

## Εργαστήριο 12: Γραμμές Διάδοσης - Transmission Lines

21 - 24 Μαΐου 2011 (βδομάδα 13)

**Διάβασμα:** Διαβάστε από το εξαιρετικό (αν και πύο προχωρημένο από το μάθημά μας) βιβλίο των *William Dally and John Poulton*: "Digital Systems Engineering", Cambridge University Press, 1998 (reprint of 2000), ISBN 0-521-59292-5 - Κεφάλαιο 3 "Modeling and Analysis of Wires":

- Εγκυκλοπαιδικό, γρήγορο πέρασμα: σελίδες 80-85·
- Η χαρακτηριστική αντίσταση,  $Z_0 = \sqrt{L/C}$  μιάς γραμμής διάδοσης όταν αγνοήσουμε τις αντιστάσεις: §3.2.2.2, σελίδα 86·
- Εγκυκλοπαιδικό, γρήγορο πέρασμα: σελίδες 88-92·
- Γραμμές LC χωρίς απώλειες (κανονικό διάβασμα): §3.3.3, σελίδες 92-99·
- Εγκυκλοπαιδικό, γρήγορο πέρασμα: §3.4.1, buses, σελ. 106-108.

Βοηθητικό υλικό για τα παραπάνω θα βρείτε και στις σημειώσεις του μαθήματος εαρινού εξαμήνου 2009: <http://www.csd.uoc.gr/~hy121/09a/transmission-lines.zip>

### Πείραμα 12.1: Διάδοση σε Ομοαξωνικό Καλώδιο και Τερματισμός του

Στο εργαστήριο θα βρείτε μία κουλούρα με 100 μέτρα ομοαξωνικού καλωδίου τύπου RG-58, με χαρακτηριστική αντίσταση  $50 \Omega$  και συντελεστή ταχύτητας 66% (δηλ. η ταχύτητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσα του είναι το 66% της ταχύτητας του φωτός στο κενό, ή 200 Mm/s, ή 200 m/μs, ή 5 ns ανά μέτρο, ή 500 ns για όλη την κουλούρα) --βλ. [http://en.wikipedia.org/wiki/Coaxial\\_cable](http://en.wikipedia.org/wiki/Coaxial_cable) Η κουλούρα διακόπτεται σε δύο ενδιάμεσα σημεία, στα 25 και στα 50 μέτρα (ή στα 50 και 75, ή 25 και 75 μέτρα, ανάλογα πώς τα τοποθετείτε), για να μπορέσετε να συνδέσετε από ένα κανάλι παλμογράφου εκεί, και να δείτε την κυματομορφή σε ενδιάμεσα σημεία.

Συνδέστε την παλμογεννήτρια στη μία άκρη του ομοαξωνικού καλωδίου, με τρόπο που να μπορείτε να συνδέσετε στο ίδιο σημείο και ένα κανάλι παλμογράφου. Ξεκινήστε με την παλμογεννήτρια σε μορφή εξόδου "pulse", δεδομένου ότι για αυτή την έξοδο προδιαγράφει τον ταχύτερο χρόνο ανόδου (rise time), 25 ns τυπικά, 30 ns στη χειρότερη περίπτωση. Εάν λειτουργεί ο (ένας) τετρακάναλος παλμογράφος που υπάρχει στο εργαστήριο, προτιμήστε αυτόν και συνδέστε το 2ο και 3ο κανάλι σε ενδιάμεσα σημεία του καλωδίου, το δε 4ο κανάλι στον τερματισμό του καλωδίου. Αλλιώς, συνδέστε τα 2 κανάλια του παλμογράφου εναλλάξ σε 2 από τα 4 παραπάνω σημεία, και καταγράψτε κάθε φορά τις μετρήσεις σας χρονικής καθυστέρησης προκειμένου να τις συγκρίνετε με τις νέες, όταν αλλάξετε τη σύνδεση. Φροντίστε οι ακροδέκτες του παλμογράφου να είναι οι κατάλληλοι που να έχουν πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου ( $1 \text{ M}\Omega$  ή περισσότερο) --συνήθως αυτοί υποβιβάζουν το σήμα κατά 10:1-- προκειμένου να μην αλλοιώνουν τα χαρακτηριστικά της γραμμής διάδοσης (άρα να μην προκαλούν ανακλάσεις στα ενδιάμεσα σημεία).

