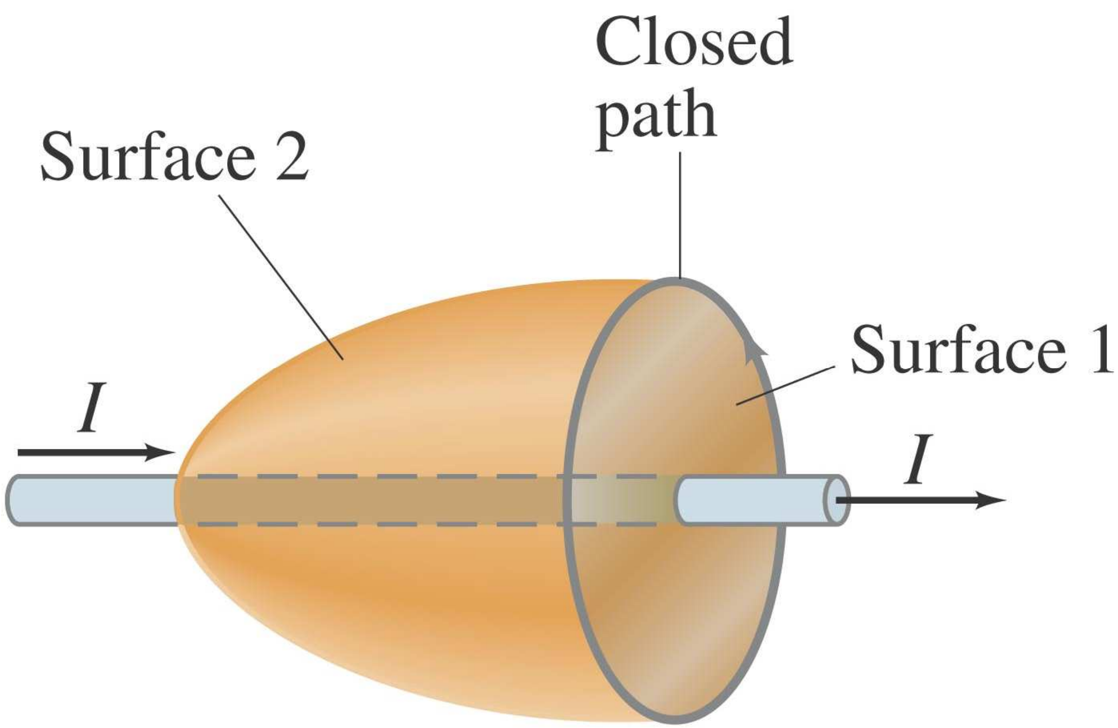
Κεφάλαιο31
Εξισώσεις Maxwell και Ηλεκτρομαγνητικά Κύματα

Περιεχόμενα Κεφαλαίου 31

- Τα μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία παράγουν μαγνητικά πεδία.
- Ο Νόμος του Ampère-Ρεύμα μετατόπισης
- Νόμος του Gauss’s στο μαγνητισμό
- Εξισώσεις Maxwell
- Παραγωγή Ηλεκτρομαγνητικού Κύματος
- Ταχύτητα ΗΜ κυμάτων
- Φως και το ΗΜ φάσμα
- Μέτρηση της Ταχύτητας του Φωτός
- Η Ενέργεια ΗΜ κυμάτων το Διάνυσμα Poynting
- Η πίεση της ακτινοβολίας

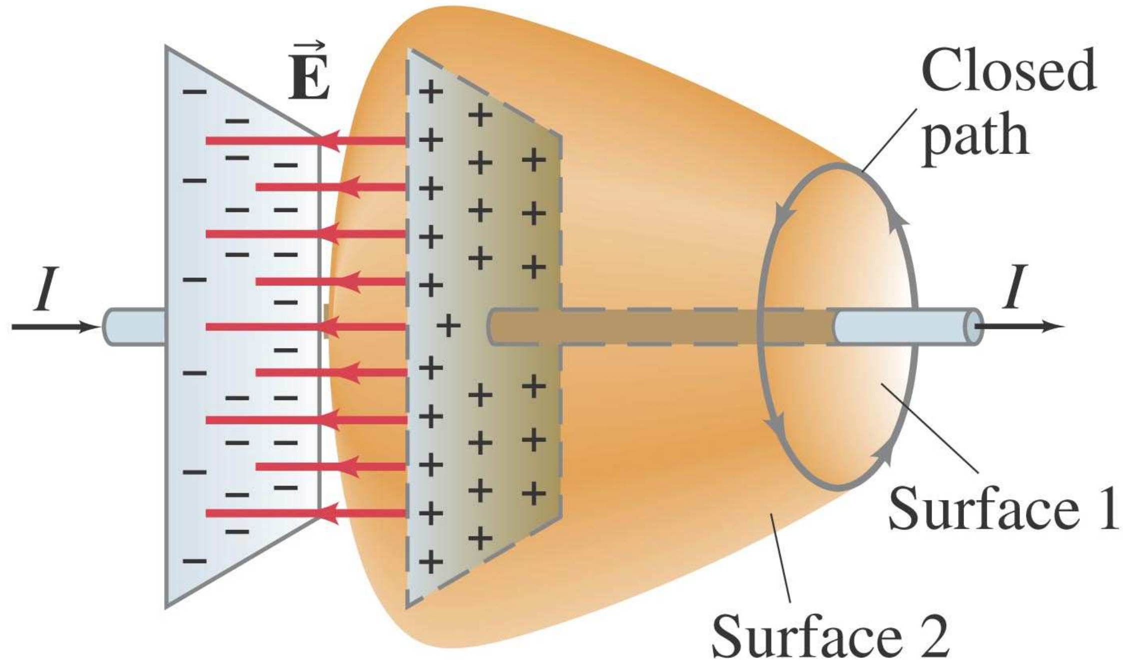
31-1 Τα μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία παράγουν μαγνητικά πεδία

