

Καλώδια...

Γιατί διαφορετικά καλώδια, ακόμα και αν είναι κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό έχουν διαφορετικό χαρακτήρα;

Τι κάνει ένα καλώδιο κατάλληλο για την μεταφορά ενός σήματος;

Βάση ποιων χαρακτηριστικών πρέπει να αγοράζουμε ένα καλώδιο;

Τα εξωτικά υλικά προσφέρουν τίποτα στην κατασκευή ενός καλωδίου;

Το βασικό ηλεκτρικό χαρακτηριστικό ενός αγωγού είναι η σύνθετη αντίσταση (εμπέδηση) που συμβολίζετε με το γράμμα Z . Η εμπέδηση είναι μιγαδικός αριθμός δηλαδή αποτελείτε από δύο μέρη το πραγματικό και το φανταστικό. Το πραγματικό δηλώνει την ωμική αντίσταση και το φανταστικό την χωρητική/αυτεπαγωγική αντίσταση. Η πραγματική αντίσταση είναι υπεύθυνη για τον υποβιβασμό της τάσης του σήματος ενώ η φανταστική ευθύνεται κυρίως για τις μεταβολές της φάσης του σήματος.

Ας ξεκινήσουμε από το ομοαξονικό καλώδιο που είναι και η πιο εύκολη για μελέτη περίπτωση. Το ομοαξονικό καλώδιο αποτελείτε από έναν εσωτερικό αγωγό που περιβάλλετε από ένα υλικό που δεν επιτρέπει την διέλευση του ρεύματος, και γύρω από αυτό υπάρχει ένα αγωγίμο πλέγμα (συνήθως από το ίδιο υλικό με τον αγωγό). Το πλέγμα περιβάλλετε κι αυτό με την σειρά του από διηλεκτρικό υλικό. Η περίπτωση του ομοαξονικού καλωδίου είναι η πιο εύκολη για μελέτη. Η σύνθετη αντίσταση του ομοαξονικού καλωδίου καθορίζετε περισσότερο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του παρά από το υλικό κατασκευής.

Για τις ανάγκες της συνέχεια του άρθρου θα χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω εφαρμογή (java applet) το οποίο μπορεί να υπολογίζει τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ομοαξονικού καλωδίου.

<http://www.amanogawa.com/archive/Coaxial/Coaxial-2.html>

Οι βασικοί παράμετροι που επηρεάζουν την σύνθετη αντίσταση είναι

1. η ακτίνα του εσωτερικού αγωγού (r)
2. η ακτίνα του εξωτερικού αγωγού (R)
3. η συχνότητα του σήματος (f)
4. η ειδική αντίσταση του αγωγού (ρ_s)
5. η ηλεκτρική διαπερατότητα του διηλεκτρικού (ϵ_r)
6. η αγωγιμότητα του διηλεκτρικού (σ)

Ας χρησιμοποιήσουμε λοιπόν ένα παράδειγμα. Χάλκινος αγωγός ($\rho=1,725 \cdot 10^8 \Omega \cdot m$), μήκους 1m, με ακτίνα εξωτερικού αγωγού $R=10mm$, ακτίνα εσωτερικού αγωγού $r=1,5mm$, ο οποίος μεταφέρει ηχητική πληροφορία ($20Hz < f < 20KHz$). Το διηλεκτρικό μας έχει μηδενική αγωγιμότητα ($\sigma=0S$) και η ηλεκτρική διαπερατότητα του διηλεκτρικού έχει μία τυπική τιμή ($\epsilon_i=2,3$ όσο περίπου τα έλαια στους πυκνωτές ελαίου).

Χρησιμοποιώντας την προσομοίωση θα πάρουμε ότι η συνθέτη αντίσταση του καλωδίου στα 20KHz είναι $Z_o = (75,008 + j3,532)\Omega$. Επαναλαμβάνουμε την ίδια μέτρηση στο 1 KHz και θα έχουμε $Z_o = (76,508 + j15,485)\Omega$. Τέλος επαναλαμβάνουμε την μέτρηση στα 20Hz και λαμβάνω $Z_o = (107,897 + j77,641)\Omega$.

