

Time Domain Reflectometry

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ

Η Time Domain Reflectometry (T.D.R.) είναι μια τεχνική ελέγχου και μετρήσεων, η οποία βρίσκει μια αυξανόμενη χρησιμότητα στον έλεγχο των γραμμών μεταφοράς (χάλκινα καλώδια (ομοαξονικών και συνεστραμμένων ζευγών) και οπτικές ίνες), καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος, ηλεκτρικούς συνδέσμους και άλλα ευρυζωνικά συστήματα και εξαρτήματα.

Η συγκεκριμένη T.D.R. τεχνική είναι επέκταση μιας παλαιότερης τεχνικής που αξιοποιούσε τις ανακλάσεις ηλεκτρικών παλμών για να εντοπίσει προβλήματα καλωδίων και για να καθορισθούν τα χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος.

Η Time Domain Reflectometry τεχνική μπορεί να εννοηθεί σαν ένα είδος R.A.D.A.R. κλειστού βρόχου, όπου ηλεκτρικοί παλμοί με πολύ μικρούς χρόνους ανόδου και καθόδου εισάγονται στο υπό έλεγχο σύστημα και από τη παρατήρηση σε οθόνη των ανακλάσεων αυτών, βγαίνουν συμπεράσματα για τις ασυνέχειες ή τη μη σωστή προσαρμογή των αντιστάσεων του συστήματος.

Σαν ασυνέχεια ορίζουμε οποιαδήποτε μεταβολή στην χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς.

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

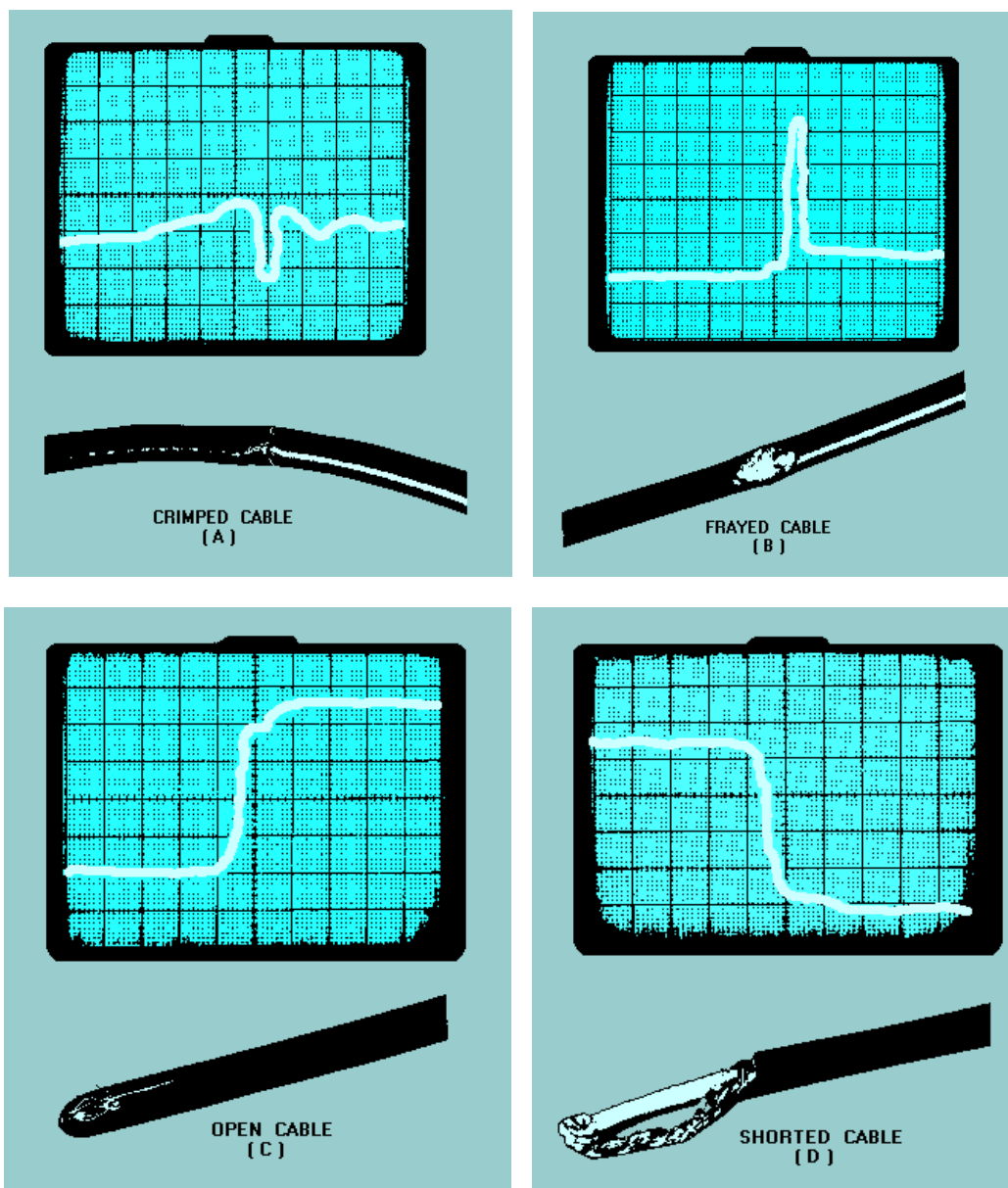
Όπως προαναφέρθηκε η T.D.R. συνίσταται στην εισαγωγή ενός παλμού ενέργειας στο υπό έλεγχο σύστημα και κατόπιν στην παρατήρηση του ανακλώμενου παλμού ενέργειας στο σημείο εισόδου.

Όταν ο παλμός εισόδου συναντήσει ασυνέχεια στην όδευση του σήματος ή μη σωστή προσαρμογή των συνθέτων αντιστάσεων, συμβαίνουν ανακλάσεις οι οποίες εμφανίζονται στην είσοδο και συγκρίνονται με τον αρχικό παλμό εισόδου όσον αφορά τις παραμέτρους του πλάτους, της περιόδου και της φάσης.

Αναλύοντας το μέγεθος, την απόκλιση του χρόνου και τη μορφή του παλμού της ανακλώμενης κυματομορφής μπορεί να καθορισθεί η φύση της διαφοροποιημένης σύνθετης αντίστασης του συστήματος μετάδοσης. Επίσης, καθώς η απόσταση σχετίζεται με τον χρόνο (αφού ο παλμός ταξιδεύει με συγκεκριμένη ταχύτητα πάνω στο καλώδιο), και το πλάτος του ανακλώμενου

παλμού σχετίζεται με την σύνθετη αντίσταση, αυτή η σύγκριση μπορεί να μας αποκαλύψει την απόσταση μέχρι το σημείο της ασυνέχειας καθώς και τη φύση αυτής.

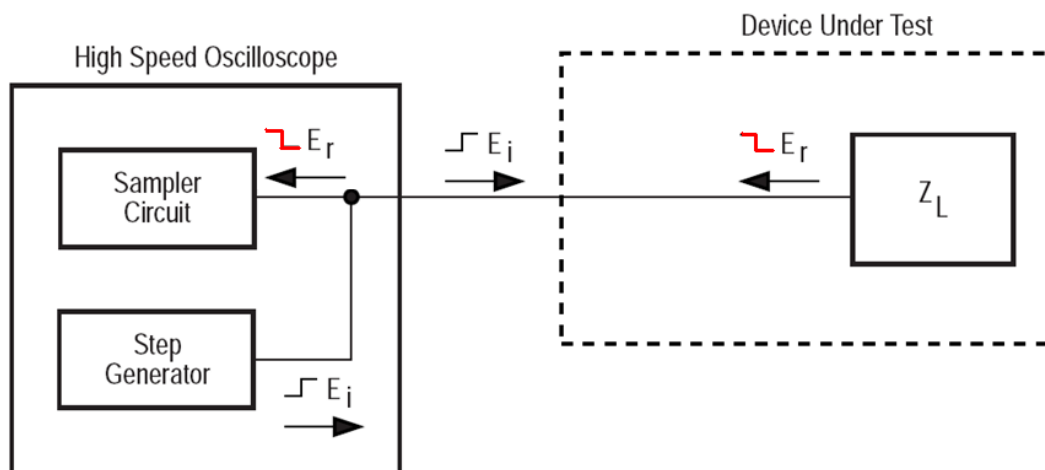
Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται τυπικά παραδείγματα προβλημάτων γραμμών μεταφοράς που εύκολα αναγνωρίζονται από ένα αναλυτή T.D.R..



