



## ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΥΨΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ (Θ)

### Ενότητα 1: Μικροκυματική Τεχνολογία

ΔΙΔΑΣΚΩΝ: Δρ. Στυλιανός Τσίτσος  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΤΕ



# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



# Ενότητα 1

---

## Μικροκυματική Τεχνολογία

Δρ. Στυλιανός Τσίτσος

# Περιεχόμενα ενότητας

---

# Σκοποί ενότητας

---

# Μικροκυματική Τεχνολογία

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΑ

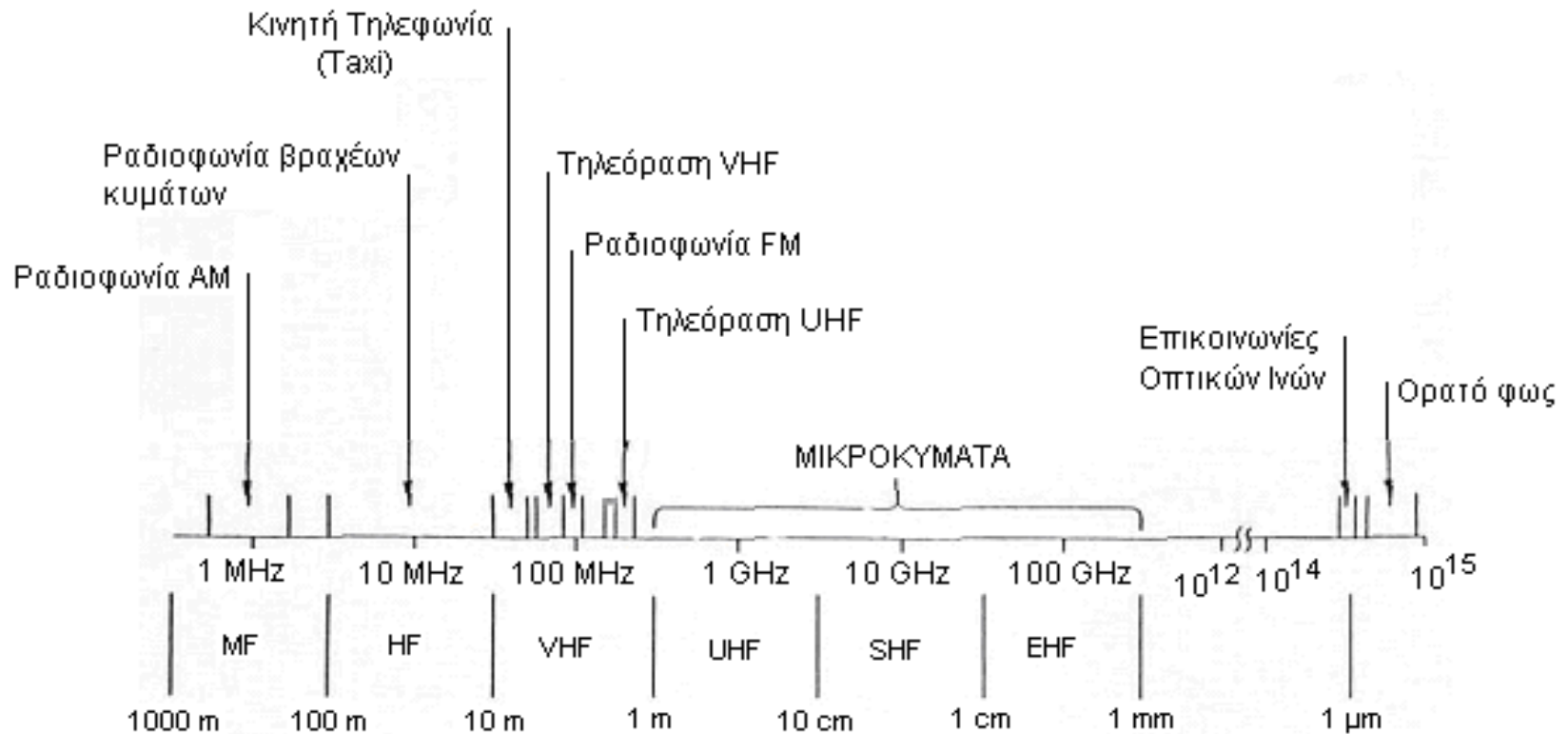
- Η επιστήμη των Μικροκυμάτων ξεκίνησε με την ανάπτυξη του ραντάρ και επεκτάθηκε κατά τη διάρκεια του 2ου Παγκοσμίου Πολέμου.
- Η ανακάλυψη των μικροκυματικών πηγών όπως το κλύστρον και το μάγνητρον άνοιξε τη συχνότητα των Γιγάκυκλων ( $GHz=10^9Hz$ ) στους Μηχανικούς Τηλεπικοινωνιών.
- Η εμπορική χρησιμοποίηση των δορυφόρων έφερε επανάσταση στις Τηλεπικοινωνίες και οι μικροκυματικές ζεύξεις αντικατέστησαν πολλά χιλιόμετρα τηλεφωνικών καλωδίων.
- Τα μικροκύματα είναι ουσιαστικά η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συχνοτήτων από μερικές εκατοντάδες  $MHz$  μέχρι μερικές εκατοντάδες  $GHz$ . Για σύγκριση, το σήμα από έναν ραδιοσταθμό  $AM$  είναι περίπου  $1 MHz$  και το σήμα από έναν σταθμό  $FM$  είναι περίπου  $100 MHz$ .
- Το μεγάλο πρόβλημα στις συχνότητες των μικροκυμάτων είναι το μέγεθος του μήκους κύματος του σήματος.
  - Μήκος κύματος γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας στη συχνότητα  $f=50 Hz$ :  $\lambda=c/f=6.000 km$ , (όπου  $c=3\cdot 10^9 m/sec$  η ταχύτητα του φωτός).
  - Μήκος κύματος σήματος συχνότητας  $f=1 MHz$ :  $\lambda=300 m$ .
- Ο μεγάλος λόγος διαστάσεων μήκους κύματος προς συσκευή έχει σαν αποτέλεσμα πολύ μικρές διαφορές φάσεως σε διαφορετικά σημεία δοκιμής. Έτσι οι λύσεις των εξισώσεων του Maxwell απλοποιούνται πάρα πολύ και προκύπτει ο νόμος του Ohm και άλλα θεωρήματα που κάνουν το σχεδιασμό κυκλωμάτων σε χαμηλές συχνότητες σχετικά εύκολο.

