνία MIMO</b>	<b>335</b>
6.1	Εισαγωγή στην επικοινωνία με πολλαπλές κεραίες	335
6.1.1	Σύστημα μίας εισόδου πολλαπλών εξόδων (SIMO)	337
6.1.2	Σύστημα πολλαπλών εισόδων μίας εξόδου (MISO)	338
6.1.3	Σύστημα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO)	341
6.2	Διαφορισμός πολλαπλών δεκτών για συστήματα SIMO σταθερής διάλειαψης	343
6.2.1	Μοντέλα καναλιών SIMO επίπεδης διάλειαψης	343
6.2.2	Επιλογή κεραίας	345
6.2.3	Συνδυασμός μέγιστου λόγου	349
6.3	Διαφορισμός μετάδοσης για συστήματα MISO	353
6.3.1	Μοντέλα καναλιών MISO επίπεδης διάλειαψης	353
6.3.2	Γιατί δεν λειτουργεί η χωρική επανάληψη	353
6.3.3	Σχηματισμός δέσμης μετάδοσης	355
6.3.4	Σχηματισμός δέσμης περιορισμένης ανάδρασης	356
6.3.5	Σχηματισμός δέσμης που βασίζεται στην αμοιβαιότητα	357
6.3.6	Ο κώδικας Alamouti	358
6.3.7	Κωδικοποίηση χώρου-χρόνου	360
6.4	Τεχνικές πομποδέκτη MIMO	364
6.4.1	Χωρική πολυπλεξία	364
6.4.2	Μοντέλα καναλιών MIMO επίπεδης διάλειαψης	365
6.4.3	Φώραση και εξισορρόπηση για χωρική πολυπλεξία	367
6.4.4	Γραμμική προκωδικοποίηση	372
6.4.5	Επεκτάσεις στην περιορισμένη ανάδραση	374
6.4.6	Εκτίμηση καναλιών σε συστήματα MIMO	378
6.4.7	Πέρα από το κανάλι επίπεδης διάλειαψης, στα επιλεκτικά ως προς τη συχνότητα κανάλια	381
6.5	Τεχνικές πομποδέκτη MIMO-OFDM	386
6.5.1	Μοντέλο συστήματος	386

6.5.2	Εξισορρόπηση και φώραση	388
6.5.3	Προκωδικοποίηση	388
6.5.4	Εκτίμηση καναλιών	389
6.5.5	Συγχρονισμός φέρουσας συχνότητας	391
6.6	Περίληψη	394
	Προβλήματα	395
	<b>Αναφορές</b>	<b>399</b>
	<b>Ευρετήριο</b>	<b>427</b>



---

# Πρόλογος

Έγραφα αυτό το βιβλίο προκειμένου να μπορέσω να φέρω τις αρχές της ασύρματης επικοινωνίας πιο κοντά στον αναγνώστη. Η ασύρματη επικοινωνία είναι το κυρίαρχο μέσο πρόσβασης στο Internet για τους περισσότερους ανθρώπους και εξελίσσεται στο μέσο εκείνο με το οποίο οι συσκευές μας συνδέονται στο Internet και μεταξύ τους περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο. Παρά την πανταχού παρουσία ασύρματων συνδέσεων, οι αρχές της ασύρματης επικοινωνίας παραμένουν απρόσιτες για πολλούς μηχανικούς. Ο κύριος λόγος φαίνεται να είναι το γεγονός ότι οι τεχνικές έννοιες της ασύρματης επικοινωνίας βασίζονται στα θεμέλια της ψηφιακής επικοινωνίας. Δυστυχώς, η ψηφιακή επικοινωνία μελετάται συνήθως στο τέλος ενός προπτυχιακού προγράμματος σπουδών σε τμήματα ηλεκτρολόγων μηχανικών, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει χώρος για ένα μάθημα στην ασύρματη επικοινωνία. Επιπλέον, με τον τρόπο αυτό η ασύρματη επικοινωνία παραμένει μακριά από φοιτητές σχετικών κλάδων, όπως της επιστήμης των υπολογιστών ή της αεροναυπηγικής, όπου η ψηφιακή επικοινωνία συνήθως δεν προσφέρεται ως επιλογή. Αυτό το βιβλίο παρέχει ένα μέσο, με το οποίο μπορεί να μάθει κάποιος την ασύρματη επικοινωνία σε συνδυασμό με τις βασικές αρχές της ψηφιακής επικοινωνίας.

