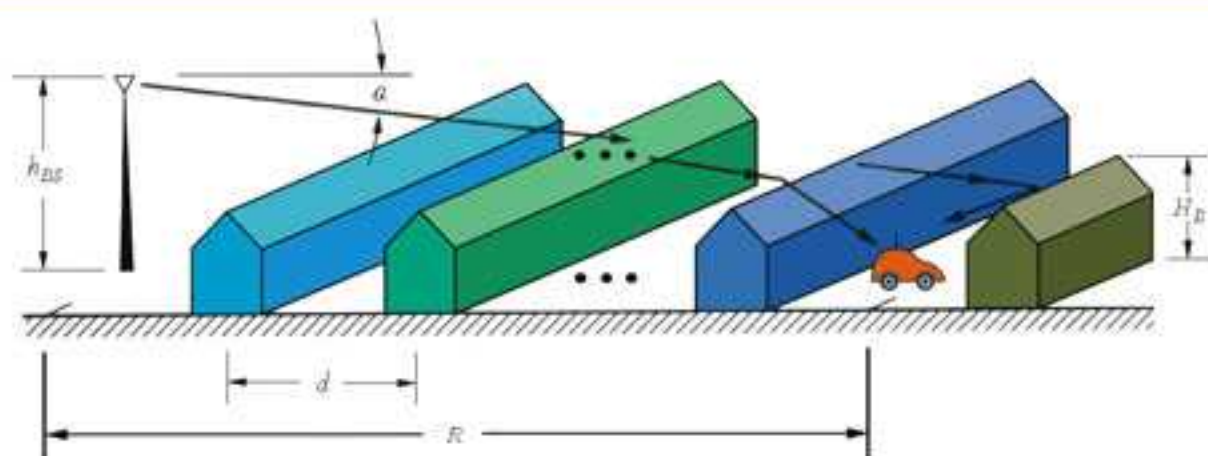


Henry L. Bertoni

Διάδοση ραδιοκυμάτων



στα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας

- Οι κορυφαίες τεχνικές και τα πιο καινοτόμα μοντέλα πρόβλεψης διάδοσης
- Αξιοπιστα νέα μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τα κτίρια, τη μορφολογία του εδάφους, και τη βλάστηση
- Λεπτομερείς συγκρίσεις με πραγματικές μετρήσεις
- Μοντέλα πολυδιάδοσης, διάδοση κυμάτων, περίθλαση, και πολλά άλλα φαινόμενα



Περιεχόμενα

Εισαγωγή	13
1 Η έννοια της κυψελωτής επικοινωνίας και η αναγκαιότητα για πρόβλεψη της διάδοσης	19
1.1 Η έννοια της χωρικής επαναχρησιμοποίησης	21
1.2 Οι γραμμικές κυψέλες ως παράδειγμα της επαναχρησιμοποίησης φάσματος του συστήματος FDMA	22
1.3 Εξαγωνικές κυψέλες κάλυψης περιοχής	25
1.3α Συμμετρικά πρότυπα επαναχρησιμοποίησης	27
1.3β Παρεμβολή για συμμετρικά πρότυπα επαναχρησιμοποίησης	28
1.4 Κατατμημένες κυψέλες	29
1.5 Χωρική επαναχρησιμοποίηση για τα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα	30
1.6 Περίληψη	32
Προβλήματα	33
Αναφορές	34
2 Εξέταση των χαρακτηριστικών που παρατηρούνται στα κανάλια διάδοσης	35
2.1 Μετρήσεις σημάτων στενής ζώνης	36
2.1α Μεταβολή σήματος σε μικρές περιοχές: ταχεία διάλειαση	38
2.1β Μεταβολές του τοπικού μέσου όρου: διάλειαση σκιάς	42
2.1γ Διαχωρισμός της διάλειασης σκιάς από την εξάρτηση απόστασης	43
2.2 Μοντέλα κλίσης - αποτέμνουσας στην εξάρτηση απόστασης των μακροκυψελών	45

2.3	Η εξάρτηση απόστασης για τις μικροκυψέλες: επίδραση της γεωμετρίας του δρόμου	48
2.3α	Διαδρομές με γραμμή οπτικής επαφής (LOS)	50
2.3β	Κλιμακωτές και ελκτικές διαδρομές στις περιοχές Sunset και Mission	51
2.3γ	Διαδρομές χωρίς γραμμή οπτικής επαφής (non-LOS) στο κέντρο του Σαν Φρανσίσκο με πολυώροφα κτίρια	53
2.4	Το πολυδιαδικό μοντέλο για την ταχεία διάλειαση και άλλες επιδράσεις στενής ζώνης	54
2.4α	Διάλειαση συχνότητας	55
2.4β	Χρονοεξαρτώμενη διάλειαση	56
2.4γ	Διάδοση Doppler	57
2.4δ	Αποπόλωση	58
2.5	Διάδοση σημάτων στενής ζώνης σε εσωτερικό χώρο	59
2.5α	Ταχεία διάλειαση σε εσωτερικές ζεύξεις	59
2.5β	Εξάρτηση του τοπικού μέσου όρου από την απόσταση	62
2.6	Απόκριση καναλιού στην παλμική διέγερση	63
2.6α	Η κατανομή της υστέρησης ισχύος	64
2.6β	Χαρακτηριστικά διάλειασης μεμονωμένων παλμών	65
2.6γ	Μέτρα της διασποράς χρονικής καθυστέρησης	66
2.6δ	Εύρος ζώνης συνοχής	69
2.7	Πολυδιάδοση σε κεραίες υπερυψωμένων σταθμών βάσης	71
2.8	Περίληψη	72
	Προβλήματα	72
	Αναφορές	74

3 Διάδοση, ανάκλαση και μετάδοση επίπεδων κυμάτων 79

3.1	Επίπεδα κύματα σε μη οριοθετημένη περιοχή	80
3.1α	Σημειογραφία φασισθετών	83
3.1β	Διάδοση πλάγια προς τους άξονες συντεταγμένων	84
3.1γ	Ταχεία διάλειαση λόγω ύπαρξης αρκετών επιπέδων κυμάτων	85
3.1δ	Συνάρτηση συσχέτισης και διασπορά Doppler	87
3.1ε	Διάλειαση σε υπερυψωμένους σταθμούς βάσης	89
3.2	Ανάκλαση επίπεδων κυμάτων σε σύνορα επιπέδων	90
3.2α	Ο νόμος του Snell	91
3.2β	Συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης στην πόλωση TE	92
3.2γ	Συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης για πόλωση TM	94
3.2δ	Απολαβή λόγω ύψους για κεραίες πάνω από το έδαφος	96
3.2ε	Ανάκλαση κυκλικά πολωμένων κυμάτων	98
3.3	Πρόσπτωση επίπεδων κυμάτων σε διηλεκτρικά στρώματα	100
3.3α	Ανάκλαση σε τοίχο από τούβλα	101
3.3β	Ανάκλαση σε τοίχους με απώλεια	103
3.3γ	Μετάδοση μέσω τοίχων ομοιόμορφης κατασκευής	106
3.3δ	Μετάδοση μέσω τοίχων και δαπέδων στο εσωτερικό κτιρίων	110

3.4	Περίληψη	111
	Προβλήματα	111
	Αναφορές	113

4 Κεραίες και ακτινοβολία 115

4.1	Ακτινοβολία σφαιρικών κυμάτων	116
4.2	Κεραίες λήψης, αμοιβαιότητα και απολαβή ή απώλεια διαδρομής	121
	4.2α Απολαβή ή απώλεια διαδρομής	122
	4.2β Ενεργός περιοχή κεραίας λήψης	124
	4.2γ Η λαμβανόμενη ισχύς σε πολυδιόδευση	127
4.3	Μοντέλα δύο ακτίνων για διάδοση πάνω από επίπεδη επιφάνεια εδάφους	128
	4.3α Απόσταση σημείων διακοπής	131
	4.3β Προσαρμογή παλινδρόμησης διπλής κλίσης	133
4.4	Διάδοση σε γραμμή οπτικής επαφής σε αστικό φαράγγι	134
4.5	Κυλινδρικά κύματα	138
4.6	Περίληψη	138
	Προβλήματα	139
	Αναφορές	140

5 Περίθλαση σε ακμές και γωνίες 141

5.1	Η τοπική φύση της διάδοσης	143
	5.1α Εκτίμηση της παραμόρφωσης πεδίου	144
	5.1β Εξήγηση της τοπικής περιοχής με τη βοήθεια των ζωνών Fresnel	146
5.2	Περίθλαση επίπεδου κύματος από απορροφητικό ημιδιάφραγμα	148
	5.2α Πεδίο στη φωτισμένη περιοχή $y > 0$	150
	5.2β Πεδίο στην περιοχή σκιάς $y < 0$	153
	5.2γ Γεωμετρική θεωρία της περίθλασης	154
	5.2δ Υπολογισμός του ολοκληρώματος Fresnel όταν το y είναι κοντά στο όριο σκιάς	154
	5.2ε Ομοιόμορφη Θεωρία Περίθλασης (ΟΘΠ)	156
5.3	Περίθλαση για άλλες ακμές και για πλάγια πρόσπτωση	158
	5.3α Απορροφητικό διάφραγμα	159
	5.3β Αγωγίμο διάφραγμα	160
	5.3γ Σφήνα ορθής γωνίας	161
	5.3δ Επίπεδα κύματα με διάδοση πλάγια προς την ακμή	163
5.4	Περίθλαση σφαιρικών κυμάτων	165
	5.4α Περίθλαση για ακτίνες προσπίπτουσες με σχεδόν ορθές γωνίες προς την ακμή	166
	5.4β Περίθλαση για ακτίνες που είναι πλάγιες στην ακμή	167
	5.4γ Απολαβή διαδρομής για ασύρματες εφαρμογές	170
5.5	Περίθλαση από πολλές ακμές	171
	5.5α Δύο παράλληλες ακμές	172
	5.5β Δύο κάθετες ακμές	174