# Μικροκυματική Τεχνολογία

- Στην Τεχνολογία Μικροκυμάτων δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν τις εξισώσεις των χαμηλών συχνοτήτων για την ανάλυση ή το σχεδιασμό ενός μικροκυματικού κυκλώματος. Η μόνη αξιόπιστη πηγή είναι οι εξισώσεις Maxwell. Στις μικροκυματικές συχνότητες, το μήκος κύματος ενός σήματος είναι συγκρίσιμο ή ακόμη και μικρότερο από τις φυσικές διαστάσεις της συσκευής.
  - Για παράδειγμα, το μήκος κύματος ενός σήματος  $10\text{ GHz}$  είναι  $3\text{ cm}$ . Έτσι, δύο γειτονικά σημεία δοκιμής μπορεί να έχουν σημαντική διαφορά φάσεως.
  - Παρόμοια, επειδή ένα προς τα εμπρός κινούμενο κύμα μπορεί να ανακλαστεί μερικώς εξαιτίας μιας κακής προσαρμογής στο κύκλωμα, ένα σημείο δοκιμής στο κύκλωμα είναι η υπέρθεση του προς τα εμπρός και του ανακλώμενου κύματος. Αυτά τα δύο κύματα διαφέρουν μεταξύ τους κατά μία σημαντική γωνία φάσεως και κατά τη διεύθυνση της διάδοσής τους με αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός **στασίμου κύματος**.
  - Άλλα φαινόμενα υψηλής συχνότητας όπως οι **απώλειες λόγω ακτινοβολίας**, οι **διηλεκτρικές απώλειες** και οι **παρασιτικές χωρητικότητες** καθιστούν το σχεδιασμό των μικροκυματικών κυκλωμάτων δύσκολο.
  - Συνεπώς, δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε απλά καλώδια και χαμηλής συχνότητας στοιχεία, όπως αντιστάσεις, πυκνωτές και πηνία, επειδή αυτά τα στοιχεία έχουν διαφορετική συμπεριφορά στις υψηλές συχνότητες που οδηγεί σε πιθανή αστοχία τους. Η κατασκευή δικτύων υψηλών συχνοτήτων είναι πολύ ευαίσθητη στο σχήμα και στις ασυνέχειες των αγωγών.