Το βιβλίο αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι η ασύρματη επικοινωνία μπορεί να διδαχθεί μόνο όταν υπάρχει ένα υπόβαθρο στην ψηφιακή επεξεργασία σήματος (DSP). Η χρησιμότητα της προσέγγισης μέσα απ' το DSP προέρχεται από το εξής γεγονός: τα ασύρματα σήματα επικοινωνίας (τουλάχιστον σε ιδανικές συνθήκες) είναι περιορισμένης ζώνης. Χάρη στο θεώρημα του Νίκουιστ, μπορούμε να αναπαραστήσουμε σήματα περιορισμένης ζώνης συνεχούς χρόνου απ' τα δείγματά τους σε ασυνεχή χρόνο. Κατά συνέπεια, ο ασυνεχής χρόνος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση των μεταδιδόμενων και ληφθέντων σημάτων συνεχούς χρόνου σε ένα ασύρματο σύστημα. Μ' αυτήν τη σύνδεση, οι ανεπάρκειες καναλιού, όπως η διάλειαση πολλαπλών διαδρομών και ο θόρυβος, μπορούν να γραφτούν με όρους των ισοδύναμων τους σε ασυνεχές χρόνο, δημιουργώντας ένα μοντέλο για το ληφθέν σήμα, το οποίο βρίσκεται εξ ολοκλήρου σε ασυνεχή χρόνο. Μ' αυτόν τον τρόπο, ένα σύστημα ψηφιακής επικοινωνίας μπορεί να κριθεί ως σύστημα ασυνεχούς χρόνου.

Πολλές κλασικές συναρτήσεις επεξεργασίας σήματος παίζουν ειδικό ρόλο σ' αυτό το ισοδύναμο ασυνεχούς χρόνου του συστήματος σύστημα ψηφιακής επικοινωνίας. Τα γραμμικά χρονικά αναλλοίωτα συστήματα, τα οποία χαρακτηρίζονται από συνέλιξη με παλμοθητική απόκριση, μοντελοποιούν ασύρματα κανάλια πολλαπλών διαδρομών. Η αποσυνέλιξη χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση των επιδράσεων του καναλιού. Η δειγματοληψία αναβάθμισης, η δειγματοληψία υποβάθμισης και οι πολυρρυθμικές ταυτότητες εφαρμόζονται στην αποδοτική υλοποίηση σχηματισμού παλμών στον πομπό και στο προσαρμοσμέ-

νο φιλτράρισμα στον δέκτη. Οι γρήγοροι μετασχηματισμοί Φουριέ αποτελούν τη βάση δύο σημαντικών τεχνικών διαμόρφωσης/αποδιαμόρφωσης: της ορθογωνικής πολυπλεξίας με διαίρεση συχνότητας και της εξισορρόπησης απλής φέρουσας πεδίου συχνοτήτων. Η γραμμική εκτίμηση και τα ελάχιστα τετράγωνα γίνονται η βάση αλγόριθμων για εκτίμηση (εκτίμηση άγνωστης απόκρισης φίλτρου) και εξισορρόπησης καναλιού (εύρεση φίλτρου αποσυνέλιξης). Οι αλγόριθμοι για την εκτίμηση των παραμέτρων μιας άγνωστης ημιτονοειδούς κυματομορφής στο θόρυβο βρίσκουν εφαρμογή στην εκτίμηση μετατόπισης φέρουσας συχνότητας. Εν συντομία, η επεξεργασία σήματος ήταν πάντα ένα μέρος της επικοινωνίας και αξιοποιώντας αυτό το γεγονός, η ψηφιακή επικοινωνία μπορεί να διδαχθεί με βάση τη σχέση της με την επεξεργασία σήματος.