Σχήμα 1

Οι αναλυτές T.D.R., όχι μόνο ανευρίσκουν την απόσταση και τη φύση της κάθε ασυνέχειας (Ωμική, Επαγωγική ή Χωρητική), αλλά ανευρίσκουν τη χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση της γραμμής και καταδεικνύουν εάν οι απώλειες συμβαίνουν «παράλληλα» ή «εν σειρά» ως προς τη γραμμή. Επίσης, οι αναλυτές αυτοί χρησιμοποιούνται για να ελέγχονται οι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι (**connectors**) και οι ενώσεις (**splices**) των γραμμών μεταφοράς.

Παρακάτω φαίνεται το λειτουργικό διάγραμμα ενός T.D.R.. Ως Step Generator ορίζεται μία γεννήτρια η οποία παράγει ένα «συνεχόμενο» παλμό με πολύ μικρό χρόνο ανόδου (rise time) (step function, βηματική συνάρτηση). Στο σχήμα φαίνεται μόνο η άνοδος του παλμού ο οποίος εκπέμπεται με πλάτος E_i (μαύρο χρώμα) προς την υπό έλεγχο συσκευή (Device Under Test). Ο ανακλώμενος προς τα πίσω παλμός με πλάτος E_r (κόκκινο χρώμα) αναλύεται από ένα κύκλωμα δειγματοληψίας και η κυματομορφή του μπορεί να απεικονισθεί στην οθόνη ενός παλμογράφου.



Σχήμα 2

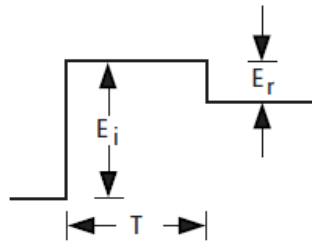
Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο εκπεμπόμενος παλμός όταν η διάρκεια του παλμού είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με τον χρόνο όδευσης του σήματος και το μήκος του καλωδίου είναι αρκετά μικρό σε σχέση με το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου σήματος,



Σχήμα 3

τότε ο ανακλώμενος παλμός επικάθεται στον εκπεμπόμενο παλμό μετά από χρόνο T ο οποίος αντιστοιχεί στο άθροισμα του χρόνου μετάβασης του εκπεμπόμενου

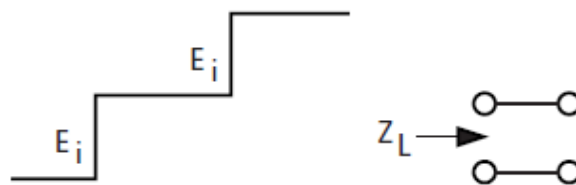
παλμού σε κάποιο σημείο ασυνέχειας της αντίστασης της υπό έλεγχο συσκευής και του χρόνου επιστροφής του ανακλώμενου παλμού προς τον παλμογράφο.



Σχήμα 4

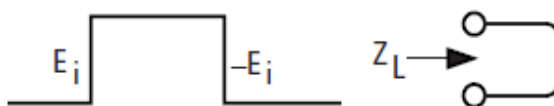
Όταν ο ανακλώμενος παλμός συναντήσει τον εκπεμφθέντα παλμό στην πηγή αυτού, τότε συμβαίνει αλγεβρική πρόσθεση των πλατών αυτών.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τέσσερις περιπτώσεις όπου ο ανακλώμενος παλμός συναντά τον εκπεμπόμενο και όταν η υπό έλεγχο συσκευή (D.U.T.) είναι μία γραμμή μεταφοράς σήματος (Transmission Line). Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται το πλάτος του ανακλώμενου παλμού. Στις παρακάτω χαρακτηριστικές περιπτώσεις θεωρείται ότι γραμμή μεταφοράς σήματος δεν έχει απώλειες, δηλαδή η εξασθένιση (Attenuation) έχει τιμή 0dB. (Στα παρακάτω σχήματα με E_i δηλώνεται το πλάτος του προσπίπτοντος παλμού, με E_r δηλώνεται το πλάτος του ανακλώμενου παλμού, με Z_L δηλώνεται η σύνθετη αντίσταση του φορτίου, και με Z_0 δηλώνεται η σύνθετη (χαρακτηριστική) αντίσταση του καλωδίου.)



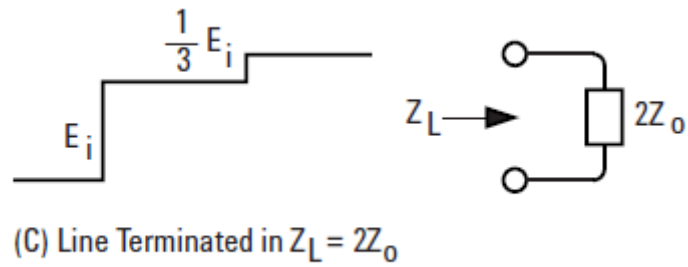
(A) Open Circuit Termination ($Z_L = \infty$)

$$E_r = E_i$$

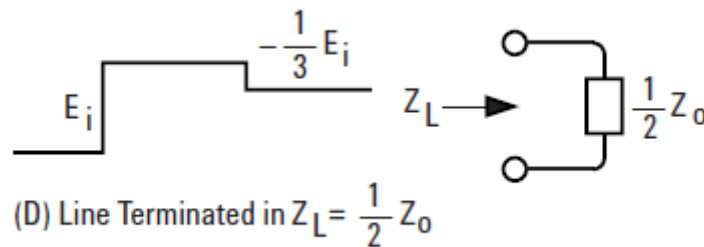


(B) Short Circuit Termination ($Z_L = 0$)

$$E_r = -E_i$$



$$E_r = 1/3E_i$$



$$E_r = -1/3E_i$$

Σχήμα 5

Ο ανακλώμενος παλμός αναγνωρίζεται εύκολα καθώς διαχωρίζεται χρονικά από τον προσπίπτοντα (Βλέπε **Σχήμα 4**). Μετά από τον χρόνο T ο ανακλώμενος παλμός επιστρέφει στο σημείο παρατήρησης (στην άκρη του καλωδίου που είναι συνδεδεμένη η γεννήτρια και ο παλμογράφος) και το πλάτος του E_r αφαιρείται από το πλάτος E_i του προσπίπτοντος παλμού. Ο χρόνος αυτός T είναι χρήσιμος για τον καθορισμό του μήκους της γραμμής μεταφοράς από την αρχή αυτής (σημείο παρατήρησης) μέχρι την ασυνέχεια που προκαλεί τον ανακλώμενο παλμό. Αν D είναι το μήκος της γραμμής μεταφοράς, τότε ισχύει:

$$D = v_p * T/2$$

όπου v_p = η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος

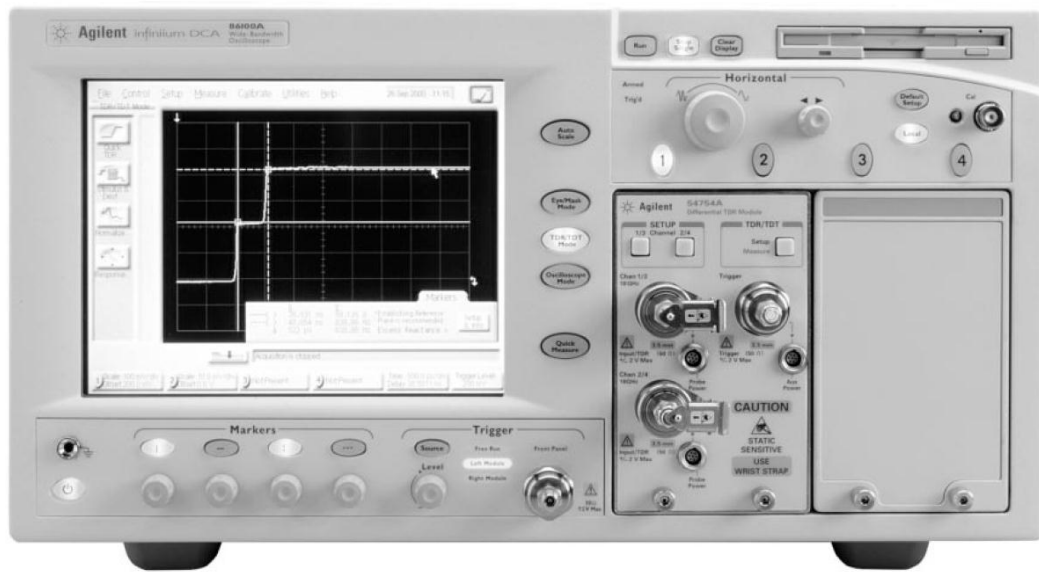
και T = ο χρόνος μετάβασης από το σημείο παρατήρησης προς την ασυνέχεια και πάλι προς τα πίσω, καθώς μετράται στον παλμογράφο (**Σχήμα 4**). (Στην προκειμένη περίπτωση του σχήματος το πλάτος του ανακλώμενου παλμού αφαιρείται από αυτό του προσπίπτοντος.)