Συνδέστε πρώτα μόνιμη αντίσταση τερματισμού  $50 \Omega$  (ταιριασμένος τερματισμός - impedance-matched termination) στην ελεύθερη άκρη του καλωδίου. Παρατηρήστε τις κυματομορφές στα 4 σημεία παρατήρησης: θα πρέπει να βλέπετε την ίδια μορφή, καθυστερημένη στο χρόνο ανάλογα με την απόσταση. Μετρήστε την ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Θα πρέπει επίσης να βλέπετε κάποια ελάττωση του πλάτους της τάσης, οφειλόμενη στη μη-μηδενική αντίσταση του καλωδίου (απώλειες ενέργειας - απόσβεση σήματος).

Στη συνέχεια, αφαιρέστε την αντίσταση τερματισμού, και αφήστε το άκρο ανοικτοκυκλωμένο (άπειρη αντίσταση τερματισμού). Παρατηρήστε τώρα τις κυματομορφές στα 4 σημεία παρατήρησης: θα πρέπει να βλέπετε αφ'ενός το προσπίπτον

κύμα, αφ' ετέρου το ανακλώμενο, επιστρέφον κύμα, το οποίο (σχεδόν) διπλασιάζει την αρχική τάση του προσπίπτοντος κύματος σε κάθε σημείο όταν φτάνει εκεί (αν δεν υπήρχαν απώλειες θα διπλασίαζε την τάση λόγω των απωλειών, προθέτει τάση όση η αρχική μετά την απόσβεσή της λόγω εν τω μεταξύ της διανυθείσας απόστασης). Εάν η παλμογεννήτρια έχει αντίσταση εξόδου (ισοδύναμο Thevenin)  $50 \Omega$  (πράγμα που μοιάζει να εννοεί χωρίς να το λέει το εγχειρίδιό της), τότε θα πρέπει να μη βλέπετε ανακλάσεις στην πηγή, δηλαδή πέραν της πρώτης ανάκλασης στο άκρο της γραμμής· αλλιώς, θα υπάρχουν ανακλάσεις και από την πηγή. Εν συνεχεία, αποσυνδέστε κομμάτια του καλωδίου, κονταίνοντάς το, και διαπιστώστε αν συντομεύονται ανάλογα οι χρόνοι επιστροφής του ανακλώμενου σήματος.

Μετά, συνδέστε διάφορες αντιστάσεις τερματισμού στο άκρο του καλωδίου, είτε μικρότερες είτε μεγαλύτερες των  $50 \Omega$ , και μετρήστε την αλλαγή που προκαλεί το ανακλώμενο σήμα,  $V_{\text{reflected}}$ , πάνω στο αρχικό, προσπίπτον σήμα,  $V_{\text{incident}}$ . Ελέγξτε την "Εξίσωση του Τηλεγραφήτη":  $V_{\text{reflected}} / V_{\text{incident}} = (Z_T - Z_0) / (Z_T + Z_0)$ . Εάν σας περισσεύει χρόνος, προσθέστε διάφορες αντιστάσεις εν σειρά μεταξύ πηγής και καλωδίου, και ψάξτε να δείτε και μετρήσετε τις επιπλέον ανακλάσεις που αυτές πρέπει να προκαλούν πάνω στο σήμα που επιστρέφει από την πρώτη (και τις μετέπειτα!) ανάκλαση (ανακλάσεις) από το άκρο του καλωδίου.