Ο Νόμος του Ampère συσχετίζει το μαγνητικό πεδίο πέριξ ηλεκτρικού ρεύματος με το μαγνητικό πεδίο μέσα από κάποια επιφάνεια.



31-1 Τα μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία παράγουν μαγνητικά πεδία

Για αν ισχύσει ο νόμος του Ampère δεν έχει σημασία ποια επιφάνεια επιλέγουμε. Προσέξτε όμως την περίπτωση εκφόρτωσης πυκνωτή: υπάρχει ρεύμα που περνάει την επιφάνεια 1 αλλά όχι μέσα από την επιφάνεια 2:



31-1 Τα μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία παράγουν μαγνητικά πεδία

Γι τν λόγο αυτό ο νόμος του, Ampère τροποποιείται για να συμπεριλάβει την παραγωγή μαγνητικού πεδίου, όπως στην περίπτωση του πυκνωτή:

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I_{\text{encl}} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}.$$

31-1 Τα μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία παράγουν μαγνητικά πεδία

Ένας πυκνωτής 30-pF έχει αέρα μεταξύ των κυκλικών οπλισμών που έχουν επιφάνεια A = 100 cm^2. Φορτίζεται από μπαταρία 70-V μέσω αντίστασης 2.0-Ω. Την στιγμή αμέσως μετά την σύνδεση με την μπαταρία έχουμε το μέγιστο ρυθμό φόρτισης. Τη στιγμή εκείνη βρείτε (a) το ρεύμα των οπλισμών και (b) το ρυθμό μεταβολής το ηλεκτρικού πεδίου του πυκνωτή και (c) Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται μεταξύ των οπλισμών. Υποθέστε ότι το πεδίο περιορίζεται μεταξύ των οπλισμών και ότι $\vec{E}$ είναι ομογενές.

APPROACH In Section 26–5 we discussed RC circuits and saw that the charge on a capacitor being charged, as a function of time, is

$$Q = CV_0\left(1 - e^{-t/RC}\right),$$

where V_0 is the voltage of the battery. To find the current at $t = 0$, we differentiate this and substitute the values $V_0 = 70\,\mathrm{V}$, $C = 30\,\mathrm{pF}$, $R = 2.0\,\Omega$.

SOLUTION (*a*) We take the derivative of Q and evaluate it at $t = 0$:

$$\left.\frac{dQ}{dt}\right|_{t=0} = \left.\frac{CV_0}{RC}e^{-t/RC}\right|_{t=0} = \frac{V_0}{R} = \frac{70\,\mathrm{V}}{2.0\,\Omega} = 35\,\mathrm{A}.$$

This is the rate at which charge accumulates on the capacitor and equals the current flowing in the circuit at $t = 0$.

(*b*) The electric field between two closely spaced conductors is given by (Eq. 21–8)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q/A}{\epsilon_0}$$

as we saw in Chapter 21 (see Example 21–13).

Hence

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ/dt}{\epsilon_0 A} = \frac{35\text{ A}}{(8.85 \times 10^{-12}\text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2)(1.0 \times 10^{-2}\text{ m}^2)} = 4.0 \times 10^{14}\text{ V/m}\cdot\text{s}.$$

(*c*) Although we will not prove it, we might expect the lines of $\vec{\mathbf{B}}$, because of symmetry, to be circles, and to be perpendicular to $\vec{\mathbf{E}}$, as shown in Fig. 31–4; this is the same symmetry we saw for the inverse situation of a changing magnetic field producing an electric field (Section 29–7, see Fig. 29–27). To determine the magnitude of B between the plates we apply Ampère's law, Eq. 31–1, with the current $I_{\text{encl}} = 0$:

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\boldsymbol{\ell}} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}.$$