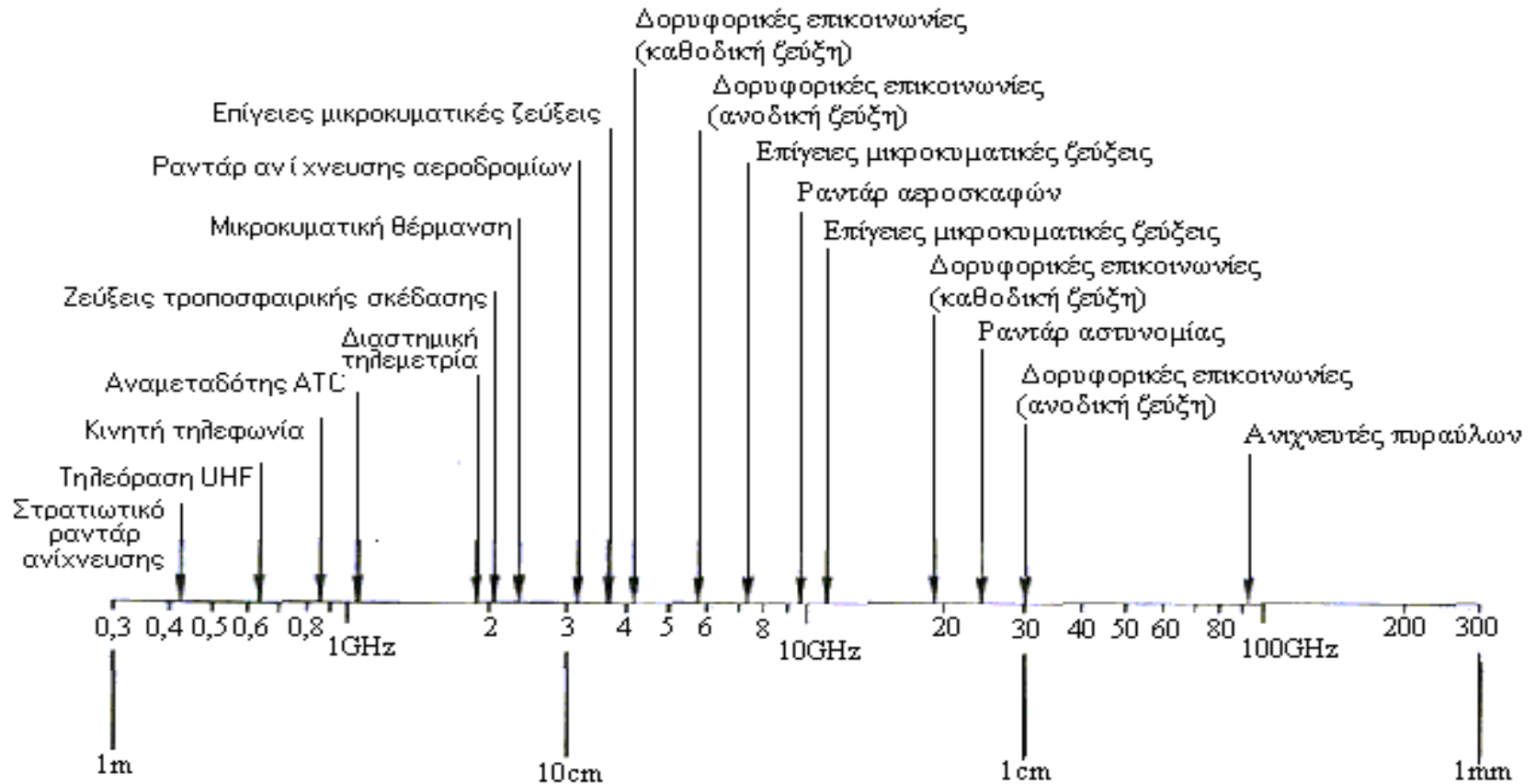


# Μικροκυματική Τεχνολογία



**Σχήμα 1.1:** Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα από συχνότητες  $\text{MHz}$  έως  $10^{15} \text{ Hz}$  και εφαρμογές.