5.6	Περίληψη	175
	Προβλήματα	176
	Αναφορές	179

6 Διάδοση κυμάτων σε επίπεδο έδαφος με κτίρια 181

6.1	Μοντελοποίηση διάδοσης πάνω από συστοιχίες χαμηλών κτιρίων	183
6.1α	Στοιχεία της απολαβής διαδρομής	183
6.1β	Η μοντελοποίηση του PG_2 με βάση την περίθλαση των πεδίων πάνω από τις στέγες κτιρίων	184
6.2	Προσεγγίσεις στον υπολογισμό της μείωσης PG_1 των πεδίων πάνω από οροφές	188
6.2α	Χρήση της οπτικής στον υπολογισμό της μείωσης του πεδίου	190
6.2β	Λύσεις για ομοιόμορφη απόσταση συστοιχιών και ομοιόμορφο ύψος κτιρίων	191
6.3	Πρόσπτωση επίπεδου κύματος για προβλέψεις μακροκυβελών	192
6.3α	Λύση με τις συναρτήσεις Borsma	193
6.3α	Χρήση του σταθεροποιημένου πεδίου για την εύρεση της απώλειας διαδρομής	197
6.4	Πρόσπτωση κυλινδρικού κύματος για προβλέψεις συστημάτων μικροκυβελών	200
6.4α	Λύση με τις συναρτήσεις Borsma	202
6.4β	Απώλεια διαδρομής για χαμηλές κεραίες σταθμού βάσης	205
6.4γ	Απώλεια διαδρομής για διάδοση μεταξύ κινητών	209
6.4δ	Διάδοση πλάγια στις συστοιχίες κτιρίων	211
6.5	Αριθμητικός υπολογισμός πεδίων για μεταβλητό ύψος και απόσταση κτιρίων	212
6.5α	Αποδισμός για τον τερματισμό της ολοκλήρωσης	213
6.5β	Διακριτοποίηση της ολοκλήρωσης	215
6.5γ	Πώς εξαρτάται από το ύψος το σταθεροποιημένο πεδίο	216
6.5δ	Επίδραση του σχήματος της στέγης	219
6.6	Περίληψη	221
	Προβλήματα	223
	Αναφορές	224

7 Η διάλειαση σκιάς και η επίδραση της μορφολογίας του εδάφους και των δένδρων 227

7.1	Στατιστική της διάλειασης σκιάς	227
7.1α	Μεταβολή των πεδίων στις στέγες	229
7.1β	Συνδυασμένες μεταβολές για το σήμα στο επίπεδο του δρόμου	232
7.2	Μοντελοποίηση της επίδρασης της μορφολογίας του εδάφους	233
7.2α	Διαδρομές με γραμμή οπτικής επαφής στις στέγες κοντά στον συνδρομητή	235
7.2β	Διαδρομές με περίθλαση πάνω από ακάλυπτους σφηνοειδείς λόφους	236

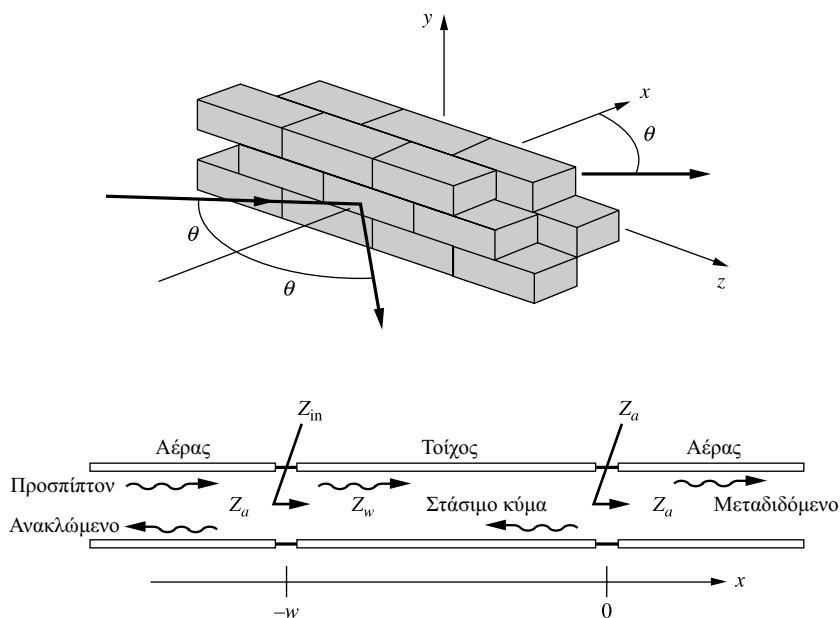
7.2γ	Διαδρομές με περίθλαση πάνω από ακάλυπτους κυλινδρικούς λόφους	240
7.2δ	Περίθλαση κυλινδρικών κυμάτων σε λόφους με κτίρια	242
7.2ε	Τύποι απώλειας διαδρομής για λόφους καλυμμένους από κτίρια	249
7.3	Μοντελοποίηση της επίδρασης των δένδρων	250
7.3α	Διάδοση σε συνδρομητές σε δασικές περιοχές	253
7.3β	Απώλεια διαδρομής σε συνδρομητές σε ξέφωτα δασών	256
7.3γ	Συστάδες δένδρων σε κατοικημένες περιοχές	258
7.4	Περίληψη	260
	Προβλήματα	262
	Αναφορές	265
8	Πρόβλεψη διάδοσης σε συγκεκριμένες τοποθεσίες	269
8.1	Προβλέψεις σε εξωτερικό χώρο με χρήση διδιάστατης βάσης δεδομένων κτιρίων	273
8.1α	Μέθοδος ειδώλων και μέθοδος εξισορρόπησης στρέβλωσης	274
8.1β	Συνεισφορές ακτίνων στη συνολική ισχύ	276
8.1γ	Σύγκριση προβλέψεων με μετρήσεις	279
8.2	Προβλέψεις σε δύο διαστάσεις για οδικό πλέγμα στο Μανχάταν	280
8.2α	Απώλεια διαδρομής κατά την στροφή σε μια γωνία	281
8.2β	Προβλέψεις με τη χρήση μεθόδων ακτίνων σε δύο διαστάσεις	285
8.3	Προβλέψεις σε εξωτερικούς χώρους με χρήση βάσεων δεδομένων κτιρίων σε 3Δ	287
8.3α	Μέθοδος εξισορρόπησης στρέβλωσης σε τρεις διαστάσεις	288
8.3β	Μέθοδος εκκίνησης από κατακόρυφο επίπεδο	289
8.3γ	Μέθοδος κεκλιμένου επιπέδου – κατακόρυφου επιπέδου	292
8.3δ	Προσομοίωση Monte Carlo για στατιστική μελέτης καναλιών ανώτερης τάξης	294
8.4	Προβλέψεις για συγκεκριμένες τοποθεσίες εσωτερικού χώρου	297
8.4α	Μετάδοση μέσα από πατώματα	300
8.4β	Επίδραση των επίπλων και της δομής της οροφής στη διάδοση πάνω από πατώματα	302
8.5	Περίληψη	305
	Προβλήματα	306
	Αναφορές	307
	Ευρετήριο	311

λήψης μπορούμε να μειώσουμε την παρεμβολή που προκαλείται από σήματα που υφίστανται μια απλή ανάκλαση.

3.3 Πρόσπτωσηση επίπεδων κυμάτων σε διηλεκτρικά στρώματα

Μερικοί τοίχοι και δάπεδα αποτελούνται από ένα ή περισσότερα διηλεκτρικά στρώματα, όπως στην περίπτωση του τοίχου από τούβλα στην Εικόνα 3.14. Όταν οι όψεις του διηλεκτρικού υλικού είναι παράλληλες μεταξύ τους, όπως στην Εικόνα 3.14, η διαδοχική εφαρμογή του νόμου του Snell σε κάθε σύνορο δείχνει ότι ο κυματικός αριθμός παράλληλα στα σύνορα θα πρέπει να είναι όμοιος σε κάθε στρώμα. Συνεπώς στην Εικόνα 3.14, αν το προσπίπτον κύμα ταξιδεύει παράλληλα με το οριζόντιο επίπεδο και σχηματίζει γωνία θ με την κάθετο, το κύμα, το οποίο μεταδίδεται στον αέρα από την άλλη πλευρά του τοίχου, θα διαδίδεται επίσης παράλληλα με το οριζόντιο επίπεδο σε γωνία θ προς την κάθετο. Για να βρούμε το μέρος της ισχύος που ανακλάται και μεταδίδεται στον τοίχο, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το ανάλογο της γραμμής μετάδοσης, το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 3.14.