Η ταχύτητα διάδοσης μπορεί να καθορισθεί κάνοντας δοκιμή σε γνωστό μήκος καλωδίου ιδίου τύπου με αυτό που θέλουμε να διερευνήσουμε (π.χ. ο χρόνος που απαιτείται για τον προσπίπτοντα παλμό να φθάσει και για τον ανακλώμενο παλμό να επιστρέψει από το ανοικτό άκρο ενός RG-9A/U καλωδίου μήκους 1,2 m είναι 11,4 ns, δίνοντάς μας ταχύτητα διάδοσης v_p ίση με 210,53 m/μs). Γνωρίζοντας πλέον την v_p κι το T από τον παλμογράφο μπορούμε να καθορίσουμε την D για καλώδιο του ιδίου τύπου και ιδίου κατασκευαστή. Κατ' αυτό τον τρόπο μπορούμε να καθορίσουμε την απόσταση της ασυνέχειας από την αρχή του καλωδίου. Τα περισσότερα όργανα μέτρησης με χρήση T.D.R. πραγματοποιούν αυτή τη μέτρηση αυτόματα.

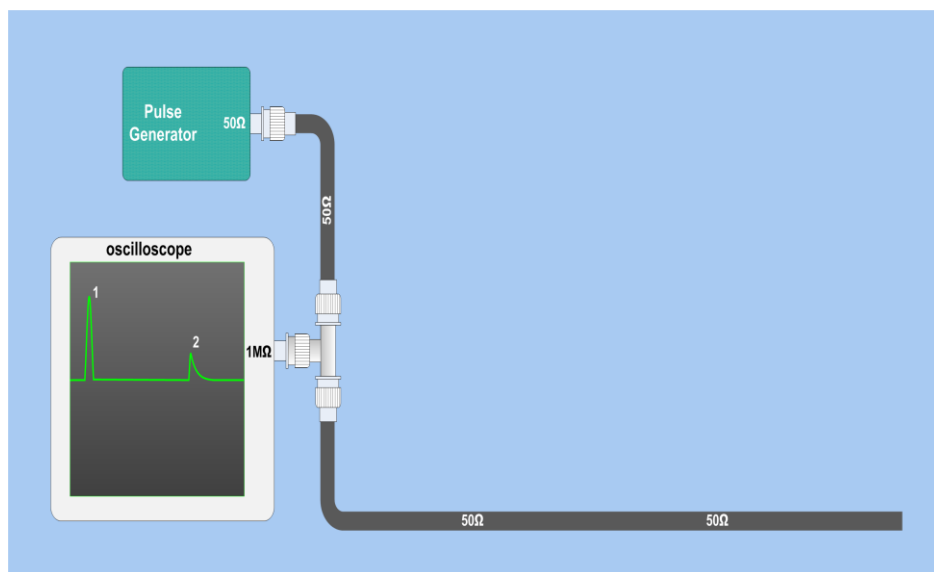
Στη παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα φορητό όργανο πιστοποίησης δομημένης καλωδίωσης που χρησιμοποιεί την τεχνική T.D.R. (μεταξύ άλλων) για να ελέγχει τον σωστό τερματισμό των καλωδίων ή την παραμόρφωση αυτών.



Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένας ειδικού σκοπού παλμογράφος (και πολύ ακριβός) που φέρει ειδικό T.D.R. module για πραγματοποίηση μετρήσεων και ανάλυση αυτών με μεγάλη ακρίβεια για την πιστοποίηση καλωδίων από τη βιομηχανία. Αυτού του είδους τα όργανα δεν μπορεί να είναι φορητά.



Καθώς δεν είναι δυνατόν να διαθέτουμε το ως άνω όργανο για τις εργαστηριακές μας μετρήσεις, θα χρησιμοποιήσουμε τον τρόπο διασύνδεσης μιας γεννήτριας παλμών και ενός παλμογράφου που φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 6

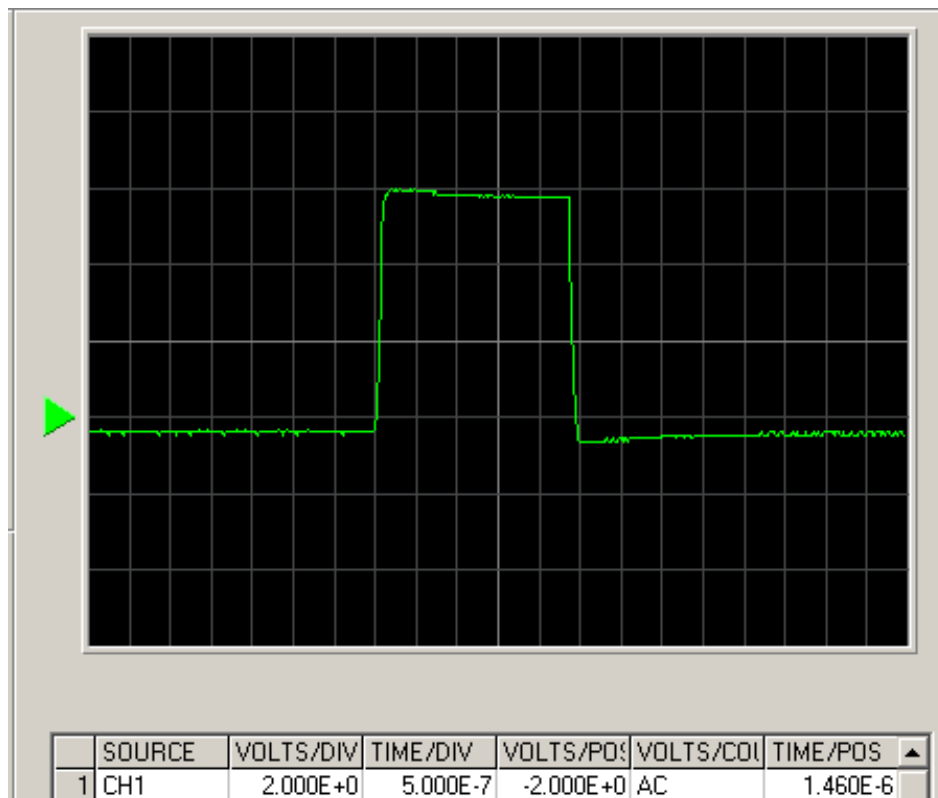
Τελειώνοντας, αναφέρουμε ότι αυτή η τεχνική βρίσκει εφαρμογή και στην παρακολούθηση κάποιων εν δυνάμη κατολισθήσεων εδαφών αφού κάτι τέτοιο, τουλάχιστον, θα παραμόρφωνε μια γραμμή μεταφοράς στερεά συνδεδεμένη με ένα τέτοιο τμήμα εδάφους. Επίσης η παραμόρφωση μιας οπτικής ίνας, στερεωμένης σ' ένα φράχτη, στην οποία εφαρμόζεται αυτή η τεχνική θα ενεργοποιούσε ένα σύστημα συναγερμού.