We choose our path to be a circle of radius r, centered at the center of the plate, and thus following a magnetic field line such as the one shown in Fig. 31–4. For $r \leq r_0$ (the radius of plate) the flux through a circle of radius r is $E(\pi r^2)$ since E is assumed uniform between the plates at any moment. So from Ampère's law we have

$$B(2\pi r) = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt}(\pi r^2 E)$$

$$= \mu_0 \epsilon_0 \pi r^2 \frac{dE}{dt}.$$

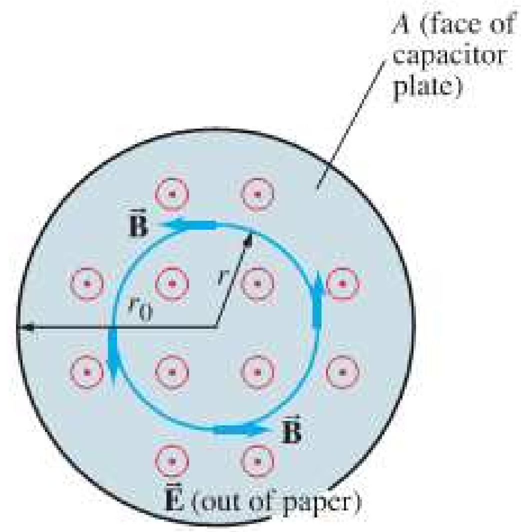


FIGURE 31–4 Frontal view of a circular plate of a parallel-plate capacitor. $\vec{\mathbf{E}}$ between plates points out toward viewer; lines of $\vec{\mathbf{B}}$ are circles. (Example 31–1.)

We assume $\vec{\mathbf{E}} = 0$ for $r > r_0$, so for points beyond the edge of the plates all the flux is contained within the plates $\left(\text{area} = \pi r_0^2\right)$ and $\Phi_E = E\pi r_0^2$. Thus Ampère's law gives

$$B(2\pi r) = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt}\left(\pi r_0^2 E\right)$$

$$= \mu_0 \epsilon_0 \pi r_0^2 \frac{dE}{dt}$$

or

$$B = \frac{\mu_0 \epsilon_0 r_0^2}{2r}\frac{dE}{dt}. \qquad \left[r \geq r_0\right]$$

B has its maximum value at $r = r_0$ which, from either relation above (using $r_0 = \sqrt{A/\pi} = 5.6\ \text{cm}$), is

$$B_{\text{max}} = \frac{\mu_0 \epsilon_0 r_0}{2}\frac{dE}{dt}$$

$$= \tfrac{1}{2}\left(4\pi \times 10^{-7}\,\text{T}\cdot\text{m/A}\right)\left(8.85 \times 10^{-12}\,\text{C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2\right)\left(5.6 \times 10^{-2}\,\text{m}\right)\left(4.0 \times 10^{14}\,\text{V/m}\cdot\text{s}\right)$$

$$= 1.2 \times 10^{-4}\,\text{T}.$$

This is a very small field and lasts only briefly (the time constant $RC = 6.0 \times 10^{-11}\,\text{s}$) and so would be very difficult to measure.

31-1 Τα μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία παράγουν μαγνητικά πεδία

Ο δεύτερος όρος στο νόμο του Ampere έχει νομάδες ρεύματος (πέραν του όρου μ_0), και ονομάζεται ρεύμα μετατόπισης:

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 (I + I_{\mathrm{D}})_{\mathrm{encl}}$$

όπου

$$I_{\mathrm{D}} = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}.$$

31-2 Ο Νόμος του Gauss στο μαγνητισμό

Ο νόμος του Gauss συνδέει το συνολικό φορτίο που περικλείεται από μια επιφάνεια με το ηλεκτρικό πεδίο που περνάει μέσα από την επιφάνεια.

Το αντίστοιχο ισχύει και για μαγνητικά πεδία μέσ από κλειστές επιφάνειες. Επειδή δεν υπάρχουν απομονωμένα μαγνητικά πεδία ο Νόμος του Gauss για το μαγνητισμό είναι :

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = 0.$$

31-3 Εξισώσεις Maxwell

Τώρα έχουμε μι πλήρης σειρά εξισώσεων που συνδέουν το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο. Οι εξισώσεις αυτές ονομάζονται εξισώσεις του Maxwell. Για το κενό οι εξισώσεις αυτές είναι:

$$\oint \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = 0$$

$$\oint \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\boldsymbol{\ell}} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\boldsymbol{\ell}} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}.$$