Από τις μετρήσεις αυτές λοιπόν διαπιστώνουμε τα ακόλουθα:

- A. στο μεγαλύτερο μέρος του φάσματος η ωμική αντίσταση του καλωδίου παραμένει σταθερή περίπου στα 75Ω.
- B. κάτω από τα 1000Hz αρχίζει και αυξάνεται σημαντικά η ωμική αντίσταση του καλωδίου (στα 20Hz η τιμή της ωμικής αντίστασης θα είναι κατά 50% αυξημένη σε σχέση με τα 75Ω) που σημαίνει πρακτικά ότι το σήμα θα είναι πιο εξασθενημένο στις χαμηλές συχνότητες.
- C. Το φανταστικό μέρος της εμπέδησης συνέχεια αυξάνετε όσο θα ελαττώνετε η συχνότητα (από 3,532 στα 20KHz θα φτάσει στα 77,641 στα 20Hz). Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα η φάση του σήματος από περίπου $\phi=2,65^\circ$ στα 20KHz να γίνει $\phi=35,74^\circ$ στα 20Hz.

Ας αλλάξουμε τώρα το υλικό του καλωδίου και ας πάρουμε ένα καλώδιο από ασήμι ($\rho=1,4\Omega \cdot m$), και ας επαναλάβουμε τις μετρήσεις.

Χρησιμοποιώντας την προσομοίωση θα πάρουμε ότι η συνθέτη αντίσταση του καλωδίου στα 20KHz είναι $Z_o = (74,992 + j3,182)\Omega$. Επαναλαμβάνουμε την ίδια μέτρηση στο 1 KHz και θα έχουμε $Z_o = (76,222 + j14,003)\Omega$. Τέλος επαναλαμβάνουμε την μέτρηση στα 20Hz και λαμβάνω $Z_o = (104,206 + j72,424)\Omega$.

Ποιοτικά λοιπόν έχουμε περίπου τα ίδια αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα δεν θα αλλάξουν ποιοτικά αν χρησιμοποιήσουμε και άλλα μέταλλα (αλουμίνιο, χρυσός κλπ κλπ) σαν υλικό του αγωγού.

Ας αλλάξουμε τώρα τις διαμέτρους των αγωγών, και ας κάνουμε την διάμετρο του εσωτερικού αγωγού $r=5\text{mm}$, και ας ξανακάνουμε τις ίδιες μετρήσεις.

Η συνθετή αντίσταση του καλωδίου στα 20KHz είναι $Z_0 = (27,439 + j1,384)\Omega$. Επαναλαμβάνουμε την ίδια μέτρηση στο 1 KHz και θα έχουμε $Z_0 = (28,064 + j6,052)\Omega$. Τέλος επαναλαμβάνουμε την μέτρηση στα 20Hz και λαμβάνω $Z_0 = (40,421 + j29,713)\Omega$.

Διαπιστώνουμε ότι ισχύουν περίπου τα ίδια για την μεταβολή της ωμικής αντίστασης (σχεδόν σταθερή μέχρι το 1KHz και από εκεί και πέρα αύξηση της τιμής της κατά περίπου 50%), αλλά και για την μεταβολή της φάσης (πάλι στα 20Hz η διαφορά της φάσης θα είναι περίπου $\phi=36,31^\circ$ ενώ στα 20Hz θα είναι $\phi=2,88^\circ$).

Ας αυξήσουμε τώρα και την ακτίνα του εξωτερικού αγωγού $R=20\text{mm}$. Επαναλαμβάνοντας το ίδιο σετ μετρήσεων θα διαπιστώσουμε αξιοσημείωτες διαφορές. Η ωμική αντίσταση μεταβάλλετε πλέον λιγότερο από τα 20KHz μέχρι τα 20Hz (η μεταβολή είναι περίπου 16% σε σχέση με το 50% που είχαμε στις προηγούμενες περιπτώσεις), ενώ και η μεταβολή της φάσης είναι μικρότερη (από $\phi=1,21^\circ$ μέχρι $\phi=26,56^\circ$).

Άρα από καθαρής ηλεκτρικής απόψεως λοιπόν δεν παίζει ρόλο τόσο το υλικό κατασκευής του ομοαξονικού καλωδίου όσο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του.