Ξεκινώ το βιβλίο με μια εισαγωγή στην ασύρματη επικοινωνία και την επεξεργασία σήματος στο Κεφάλαιο 1, παρέχοντας κάποια ιστορικά στοιχεία. Ένα σημαντικό κομμάτι του κεφαλαίου είναι η συζήτηση για τις διαφορετικές εφαρμογές της ασύρματης επικοινωνίας, όπως η ραδιοφωνική και η τηλεοπτική μετάδοση, η κυψελοειδής επικοινωνία, η τοπική δικτύωση, τα προσωπικά δίκτυα, τα δορυφορικά συστήματα, τα ad hoc δίκτυα, τα δίκτυα αισθητήρων, ακόμα και οι υποβρύχιες επικοινωνίες. Η επισκόπηση των εφαρμογών δημιουργεί ένα κατάλληλο πλαίσιο για τα παραδείγματα που ακολουθούν και για τα προβλήματα στο τέλος του κεφαλαίου, τα οποία πολλές φορές πραγματεύονται τις εξελίξεις στα ασύρματα τοπικά δίκτυα, τα προσωπικά δίκτυα ή τα κυψελοειδή συστήματα επικοινωνίας.

Τα δύο επόμενα Κεφάλαια ασχολούνται με το θεωρητικό υπόβαθρο της ψηφιακής επικοινωνίας και της επεξεργασίας σήματος. Ξεκινώ με μια περιγραφή του τυπικού σχηματικού διαγράμματος των συστημάτων ψηφιακής επικοινωνίας στο Κεφάλαιο 2, όπου εξηγώ τι κάνει κάθε μπλοκ στον πομπό και στον δέκτη. Περιγράφονται σημαντικές λειτουργίες, όπως η κωδικοποίηση πηγής, η κρυπτογράφηση, η κωδικοποίηση και η διαμόρφωση καναλιού, μαζί με μια συζήτηση για το ασύρματο κανάλι. Το υπόλοιπο κεφάλαιο εστιάζει σ' ένα υποσύνολο αυτών των λειτουργιών: διαμόρφωση, αποδιαμόρφωση και το κανάλι. Για να παρέχω το κατάλληλο μαθηματικό υπόβαθρο, παραθέτω μια εκτεταμένη ανασκόπηση σημαντικών εννοιών από την επεξεργασία σήματος στο Κεφάλαιο 3, συμπεριλαμβανομένων των αιτιοκρατικών και στοχαστικών σημάτων, της ζώνης διέλευσης, της πολυρρυθμικής επεξεργασίας σήματος και της γραμμικής εκτίμησης σήματος. Αυτό το κεφάλαιο προσφέρει εργαλεία, τα οποία χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των λειτουργιών του πομπού και του δέκτη στην ψηφιακή επικοινωνία απ' την πλευρά της επεξεργασίας σήματος.

Αφού μάθετε τις βασικές αρχές, συνεχίζω με μια πιο διεξοδική μελέτη της διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης στο Κεφάλαιο 4. Αντί να εξετάσω όλες τις πιθανές μορφές διαμόρφωσης, όπως θα γινόταν σε μια πολύ βαθιά μελέτη, εστιάζω σε στρατηγικές που περιγράφονται με τη μιγαδική διαμόρφωση πλάτους παλμού, μια επιλογή αρκετά γενική, που επιτρέπει την περιγραφή των περισσότερων κυματομορφών που χρησιμοποιούνται σε ασύρματα συστήματα της αγοράς. Η διαδικασία αποδιαμόρφωσης παράγεται αν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα κανάλι με προσθετικό λευκό Γκαουσιανό θόρυβο, όπου συμπεριλαμβάνεται ο σχηματισμός παλμών, η φώραση μέγιστης πιθανότητας και η πιθανότητα σφάλματος συμβόλου. Τα κύρια σημεία του πομπού και του δέκτη περιγράφονται με τη βοήθεια εννοιών της επεξεργασίας πολυρρυθμικού σήματος. Αυτό το κεφάλαιο διαμορφώνει τη βάση μιας κλασικής εισαγωγής στην ψηφιακή επικοινωνία, αλλά με μια ιδέα επεξεργασίας σήματος.