# Μικροκυματική Τεχνολογία



Σχήμα 1.2: Το μικροκυματικό φάσμα από υπό-GHz συχνότητες μέχρι εκατοντάδες GHz και εφαρμογές.

# Μικροκυματική Τεχνολογία

- Τα μικροκυματικά σήματα μπορούν να διαδοθούν μέσα από την ιονόσφαιρα με ελάχιστες απώλειες. Όμως, οι υδρατμοί, η βροχή, το όζον και το οξυγόνο απορροφούν τα μικροκύματα και τα εξασθενούν σε ορισμένες συχνότητες. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε συχνότητες της τάξεως δεκάδων  $MHz$  και κάτω, δεν μπορεί να εισχωρήσει στην ιονόσφαιρα αλλά ανακλάται πίσω. Τα μικροκύματα όμως, μπορούν να εισχωρήσουν στην ιονόσφαιρα υφιστάμενα κάποια περίθλαση. Έτσι οι διαστημικές επικοινωνίες χρησιμοποιούν μικροκύματα.
- Τα μικροκυματικά σήματα ως φέροντα κύματα μπορούν να συγκεντρώσουν περισσότερη πληροφορία μέσα στο εύρος ζώνης τους.
  - Η τυπική συχνότητα φέροντος ενός σήματος  $AM$  είναι  $1 MHz$  και η πληροφορία της μουσικής και της φωνής (που ονομάζονται ακουστική πληροφορία) περιέχονται σε ένα εύρος ζώνης  $40 kHz$ , δηλαδή  $4\%$  του φέροντος.
  - Αν χρησιμοποιηθεί ένα κύμα  $10 GHz$  ως φέρον, τότε ένα εύρος ζώνης  $1\%$  θα είναι  $100 MHz$ , που σημαίνει ότι  $100 MHz / 40 kHz = 25.000$  ξεχωριστές ομάδες ακουστικής πληροφορίας μπορούν θεωρητικά να διευθετηθούν.
- Πέρα από τις τηλεπικοινωνίες, η επιστήμη των μικροκυμάτων έχει εφαρμογές και σε άλλους τομείς, όπως η απομάκρυνση οργανικού θείου και άλλων πιθανών ρυπαντών από τον άνθρακα, η ανίχνευση των δινορευμάτων σε ένα κομμάτι μετάλλου με ρωγμές κλπ., καθώς και εφαρμογές στην Ιατρική (καταπολέμηση καρκίνου, μαγνητική τομογραφία, κλπ.).

# Μικροκυματική Τεχνολογία

## Η κλίμακα decibel

- Η κλίμακα decibel χρησιμοποιείται κυρίως για τη σύγκριση λόγων ισχύος ή τάσεως. Αν θεωρήσουμε μόνο ηλεκτρική ισχύ, θα έχουμε:

$$dB = 10 \cdot \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (1.1)$$

- Το  $dB$  δεν είναι φυσική ποσότητα αλλά παριστάνει το λόγο δύο φυσικών ποσοτήτων και είναι ένας αδιάστατος αριθμός. Αν η ισχύς αναφοράς  $P_2$  είναι το  $1W$  τότε το  $dB$  γίνεται  $dBW$ , ενώ αν  $P_2=1 mW$  τότε το  $dB$  γίνεται  $dBm$ .

(Σημείωση: Δεν μπορούμε να πολλαπλασιάσουμε μαζί δύο στάθμες ισχύος, επειδή ένα τέτοιο γινόμενο δεν έχει φυσική σημασία. Συνεπώς η πράξη  $dBm+dBm$  δεν υφίσταται).

- Σε πολλές περιπτώσεις, οι ισχείς μπορούν να εκφραστούν σε όρους των συσχετιζόμενων τάσεών τους:

$$dB = 10 \cdot \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{V_1^2 \cdot R_2}{V_2^2 \cdot R_1}\right) \quad (1.2)$$

- Συνήθως, οι δύο αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  εκλέγονται να είναι ίσες για λόγους σύγκρισης. Αυτό σημαίνει, ότι η ισχύς που παράγεται από δύο ξεχωριστές τάσεις,  $V_1$  και  $V_2$  μπορεί να συγκριθεί όταν εφαρμόζεται σε αντιστάσεις με ίδιες τιμές. Συνεπώς:

$$dB = 10 \cdot \log\left(\frac{V_1^2}{V_2^2}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (1.3)$$