Λόγω της μη ταύτισης της εμπέδησης στο $x = 0$ και στο $x = -w$, θα σχηματιστούν στατικά κύματα μέσα στον τοίχο. Όλες οι ποσότητες του πεδίου θα έχουν την ίδια εγκάρσια μεταβολή $\exp(-jk_z \sin \theta)$. Αν αγνοήσουμε τον παράγοντα αυτόν για οποιαδήποτε από τις δύο πολώσεις, οι εγκάρσιες συνιστώσες του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου στον τοίχο θα εξαρτώνται από το x , όπως δείχνουν οι σχέσεις:



Εικόνα 3.14 Τοίχος από τούβλα, τον οποίο εξετάζουμε με την προσέγγιση της γραμμής μετάδοσης για να υπολογίσουμε τα ανακλώμενα και μεταδιδόμενα κύματα. Οι εμπεδήσεις είναι εκείνες της περίπτωσης TE ή TM, ανάλογα με την πόλωση του προσπίπτοντος κύματος.

$$V(x) = V^+ e^{-j\beta_w x} + V^- e^{+j\beta_w x} \quad (3-49)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_w} (V^+ e^{-j\beta_w x} - V^- e^{+j\beta_w x}) \quad (3-50)$$

αντίστοιχα. Εδώ τα V^+ και V^- είναι τα πλάτη της εγκάρσιας συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου για τα κύματα που ταξιθεύουν στις θετικές και τις αρνητικές κατευθύνσεις του άξονα x , αντίστοιχα, το $\beta_w = k_w \cos \theta_w$ είναι ο κυματικός αριθμός κατά μήκος του x στον τοίχο, και Z_w είναι η κυματική εμπεδήση του τοίχου, είτε για πόλωση TE είτε για πόλωση TM. Ο λόγος της τάσης προς το ρεύμα δίνει την εμπεδήση $Z(x)$ που εξαρτάται από το x και παρατηρείται κατά μήκος του τμήματος της γραμμής μετάδοσης:

$$Z(x) = \frac{V(x)}{I(x)} = Z_w \frac{V^+ e^{-j\beta_w x} + V^- e^{+j\beta_w x}}{V^+ e^{-j\beta_w x} - V^- e^{+j\beta_w x}} \quad (3-51)$$

Στον κόμβο $x = 0$, η εμπεδήση της (3-51) πρέπει να είναι ίση με την εμπεδήση φόρτου Z_L , που παρατηρείται προς τα δεξιά. Στην Εικόνα 3.14, αυτή η εμπεδήση φόρτου είναι απλώς η εμπεδήση του αέρα Z . Συνεπώς, αν υπολογίσουμε την εμπεδήση της Σχέσης (3-51) στο $x = 0$ και τη θεωρήσουμε ίση με τη Z_L , μπορούμε να επιλύσουμε για V^- συναρτήσει του V^+ ώστε να καταλήξουμε σε:

$$V^- = V^+ \frac{Z_L - Z_w}{Z_L + Z_w} \quad (3-52)$$

Αν αντικαταστήσουμε τη Σχέση (3-52) στην (3-51) και υπολογίσουμε την (3-51) στο $x = -w$, μετά από κάποιες πράξεις, η εμπεδήση εισόδου που παρουσιάζεται στον τοίχο βρίσκεται ότι είναι:

$$Z_{in} = Z(-w) = Z_w \frac{Z_L (e^{+j\beta_w w} + e^{-j\beta_w w}) + Z_w (e^{+j\beta_w w} - e^{-j\beta_w w})}{Z_w (e^{+j\beta_w w} + e^{-j\beta_w w}) + Z_L (e^{+j\beta_w w} - e^{-j\beta_w w})} \quad (3-53)$$

Η διατύπωση στην (3-53) είναι χρήσιμη όταν το υλικό του τοίχου παρουσιάζει απώλειες, αλλά για διηλεκτρικά χωρίς απώλειες η εμπεδήση εισόδου μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει τριγωνομετρικών συναρτήσεων:

$$Z_{in} = Z_w \frac{Z_L \cos \beta_w w + j Z_w \sin \beta_w w}{Z_w \cos \beta_w w + j Z_L \sin \beta_w w} \quad (3-54)$$

3.3α Ανάκλαση σε τοίχο από τούβλα

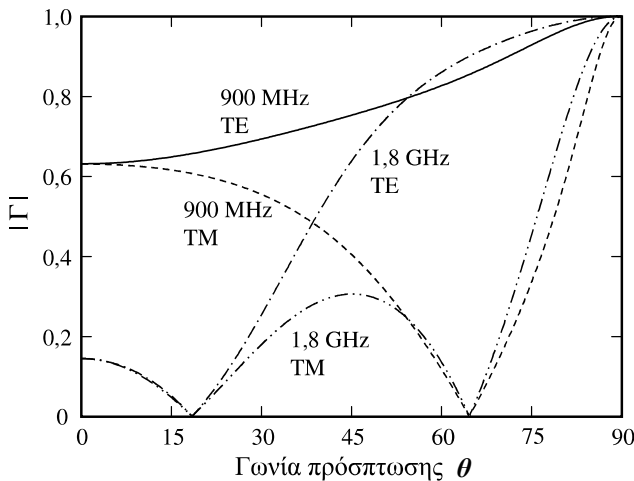
Με την προηγούμενη παράσταση για την εμπέδηση εισόδου, ο συντελεστής ανάκλασης Γ του τοίχου, δηλαδή ο λόγος των εγκάρσιων συνιστωσών του ηλεκτρικού πεδίου των ανακλώμενων και των προσπιπόντων κυμάτων, δίνεται από τη σχέση:

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z}{Z_{in} + Z} \quad (3-55)$$

όπου Z είναι η κυματική εμπέδηση TE ή TM για τον αέρα. Το κλάσμα της προσπίπτουσας ισχύος που ανακλάται είναι ίσο με $|\Gamma|^2$, και αν δεν εμφανίζεται καμία απώλεια μέσα στον τοίχο, το κλάσμα της ισχύος που μεταδίδεται στον αέρα, στην άλλη πλευρά του τοίχου, ισούται με $1 - |\Gamma|^2$. Αν υπάρχει απώλεια, πρέπει να ληφθεί υπόψη η εξασθένιση των πεδίων μέσα στον τοίχο κατά τον υπολογισμό της μεταδιδόμενης ισχύος.

Από τη Σχέση (3-54) παρατηρούμε δύο ειδικές περιπτώσεις για τις οποίες δεν υπάρχει ανακλώμενο κύμα από τον τοίχο ($\Gamma = 0$). Να σημειωθεί ότι για τον αέρα στην άλλη πλευρά του τοίχου, ισχύει ότι $Z_L = Z$. Τότε, για πόλωση TM και πρόσπτωση με γωνία Brewster θ_B , η εμπέδηση Z_w του υλικού του τοίχου θα είναι ίση με τη Z του αέρα. Στην περίπτωση αυτή, η (3-54) γράφεται πιο απλά ως $Z_{in} = Z$, και από την (3-55) προκύπτει ότι $\Gamma = 0$. Η δεύτερη περίπτωση ισχύει και στις δύο πολώσεις και συμβαίνει όταν η συχνότητα και η γωνία πρόσπτωσης είναι τέτοιες ώστε η μετατόπιση φάσης $\beta_w w$ να είναι πολλαπλάσια του π . Τότε $\sinh \beta_w w = 0$, και πάλι στην (3-43) ισχύει ότι $Z_{in} = Z$, οπότε από την (3-55), προκύπτει ότι $\Gamma = 0$.

Στην Εικόνα 3.15 φαίνεται μια γραφική παράσταση του $|\Gamma|$ ως συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης θ τόσο για πολωμένα κύματα TE όσο και για TM, τα οποία ανακλώνται από έναν τοίχο πάχους $w = 20\text{cm}$, με μια σχετική διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 4,44$ και συχνότητες 900 MHz και 1800 MHz. Για $\theta = 0$ υπάρχει πεπερασμένη ανάκλαση, η οποία είναι ίδια και για τις δύο πολώσεις, ενώ στις 90° γίνεται ολική ανάκλαση σε όλες τις περιπτώσεις. Η συμπεριφορά αυτή στις δύο περιοριστικές γωνίες είναι ίδια για όλα τα είδη κατασκευής τοίχων. Για την πόλωση TM, η συνθήκη της γωνίας Brewster $\theta_B = 64,6^\circ$ προκαλεί το μηδενισμό του συντελεστή ανάκλασης και για τις δύο συχνότητες, όπως σημειώθηκε παραπάνω. Στα 1800 MHz υπάρχει μια πρόσθετη σύμπτωση εμπεδήσεων και για τις δύο πολώσεις όταν $\theta \approx 18^\circ$, επειδή εκεί $\beta_w w = 5\pi$, και ο συντελεστής ανάκλασης μηδενίζεται, όπως είδαμε παραπάνω. Επειδή στο TM-πολωμένο κύμα των 1800 MHz το Γ μηδενίζεται δύο φορές στις 18° και τις 65° περίπου, το μέγεθος του είναι μικρό μεταξύ των γωνιών αυτών.