Οι ολοκληρωμένες προδιαγραφές των αλγόριθμων δέκτη για το ασύρματο περιβάλλον έρχονται στο Κεφάλαιο 5. Περιγράφονται συγκεκριμένες ανεπάρκειες, όπως η μετατόπιση χρονισμού συμβόλου, η μετατόπιση χρονισμού πλαισίων, η μετατόπιση φέρουσας συχνότητας και τα επιλεκτικά ως προς τη συχνότητα κανάλια. Περιγράφονται επίσης αρκετές μέθοδοι εξομάλυνσης, όπως αλγόριθμοι για την εκτίμηση άγνωστων παραμέτρων, οι οποίοι βασίζονται σε στρατηγικές εκτίμησης ελαχίστων τετραγώνων και εξισορρόπησης και αξιο-

ποιούν εναλλακτικά το πεδίο χρόνου ή το πεδίο συχνοτήτων. Εστιάζω σε αλγόριθμους για το χειρισμό των ανεπαρκειών με τους πιο απλούς δυνατούς τρόπους, ώστε να προετοιμάσω το σκηνικό για πιο προχωρημένους αλγόριθμους που πιθανώς να συναντήσετε στο μέλλον. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μια περιγραφή μοντέλων καναλιών μικρής και μεγάλης κλίμακας και με μια συζήτηση για τον τρόπο με τον οποίο χαρακτηρίζουμε την επιλεκτικότητα ενός καναλιού ως προς το χρόνο και ως προς τη συχνότητα. Οι γνώσεις απ' αυτό το κεφάλαιο είναι απαραίτητες και ουσιαστικές για τη σχεδίαση και υλοποίηση οποιουδήποτε ασύρματου συστήματος.

Το τελευταίο κεφάλαιο, το Κεφάλαιο 6, παρέχει μια γενίκευση των εννοιών που διατυπώσαμε στα Κεφάλαια 4 και 5 σε συστήματα που χρησιμοποιούν κεραίες πολλαπλής μετάδοσης ή και πολλαπλής λήψης, τα οποία κατατάσσονται υπό το ευρύτερο πεδίο της επικοινωνίας MIMO. Σ' αυτό το κεφάλαιο, ορίζω διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας MIMO και τις εξερευνώ αναλυτικά, μιλώντας ακόμα και για την ποικιλία των δεκτών, το διαφορισμό του πομπού και τη χωρική πολυπλεξία. Στην ουσία, οι περισσότερες περιγραφές σε προηγούμενα κανάλια ανάγονται στην περίπτωση MIMO με κατάλληλο συμβολισμό διανυσμάτων και πινάκων, αλλά και επιπρόσθετης πολυπλοκότητας στους αλγόριθμους δέκτη. Ενώ το μεγαλύτερο μέρος του κεφαλαίου εστιάζει στο μοντέλο καναλιού επίπεδης διάλειτουργίας, ορισμένες γενικεύσεις για τα επιλεκτικά ως προς τη συχνότητα κανάλια διατυπώνονται στο τέλος. Αυτό το κεφάλαιο παρέχει σημαντικές συνδέσεις μεταξύ των βασικών αρχών του ασύρματου και των τύπων συστημάτων επικοινωνίας, που χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως στα ασύρματα συστήματα της αγοράς.