Time Domain Reflectometry

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΜΕΡΟΣ

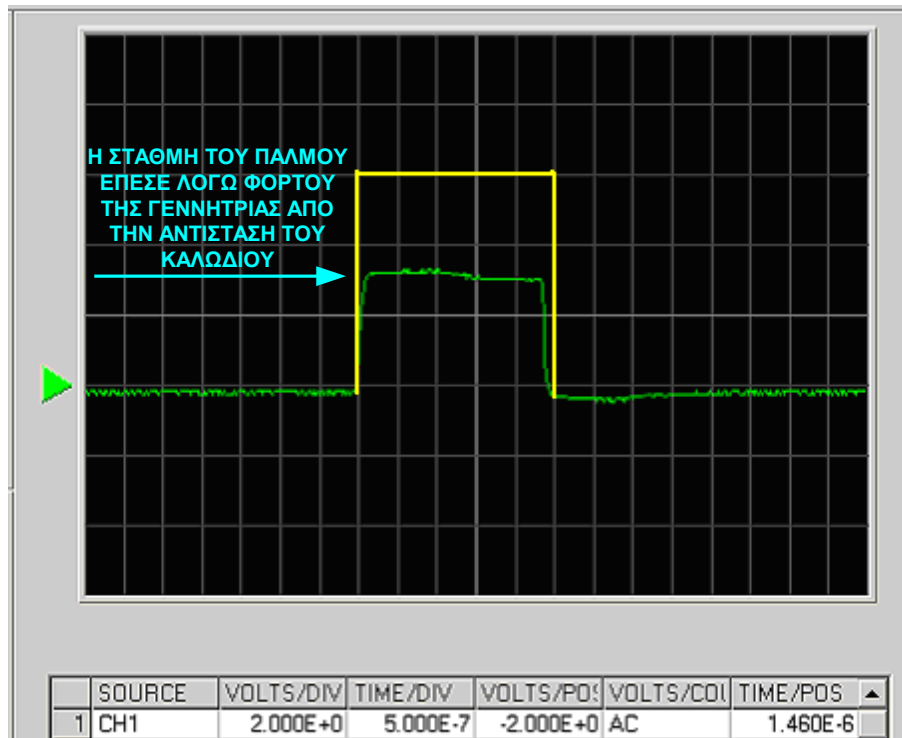
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρακάτω φαίνονται κάποιες μετρήσεις που έγιναν με την βοήθεια παλμογράφου και Η/Υ όπου αναδεικνύονται πιο πρακτικά ορισμένα από τα θέματα που αναπτύχθηκαν στο θεωρητικό μέρος.



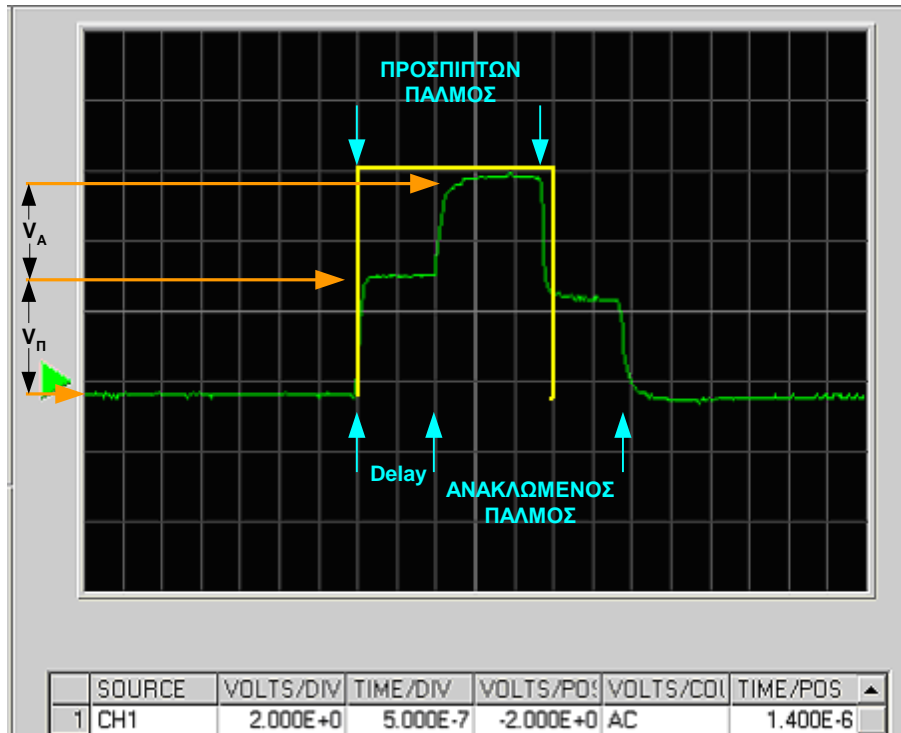
Εικόνα 1.

Αρχικός παλμός. Χωρίς καλώδιο.



Εικόνα 2.

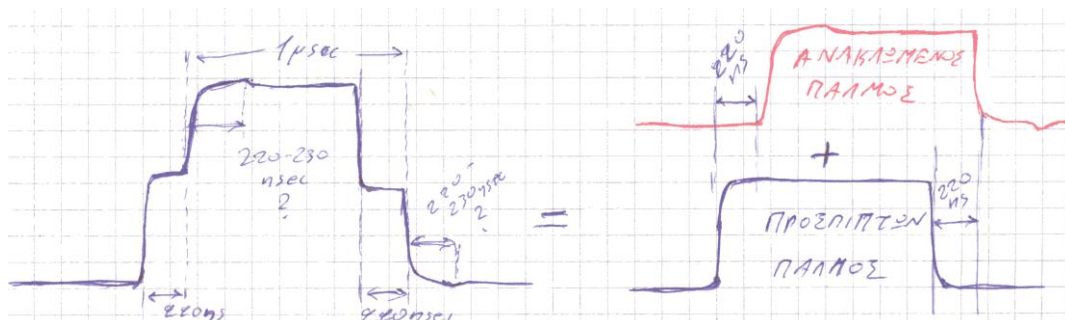
Καλώδιο μήκους 100μ **τερματισμένο με 50Ω.**

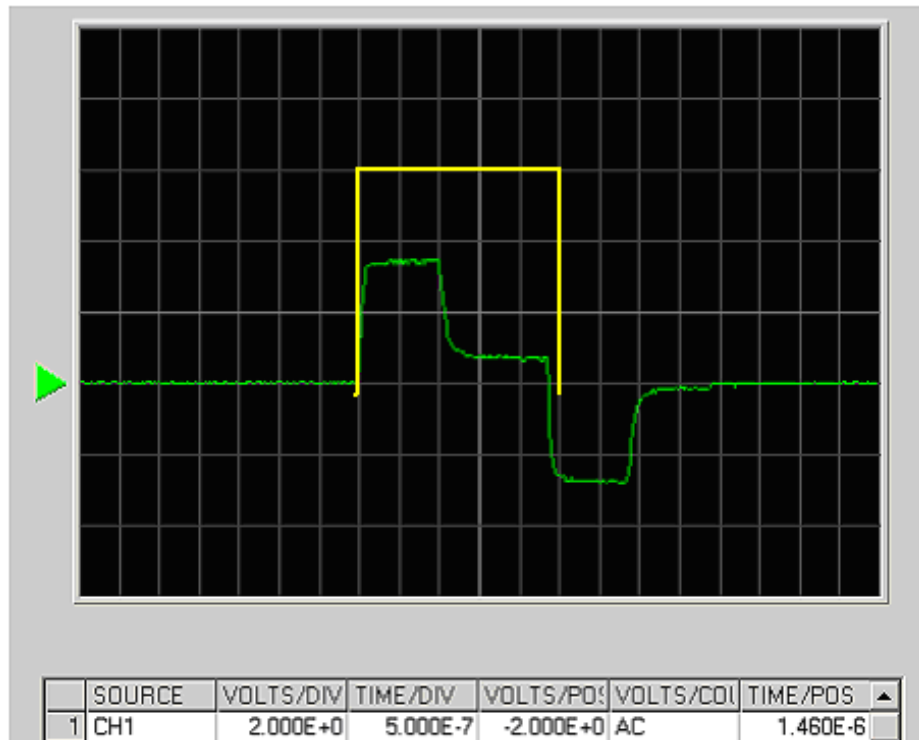


Εικόνα 3.

Ανοικτοκυκλωμένο καλώδιο 100μ.