Εικόνα 3.15 Τιμή του συντελεστή ανάκλασης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης σε έναν τοίχο από τούβλα πάχους 20 cm ($\epsilon_w = 4,44$) στα 900 MHz και στα 1800 MHz για πολώσεις TE και TM.

3.3β Ανάκλαση σε τοίχους με απώλεια

Στην περίπτωση όπου το υλικό του τοίχου ευνοεί τις απώλειες, η εμπίεση εισόδου πρέπει να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη το ϵ_r'' . Για να γίνει αυτό, παρατηρούμε ότι ο κυματικός αριθμός του μέσου, που δίνεται από την:

$$k_w = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_r' - \epsilon_r''} \quad (3-56)$$

έχει θετικό πραγματικό μέρος και αρνητικό φανταστικό μέρος. Από τη Σχέση (3-31), ο κυματικός αριθμός στην κατεύθυνση που είναι κάθετη στο σύνορο (η κατεύθυνση της γραμμής μετάδοσης) είναι τότε μιγαδικός:

$$\beta_w = k \sqrt{\epsilon_r' - j\epsilon_r'' - \sin^2 \theta} \equiv \kappa_w - j\alpha_w \quad (3-57)$$

με θετικό πραγματικό μέρος και αρνητικό φανταστικό μέρος. Οι κυματικές εμπεδήσεις που ορίστηκαν στις Σχέσεις (3-32) και (3-39) έχουν επίσης μιγαδικές τιμές:

$$Z_w^{TE} = \frac{\eta}{\sqrt{\epsilon'_r - j\epsilon''_r - \sin^2 \theta}} \quad (3-58)$$

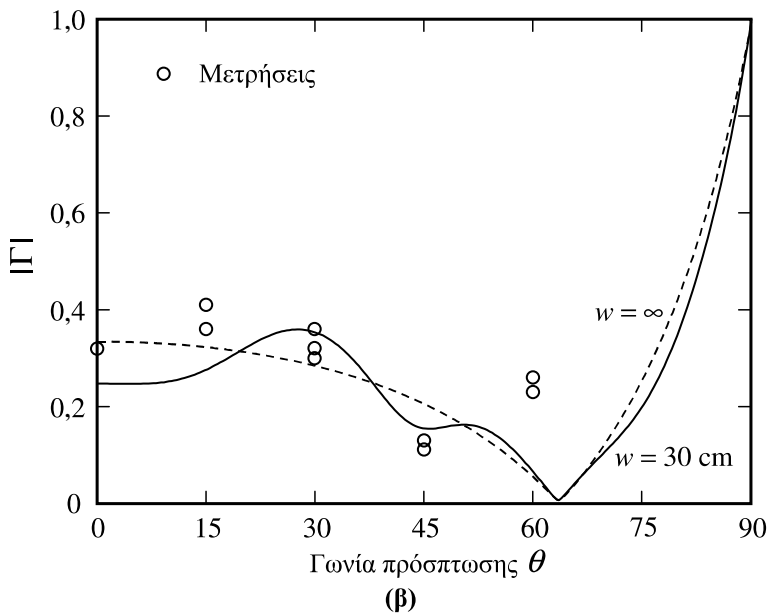
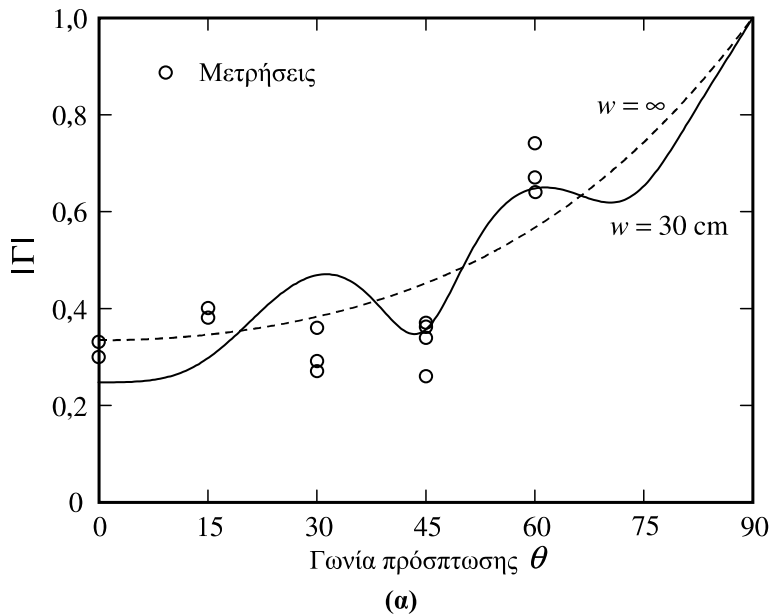
$$Z_w^{TE} = \frac{\eta}{\epsilon'_r - j\epsilon''_r} \sqrt{\epsilon'_r - j\epsilon''_r - \sin^2 \theta} \quad (3-59)$$

Αν η Σχέση (3-57) χρησιμοποιηθεί στην παράσταση (3-53), η εμπέδηση Z_{in} σε έναν τοίχο με απώλειες είναι:

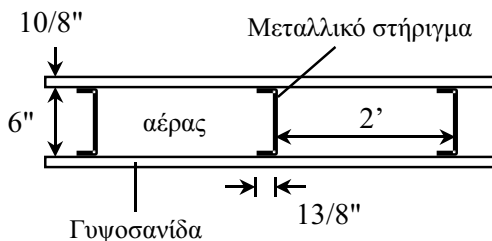
$$Z_{in} = Z_w \frac{Z_L(e^{jk_w w} e^{a_w w} + e^{-jk_w w} e^{-ja_w w}) + Z_w(e^{jk_w w} e^{a_w w} + e^{-jk_w w} e^{-ja_w w})}{Z_w(e^{jk_w w} e^{a_w w} + e^{-jk_w w} e^{-ja_w w}) + Z_L(e^{jk_w w} e^{a_w w} + e^{-jk_w w} e^{-ja_w w})} \quad (3-60)$$

Όταν το πάχος του τοίχου είναι τέτοιο ώστε $a_w w \geq 1$, ο πρώτος όρος σε κάθε ζευγάρι παρενθέσεων στη Σχέση (3-60) είναι μεγαλύτερος από το δεύτερο όρο, επομένως η (3-48) ανάγεται στην $Z_{in} \approx Z_w$. Με άλλα λόγια, η απώλεια αμβλύνει τις πολλαπλές ανακλάσεις μέσα στον τοίχο, με αποτέλεσμα το προσπίπτον κύμα να αντιλαμβάνεται τον τοίχο ως απείρως παχύ. Για να δείξουμε το φαινόμενο της απώλειας μέσα στον τοίχο, έχουμε υπολογίσει το συντελεστή ανάκλασης ως συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης στα 4 GHz, υποθέτοντας ότι $\epsilon_r = 4 - j0,1$. Οι παραστάσεις (3-33) και (3-40) χρησιμοποιήθηκαν για την περίπτωση ενός ημιχώρου ($w \rightarrow \infty$) και η (3-60) χρησιμοποιήθηκε για έναν τοίχο πάχους $w = 30$ cm. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών από τις δύο πολώσεις φαίνονται στην Εικόνα 3.16, από την οποία μπορούμε να δούμε ότι τα στατικά κύματα μέσα στον τοίχο είναι ισχυρά εξασθενημένα, οπότε η τιμή του $|\Gamma|$ για τοίχο πεπερασμένου πάχους παρουσιάζει μόνο μια μικρή ταλάντωση γύρω από την καμπύλη για ένα διηλεκτρικό ημιχώρο.

Έχουν αναφερθεί λίγες μετρήσεις συντελεστών ανάκλασης για τοίχους. Στην Εικόνα 3.16 έχουν απεικονιστεί τα αποτελέσματα ενός συνόλου μετρήσεων στα 4 GHz που πραγματοποιήθηκαν σε ένα μεγάλο τοίχο από τούβλα χωρίς παράθυρα με χρήση κατευθυντικών κεραιών [7] και για τις δύο πολώσεις (TE και TM). Είναι δύσκολο να συγκρίνουμε αυτά τα αποτελέσματα με τη θεωρία, μιας και το πάχος του τοίχου, η πραγματική κατασκευή πίσω από το πρώτο στρώμα τούβλων, και το εσωτερικό τελείωμα δεν είναι γνωστά. Και τα δύο μοντέλα για έναν τοίχο πεπερασμένου πάχους και ένα διηλεκτρικό ημιχώρο συμφωνούν εν γένει με τις μετρήσεις. Η ομοιότητα των συντελεστών ανάκλασης για τους τοίχους πεπερασμένου πάχους και το διηλεκτρικό ημιχώρο είναι σημαντική για μοντέλα χωρικά προσδιορισμένης πρόβλεψης διάδοσης, όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 6.



Εικόνα 3.16 Μετρηθείσες και θεωρητικές τιμές του $|\Gamma|$ συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης σε έναν τοίχο από τούβλα για 4 GHz και (α) πόλωση TE, (β) πόλωση TM. Οι μετρήσεις που αναφέρθηκαν στο [7] έχουν σχεδιαστεί εκ νέου για λόγους σύγκρισης με υπολογισμούς στους οποίους θεωρείται ότι $\epsilon_w' = 4$, $\epsilon_w'' = 0,1$ για τοίχο πάχους $w = 30$ cm (αναπαριστάνονται από τις συνεχείς καμπύλες) και για ένα διηλεκτρικό ημιχώρο (απεικονίζονται από διακεκομμένες καμπύλες).