Το βιβλίο αναπτύχθηκε στο πλαίσιο ενός μαθήματος στο Πανεπιστήμιο του Τέξας στο Όστιν με τον τίτλο Εργαστήριο ασύρματων επικοινωνιών. Η θεωρητική διδασκαλία του μαθήματος βασίστηκε σε προσχέδια αυτού του βιβλίου και στα εργαστηριακά μαθήματα χρησιμοποιήθηκε το εργαστηριακό εγχειρίδιό μου *Digital Wireless Communication: Physical Layer Exploration Lab Using the NI USRP*, το οποίο εκδόθηκε από την National Technology and Science Press το 2012. Αυτό το εγχειρίδιο προσφέρεται μαζί μ' ένα πακέτο υλικού USRP από την National Instruments. Στο εργαστήριο, οι φοιτητές υλοποιούν διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση ορθογωνικού πλάτους. Πρέπει να χειριστούν μια διαδοχή πιο περίπλοκων ανεπαρκειών, όπως θόρυβο, κανάλια πολλαπλών διαδρομών, μετατόπιση χρονισμού συμβόλων, μετατόπιση χρονισμού πλαισίων και μετατόπιση φέρουσας συχνότητας. Το εργαστήριο παρέχει έναν τρόπο μελέτης της θεωρίας του βιβλίου στην πράξη, με πραγματικά ασύρματα σήματα. Για μεμονωμένη μελέτη εκτός εργαστηρίου, έχω συμπεριλάβει αρκετά προβλήματα για υπολογιστές, τα οποία περιλαμβάνουν την προσομοίωση σημαντικών στοιχείων της ζεύξης επικοινωνίας. Προκειμένου να δείτε τη θεωρία στην πράξη, μπορείτε να υλοποιήσετε τους αλγόριθμους που περιγράφονται σε ένα κανάλι ήχου, χρησιμοποιώντας μικρόφωνο και ηχείο. Ακολούθησα αυτήν την προσέγγιση στο παρελθόν για την κατασκευή ενός πρωτότυπου συστήματος ασύρματης ζεύξης επικοινωνίας (High Frequency Near Vertical Incidence Skywave), το οποίο λειτούργησε σε συχνότητες ραδιοερασιτεχνών.

Το βιβλίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί με αρκετούς διαφορετικούς τρόπους, σε εργαστήριο ή όχι. Σε ένα εισαγωγικό προπτυχιακό επίπεδο, θα κάλυπτα τα Κεφάλαια 1 ως 5 και θα αφιέρωνα επιπλέον χρόνο στην αρχή του μαθήματος για να εξηγήσω βασικές μαθηματικές αρχές. Για ένα πιο προχωρημένο επίπεδο, θα κάλυπτα όλα τα κεφάλαια του βιβλίου. Σε μεταπτυχιακό επίπεδο, στην ύλη του βιβλίου θα πρόσθετα μια επιπλέον υλοποίηση ή μια ερευνητική εργασία. Στο Πανεπιστήμιο του Τέξας, το μάθημα που διδάσκω σε προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές καλύπτει όλο το βιβλίο και τα πρώτα εργαστηριακά πειράματα απ' το προαναφερθέν εργαστηριακό εγχειρίδιο. Οι μεταπτυχιακοί φοιτητές αναλαμβάνουν επίσης μια εργασία. Το μάθημα είναι δύσκολο, αλλά σίγουρα ανταμείβει τους φοιτητές.

Το βιβλίο προτείνεται επίσης για μεμονωμένη μελέτη, ως ολοκληρωμένη σπουδή των βασικών αρχών που παρέχονται στα Κεφάλαια 2 και 3. Ενθαρρύνω μια προσεκτική επισκόπηση των βασικών μαθηματικών αρχών πριν προχωρήσετε στο περιεχόμενο των Κεφαλαίων 4 ως 6. Θα πρότεινα επίσης να ασχοληθείτε με όλα τα παραδείγματα του βιβλίου, ώστε να αποσαφηνιστούν οι κεντρικές ιδέες. Προτείνεται επίσης η επιλογή κάποιων προβλημάτων από το τέλος κάθε κεφαλαίου. Θεωρώ ότι αυτό το βιβλίο μπορεί να αποτελέσει μια καλή βάση για περαιτέρω σπουδές στις ασύρματες επικοινωνίες.

Όσο η ασύρματη επικοινωνία εξακολουθεί να ενσωματώνεται στη ζωή μας, θα υπάρχει μια σταθερή πρόοδος στις ασύρματες τεχνολογίες. Ελπίζω ότι αυτό το βιβλίο θα προσφέρει μια φρέσκια ματιά στις ασύρματες τεχνολογίες και θα αποτελέσει την αφετηρία για τις εξελίξεις που θα ακολουθήσουν.