Η ως άνω κυματομορφή (πράσινο χρώμα) προκύπτει από το αλγεβρικό άθροισμα (πρόσθεση στη συγκεκριμένη περίπτωση) του προσπίπτοντος και του ανακλώμενου παλμού. Το $\text{Delay} = T$ είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την εκπομπή του παλμού, την ανάκλασή του στην ασυνέχεια και την επιστροφή του στην αρχή του καλωδίου. Επίσης παρατηρούμε ότι το πλάτος του ανακλώμενου παλμού είναι μικρότερο από το πλάτος του προσπίπτοντος ($V_A < V_{\Pi}$) λόγω της εξασθένησης που εισάγει το καλώδιο. Βλέπε και το παρακάτω σκαρίφημα:

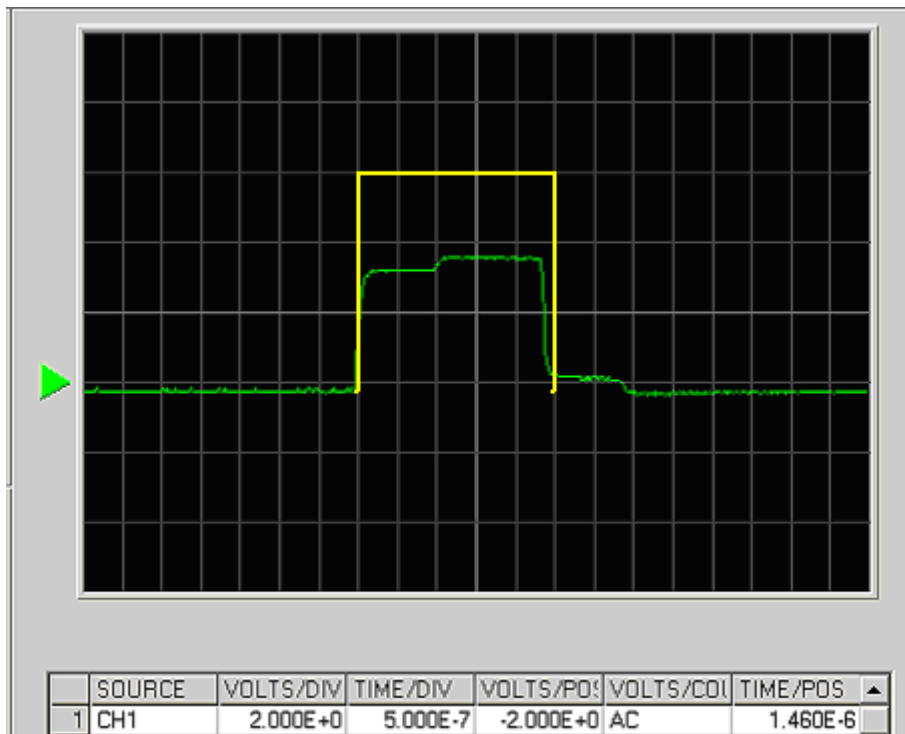




Εικόνα 4.

Βραχυκυκλωμένο καλώδιο μήκους 100μ.

Ο ανακλώμενος παλμός επιστρέφει με αντίθετη πολικότητα σε σχέση με το Ανοικτοκυκλωμένο καλώδιο και έτσι προκύπτει το αλγεβρικό άθροισμα των δύο παλμών (ουσιαστικά αφαιρείται ο ανακλώμενος από τον προσπίπτοντα παλμό). Επίσης το $\text{Delay} = T$ είναι το ίδιο όπως στην προηγούμενη περίπτωση αφού το μήκος του καλωδίου είναι το ίδιο.



Εικόνα 5.

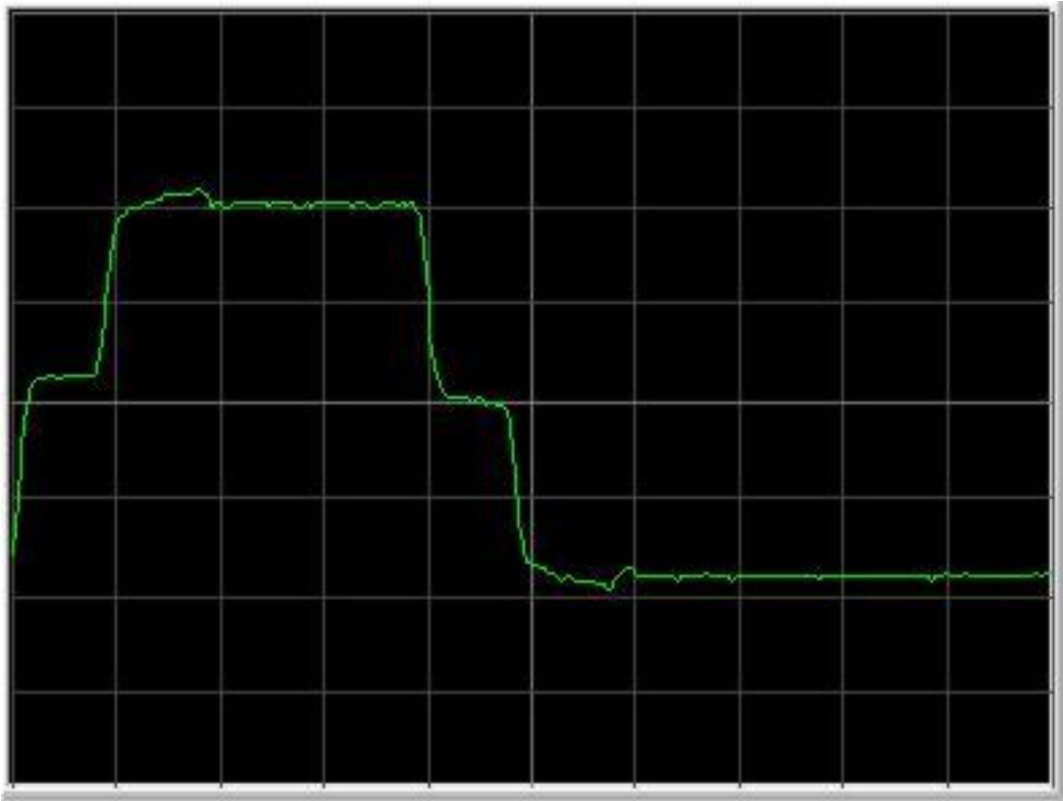
Καλώδιο μήκους 100μ **τερματισμένο με 75Ω**.

Και εδώ το $\text{Delay} = T$ είναι το ίδιο όπως στην προηγούμενη περίπτωση αφού το μήκος του καλωδίου είναι το ίδιο.

Παρατηρείστε τις κυματομορφές που αντιστοιχούν στο τερματισμό του καλωδίου με αντίσταση 50Ω (**Εικόνα 2**) και με 75Ω (**Εικόνα 5**). Μόνο στην περίπτωση της **Εικόνας 2** έχουμε πλήρη προσαρμογή (matching) μεταξύ της Αντίστασης Εξόδου ($R_o = 50\Omega$) της γεννήτριας, της Χαρακτηριστικής Αντίστασης του καλωδίου ($Z_o = 50\Omega$) και της Αντίστασης Φορτίου ($R_L = 50\Omega$). Γι' αυτό και δεν έχουμε ανακλώμενο παλμό. Όλη η προσπίπτουσα ηλεκτρική ενέργεια (υπό την μορφή του παλμού) απορροφάται από το φορτίο. (**Θεώρημα Μεγίστης Μεταφοράς Ισχύος**).

Στην περίπτωση της **Εικόνας 5**, όπου η Αντίσταση Φορτίου ($R_L = 75\Omega$) διαφέρει κατά 50% από την Χαρακτηριστική Αντίσταση του καλωδίου ($Z_o = 50\Omega$) υπάρχει μια μικρή ανάκλαση προς τη πηγή.

Οι παρακάτω εικόνες δείχνουν πραγματικές κυματομορφές από ψηφιακό παλμογράφο (μαζί με τα χαρακτηριστικά των μετρήσεων) για διάφορα μήκη καλωδίου.



Εικόνα 6.