Εικόνα 3.17 Διαστάσεις για τοίχο από γυψοσανίδες στερεωμένες πάνω σε μεταλλικά στηρίγματα [16] (©1994 IEEE).

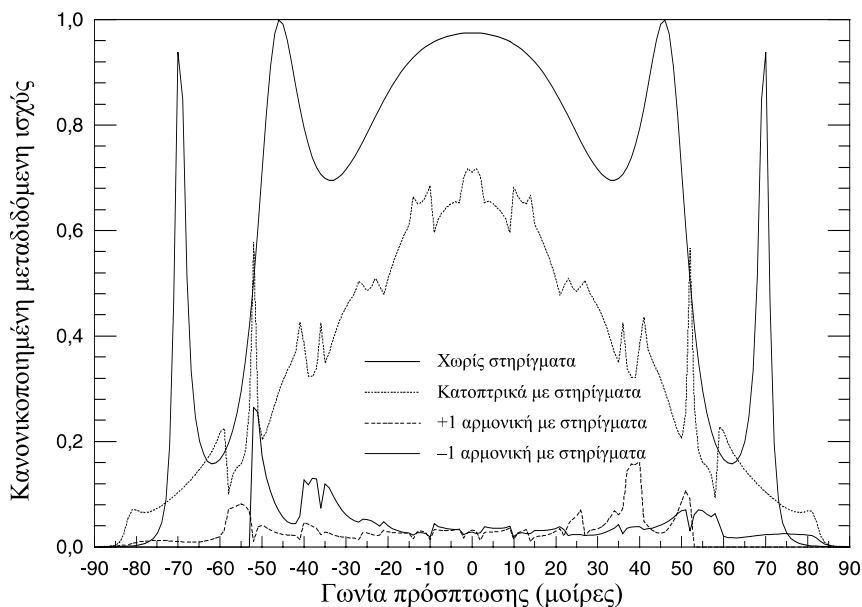
3.3γ Μετάδοση μέσω τοίχων ομοιόμορφης κατασκευής

Μερικοί ερευνητές έχουν αναφέρει τη χρήση κατευθυντικών κεραιών για την μέτρηση της απώλειας μετάδοσης μέσω ομοιόμορφων τοίχων [5,15,16]. Το πιο σύνηθες είδος κατασκευής εσωτερικού τοίχου αποτελείται από στρώματα γυψοσανίδων τοποθετημένα εκατέρωθεν μεταλλικών στηριγμάτων, όπως φαίνεται στην τομή της Εικόνας 3.17 για έναν τοίχο κατασκευασμένο με διπλή στρώση γυψοσανίδων. Αν αγνοηθούν τα μεταλλικά στηρίγματα, η ανάκλαση από αυτόν τον τοίχο αναλύεται με συνάθροιση (στοίβαξη) του μετασχηματισμού εμπέδησης της (3-54) μέσω ενός στρώματος γυψοσανίδων, κατόπιν μέσω του κενού αέρα ανάμεσα στα στρώματα, και τέλος μέσω του δεύτερου στρώματος γυψοσανίδων. Το κλάσμα $1-|\Gamma|^2$ της προσπίπτουσας ισχύος με πόλωση TE που μεταδίδεται μέσω του τοίχου της Εικόνας 3.17 απεικονίζεται στην Εικόνα 3.18 με την ενιαία καμπύλη ως συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης για 2,4 GHz.

Στις σύγχρονες κατασκευές, τα μεταλλικά στηρίγματα είναι συνήθως από χάλυβα. Έχει πραγματοποιηθεί και μια πιο πολύπλοκη ανάλυση [16], η οποία περιλαμβάνει τη σκέδαση από τα χαλύβδινα στηρίγματα. Τα αποτελέσματα για τη μεταδιδόμενη ισχύ φαίνονται και αυτά στην Εικόνα 3.18. Παρατηρείται ότι τα στηρίγματα μειώνουν τη μετάδοση κατά έναν παράγοντα 0,7 ως 0,6 (1,5 ως 2,2 dB) σε κάθετη πρόσπτωση και μειώνουν σημαντικά τις εξάρσεις στις $\pm 50^\circ$ και $\pm 70^\circ$, οι οποίες προκαλούνται από πολλαπλές ανακλάσεις μεταξύ των δύο στρωμάτων γυψοσανίδων. Επειδή τα στηρίγματα δημιουργούν μια περιοδική δομή, σαν φράγμα περίθλασης, μπορεί να γίνεται επιπλέον σκέδαση σε τάξεις περίθλασης. Η ισχύς που μεταδίδεται μέσα στις πρώτες τάξεις είναι επίσης σχεδιασμένη στην Εικόνα 3.18 και φαίνεται ότι είναι γενικά μικρή. Οι καμπύλες δεν παρουσιάζουν συμμετρία γύρω από την ευθεία $\theta = 0$ λόγω του μη συμμετρικού σχήματος των στηριγμάτων. Και πάλι, από αυτές τις καμπύλες διαπιστώνουμε ότι γίνεται ολική ανάκλαση καθώς το θ προσεγγίζει τις 90° .

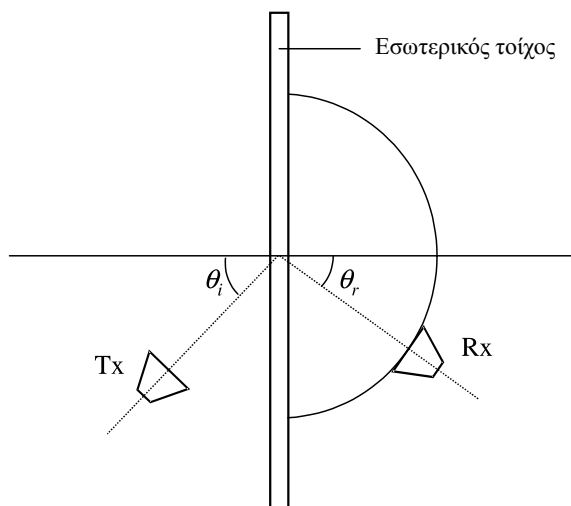
Η μέτρηση της μετάδοσης μέσω τοίχων μπορεί να πραγματοποιηθεί με κατευθυντικές κεραιές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.19. Μια χοανοειδής κεραία κατευθύνει ακτινοβολία στον τοίχο κατά μήκος ενός άξονα που σχηματίζει γωνία θ_i με την κάθετο και βρίσκεται στο οριζόντιο επίπεδο. Για να υπολογίσουμε τη σκέδαση από τα μεταλλικά στηρίγματα, η χοάνη λήψης κατευθύνεται στην αντίθετη πλευρά του τοίχου και ο άξονας σαρώνεται μέσω γωνιών θ_r στο οριζόντιο επίπεδο. Στην Εικόνα 3.20 φαίνονται τα αποτελέσματα τέτοιων μετρήσεων στα 2,6 GHz για κάθετη πρόσπτωση πάνω σε

τοίχο ο οποίος έχει τις διαστάσεις που αναφέρονται στην Εικόνα 3.17 [16]. Σε αυτή τη γραφική παράσταση, η λαμβανόμενη ισχύς είναι κανονικοποιημένη στην τιμή που βρέθηκε όταν οι δύο χοάνες αντικρίζουν η μία την άλλη στον αέρα και απέχουν συνολικά την ίδια απόσταση. Αν και για μεγάλες γωνιακές μετατοπίσεις θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι συναρτήσεις χοανοειδών προτύπων, για μικρές γωνίες η κανονικοποιημένη ληφθείσα ισχύς προσεγγίζει την απώλεια μετάδοσης επιπέδου κύματος σε κάθετη πρόσπτωση, η οποία είναι μερικά decibel. Χοάνες τυπικής απολαβής με εύρος δέσμης περίπου 30° ήταν τοποθετημένες σε ακτινική απόσταση 3,5 m από το σημείο στόχευσης στον τοίχο, συνεπώς το φωτιζόμενο σημείο ήταν ευρύτερο από την απόσταση μεταξύ των μεταλλικών στηριγμάτων. Από την Εικόνα 3.20 προκύπτει ότι δεν παρουσιάζεται καμία συστηματική διαφορά όταν το σημείο στόχευσης τοποθετείται σε ένα από τα μεταλλικά στηρίγματα ή ενδιάμεσα σε αυτά. Στην ίδια εικόνα υπάρχουν και τα αντίστοιχα θεωρητικά αποτελέσματα τόσο για την περίπτωση που συμπεριλαμβάνονται τα μεταλλικά στηρίγματα (μη συμμετρική καμπύλη με διαλείψεις), όσο και για την περίπτωση στην οποία παραλείπονται (ομαλή συμμετρική καμπύλη), λαμβάνοντας υπόψη τις συναρτήσεις μορφής για τις δύο χοάνες. Σε γενικές γραμμές, η θεωρία, είτε περιλαμβάνονται τα μεταλλικά στηρίγματα είτε όχι, συμπίπτει με τις μετρήσεις για $|\theta_r| < 60^\circ$, αλλά σε μεγαλύτερες γωνίες μετρίεται μεγαλύτερη σκέδαση από αυτήν που προβλέπεται. Για πλάγια πρόσπτωση με $\theta_i = 30^\circ$ παρατηρήθηκε παρόμοια συμφωνία μεταξύ μετρήσεων και θεωρίας εντός $\pm 60^\circ$ από τον άξονα δέσμης, αλλά η μετρούμενη σκέδαση ήταν ισχυρότερη εκτός της κύριας δέσμης [16].