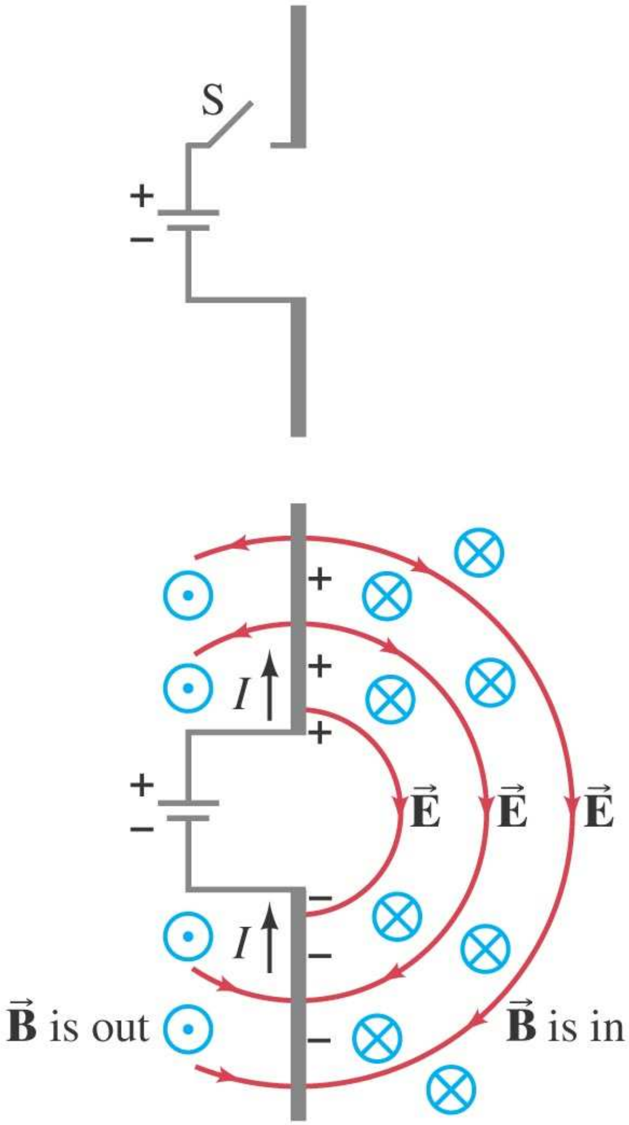
31-4 Παραγωγή ΗΜ κυμάτων

Εφόσον μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία παράγουν μαγνητικά και μεταβαλλόμενα μαγνητικά παράγουν ηλεκτρικά, από την στιγμή που παραχθούν ημιτονοειδή ΗΜ πεδία, τότε αυτά συνεχίζουν να διαδίδονται μόνα τους (αυτοσυντηρούνται).

These propagating fields are called electromagnetic waves.

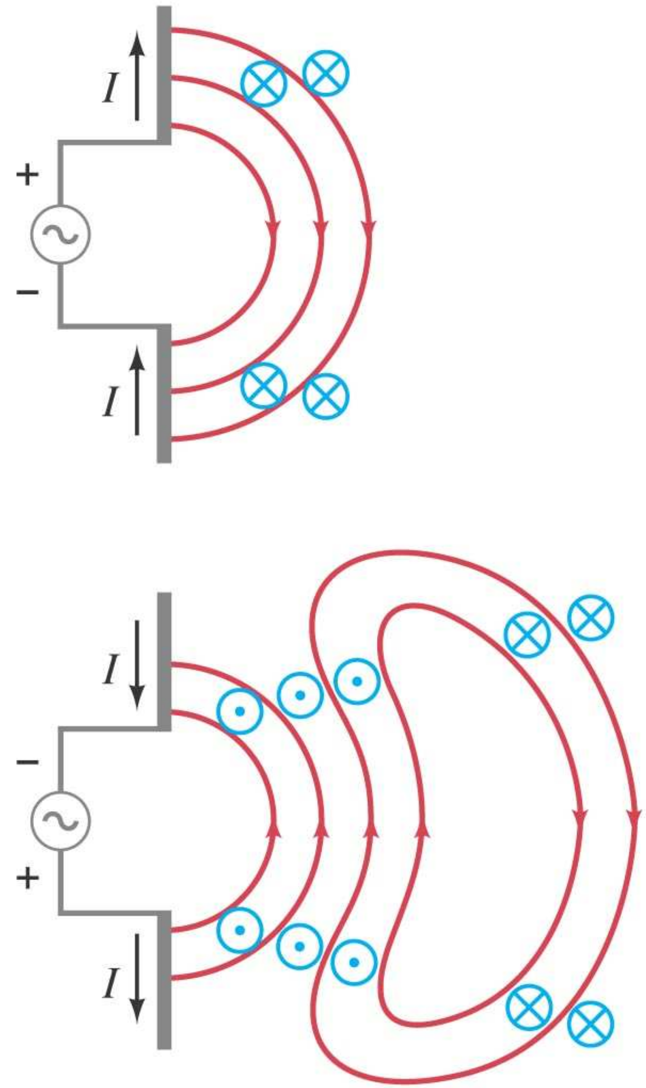
31-4 Παραγωγή ΗΜ κυμάτων

Ταλαντώσεις φορτίων παράγουν ΗΜ κύματα:



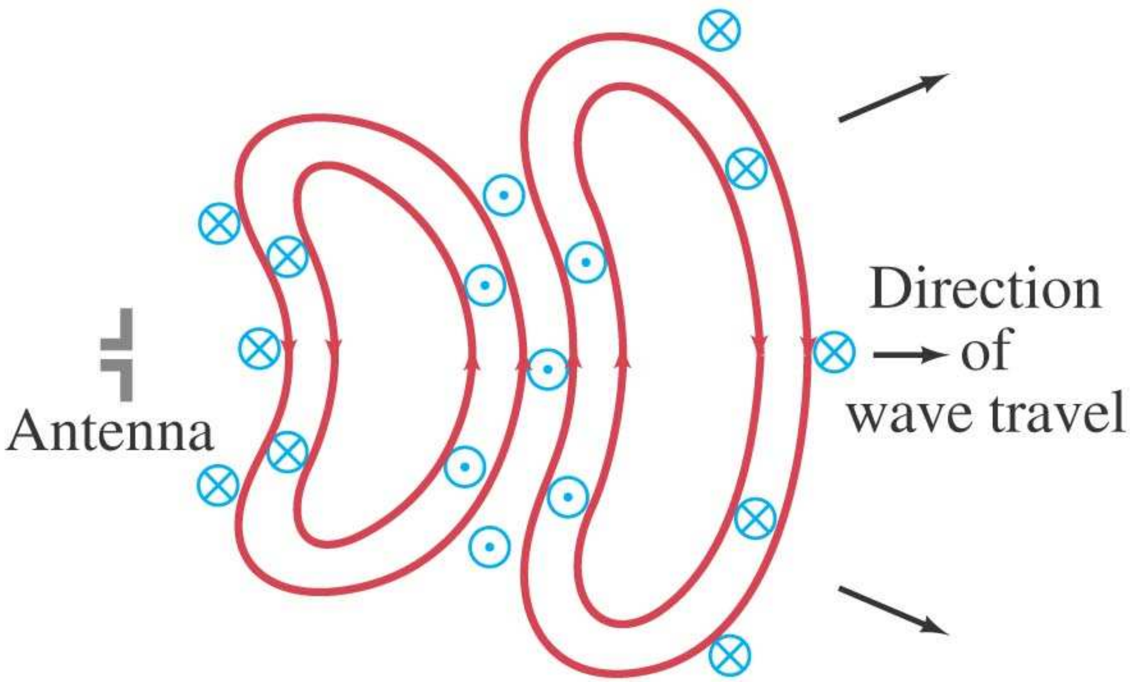
31-4 Παραγωγή ΗΜ κυμάτων

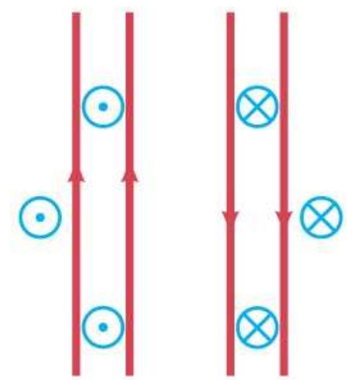
Κοντά σε μια κεραία τα πεδία είναι πολύπλοκα και ονομάζονται near field:



31-4 Παραγωγή ΗΜ κυμάτων

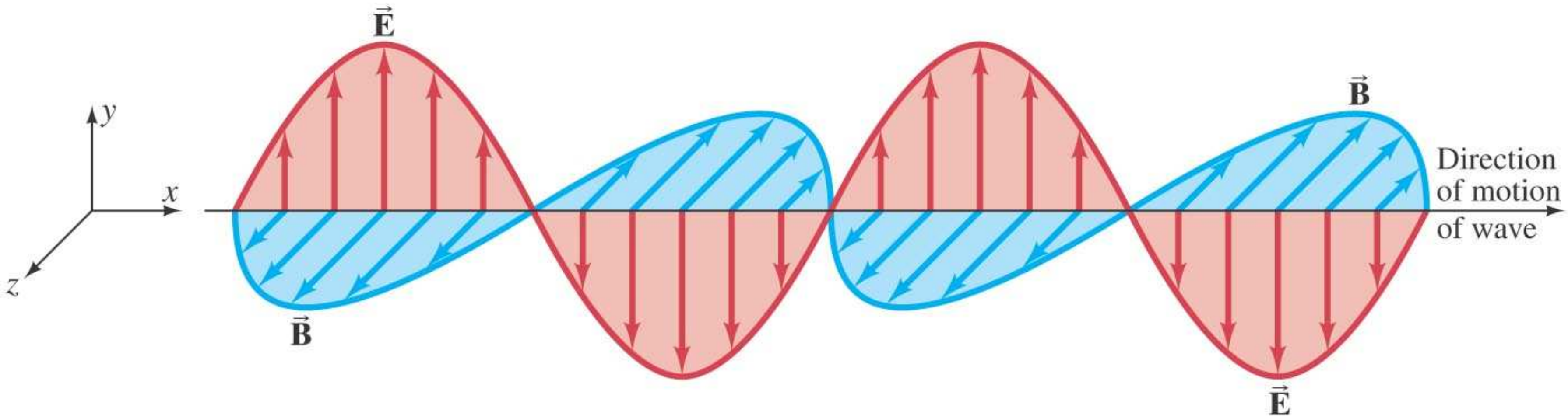
Σε μεγάλες αποστάσεις από τις κεραίες τα κύματα είναι κατά προσέγγιση επίπεδα:





31-4 Παραγωγή ΗΜ κυμάτων

Τα ηλεκτρικά και μαγνητικά κύματα είναι κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης του ΗΜ κύματος.