Time : 9/3/2014 10:37:04 $\mu\mu$
Description : **21m unterminated coaxial cable**

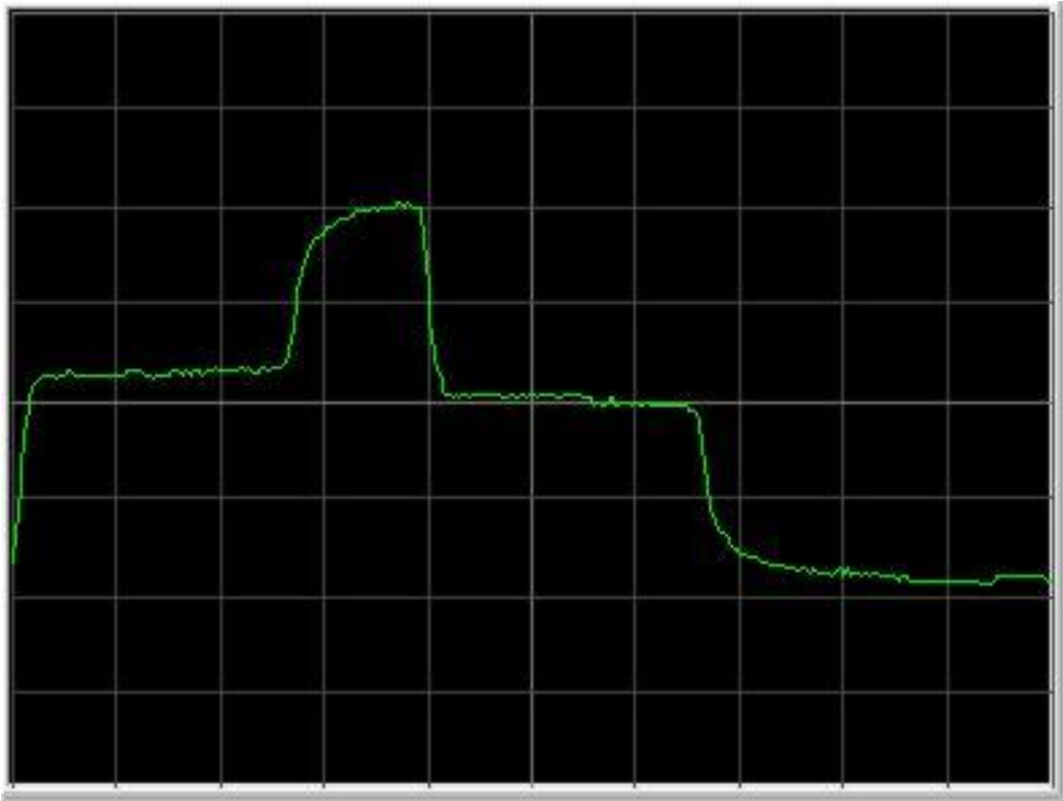
---Source Parameters

Ch1/Ch2 : CH1
Vertical Scale : 5.000E-1
Vertical Position : -1.040E+0
Coupling : DC

Horizontal Scale : 2.500E-7
Horizontal Position : 1.190E-6

Trigger Type : CH1
Trigger Source: 8.000E-2
Trigger Level : Rising
Trigger Slope : DC
Trigger Coupling : Sample

Acquire Mode :



Εικόνα 7.

Time : 9/3/2014 10:47:31 μm
Description : **66m unterminated coaxial cable**

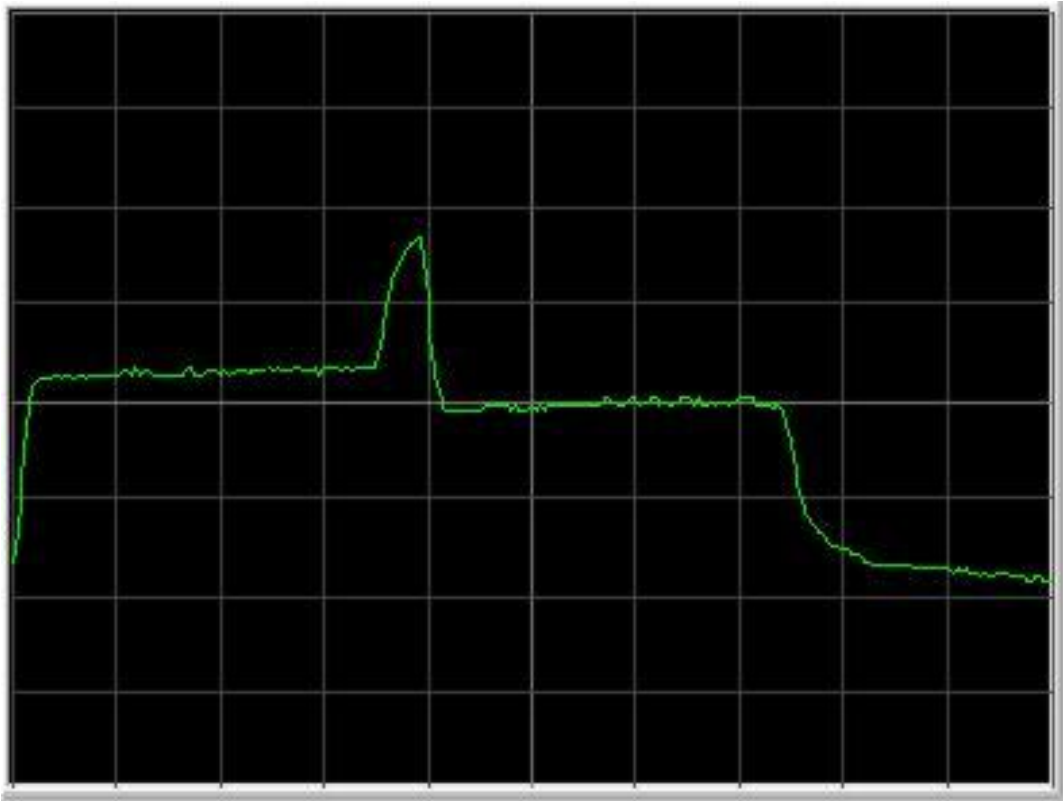
---Source Parameters

Ch1/Ch2 : CH1
Vertical Scale : 5.000E-1
Vertical Position : -1.040E+0
Coupling : DC

Horizontal Scale : 2.500E-7
Horizontal Position : 1.190E-6

Trigger Type : CH1
Trigger Source: 8.000E-2
Trigger Level : Rising
Trigger Slope : DC
Trigger Coupling : Sample

Acquire Mode :



Εικόνα 8.

Time : 9/3/2014 10:49:02 μμ
Description : **87m unterminated coaxial cable**

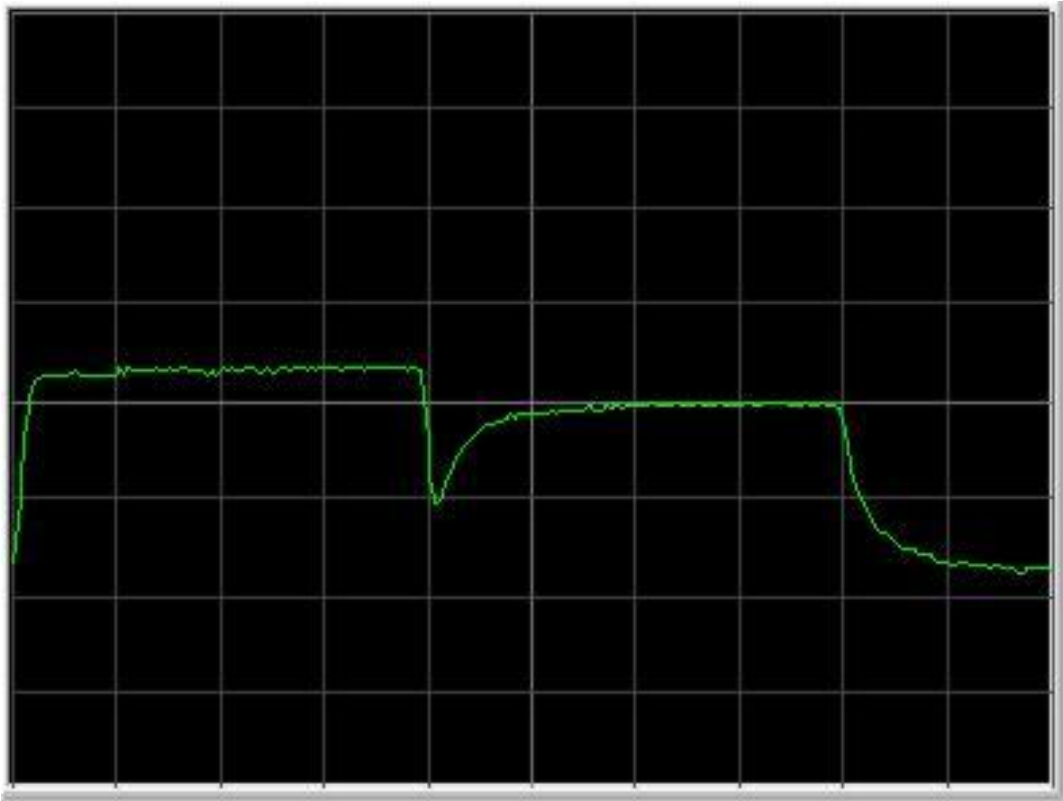
---Source Parameters

Ch1/Ch2 : CH1
Vertical Scale : 5.000E-1
Vertical Position : -1.040E+0
Coupling : DC