## Πείραμα 12.2: Προσομοίωση Γραμμής Διάδοσης μέσω πολλαπλών L, C

Συνδέστε ένα μεγάλο πλήθος από πηνία των  $22 \mu\text{H}$  εν σειρά. Στη "δεξιά" άκρη καθενός από αυτά τα πηνία, συνδέστε από έναν πυκνωτή  $8.8 \text{ nF}$ , "παράλληλα", προς τη γή (εναλλακτικά, μπορεί τα πηνία να είναι  $47 \mu\text{H}$  καθένα, και οι πυκνωτές να είναι  $19 \text{ nF}$  καθένας). Με το δίκτυο σαν σκάλα που προκύπτει προσπαθούμε να προσομοιώσουμε μιά γραμμή διάδοσης με αυτεπαγωγή  $22 \mu\text{H}$  (ή  $47 \mu\text{H}$ ) ανά μονάδα μήκους, και με χωρητικότητα  $8.8 \text{ nF}$  (ή  $19 \text{ nF}$ ) ανά μονάδα μήκους. Μιά τέτοια γραμμή διάδοσης θα είχε χαρακτηριστική αντίσταση  $Z_0 = \sqrt{L/C} = \sqrt{22000 \text{ nH} / 8.8 \text{ nF}} = \sqrt{2500 \Omega^2} = 50 \Omega$ . Εάν δεν βρείτε τέτοιους πυκνωτές και χρησιμοποιήσετε άλλους μικρότερους, η χαρακτηριστική αντίσταση μεγαλώνει. Στην δεξιά άκρη αυτού του δικτύου "σκάλας" συνδέστε εν παραλλήλω μίαν ωμική αντίσταση ίση με τη χαρακτηριστική αντίστασης της γραμμής.

Σε μιά γραμμή διάδοσης, η ταχύτητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι  $c = 1/\sqrt{L \cdot C}$ , ή αντίστοιχα ο χρόνος καθυστέρησης (διάδοσης) ανά μονάδα μήκους είναι  $\sqrt{L \cdot C}$ , όπου  $L$  είναι η αυτεπαγωγή της γραμμής ανά μονάδα μήκους, και  $C$  είναι η χωρητικότητα της γραμμής ανά μονάδα μήκους. Για μας που η "μονάδα μήκους" είναι ένα πηνίο  $L = 22 \mu\text{H}$  και ένας πυκνωτής  $C = 8.8 \text{ nF}$ , η καθυστέρηση ανά τέτοια "μονάδα μήκους" περιμένουμε ότι θα είναι περίπου  $440 \text{ ns}$ .

Γιά να μπορεί αυτό το χονδροειδές μοντέλο γραμμής διάδοσης να προσεγγίζει μιά πραγματική γραμμή διάδοσης, η θεωρία (§3.2.2.5, σελ. 88 του βιβλίου Dally & Poulton) λέει ότι πρέπει ο ταχύτερος χρόνος ανόδου (rise time) των κυματομορφών μας να είναι πολύ αργότερος από την παραπάνω καθυστέρηση ανά "μονάδα μήκους". Άρα, θα πρέπει μάλλον να χρησιμοποιήσουμε ημιτονοειδή είσοδο με περίοδο μεγαλύτερη από περίπου  $10 \mu\text{s}$ , δηλαδή συχνότητες κάτω από  $100 \text{ kHz}$ . Δώστε τέτοιες εισόδους στο παραπάνω δίκτυο "σκάλας", και παρατηρήστε τις κυματομορφές σε ενδιάμεσα σημεία και στο άκρο. Αλλάζοντας την αντίσταση τερματισμού, τι παρατηρείτε; Δυστυχώς, οι "ανακλάσεις" δεν θα φαίνονται εύκολα εδώ, διότι το άθροισμα ημιτόνου με άλλο καθυστερημένο ημίτονο είναι πάλι ημίτονο, της ίδιας συχνότητας, άρα δεν ξεχωρίζει εύκολα.... Δοκιμάστε και τριγωνικές εισόδους να δείτε τι βλέπετε. Μπορείτε να δοκιμάστε και τετραγωνικές εισόδους, αλλά δεδομένου ότοι αυτές έχουν χρόνο ανόδου (rise time) γύρω στα  $100 \mu\text{s}$  με  $120 \text{ ns}$ , το δίκτυό μας δεν θα προσεγγίζει καλά την ιδανική γραμμή διάδοσης....