Ας εξετάσουμε τώρα την περίπτωση δύο παράλληλων αγωγών. Πάλι θα χρησιμοποιήσουμε ένα java applet που βρίσκεται στην διεύθυνση

<http://www.amanogawa.com/archive/TwoWire/TwoWire-2.html>

Στο σύστημα των δύο παράλληλων αγωγών τα βασικά χαρακτηριστικά είναι,

7. η διάμετρος των αγωγών (d)
8. η απόσταση μεταξύ των αγωγών (D)
9. η συχνότητα του σήματος (f)
10. η ειδική αντίσταση του αγωγού (ρ_s)
11. η ηλεκτρική διαπερατότητα του διηλεκτρικού (ϵ_r)
12. η αγωγιμότητα του διηλεκτρικού (σ)

Ας χρησιμοποιήσουμε λοιπόν ένα παράδειγμα. Χάλκινος αγωγός ($\rho=1,725 \cdot 10^8 \Omega \cdot m$), μήκους 1m, με διάμετρο $d=5mm$, απόσταση μεταξύ των αγωγών $D=10mm$, ο οποίος μεταφέρει ηχητική πληροφορία ($20Hz < f < 20KHz$). Το μονωτικό των αγωγών έχει μηδενική αγωγιμότητα ($\sigma=0S$) και η ηλεκτρική διαπερατότητα του διηλεκτρικού έχει μία τυπική τιμή ($\epsilon_r=2,3$ όσο περίπου τα έλαια στους πυκνωτές ελαίου).

Χρησιμοποιώντας την προσομοίωση θα πάρουμε ότι η συνθέτη αντίσταση του καλωδίου στα 20KHz είναι $Z_o = (104,199 + j3,694)\Omega$. Επαναλαμβάνουμε την ίδια μέτρηση στο 1 KHz και θα έχουμε $Z_o = (105,405 + j16,329)\Omega$. Τέλος επαναλαμβάνουμε την μέτρηση στα 20Hz και λαμβάνω $Z_o = (136,914 + j88,891)\Omega$.

Ας αλλάξουμε τώρα το υλικό του καλωδίου και ας πάρουμε ένα καλώδιο από ασήμι ($\rho=1,4\Omega \cdot m$), και ας επαναλάβουμε τις μετρήσεις.

Χρησιμοποιώντας την προσομοίωση θα πάρουμε ότι η συνθέτη αντίσταση του καλωδίου στα 20KHz είναι $Z_o = (104,186 + j3,328)\Omega$. Επαναλαμβάνουμε την ίδια μέτρηση στο 1 KHz και θα έχουμε $Z_o = (105,172 + j14,743)\Omega$. Τέλος επαναλαμβάνουμε την μέτρηση στα 20Hz και λαμβάνω $Z_o = (132,866 + j82,520)\Omega$.

Παρατηρούμε κι εδώ (όπως και σε ένα ομοαξονικό καλώδιο) ότι η τιμή της ωμικής αντίστασης παραμένει περίπου σταθερή μέχρι το 1KHz και από κει και πέρα αυξάνει. Όσο για την μεταβολή της φάσης είναι παρόμοια με αυτή στο ομοαξονικό καλώδιο.

Ας πλησιάσουμε τους αγωγούς μεταξύ τους, ώστε να τους χωρίζει μόνο η μόνωση ($D=5.5mm$).

Η εμπέδηση του χάλκινου αγωγού τότε θα γίνει στα 20KHz $Z_o = (35,265 + j3,675)\Omega$. Επαναλαμβάνουμε την ίδια μέτρηση στο 1 KHz και θα έχουμε $Z_o = (38,213 + j15,170)\Omega$. Τέλος επαναλαμβάνουμε την μέτρηση στα 20Hz και λαμβάνω $Z_o = (68,993 + j59,413)\Omega$.

Διαπιστώνουμε ότι η μεταβολή της τιμής της ωμικής αντίστασης αυξάνεται. Όσο για την μεταβολή της φάσης αυτή είναι πιο μεγάλη σαν τιμή αλλά μικρότερη ως ποσοστό. Άρα σε αυτή την περίπτωση καλό θα είναι να ακολουθήσουμε την μέση οδό. Οι δύο αγωγοί θα πρέπει να είναι όχι σε επαφή αλλά ούτε και σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους.