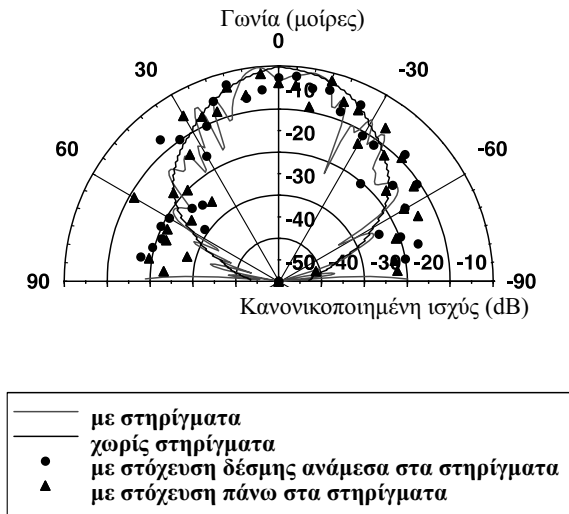


Εικόνα 3.18 Κλάσμα της προσπίπτουσας ισχύος που μεταδίδεται μέσω τοίχου από γυσοσανίδες στα 2,4 GHz υπολογισμένο με και χωρίς μεταλλικά στηρίγματα. Επίσης έχει παρασταθεί γραφικά και το μέρος της ισχύος που μεταδίδεται μέσα στις τάξεις πρώτης τάξης περιθλάσης, ενώ έχει ληφθεί υπόψη η ύπαρξη στηριγμάτων. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει για τις διαστάσεις της Εικόνας 3.17 [16] (©1994 IEEE).

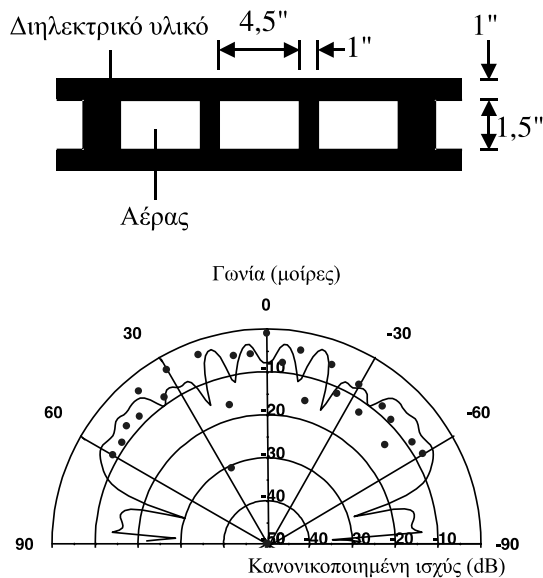
Μερικοί τοίχοι είναι κατασκευασμένοι από μπλοκ σκυροδέματος, των οποίων οι ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες γίνονται πολύπλοκότερες λόγω της ύπαρξης εσωτερικών δικτύων και κενών που παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.21. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο τοίχος να συμπεριφέρεται ως περιοδική δομή [15,16], όπως ένα φράγμα περίθλασης. Για κοινά μπλοκ σκυροδέματος, η περιοδικότητα θα δημιουργήσει κύματα που έχουν υποστεί περίθλαση (λοβούς φράγματος περίθλασης) όταν η συχνότητα είναι κοντά ή πάνω από τα 1800 MHz. Σε χαμηλότερες συχνότητες υφίστανται μόνο κατοπτρικά ανακλώμενα και μεταδιδόμενα κύματα. Τα μεγέθη τους μπορούν να βρεθούν κατά προσέγγιση αν θεωρήσουμε μια ισοδύναμη ομογενή διηλεκτρική σταθερά, η οποία είναι ο σταθμισμένος μέσος των διηλεκτρικών σταθερών στον πραγματικό τοίχο [17]. Έγιναν μετρήσεις όπως αυτές που υποδεικνύει η Εικόνα 3.19 στα 2,6 GHz σε ξηρό εσωτερικό τοίχο που κατασκευάστηκε από τα μπλοκ της Εικόνας 3.21 [16]. Στην εικόνα αυτή φαίνονται και τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Διαπιστώνεται ότι η εσωτερική δομή των μπλοκ σκεδάζει τη μεταδιδόμενη ισχύ κάπως ομοιόμορφα σε όλο το εύρος μετρήσεων των 120° . Η θεωρητική ανάλυση είναι εφικτή, αν προσεγγίσουμε τον τοίχο που αποτελείται από αυτά τα μπλοκ με μια κανονική περιοδική δομή [15,16], τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.21 και φαίνεται ότι γενικά συμφωνούν με τις μετρήσεις. Οι τοίχοι από μπλοκ σκυροδέματος, τα ξύλινα δάπεδα με υποστηρίγματα, και τα προκατασκευασμένα δάπεδα από σκυρόδεμα αποτελούν παραδείγματα πολυστρωματικών περιοδικών διηλεκτρικών δομών που μπορούν να αναλυθούν με τις ακριβείς διαδικασίες που περιγράφονται στη βιβλιογραφική αναφορά [18], ωστόσο ξεφεύγουν από τη θεματολογία αυτού του βιβλίου.



Εικόνα 3.19 Χοανοειδείς κεραίες που χρησιμοποιούνται για μέτρηση των ιδιοτήτων μετάδοσης εσωτερικών τοίχων.



Εικόνα 3.20 Μετρηθείσες και προσομοιωμένες τιμές της λαμβανόμενης ισχύος, με εφαρμογή της προσέγγισης της Εικόνας 3.19 για κάθετη πρόσπτωση σε τοίχο από γυψοσανίδες στα 2,6 GHz. Οι διαστάσεις του τοίχου είναι όμοιες με εκείνες της Εικόνας 3.17 [16] (©1994 IEEE).



Εικόνα 3.21 Διαστάσεις τοίχου από μπλοκ σκυροδέματος, και η μετρούμενη και υπολογισμένη λαμβανόμενη ισχύς στα 2,6 MHz, με χρήση χοανοειδών κεραιών, όπως δείχνει η Εικόνα 3.19 [16] (©1994 IEEE).

3.35 Μετάδοση μέσω τοίχων και δαπέδων στο εσωτερικό κτιρίων

Στην πράξη, στην κατασκευή τοίχων και δαπέδων γίνεται χρήση διαφόρων στρωμάτων για να παρέχεται μόνωση και για να εμποδίζουν την υγρασία. Στους εξωτερικούς τοίχους κάποιων κτιρίων χρησιμοποιούνται εξαιρετικά ανακλαστικά στρώματα, όπως επιστρώσεις από αλουμίνιο και/ή μόνωση με επικάλυψη αλουμινίου για να εμποδίζονται οι υδρατμοί. Οι τοίχοι γίνονται ακόμα πιο σύνθετοι λόγω της ύπαρξης παραθύρων, θυρών, δοκών υποστήριξης, και επίπλων που είναι τοποθετημένα στα παράθυρα και πάνω ή μπροστά σε αυτούς. Και τα δάπεδα έχουν υποστηρικτικές δοκούς, όπως και αναρτημένους αεραγωγούς, στερεωμένα φωτιστικά κ.ο.κ. Σε κάποιες περιπτώσεις, αυτά τα χαρακτηριστικά ίσως είναι πιο σημαντικά από την ίδια την κατασκευή του τοίχου ή του δαπέδου και ποικίλλουν εντυπωσιακά.

Για να συνυπολογιστούν κατά μέσο όρο αυτά τα πολύπλοκα χαρακτηριστικά, έχουν πραγματοποιηθεί μετρήσεις σε κατοικημένα κτίρια. Η εκτίμηση της απώλειας μετάδοσης μέσω των εξωτερικών τοίχων επιτυγχάνεται με σύγκριση της ισχύος που λαμβάνει μια δίπολη κεραία, όταν τοποθετείται μπροστά από ένα μεμονωμένο κτίριο και όταν τοποθετείται μέσα στο κτίριο. Οι απώλειες από τους εσωτερικούς τοίχους και τα δάπεδα υπολογίζονται από τη λαμβανόμενη ισχύ όταν είναι τοποθετημένες δίπολες κεραίες εκπομπής και δίπολες κεραίες λήψης σε διαφορετικά δωμάτια ή σε διαφορετικούς ορόφους. Οι μετρήσεις απώλειας διείσδυσης στα 800 MHz σε απομονωμένα κτίρια κυμαίνονταν μεταξύ 4–7dB [19], ενώ στα μεταλλικά κτίρια η απώλεια έφτανε ως και τα 24dB [20]. Σε εσωτερικούς τοίχους από μπλοκ σκυροδέματος η απώλεια μετάδοσης μετρήθηκε από 1,5 ως 2,4 dB στα 900 MHz [21,22]. Με παρόμοιες μετρήσεις στα 5,85 GHz βρέθηκαν απώλειες μετάδοσης 14,5dB και 8,8 dB σε εξωτερικούς τοίχους με επιστροφή τούβλων και ξύλου, αντίστοιχα, και 4,7 dB σε εσωτερικούς τοίχους [23].