---

# Ευχαριστίες

Αυτό το βιβλίο αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του εργαστηριακού μαθήματος EE 371C/EE 371C/EE 387K-17 για τις ασύρματες επικοινωνίες που δίδαξα στο Πανεπιστήμιο του Τέξας στο Όστιν, μαζί με το εργαστηριακό εγχειρίδιο για την ψηφιακή ασύρματη επικοινωνία: Natural Layer Exploration Lab Using the NI USRP, το οποίο εκδόθηκε από την National Technology and Science Press. Πολλοί από τους βοηθούς μου πρόσφεραν πολύτιμες γνώμες κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του μαθήματος και των βιβλίων και θα ήθελα να αναφέρω τους Roopsha Samanta, Sachin Dasnurkar, Ketan Mandke, Hoojin Lee, Josh Harguess, Caleb Lo, Robert Grant, Ramya Bhagavatula, Omar El Ayache, Harish Ganapathy, Zheng Li, Tom Novlan, Preeti Kumari, Vutha Va, Jianhua Mo και Anum Anumali. Όλοι οι βοηθοί μου λειτούργησαν τα εργαστήρια, συνεργάστηκαν με τους φοιτητές, συγκέντρωσαν σχόλια και υπέβαλλαν προτάσεις και συμβουλές, όπως τα παραδείγματα και τα προβλήματα. Εκατοντάδες φοιτητές παρακολούθησαν το μάθημα και παρείχαν πολύτιμα σχόλια για διάφορα προσχέδια του βιβλίου. Υπέβαλαν επίσης πολύ ενδιαφέρουσες ερωτήσεις απ' τις οποίες προέκυψαν αναθεωρήσεις και προσθήκες στο κείμενο του βιβλίου. Συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Bhavatharini Sridharan για τα θετικά σχόλιά της σχετικά με την έκδοση του βιβλίου με το υπάρχον υλικό μου. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Kien T. Truong για τη βοήθειά του στο κεφάλαιο με το θεωρητικό υπόβαθρο για την ψηφιακή επικοινωνία. Ευχαριστώ ειλικρινά όλους τους φοιτητές και βοηθούς μου για την υποστήριξή τους.

Θα ήθελα επίσης να αναγνωρίσω την υποστήριξη συναδέλφων μου στην ανάπτυξη αυτού του βιβλίου. Συγκεκριμένα, η καθηγήτρια Nuria Gonzalez-Prelcic παρείχε λεπτομερή επιμέλεια όλων των κεφαλαίων και παρείχε πολλές προτάσεις και διορθώσεις στα σχήματα. Η συνολική συμβολή της ήταν ανεκτίμητη. Το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών με βοήθησε πολύ υποστηρίζοντας τη διδασκαλία της ύλης αυτού του βιβλίου. Θα ήθελα επίσης να εκφράσω την εκτίμησή τους για τους πολλούς συναδέλφους που πρότειναν το μάθημά μου στους φοιτητές τους. Οι Sam Shearman και Erik Luther από την National Instruments με ενθάρρυναν και με υποστήριξαν στην έκδοση του βιβλίου, ιδιαίτερα συμφώνησαν με γενναιοδωρία να δημοσιεύσω το εργαστηριακό εγχειρίδιο.

Η ανάπτυξη του μαθήματος, στο οποίο βασίστηκε αυτό το βιβλίο υποστηρίχθηκε από πολλές ομάδες. Η National Instruments (NI) συνέβαλε στην πραγματοποίηση του μαθήματος μέσα από την εγκατάσταση του εργαστηρίου Truchard Wireless Lab στο Πανεπιστήμιο του Τέξας. Η NI παρείχε θερμή υποστήριξη, μέσω της οποίας χρηματοδοτήθηκε το εγχείρημα και συνεισέφερε αμέτρητες εργατοώρες. Πολλές ομάδες απ' το Πανεπιστήμιο του Τέξας, όπως το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και η Σχολή Μηχανικών Cockrell, παρείχαν διδακτική βοήθεια και υποστήριξη για την ανάπτυξη και εξέλιξη της ύλης του μαθήματος. Η εργασία στα εργαστήρια ενέπνευσε την έρευνά μου. Θα ήθελα να αναγνωρίσω την υπο-