Ας εξετάσουμε τέλος ένα ομοαξονικό καλώδιο κατά την μεταφορά του ψηφιακού σήματος (από $f=32\text{KHz}$ μέχρι $f=192\text{KHz}$). Παρατηρούμε ότι ανεξαρτήτως υλικού η τιμή της ωμικής αντίστασης είναι αξιοσημείωτα σταθερή (την τιμή μπορούμε να την ρυθμίσουμε αλλάζοντας τις ακτίνες των αγωγών. Για να πετύχουμε το στάνταρ των 75Ω μπορούμε να βάλουμε $r=1,5\text{mm}$ και $R=10\text{mm}$). Η μεταβολή της φάσης από την άλλη είναι ελάχιστη, ανεξαρτήτως του υλικού (ασήμι, χαλκός ή αλουμίνιο). Άρα σε αυτή την περίπτωση τον κύριο ρόλο παίζουν όχι τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του καλωδίου, αλλά η σωστή γεωμετρία και η καλή ποιότητα κατασκευής....

Γιατί όμως υπάρχουν διαφορές μεταξύ των καλωδίων;

Η απάντηση είναι ότι πρέπει να κοιτάξουμε λίγο πέρα από τα καθαρά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Υπάρχουν 4 βασικοί παράγοντες (κατά την άποψή μου)

A) η οξείδωση του καλωδίου

Όλοι οι μεταλλικοί αγωγοί (πλην αυτών που είναι από χρυσό ή κάποια συγκεκριμένα μεταλλικά κράματα) οξειδώνονται με το πέρασμα του χρόνου. Η οξείδωση αυτή πολλές φορές δεν είναι ορατή με γυμνό μάτι, και συνήθως επηρεάζει την εξωτερική επιφάνεια του μετάλλου. Τα οξείδια των μετάλλων συμπεριφέρονται τις περισσότερες φορές διαφορετικά από το ίδιο το μέταλλο (τα οξείδια του χαλκού είναι λιγότερο αγωγίμα από τον χαλκό, ενώ του ασημιού έχουν περίπου την ίδια αγωγιμότητα με το ασήμι)

B) το επιδερμικό φαινόμενο

Έχει αποδειχθεί ότι η πυκνότητα του ρεύματος στο εσωτερικό ενός αγωγού είναι μέγιστη στην επιφάνεια του αγωγού και ελαχιστοποιείται καθώς πηγαίνουμε προς το κέντρο του. Άρα το εξωτερικό του αγωγού είναι πιο κρίσιμο για την μεταφορά του σήματος. Αυτό αν συνδυαστεί με τα όσα είπαμε παραπάνω για την οξείδωση του εξωτερικού τμήματος του αγωγού μπορούμε να καταλάβουμε την σπουδαιότητα της οξείδωσης, μιας που το οξειδωμένο τμήμα του αγωγού θα μεταφέρει το περισσότερο σήμα. Το φαινόμενο αυτό όμως έχει να κάνει κυρίως με τις συχνότητες του σήματος που μεταφέρει το καλώδιο, και με την γεωμετρία του καλωδίου (ένα ribbon ic θα «υποφέρει» περισσότερο από ένα συμβατικό). Για αυτό είναι πιο κρίσιμο στα ψηφιακά καλώδια που μπορεί να χρειαστεί να μεταφέρουν σήματα μεγάλης συχνότητας (π.χ. 192kHz) και ουσιαστικά δεν επηρεάζει τα καλώδια που θα μεταφέρουν αναλογικό ηχητικό σήμα.