## To Neper

- Ο λόγος ισχύων μπορεί να εκφραστεί με βάση τον αριθμό  $e=2,718$ , οπότε χρησιμοποιείται ο φυσικός λογάριθμος  $\ln$  και έτσι ορίζεται το *Neper* ως:

$$Neper = \ln(P_1 / P_2) \quad (1.4)$$

# Μικροκυματική Τεχνολογία

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

### Εισαγωγή

- Στην ηλεκτρονική χαμηλών συχνοτήτων, τα ηλεκτρικά σήματα ταξιδεύουν από το ένα στοιχείο στο άλλο μέσω συνδετικών καλωδίων. Η απώλεια ισχύος στα καλώδια είναι συνήθως ωμική.
- Καθώς η συχνότητα αυξάνει, οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας και οι διηλεκτρικές απώλειες γίνονται σημαντικές. Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας είναι ενέργεια που ακτινοβολείται ως αποτέλεσμα του ότι ένα καλώδιο λειτουργεί όπως μία κεραία. Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας σχετίζονται με τη συχνότητα και την ισχύ των σημάτων που μεταφέρονται στα καλώδια.
- Στις διηλεκτρικές απώλειες, τα επαγόμενα επιφανειακά φορτία στο διηλεκτρικό, που οφείλονται στη μεταβολή της τάσεως μεταξύ π.χ. του κεντρικού αγωγού και του εξωτερικού αγωγού ενός ομοαξονικού καλωδίου, σπαταλούν ενέργεια. Οι διηλεκτρικές απώλειες σχετίζονται με τη διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού, την τάση μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού αγωγού και τη συχνότητα του σήματος. Οι διηλεκτρικές απώλειες σε ομοαξονικά καλώδια γίνονται σημαντικές για συχνότητες άνω των 10 GHz.

### Εξισώσεις Maxwell

- Τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων βασίζονται στις εξισώσεις του Maxwell, οι οποίες συσχετίζουν την πυκνότητα ηλεκτρικής ροής  $\mathbf{D}$ , την πυκνότητα μαγνητικής ροής  $\mathbf{B}$ , την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $\mathbf{E}$  και την ένταση του μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{H}$  με την πυκνότητα της εντάσεως του ρεύματος  $\mathbf{J}$  και την πυκνότητα φορτίου  $\rho$  (όπου τα εμφανιζόμενα βαθμωτά και διανυσματικά μεγέθη είναι σημειακές συναρτήσεις του χρόνου και  $\mathbf{B}=\mu\mathbf{H}$   $\mathbf{D}=\epsilon\mathbf{E}$ ):

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.1)$$

# Μικροκυματική Τεχνολογία

όπου  $\nabla \times \mathbf{E} = \begin{vmatrix} \bar{x} & \bar{y} & \bar{z} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix} = \bar{x} \left( \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) - \bar{y} \left( \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) + \bar{z} \left( \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right)$  (διανυσματικό μέγεθος)

όπου  $\nabla \cdot \mathbf{D} = \frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z}$  (βαθμωτό μέγεθος)

(Τα εμφανιζόμενα βαθμωτά και διανυσματικά μεγέθη είναι σημειακές συναρτήσεις του χρόνου).

- Η πρώτη εξίσωση του Maxwell δηλώνει ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο έχει σαν αποτέλεσμα ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο και είναι γνωστή ως **νόμος του Faraday**.
- Η δεύτερη εξίσωση δηλώνει ότι ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο έχει σαν αποτέλεσμα ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.
- Η τρίτη εξίσωση δηλώνει ότι η μορφή, η ένταση και η διεύθυνση του συνολικού ηλεκτρικού πεδίου καθορίζονται από τη γεωμετρική κατανομή των ηλεκτρικών φορτίων που παράγουν το πεδίο.
- Τέλος, η τέταρτη εξίσωση μας λέει ότι το μαγνητικό πεδίο ακολουθεί έναν κλειστό βρόχο.