στήριξη που έλαβα από τη National Science Foundation, τη DARPA, την Υπηρεσία Ναυτικών Ερευνών, τα Ερευνητικά Εργαστήρια του Στρατού, τη Huawei, τη National Instruments, τη Samsung, τη Semiconductor Research Corporation, τη Freescale, την Andrew, την Intel, τη Cisco, τη Verizon, την AT& T, την CommScope, την Mitsubishi Electric Research Laboratories, τη Nokia, την Toyota ITC και την Crown Castle. Η υποστήριξή τους μου επέτρεψε να εκπαιδεύσω τους φοιτητές μου, με τους οποίους μοιράστηκα τη θεωρία και την πράξη.

---

# Λίγα λόγια για το συγγραφέα



Ο **Robert W. Heath, Jr.**, διαθέτει τίτλους προπτυχιακών και μεταπτυχιακών σπουδών από το Πανεπιστήμιο της Βιρτζίνια (1996 και 1997, αντίστοιχα) και διδακτορικό δίπλωμα από το Πανεπιστήμιο Στάνφορντ το 2002, όλους ως ηλεκτρολόγος μηχανικός. Από το 1998 ως το 2001, διετέλεσε βασικό μέλος του τεχνικού προσωπικού και στη συνέχεια εργάστηκε ως σύμβουλος στην Iospan Wireless, Inc., όπου ασχολήθηκε με τη σχεδίαση και υλοποίηση του φυσικού επιπέδου και του επιπέδου σύνδεσης του πρώτου εμπορικού συστήματος επικοινωνίας MIMO OFDM. Από το 2002, διδάσκει στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου του Τέξας στο Όστιν, όπου είναι κάτοχος της διακεκριμένης έδρας Cullen

Trust #6. Είναι επίσης πρόεδρος και διευθύνων σύμβουλος της MIMO Wireless Inc. Τα ερευνητικά ενδιαφέροντά του περιλαμβάνουν αρκετές πτυχές της ασύρματης επικοινωνίας και της επεξεργασίας σήματος – 5G κυψελοειδή συστήματα, επικοινωνία MIMO, επικοινωνία χιλιοστομετρικού κύματος, προσαρμοστική μετάδοση βίντεο και πολλαπλή επεξεργασία σήματος – όπως και εφαρμογές της ασύρματης επικοινωνίας στην αυτοκίνηση, τα εναέρια οχήματα και τα φορητά δίκτυα. Συμμετείχε στην ομάδα συγγραφέων του βιβλίου *Millimeter Wave Wireless Communications* (Prentice Hall, 2015) και είναι ο συγγραφέας του έργου *Digital Wireless Communication: Physical Layer Exploitation Lab Using the NI USRP* (National Technology and Science Press, 2012).

Ο Δρ. Heath έχει πάρει μέρος σε πολλές βραβευμένες εργασίες, όπως, πιο πρόσφατα, στο EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking το 2010 και το 2013, στο Signal Processing Magazine το 2012, στο Signal Processing Society το 2013, στο EURASIP Journal on Advances in Signal Processing το 2014, στο Journal of Communications and Networks το 2014, στο IEEE Communications Society Fred W. Ellersick Prize το 2016 και στο IEEE Communications and Information Theory Societies Joint Paper Award επίσης το 2016. Εργάστηκε ως διακεκριμένος λέκτορας για την κοινότητα επιστημόνων επεξεργασίας σήματος του IEEE και έχει ανακηρυχθεί διακεκριμένος ερευνητής για το ISI. Είναι επίσης εκλεγμένο μέλος του Διοικητικού Συμβουλίου της κοινότητας επιστημόνων επεξεργασίας σήματος του IEEE, αδειούχος ραδιοερασιτέχνης, πιλότος ιδιωτικών αεροσκαφών, επαγγελματίας μηχανικός στην πολιτεία του Τέξας και εταίρος του IEEE.