Horizontal Scale : 2.500E-7
Horizontal Position : 1.190E-6

Trigger Type : CH1
Trigger Source: 8.000E-2
Trigger Level : Rising
Trigger Slope : DC
Trigger Coupling : Sample

Acquire Mode :



Εικόνα 9.

Time : 9/3/2014 10:50:59 μμ
Description : **100m unterminated coaxial cable**

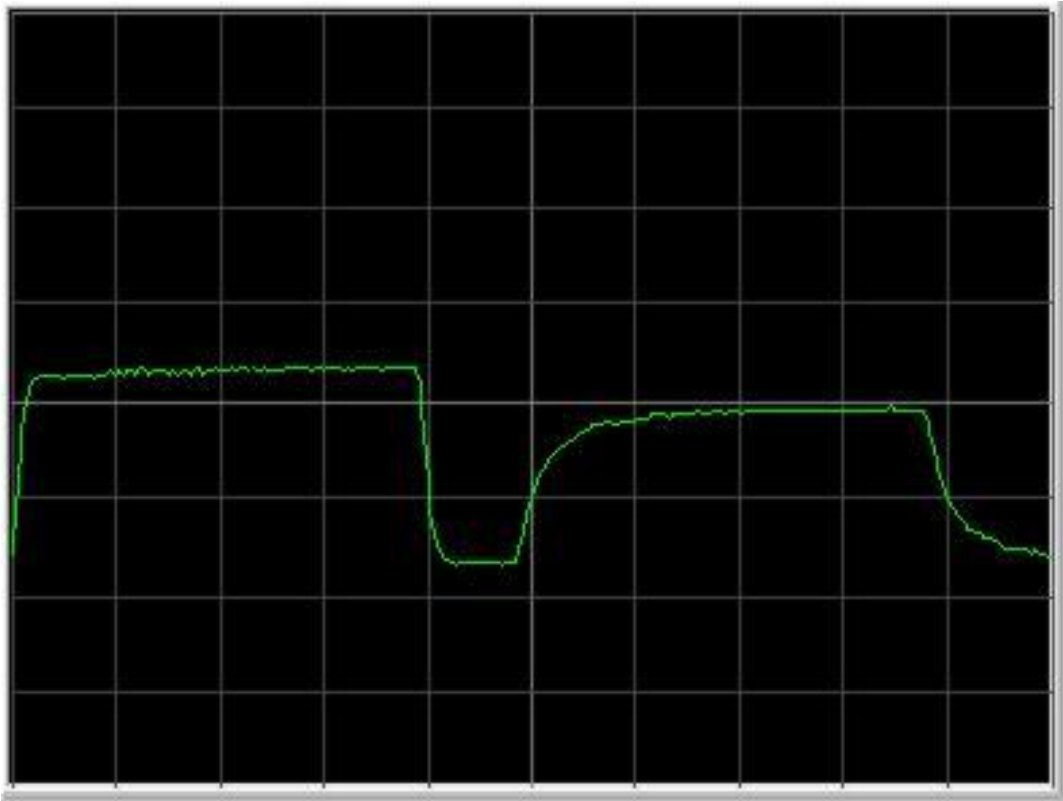
---Source Parameters

Ch1/Ch2 : CH1
Vertical Scale : 5.000E-1
Vertical Position : -1.040E+0
Coupling : DC

Horizontal Scale : 2.500E-7
Horizontal Position : 1.190E-6

Trigger Type : CH1
Trigger Source: 8.000E-2
Trigger Level : Rising
Trigger Slope : DC
Trigger Coupling : Sample

Acquire Mode :



Εικόνα 10.

Time : 9/3/2014 10:52:15 μμ
Description : **121m unterminated coaxial cable**

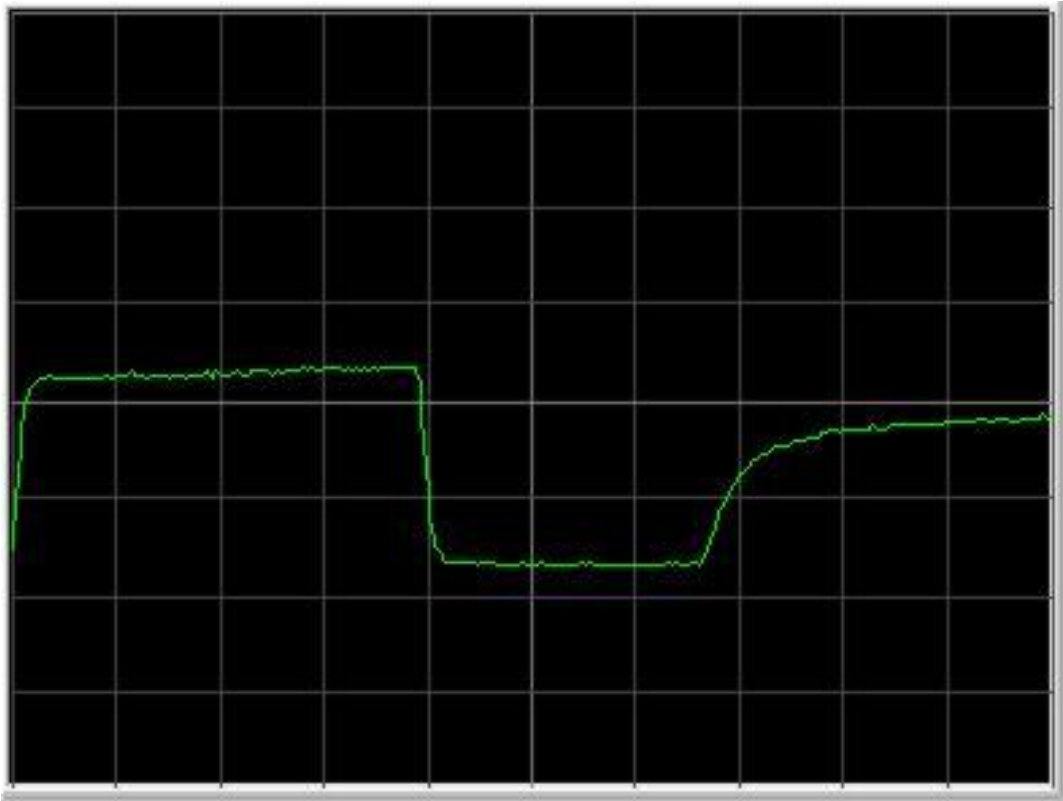
---Source Parameters

Ch1/Ch2 : CH1
Vertical Scale : 5.000E-1
Vertical Position : -1.040E+0
Coupling : DC

Horizontal Scale : 2.500E-7
Horizontal Position : 1.190E-6

Trigger Type : CH1
Trigger Source: 8.000E-2
Trigger Level : Rising
Trigger Slope : DC
Trigger Coupling : Sample

Acquire Mode :



Εικόνα 11.