Έχουν πραγματοποιηθεί μετρήσεις απώλειας διείσδυσης σε μεμονωμένα προαστιακά κτίρια γραφείων σε εσωτερικές τοποθεσίες, στις οποίες τα κύματα φθάνουν μετά από μετάδοση μέσω ενός εξωτερικού τοίχου και ενός ή περισσότερων εσωτερικών τοίχων [24]. Η μέση απώλεια για 10 τέτοια κτίρια καταγράφηκε στα 10,8 dB στα 900 MHz και 10,2 dB στα 1500 MHz [24]. Η απώλεια διείσδυσης είναι περίπου όμοια σε όλους τους ορόφους πάνω από τον πρώτο όροφο, ο οποίος συνήθως είναι ένας ανοιχτός χώρος υποδοχής. Όταν οι μετρήσεις απώλειας διείσδυσης πραγματοποιούνται μέσα σε κτίρια γραφείων που βρίσκονται σε συνωστισμένο αστικό περιβάλλον, η «σκίαση» από τα περιβάλλοντα κτίρια έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη απώλεια διείσδυσης στον πρώτο όροφο και σημαντικά χαμηλότερη απώλεια στους υψηλότερους ορόφους [25]. Στην κλίμακα συχνοτήτων που εκτείνεται λίγο κάτω από τα 100 MHz ως περίπου τα 2 GHz, η απώλεια διείσδυσης σε κτίρια γραφείων μειώνεται αναλογικά με τη συχνότητα [24,25]. Αυτή η εξάρτηση από τη συχνότητα μπορεί να υφίσταται λόγω του γεγονότος ότι το κύμα διαδίδεται μέσω ανοιγμάτων, όπως είναι τα παράθυρα, αντί μέσω του τοίχου, με αποτέλεσμα πεδία με χαμηλότερο μήκος κύματος να τα διαδίδονται καλύτερα. Δεν είναι γνωστό αν αυτή η τάση θα συνεχιστεί για συχνότητες πάνω από 2 GHz.

Τα δάπεδα των μοντέρνων κτιριακών χώρων γραφείων και εμπορικών χώρων είναι κατασκευασμένα από χυτό σκυρόδεμα και μπορεί να διαθέτουν χαλύβδινες ράβδους υποστήριξης ή μπορεί το σκυρόδεμα να έχει χυτευθεί σε αυλακωτά ατσάλινα καλούπια τα οποία παραμένουν εκεί. Στην πρώτη περίπτωση οι ενισχυτικές ράβδοι μπορεί να απέχουν 20 cm ή και περισσότερο και δεν σκεδάζουν ισχυρά τα πεδία. Ωστόσο τα αυλακωτά ατσάλινα καλούπια που παραμένουν στη θέση τους θα είναι πολύ ανακλαστικά. Τα προκατασκευασμένα δάπεδα από σκυρόδεμα περιέχουν και ενισχυτικές ράβδους και κενούς χώρους. Η απώλεια μετάδοσης μέσω δαπέδων από σκυρόδεμα χωρίς ατσάλινες κοιλότητες έχει μετρηθεί στα 13 dB [22]. Σε ψηλά κτίρια διαπιστώνουμε ότι η απώλεια μετάδοσης δεν αυξάνεται γραμμικά ανάλογα με τον αριθμό ορόφων μεταξύ πομπού και δέκτη [22]. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στην παρουσία άλλων διαδρομών από τις οποίες μπορεί να μεταφερθεί το σήμα από τον πομπό στον δέκτη, όπως θα μελετήσουμε στο Κεφάλαιο 8.

3.4 Περίληψη

Τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία σε μικρές περιοχές που περιβάλλουν μεμονωμένες διαδρομές ακτινών είναι κατά προσέγγιση όπως εκείνα ενός επίπεδου κύματος. Επομένως, η μελέτη της διάδοσης των επιπέδων κυμάτων μπορεί να μας βοηθήσει να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά των περισσότερο περίπλοκων κυμάτων. Για παράδειγμα, τα πρότυπα παρεμβολής και τα σχετικά φαινόμενα, παραγόμενα από πολυδιαδικές αφίξεις, μπορούν να μοντελοποιηθούν με υπέρθεση επιπέδων κυμάτων. Στα επόμενα κεφάλαια, ο νόμος του Snell και οι συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης, οι οποίοι βρέθηκαν για τα επίπεδα κύματα, χρησιμοποιούνται επίσης και για σφαιρικά κύματα που εκπέμπονται από κεραίες για να ερμηνευθούν οι αλληλεπιδράσεις με το έδαφος και τους τοίχους. Κατά τη μοντελοποίηση της διάδοσης σε πόλεις, θα διαπιστώσουμε ότι είναι ιδιαίτερα σημαντικό ο συντελεστής ανάκλασης να είναι πεπερασμένος σε κάθετη πρόσπτωση, και να πλησιάζει τη μονάδα σε παρεκκλίνουσα πρόσπτωση ανεξάρτητα από την κατασκευή του τοίχου ή την πόλωση.

Προβλήματα

3.1 Υποθέτουμε ότι $f = 2,4$ GHz.

- (α) Βρείτε τον κυματικό αριθμό k_d , το μήκος κύματος λ_d και την εμπέδηση η_d για το γυαλί, αν $\epsilon_r = 3,8$.
- (β) Για ξηρό σκυρόδεμα με $\epsilon_r = 5 - j0,3$, ο κυματικός αριθμός k_d θα είναι μιγαδικός. Βρείτε το $\text{Re}\{k_d\}$ και το $\text{Im}\{k_d\}$, όπως επίσης και το $\lambda_d = 2\pi/\text{Re}\{k_d\}$. Στο σκυρόδεμα, το πλάτος ενός ραδιοκύματος εξασθενεί με την απόσταση d κατά $\exp[-d\text{Im}\{k_d\}]$. Σε ποια απόσταση φθίνει το πλάτος κατά παράγοντα $1/e$ και σε ποια απόσταση κατά παράγοντα $1/e^3$;

3.2 Υποθέτουμε ότι υπάρχουν $N = 6$ επίπεδα κύματα τα οποία διαδίδονται παράλληλα με το επίπεδο (x, z) σε τυχαίως κατανομημένες γωνίες θ_i στον άξονα x και είναι πολωμένα κατά μήκος του y . Τότε η μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου στον άξονα x δίνεται από τη σχέση:

$$E_y(x, 0) = \sum_{i=1}^N V_i e^{j\phi_i} e^{-jkx \sin \theta_i} \quad (3-61)$$

όπου V_i και ϕ_i είναι τα πλάτη και οι φάσεις των επίπεδων κυμάτων.

- (α) Με μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών ή έναν πίνακα τυχαίων αριθμών, επιλέξτε τιμές για τις γωνίες θ_i στο διάστημα $0 - 2\pi$. Επαναλάβετε αυτή τη διαδικασία για να πάρετε ένα ανεξάρτητο σύνολο τιμών για τις φάσεις ϕ_i . Καταγράψτε τις τιμές των θ_i και ϕ_i .
 - (β) Για συχνότητα $f = 1 \text{ GHz}$, και αν για κάθε i ισχύει ότι $V_i = 1$, να υπολογιστεί και να σχεδιαστεί το $|E(x, 0)|$ σε 400 σημεία στο διάστημα $-3 \leq x < 3 \text{ m}$.
 - (γ) Για τις 400 τιμές u_n ($n = 1, 2, \dots, 400$), οι οποίες υπολογίστηκαν στο μέρος (β), βρείτε τις μέσες $\langle u_n \rangle$ και $\langle (u_n)^2 \rangle$ και συγκρίνετε την τελευταία με το $\langle u_n \rangle^2$.
 - (δ) Κανονικοποιήστε τις τιμές u_n του μέρους (γ) σε $\langle u_n \rangle$. Από το προκύπτον σύνολο αριθμών $r_n = u_n / \langle u_n \rangle$, να υπολογιστεί και να σχεδιαστεί η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής. Στην ίδια γραφική παράσταση να σχεδιαστεί η κατανομή Rayleigh $P(r) = 1 - \exp(-\pi r^2/4)$.
 - (ε) Με χρήση των τιμών r_n , να υπολογίσετε και να σχεδιάσετε τη συνάρτηση συσχέτισης $C(s)$ που ορίστηκε στη αναφορά (14) για $0 \leq s \leq 0,3 \text{ m}$.
- 3.3** Επαναλάβετε το Πρόβλημα (3-2) για τις περιπτώσεις όπου $V_1 = 3$ και $V_i = 1$ για $i \neq 1$, και όταν $V_1 = 6$ και $V_i = 1$ για $i \neq 1$.
- 3.4** Αν ϵ_r πραγματικό, να δείξετε από τις Σχέσεις (3-27) και (3-28) ότι για πόλωση TE ισχύει ότι $1 - \Gamma_E^2 = (Z_d^{\text{TE}}/Z_d^{\text{TE}})T_E^2$, δηλαδή οποιαδήποτε από τις δύο παραστάσεις δίνει το ίδιο κλάσμα μεταδιδόμενης ισχύος μέσα στο διηλεκτρικό, όπως είδαμε μετά την (3-28).
- 3.5** Ένα κύμα που διαδίδεται στον αέρα, είναι προσπίπτον πάνω σε μια παγωμένη λίμνη ($\epsilon_r = 3,2$) σε γωνία θ με την κάθετη διεύθυνση. Να βρεθεί η γωνία Brewster θ_B . Αν $\theta = 45^\circ$, βρείτε το θ_T και το Γ_H για πόλωση TM. Κάντε το ίδιο για $\theta = 75^\circ$.
- 3.6** Ένα επίπεδο κύμα συχνότητας $f = 1 \text{ GHz}$ και πόλωσης TE ανακλάται από έναν τοίχο από τούβλα, ο οποίος έχει πάχος $w = 16 \text{ cm}$. Χωρίς να λάβουμε υπόψη τις απώλειες, είναι $\epsilon_r = 4$. Βρείτε τον συντελεστή ανάκλασης Γ_E για κάθετη πρόσπτωση ($\theta = 0$). Ποια είναι η οριακή τιμή του Γ_E καθώς η θ τείνει στις 90° ; Βρείτε όποιες γωνίες πρόσπτωσης θ έχουν $\Gamma_E = 0$.