# Μικροκυματική Τεχνολογία

## Ηλεκτρική και μαγνητική διαπερατότητα

- Η ικανότητα παραγωγής ενός ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου μέσα σε ένα ορισμένο μέσο, εξαρτάται από τις διηλεκτρικές ή μαγνητικές ιδιότητες των διαφόρων υλικών. Οι διηλεκτρικές ιδιότητες δίνονται από την **ηλεκτρική διαπερατότητα  $\epsilon$** , που περιγράφει πόσο εύκολα το υλικό μπορεί να πολωθεί, δηλαδή πόσο εύκολα τα φορτία εντός του υλικού μπορούν να μετατοπιστούν όταν εφαρμόζεται μία τάση (ή ηλεκτρικό πεδίο). Στο κενό ή στον αέρα, η τιμή της ηλεκτρικής διαπερατότητας είναι  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ . Οι διαπερατότητες όλων των άλλων υλικών συνήθως εκφράζονται ως ένα γινόμενο του  $\epsilon_0$  και ενός αριθμητικού παράγοντα που είναι γνωστός ως η **διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$**  ( $\epsilon_r = 1$  για το κενό). Επομένως η διηλεκτρική σταθερά ενός συγκεκριμένου υλικού είναι  $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$ .
- Κατά τον ίδιο τρόπο, οι μαγνητικές ιδιότητες ενός υλικού περιγράφονται από την **μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$** . Για το κενό ή τον αέρα έχουμε  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ . Οι μαγνητικές διαπερατότητες των άλλων υλικών δίνονται ως  $\mu = \mu_r \mu_0$  όπου το  $\mu_r$  είναι ένας καθαρός αριθμός γνωστός ως σχετική μαγνητική διαπερατότητα ( $\mu_r = 1$  για το κενό).

## Ταχύτητα διάδοσης

- Όταν δημιουργείται ένα φορτίο, το ηλεκτρικό πεδίο αρχίζει να διαδίδεται προς τα έξω με πεπερασμένη ταχύτητα που είναι η ταχύτητα του φωτός. Στο κενό ή τον αέρα, η ταχύτητα του φωτός είναι  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Σε ένα μέσο, η ταχύτητα του φωτός αλλάζει κατά κάτι και γενικά δηλώνεται ως  $v$ . Αν το υλικό έχει ηλεκτρική και μαγνητική διαπερατότητα  $\epsilon$  και  $\mu$  αντίστοιχα, η ταχύτητα  $v$  δίνεται ως εξής:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2.2)$$

- Στο κενό, η ταχύτητα του φωτός είναι:  $v = c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \quad (2.3)$

- Η ταχύτητα του φωτός  $v$  σε ένα μέσο, σαν κλάσμα του  $c$  εκφράζεται ως εξής:  $v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r\epsilon_0\mu_r\mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} \quad (2.4)$

# Μικροκυματική Τεχνολογία

## Χαρακτηριστική αντίσταση $Z_o$

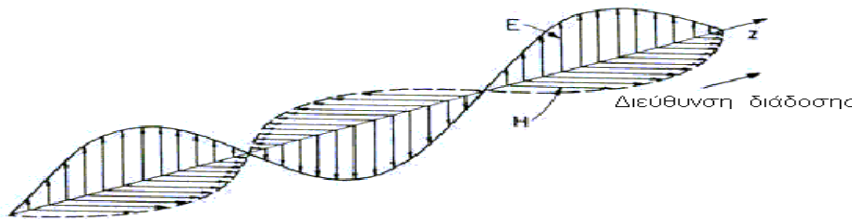
- Ο λόγος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H$  είναι γνωστός ως η **χαρακτηριστική αντίσταση** (ή αντίσταση κύματος),  $Z_o$  του μέσου:

$$Z_o = \frac{E}{H} \quad (2.5)$$

- Το ηλεκτρικό πεδίο  $E$  δίνεται σε *Volt/m*, το μαγνητικό πεδίο σε *Amperes/m* και η χαρακτηριστική αντίσταση  $Z_o$  σε *Ohms*.
- Η  $Z_o$  είναι ο λόγος του  $E$  προς  $H$  και είναι ανεξάρτητος από τα απόλυτα πλάτη όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Επειδή οι εντάσεις του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου σχετίζονται με την ηλεκτρική και μαγνητική διαπερατότητα του μέσου, η  $Z_o$  μπορεί να εκφραστεί εναλλακτικά ως:

$$Z_o = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.6)$$

- Στον ελεύθερο χώρο ισχύει:  $Z_o$  (ελευθέρου χώρου) =  $\sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o}} = 377 \text{ Ohms}$  (2.7)



**Σχήμα 2.1:**

Η χαρακτηριστική αντίσταση  $Z_o$  ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι ο λόγος του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  προς το μαγνητικό πεδίο  $H$ . Τα  $E$  και  $H$  αλλάζουν τα πλάτη τους έτσι ώστε ο λόγος παραμένει πάντα ο ίδιος.