31-5 Ταχύτητα ΗΜ κυμάτων

Απουσία ρευμάτων και φορτίων οι, εξισώσεις Maxwell προβλέπουν:

$$\oint \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = 0$$

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = 0$$

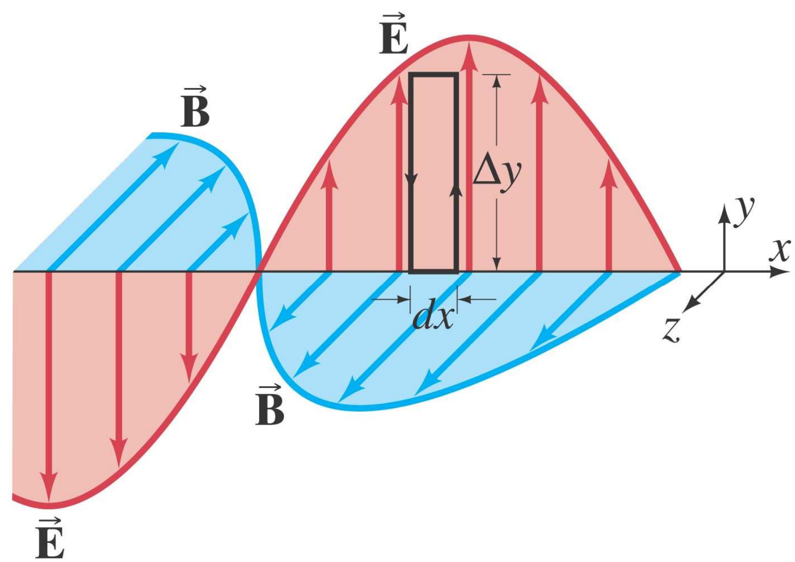
$$\oint \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}.$$

31-5 Ταχύτητα ΗΜ κυμάτων

Το σχήμα απεικονίζει ένα ΗΜ κύμα με μήκος κύματος λ και συχνότητα f. Τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία περιγράφονται από τις σχέσεις:

$$E = E_y = E_0 \sin(kx - \omega t)$$
$$B = B_z = B_0 \sin(kx - \omega t).$$



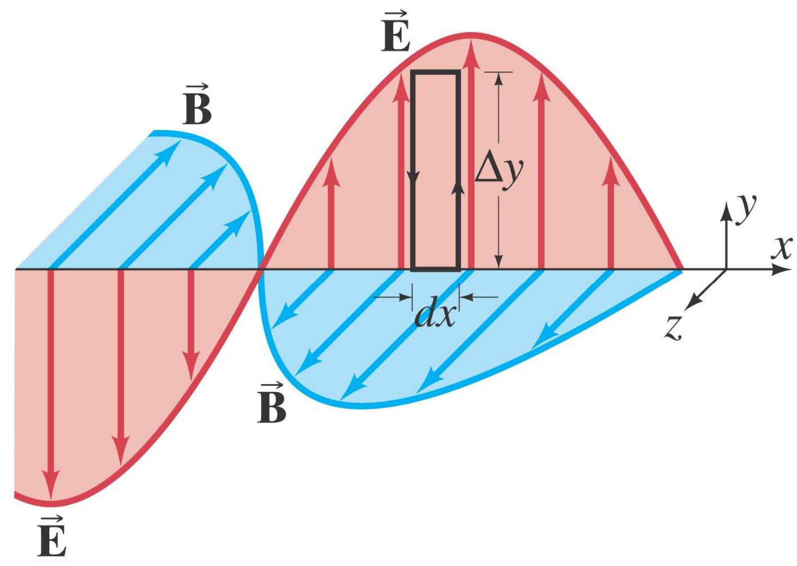
όπου

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \qquad \omega = 2\pi f, \qquad \text{and} \qquad f\lambda = \frac{\omega}{k} = v.$$