Γ) η καθαρότητα του αγωγού-ατέλειες μεταλλικού πλέγματος

Τα μέταλλα αναλόγως της κατεργασίας που έχουν υποστεί έχουν διάφορες προσμίξεις μέσα τους. Οι προσμίξεις αυτές παίζουν κρίσιμο ρόλο γιατί αλλοιώνουν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του αγωγού. Ρόλο παίζει όχι μόνο η ποσότητα των προσμίξεων αλλά και το είδος τους. Και κάτι που ελάχιστοι γνωρίζουν είναι ότι όλες οι ατέλειες του μεταλλικού πλέγματος με την πάροδο του χρόνου μετακινούνται στην επιφάνεια του αγωγού, κάτι που αν το συνδυάσουμε με το επιδερμικό φαινόμενο, δείχνει την κρίσιμότητα αυτού του παράγοντα

Δ) Ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας που συχνά παραβλέπετε είναι η δημιουργία στάσιμων κυμάτων μέσα στο καλώδιο.

Όλα τα καλώδια λειτουργούν ως γραμμές μεταφοράς. Κάθε γραμμή μεταφορά όμως θα πρέπει να τερματίζει στην χαρακτηριστική της εμπέδηση για να έχουμε σωστή λειτουργία. Δηλαδή η εμπέδηση του φορτίου θα πρέπει να είναι ίδια, ή καλύτερα παραπλήσια, με την εμπέδηση της γραμμής μεταφοράς (δηλ. του καλωδίου). Σε διαφορετική περίπτωση μπορεί να δημιουργηθούν στάσιμα κύματα στην γραμμή μεταφοράς .

Το στάσιμο κύμα δημιουργείται από την ανάκλαση του σήματος πίσω στην πηγή του. Η σύνθεση του κανονικού σήματος και του ανακλώμενου δημιουργούν το στάσιμο κύμα. Δυστυχώς όμως η εμπέδηση του φορτίου δεν είναι ποτέ ίση με αυτήν της γραμμής μεταφοράς (καλώδια). Πάντα θα υπάρχει μία διαφορά είτε στο πραγματικό είτε στο φανταστικό τμήμα της εμπέδησης (είχαμε πει ότι η εμπέδηση είναι μιγαδική και αποτελείται από το πραγματικό-ωμικό τμήμα και το φανταστικό -χωρητικό ή επαγωγικό τμήμα)

Στάσιμο κύμα μπορεί να έχουμε όχι μόνο από την διαφορά της εμπέδησης μεταξύ πηγής-φορτίου αλλά και λόγω κακής προσαρμογής της γραμμής μεταφοράς στο φορτίο. Η κακή προσαρμογή μπορεί να δημιουργήσει στάσιμα κύματα μικρότερου όμως πλάτους από την διαφορά των εμπεδήσεων (Για αυτό στα καλώδια πάντα θα πρέπει να έχουμε πολύ καλή επαφή του θυληκού με το αρσενικό βύσμα. Στα καλώδια ηχείων χρειάζεται είτε πολύ καλό σφίξιμο του γυμνού καλωδίου είτε πολύ καλά τοποθετημένα βύσματα)

Τέλος στάσιμο κύμα μπορούμε να έχουμε (σε ακραίες περιπτώσεις) και λόγω της διαφοράς υλικού μεταξύ γραμμής μεταφοράς και ακροδεκτών. Γι' αυτό και πάλι προσοχή στους ακροδέκτες σας. Καλό είναι να είναι από το ίδιο υλικό με το καλώδιο.

Τώρα το μέγεθος των στάσιμων κυμάτων σε μια γραμμή μεταφοράς προσδιορίζεται από το λόγο του μέγιστου ρεύματος προς το ελάχιστο ρεύμα της γραμμής ή της μέγιστης τάσης με την ελάχιστη τάση της γραμμής. Αυτοί οι λόγοι καλούνται SWR (standing-wave ratio).

$$\text{SWR} = I_{\max}/I_{\min} \quad \text{ή αλλιώς} \quad \text{SWR} = V_{\max}/V_{\min}$$

Μεγάλε τιμές του λόγου αυτού σημαίνει μεγάλη ανάκλαση του σήματος. Αν έχουμε σωστό τερματισμό δεν έχουμε στάσιμο κύμα. (τότε ο λόγος έχει τιμή $\text{SWR}=0$)

Ο SWR μπορεί να υπολογιστεί αν γνωρίζουμε την εμπέδηση της γραμμής μεταφοράς και αυτή του φορτίου.

$$\begin{aligned} \text{SWR} &= Z_i/Z_l \text{ αν } Z_i > Z_l \\ &\text{ή} \\ \text{SWR} &= Z_l/Z_i \text{ αν } Z_i < Z_l \end{aligned}$$

(όπου Z_i η εμπέδηση της γραμμής μεταφοράς και Z_l αυτή του φορτίου)

ΠΡΟΣΟΧΗ. Και τα δύο αυτά μεγέθη (Z_i και Z_l) είναι μιγαδικά .