# Μικροκυματική Τεχνολογία

## Επιδερμικό βάθος

- Το επιδερμικό βάθος ορίζεται ως η απόσταση από μία μεταλλική επιφάνεια πέρα από την οποία το συνολικό πλάτος του διεισδύοντος μαγνητικού πεδίου πέφτει κάτω από 30% του αρχικού πλάτους. Μαθηματικά, το επιδερμικό βάθος,  $\delta$  για έναν αγωγό εκφράζεται ως:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \quad (2.8)$$

όπου  $\rho$  η ειδική αντίσταση του μετάλλου,  $\sigma=1/\rho$  η ειδική αγωγιμότητα του μετάλλου,  $f$  η συχνότητα του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου και  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα του μετάλλου.

- Για μικροκυματικές εφαρμογές, ως ένα αγωγίμο μέσο χρησιμοποιείται συνήθως ο χαλκός. Μια χρήσιμη έκφραση για το επιδερμικό βάθος του χαλκού είναι η εξής:

$$\delta = \frac{2}{\sqrt{f(\text{GHz})}} \quad (2.9)$$

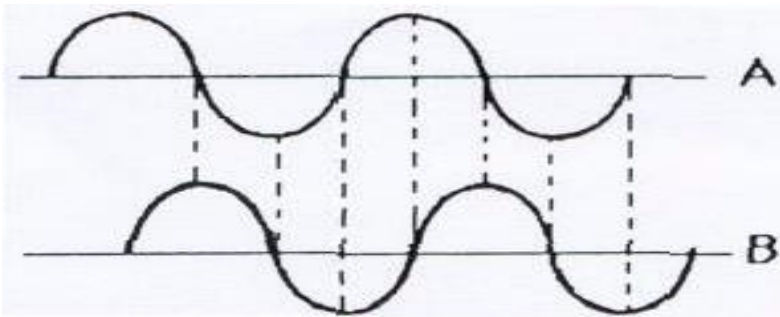
όπου το  $f$  δίνεται σε GHz και το  $\delta$  σε  $\mu\text{m}$ .

- Από την εξίσωση 2.8, για το επιδερμικό βάθος προκύπτουν τα εξής:
  - Το  $\delta$  αυξάνει με την ειδική αντίσταση.
  - Το  $\delta$  μειώνεται με τη συχνότητα.
  - Το  $\delta$  μειώνεται με τη μαγνητική διαπερατότητα.
- Αν το μέταλλο είναι τέλειος αγωγός, δηλαδή  $\rho=0$  που σημαίνει  $\delta=0$ , δηλαδή το επιδερμικό βάθος είναι μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι το εισερχόμενο μαγνητικό πεδίο δεν μπορεί να διεισδύσει στο μέταλλο. Έτσι το 100% του κύματος ανακλάται και το μέταλλο δεν απορροφά ισχύ. Αν το μέταλλο έχει κάποια αντίσταση, η ανάκλαση δεν είναι 100%. Τότε το ηλεκτρομαγνητικό κύμα μπορεί να διεισδύσει στο μέταλλο σε μία απόσταση  $\delta$  και κάποια ισχύς απορροφάται από το μέταλλο για να διατηρήσει τα δινο-ρεύματα, τα οποία μαζί με την αντίσταση του μετάλλου παράγουν θερμότητα. Αυτή η απορρόφηση ισχύος προκαλεί την εξασθένιση στον κυματοδηγό. Αυτή η εξασθένιση είναι παρόμοια με την ωμική αντίσταση ενός απλού καλωδίου στην ηλεκτρονική χαμηλών συχνοτήτων.