Time : 9/3/2014 10:54:29 $\mu\mu$
Description : **166m unterminated coaxial cable**

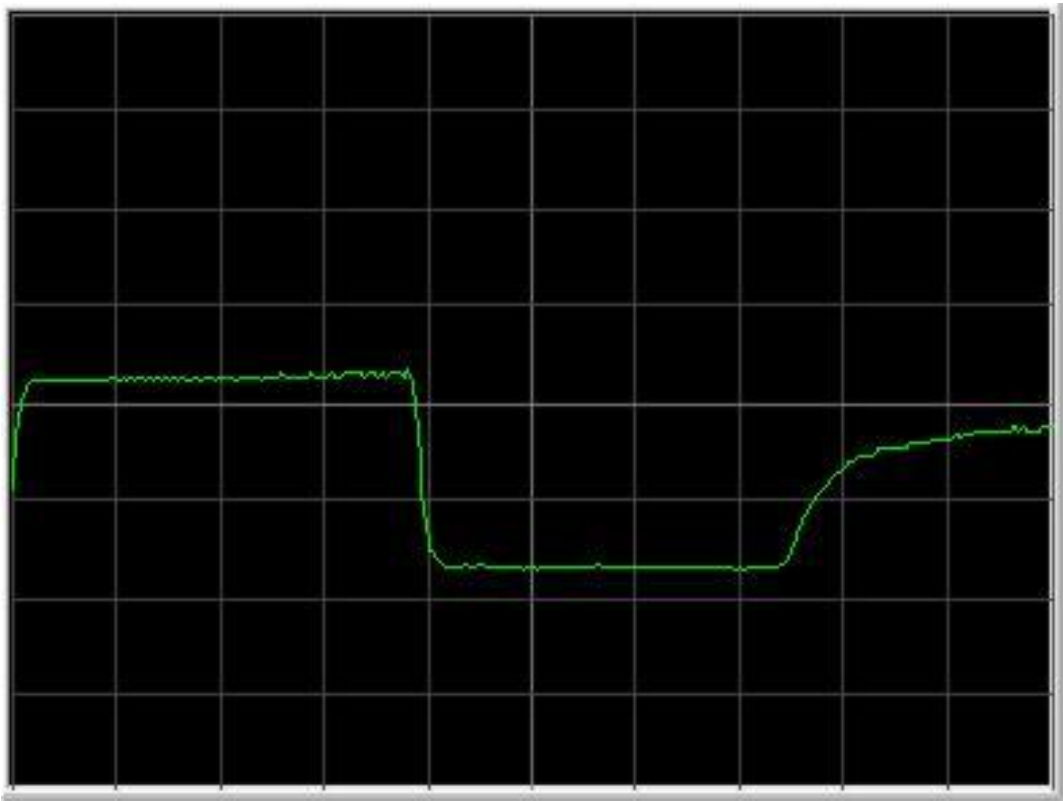
---Source Parameters

Ch1/Ch2 : CH1
Vertical Scale : 5.000E-1
Vertical Position : -1.040E+0
Coupling : DC

Horizontal Scale : 2.500E-7
Horizontal Position : 1.190E-6

Trigger Type : CH1
Trigger Source: 8.000E-2
Trigger Level : Rising
Trigger Slope : DC
Trigger Coupling : Sample

Acquire Mode :



Εικόνα 12.

Time : 9/3/2014 10:55:57 μm
Description : **187m unterminated coaxial cable**

---Source Parameters

Ch1/Ch2 : CH1
Vertical Scale : 5.000E-1
Vertical Position : -1.040E+0
Coupling : DC

Horizontal Scale : 2.500E-7
Horizontal Position : 1.190E-6

Trigger Type : CH1
Trigger Source: 8.000E-2
Trigger Level : Rising
Trigger Slope : DC
Trigger Coupling : Sample

Acquire Mode :

Παρατήρηση 1). Κάποιος προσεκτικός αναγνώστης μπορεί να παρατηρήσει, στις **Εικόνες 6 – 12**, ότι αυξανόμενου του μήκους του υπό μέτρηση καλωδίου, μειώνεται το πλάτος του ανακλώμενου παλμού. Πολύ εύκολα έτσι θα μπορούσε να μετρηθεί η **Εξασθένηση** του καλωδίου αυτού.

Παρατήρηση 2). Ένας ακόμη πιο προσεκτικός αναγνώστης θα αναρωτιόταν γιατί οι κυματομορφές στις **Εικόνες 3 και 9** έχουν διαφορετική μορφή αφού μετρούν καλώδιο ίδιου μήκους με ίδιο τύπου τερματισμό; Η απεικόνιση των κυματομορφών είναι σωστή και το καλώδιο είναι το ίδιο ακριβώς. Απλώς, κάποιος πρέπει να παρατηρήσει προσεκτικά ότι στην **Εικόνα 3** το TIME/DIV είναι 0,5 μsec και η καθυστέρηση (Delay) άφιξης του ανακλώμενου παλμού είναι 1 μsec, ενώ στην **Εικόνα 9** το Horizontal Scale είναι 250 nsec και η καθυστέρηση (Delay) άφιξης του ανακλώμενου παλμού είναι και πάλι 1 μsec!!!!. Το “μυστήριο” λύνεται αν λάβουμε υπ' όψη τη συχνότητα της κυματομορφής των τετραγωνικών παλμών και το Duty Cycle (ουσιαστικά τη διάρκεια) των τετραγωνικών παλμών στη κάθε περίπτωση.

ΠΟΡΕΙΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

1. Προκειμένου να καθορίσουμε την ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο καλώδιό μας, εργαζόμαστε ως εξής:

α. Σε ομοαξονικό πάντα καλώδιο γνωστού μήκους, τουλάχιστον 20m, υλοποιούμε την συνδεσμολογία του **Σχήματος 6** και ρυθμίζουμε τη γεννήτρια να παρέχει τετραγωνική παλμοσειρά με συχνότητα επανάληψης 200KHz και Duty Cycle 20% και με τέτοιο πλάτος ώστε να έχουμε ευκρινή απεικόνιση στον παλμογράφο. Επίσης ρυθμίζουμε τα VOLTS/DIV και TIME/DIV του παλμογράφου ώστε να έχουμε ευκρινή απεικόνιση της κυματομορφής (TIME/DIV = 250 nsec).

β. Μετρήστε με όσον το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια το χρόνο T που αντιστοιχεί στο Delay μεταξύ του ανερχόμενου μετώπου του προσπίπτοντος παλμού και του ανερχόμενου μετώπου του ανακλώμενου παλμού. (Εαν ο παλμογράφος είναι ψηφιακός διευκολύνει πολύ η χρήση των cursors.)

γ. Απο τον παραπάνω τύπο μετασχηματισμένο ως προς $v_p = 2 * D / T$ υπολογίζουμε την v_p για τον συγκεκριμένο τύπο καλωδίου από τον συγκεκριμένο κατασκευαστή.

(Οι κατασκευαστές στα χαρακτηριστικά των καλωδίων που είναι γραμμές μεταφοράς, οφείλουν να δίδουν αυτή την παράμετρο με την ονομασία: Velocity Factor ή Velocity of Propagation. Η παραπάνω, πάντως, διαδικασία μας επιτρέπει τον καθορισμό της v_p ενός καλωδίου και από άγνωστο κατασκευαστή.)

δ. Λαμβάνοντας υπ' όψη ότι η ταχύτητας διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο κενό είναι: **299,792,458 m/s**, υπολογίστε τι

ποσοστιαίο κλάσμα αυτής της ταχύτητας είναι η v_p που υπολογίσατε στο προηγούμενο βήμα **γ**..

2. Αφού από το βήμα **1.γ**. έχει καθορισθεί η v_p , πραγματοποιούμε διάφορες μετρήσεις αντίστοιχες του βήματος **1.β**. σε ιδίου τύπου καλώδια τα οποία έχουν διάφορα μήκη (τα οποία είναι γνωστά στον εκπαιδευτή) και υπολογίζουμε τα μήκη τους με την βοήθεια του τύπου:

$$D = v_p * T/2$$

3. Σε συγκεκριμένο μήκος καλωδίου, ο εκπαιδευτής τοποθετεί διαφόρων ειδών τερματισμούς, χωρίς αυτοί να είναι ορατοί, και ο εκπαιδευόμενος καλείται να βρει το είδος του προβλήματος (αν υπάρχει) βασιζόμενος στις κυματομορφές των **Εικόνων 1 - 5**.