- 3.7 Θεωρούμε ένα επίπεδο κύμα 900 MHz που προσπίπτει με πόλωση TE σε έναν τοίχο από σκυρόδεμα, ο οποίος έχει μιγαδική διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 4 - j0,2$. Να υπολογίσετε και να σχεδιάσετε το $|\Gamma_E|^2$ ως συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης θ για την περίπτωση όπου το πάχος του τοίχου είναι πολύ μεγάλο, και για την περίπτωση πεπερασμένου πάχους $w = 25$ cm.
- 3.8 Μια κοινή κατασκευή εσωτερικού τοίχου αποτελείται από δύο στρώματα γυψοσανίδων ($\epsilon_r = 2,8$) πάχους $5/8$ της ίντσας, τα οποία απέχουν 3,5 ίντσες. Χωρίς να λάβετε υπόψη την επίδραση των μεταλλικών στηριγμάτων, να υπολογίσετε και να σχεδιάσετε το $|\Gamma_E|^2$ ως συνάρτηση της γωνίας θ για επίπεδα TE-πολωμένα κύματα που προσπίπτουν πάνω σε έναν τέτοιο τοίχο.

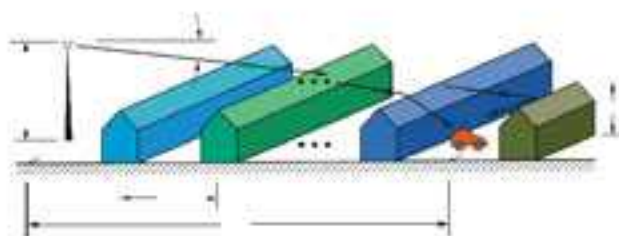
Αναφορές

1. C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, Wiley, New York, 1989.
2. E. C. Jordan and K. G. Balmain, *Electromagnetic Waves and Radiating Systems*, 2nd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 1968.
3. S. Ramo, J. R. Whinnery, and T. Van Duzer, *Fields and Waves in Communication Electronics*, 3rd ed., Wiley, New York, 1994.
4. A. von Hippel, ed., *Dielectric Materials and Applications*, Artech House, Norwood, Mass., 1995.
5. L. M. Correia, Transmission and Isolation of Signals in Buildings at 60 GHz, *Proc. IEEE International Symposium PIMRC'95*, pp. 510-513, 1995.
6. J. B. Hasted and M. A. Shah, Microwave Absorption by Water in Building Material, *Br. J. Appl. Phys.*, vol. 15, pp. 825-836, 1964.
7. O. Landron, M. J. Feuerstein, and T. S. Rappaport, A Comparison of Theoretical and Empirical Reflection Coefficients for Typical Exterior Wall Surfaces in a Mobile Radio Environment, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 44, pp. 341-351, 1996.
8. M. A. Shah, J. B. Hasted, and L. Moore, Microwave Absorption by Water in Building Materials: Aerated Concrete, *Br. J. Appl. Phys.*, vol. 16, pp. 1747-1754, 1965.
9. M. Abramowitz and I. A. Stegun, eds., *Handbook of Mathematical Functions*, Dover Publications, New York, Chap. 9, 1965.
10. W. C. Y. Lee, *Mobile Communications Engineering*, McGraw-Hill, New York, p. 276, 1982.
11. A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, pp. 319-332, 1991.
12. T. Aulin, A Modified Model for the Fading Signal at a Mobile Radio Channel, *IEEE Trans. Veh. Tech nol.*, vol. VT-28, pp. 182-203, 1979.
13. F. Adachi, M. T. Feeney, A. G. Williamson, and J. D. Parsons, Crosscorrelation between the Envelopes of 900 MHz Signals Received at a Mobile Radio Base Station Site, *IEE Proc.*, vol. 133, Pt. F, pp. 506-512, 1986.

Διάδοση ραδιοκυμάτων στα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας

Henry L. Bertoni

Ο απόλυτος οδηγός για τη μοντελοποίηση της διάδοσης ραδιοκυμάτων ασύρματων επικοινωνιών από έναν από τους κορυφαίους ειδικούς στον κόσμο.



Για την κατασκευή ασύρματων συστημάτων με τη μέγιστη δυνατή απόδοση και αξιοπιστία, οι μηχανικοί πρέπει να γνωρίζουν και να κατανοούν σε βάθος το φαινόμενο της διάδοσης των ραδιοκυμάτων. Με εφόδιο τα περισσότερα από 15 χρόνια εμπειρίας στο αντικείμενο, ο κορυφαίος ερευνητής ασύρματων επικοινωνιών Henry Bertoni παρουσιάζει την πιο πλήρη και ολοκληρωμένη ανάλυση τεχνικών πρόβλεψης διάδοσης ραδιοκυμάτων που έχει εκδοθεί ποτέ. Από τη θεωρητική εισαγωγή για την επαναχρησιμοποίηση φάσματος μέχρι τα πιο αναπτυγμένα πραγματικά μοντέλα για τα κτίρια, τη μορφολογία του εδάφους, και τη βλάστηση, το βιβλίο «Διάδοση ραδιοκυμάτων στα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας» παρέχει ανεκτίμητες πληροφορίες για κάθε σχεδιαστή ασύρματων συστημάτων. Περιλαμβάνει:

- Μια κατανοητή περιγραφή της διάδοσης των ραδιοκυμάτων για τα ασύρματα κανάλια επικοινωνίας
- Αναλυτική μελέτη των επιπτώσεων που προκαλούν τα κτίρια, το έδαφος, και η βλάστηση στην απώλεια διαδρομής
- Μια συνολική άποψη των κύριων παραγόντων διάδοσης στα στενοζωνικά και τα ευρυζωνικά συστήματα, όπως η χωρική μεταβολή, η γωνία πρόσπτωσης, και η διάσπορα καθυστέρησης
- Μια ευανάγνωστη αναφορά στο φαινόμενο της περίθλασης σε γωνίες κτιρίων, με λυμένα παραδείγματα
- Μια πρωτοεμφανιζόμενη ανάλυση σχετικά με την απώλεια διαδρομής κατά την επικοινωνία με συσκευές κινητών τηλεφώνων στις πόλεις
- Νέα αποτελεσματικά μοντέλα ακτίνων για προβλέψεις που αφορούν συγκεκριμένες τοποθεσίες και για την προσομοίωση στατιστικών στοιχείων καναλιών επικοινωνίας
- Προσομοιώσεις της ταχείας διάλειτουργίας και της διάλειτουργίας σκιάς

Από την αρχή ως το τέλος, το βιβλίο «Διάδοση ραδιοκυμάτων στα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας» παρουσιάζει εξελιγμένα περίπλοκα μοντέλα και συγκρίνει τα αποτελέσματά τους με πραγματικές μετρήσεις. Με τη διεξοδική ανάλυση του και τα εκτενή παραδείγματα, τόσο από στενοζωνικά όσο και από ευρυζωνικά συστήματα, το εγχειρίδιο αυτό μπορεί να βοηθήσει τους σχεδιαστές ασύρματων συστημάτων να παρέχουν πιο αποτελεσματικές και αποδοτικές υπηρεσίες.

Ο συγγραφέας

Ο HENRY L. BERTONI είναι καθηγητής στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Polytechnic University της Νέας Υόρκης και διδάσκει ένα από τα κορυφαία πανεπιστημιακά μαθήματα σχετικά με την ασύρματη διάδοση ραδιοκυμάτων στα πλαίσια του προγράμματος σπουδών Ασύρματων Δικτύων.



ΕΚΔΟΣΕΙΣ
ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ

Σοφοκλή 4, Στόμπος Λαρίσης, 10440 ΑΘΗΝΑ, Τηλ. 210-5237635

Επισκεφθείτε μας στο Internet:
www.klidarithmos.gr

ISBN 978-960-461-168-3



9 789604 611683