# Μικροκυματική Τεχνολογία

## Διαφορά φάσεως

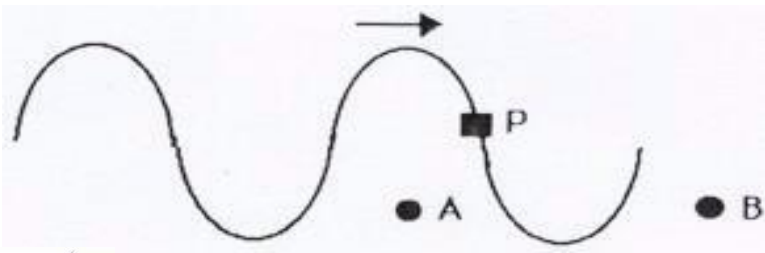
- Δύο κύματα που έχουν την ίδια συχνότητα, αλλά δεν είναι πλήρως ευθυγραμμισμένα μεταξύ τους, λέμε ότι έχουν **διαφορά στη φάση τους**. Το σχήμα 2.2 παριστάνει δύο κύματα  $A$  και  $B$  της ίδιας συχνότητας αλλά με διαφορά φάσεως  $90^\circ$ . Το κύμα  $A$  προηγείται του  $B$  κατά  $90^\circ$ .



**Σχήμα 2.2:**

Δύο ημιτονοειδή κύματα  $A$  και  $B$  με διαφορά φάσης  $90^\circ$ .

- Για ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που ταξιδεύει προς δύο θέσεις  $A$  και  $B$  (σχήμα 2.3), ένα συγκεκριμένο σημείο του κύματος, το  $P$ , περνάει πρώτα από τη θέση  $A$  και μετά από κάποια στιγμή περνάει από τη θέση  $B$ . Χρειάζεται ένας πεπερασμένος χρόνος για το σημείο  $P$  να πάει από το  $A$  στο  $B$ .



**Σχήμα 2.3:**

Ένα συγκεκριμένο σημείο  $P$  του κύματος που διαδίδεται από τα αριστερά προς τα δεξιά περνάει πρώτα από τη θέση  $A$  και μετά από τη θέση  $B$ .

# Μικροκυματική Τεχνολογία

- Η διαφορά φάσεως χαρακτηρίζεται από μία μετρούμενη ποσότητα που ονομάζεται **γωνία φάσεως**  $\theta$  και μπορεί να υπολογιστεί από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\theta = \frac{D}{\lambda} \cdot 360^\circ \quad (2.10)$$

$$\theta = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360^\circ \quad (2.11)$$

- όπου  $D$  η απόσταση μεταξύ του σημείου  $A$  και του σημείου  $B$ ,  $\lambda$  το μήκος κύματος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος,  $\Delta t$  ο χρόνος που χρειάζεται το κύμα να ταξιδέψει από το σημείο  $A$  στο  $B$  και  $T$  η περίοδος του κύματος. Ο χρόνος που χρειάζεται για να καλυφθεί η απόσταση από το  $A$  στο  $B$  δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta t = D/v \quad (2.12)$$

όπου  $v$  η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος ( $c$  αν το μέσο είναι το κενό).

- Πρέπει να σημειωθεί ότι τα μήκη κύματος των σημάτων χαμηλών και μεσαίων συχνοτήτων ( $dc$ - $MHz$ ) είναι πολύ μεγαλύτερα από τις φυσικές διαστάσεις τυπικών εργαστηριακών συσκευών. Έτσι η διαφορά φάσεως μεταξύ της πηγής του σήματος και του φορτίου για ένα σήμα χαμηλής συχνότητας, είναι πολύ μικρή. Αυτή η μικρή διαφορά φάσεως κάνει την ανάλυση εύκολη, καθώς κάθε συσκευή επεξεργάζεται το «ίδιο» κομμάτι πληροφορίας εξαιτίας των πολύ μικρών διαφορών φάσεως.
- Στις μικροκυματικές συχνότητες, τα μήκη κύματος είναι συγκρίσιμα ή και μικρότερα από τα εργαστηριακά καλώδια και τις συσκευές. Η γωνία φάσεως μεταξύ δύο θέσεων μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη. Αυτή η σημαντική διαφορά φάσεως, προκαλεί και τις δυσκολίες που συναντούμε στα μικροκυματικά συστήματα. Σε αντίθεση με τις χαμηλές συχνότητες όπου τα μήκη των καλωδίων δεν παίζουν ρόλο, τα μήκη των μικροκυματικών αγωγών και των κυματοδηγών παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της συνολικής συμπεριφοράς ενός μικροκυματικού κυκλώματος.

# Τέλος Ενότητας

---