Ο λόγος τώρα της τάσης του σήματος προς την ανακλώμενη τάση ονομάζεται συντελεστής ανάκλασης και συμβολίζεται με R . Το R λοιπόν είναι ίσο με:

$$R = V_r/V_i$$

(όπου V_r η ανακλώμενη τάση και V_i η τάση του σήματος.)

Αν η εμπέδηση του φορτίου είναι ίδια με αυτή της γραμμής μεταφοράς τότε έχουμε $R=0$, Ενώ αν έχω πλήρη ανάκλαση τότε $R=1$.

Ο SWR μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει του R . Έτσι έχουμε

$$\text{SWR} = (1 + R)/(1 - R),$$

Ενώ το R μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει των Z_l και Z_i .

$$R = (Z_l - Z_i)/(Z_l + Z_i)$$

Η πρακτική σημασία του SWR, είναι ότι μας δίνει μια σχετική ένδειξη της ισχύος που χάνεται στην γραμμή μεταφοράς. Π.χ. για $\text{SWR}=1$ έχω

απώλειες 0%, για SWR=1.5 απώλειες 4% για SWR<2 απώλειες λιγότερο από 10%. Από εκεί και πάνω οι τιμές των απωλειών αυξάνονται δραματικά.

Στα ψηφιακά interconnect καλώδια (AES-EBU και coaxial) μπορούμε να περιορίσουμε τις απώλειες γιατί εκεί οι γραμμές μεταφοράς έχουν σταθερή τιμή (75Ω για τα coaxial και 110Ω για τα AES/EBU) στο πραγματικό τμήμα τη εμπέδησης. Με κάποιες ενδιάμεσες τιμές στο φανταστικό τμήμα μπορούμε να έχουμε καλύτερη συμπεριφορά του καλωδίου. Γι' αυτό και δυσκολότερα μπορούμε να εντοπίσουμε διαφορές σε ψηφιακά καλώδια παρά σε αυτά που μεταφέρουν αναλογικό σήμα.

Στα αναλογικά καλώδια όμως δεν υπάρχει κάποια σταθερή τιμή της εμπέδησης και έτσι λοιπόν το «ταίριασμα» του καλωδίου είναι περισσότερο θέμα τύχης Υπάρχουν ορισμένα καλώδια τα οποία έχουν ακραίες εμπέδησης και τα οποία δύσκολα θα ταιριάξουν με ένα φορτίο, ενώ υπάρχουν κάποια περίεργα φορτία που απαιτούν περίεργα καλώδια. Στην πράξη μονό με δοκιμές μπορούμε να βρούμε το κατάλληλο καλώδιο, αφού τόσο οι κατασκευαστές των ηχητικών συσκευών όσο και των καλωδίων αποφεύγουν να δίνουν πραγματικές τιμές εμπεδησεων.

Συμπεράσματα

Άρα αυτό που θα πρέπει να προσέχουμε σε ένα **ομοαξονικό καλώδιο** για την μεταφορά **αναλογικού και ψηφιακού σήματος** είναι:

- α) η ποιότητα της κατασκευής.
- β) η σωστή γεωμετρία.
- γ) η ποιότητα του υλικού του αγωγού.

Επομένως δεν υπάρχει λόγος να επενδύουμε τεράστια ποσά σε καλώδια απλά γιατί είναι από εξωτικά υλικά ή έχουν εξωφρενικές καθαρότητες. Αρκεί ένα καλά κατασκευασμένο καλώδιο από χαλκό. Μία κακή κόλληση, ή ένα εσωτερικό σπάσιμο του υλικού που δεν μπορεί να φανεί συνήθως με γυμνό μάτι, μπορεί να επηρεάσουν τον ήχο περισσότερο απ' ότι το υλικό κατασκευής του καλωδίου.