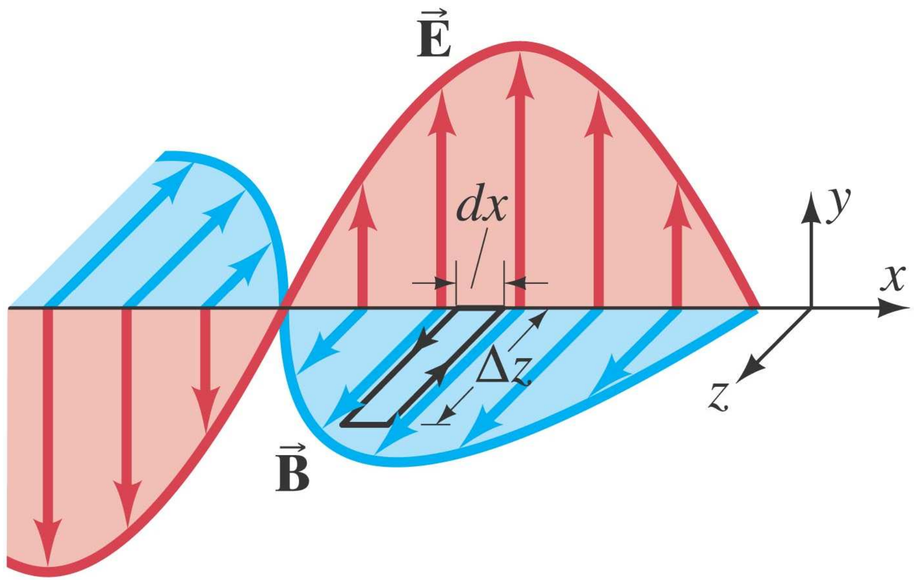
31-5 Ταχύτητα ΗΜ κυμάτων

Εφαρμόζοντας το Νόμο του Faraday για το παραλληλόγραμμο με ύψος Δy και πλάτος dx βρίσκουμε:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t}.$$



31-5 Ταχύτητα ΗΜ κυμάτων



Παρομοίως από την 4η εξίσωση Maxwell για το παραλληλόγραμμο Δz x dx, βρίσκουμε

$$\frac{\partial B}{\partial x} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}.$$

31-5 Ταχύτητα ΗΜ κυμάτων

Από τις δύο αυτές σχέσεις βρίσκουμε ότι

$$\frac{E}{B} = v.$$

Όπου, *v* είναι η ταχύτητα του κύματος.
Με αντικατάσταση βρίσκουμε,

$$v = c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}.$$

Με αντικατάσταση η ταχύτητα είναι 3.0 x 10^8 m/s – ακριβώς ίση με τη ταχύτητα του φωτός! <u>Το φώς είναι ΗΜ κύμα.</u>

31-5 Ταχύτητα ΗΜ κυμάτων

Υποθέτουμε ότι ένα ΗΜ κύμα με συχνότητα 60-Hz, είναι ημιτονοειδές με διεύθυνση διάδοσης τον άξονα z και το μαγνητικό πεδίο έχει κατεύθυνση κατά μήκος του άξονα x και E_0 = 2.0 V/m. Γράψτε εξισώσεις για το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο σαν συνάρτηση του χρόνου και μετατόπισης.

APPROACH We find λ from $\lambda f = v = c$. Then we use Fig. 31–9 and Eqs. 31–7 and 31–8 for the mathematical form of traveling electric and magnetic fields of an EM wave.

SOLUTION The wavelength is

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.00 \times 10^{8}\,\mathrm{m/s}}{60.0\,\mathrm{s^{-1}}} = 5.00 \times 10^{6}\,\mathrm{m}.$$

From Eq. 31–8 we have

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{5.00 \times 10^{6}\,\mathrm{m}} = 1.26 \times 10^{-6}\,\mathrm{m^{-1}}$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi(60.0\,\mathrm{Hz}) = 377\,\mathrm{rad/s}.$$

From Eq. 31–11 with $v = c$, we find that

$$B_0 = \frac{E_0}{c} = \frac{2.00\,\mathrm{V/m}}{3.00 \times 10^{8}\,\mathrm{m/s}} = 6.67 \times 10^{-9}\,\mathrm{T}.$$

The direction of propagation is that of $\vec{\mathbf{E}} \times \vec{\mathbf{B}}$, as in Fig. 31–9. With $\vec{\mathbf{E}}$ pointing in the x direction, and the wave propagating in the z direction, $\vec{\mathbf{B}}$ must point in the y direction. Using Eqs. 31–7 we find:

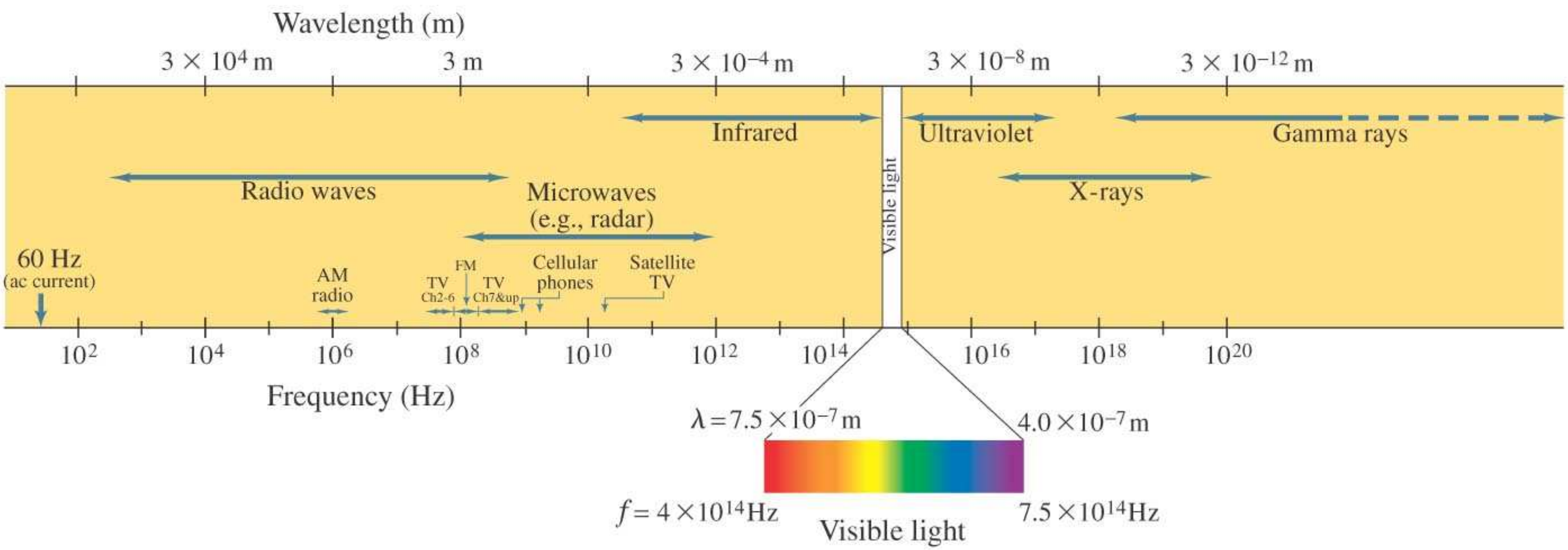
$$\vec{\mathbf{E}} = \hat{\mathbf{i}}(2.00\,\mathrm{V/m})\sin\left[(1.26 \times 10^{-6}\,\mathrm{m^{-1}})z - (377\,\mathrm{rad/s})t\right]$$

$$\vec{\mathbf{B}} = \hat{\mathbf{j}}(6.67 \times 10^{-9}\,\mathrm{T})\sin\left[(1.26 \times 10^{-6}\,\mathrm{m^{-1}})z - (377\,\mathrm{rad/s})t\right]$$

31-6 Το Φως είναι ΗΜ κύμα-Το ΗΜ φάσμα

Η σχέση μεταξύ της συχνότητας και του μήκους κύματος του φωτός είναι:

$$c = \lambda f.$$



31-6 Το Φως είναι ΗΜ κύμα-Το ΗΜ φάσμα

Βρείτε το μήκος κύματος για

(a) ΗΜ κύμα με 60-Hz,

(b) Ράδιο-κύμα 93.3-MHz FM

(c) Ακτινοβολία laser στα 4.74 x 10^{14} Hz.

APPROACH All of these waves are electromagnetic waves, so their speed is $c = 3.00 \times 10^8\,\mathrm{m/s}$. We solve for λ in Eq. 31–14: $\lambda = c/f$.

SOLUTION (*a*) $$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.00 \times 10^8\,\mathrm{m/s}}{60\,\mathrm{s^{-1}}} = 5.0 \times 10^6\,\mathrm{m},$$

or 5000 km. 60 Hz is the frequency of ac current in the United States, and, as we see here, one wavelength stretches all the way across the continental USA.

(*b*) $$\lambda = \frac{3.00 \times 10^8\,\mathrm{m/s}}{93.3 \times 10^6\,\mathrm{s^{-1}}} = 3.22\,\mathrm{m}.$$

The length of an FM antenna is about half this $\left(\frac{1}{2}\lambda\right)$, or $1\frac{1}{2}\,\mathrm{m}$.

(*c*) $$\lambda = \frac{3.00 \times 10^8\,\mathrm{m/s}}{4.74 \times 10^{14}\,\mathrm{s^{-1}}} = 6.33 \times 10^{-7}\,\mathrm{m}\ (= 633\,\mathrm{nm}).$$

31-6 Το Φως είναι ΗΜ κύμα-Το ΗΜ φάσμα

Η κεραία ενός κινητού έχει συχνά μήκος το ¼ του μήκους κύματος της ακτινοβολίας. Κάποιο Smartphone έχει 8.5-cm μεταλλική ράβδου κεραία. Εκτιμείστε την συχνότητα λειτουργίας της συσκευής.

APPROACH The basic equation relating wave speed, wavelength, and frequency is $c = \lambda f$; the wavelength λ equals four times the antenna's length.

SOLUTION The antenna is $\frac{1}{4}\lambda$ long, so $\lambda = 4(8.5\text{ cm}) = 34\text{ cm} = 0.34\text{ m}$. Then $f = c/\lambda = (3.0 \times 10^8\text{ m/s})/(0.34\text{ m}) = 8.8 \times 10^8\text{ Hz} = 880\text{ MHz}$.

NOTE Radio antennas are not always straight conductors. The conductor may be a round loop to save space. See Fig. 31–21b.

31-6 Το Φως είναι ΗΜ κύμα-Το ΗΜ φάσμα

Υποθέστε ότι συνομιλείτε με κάποιον φίλο στο Λονδίνο. Εκτιμείστε πόσο χρόνο χρειάζεται το «σήμα» από την Νέα Υόρκη στο Λονδίνο εάν (a) με σταθερή γραμμή (b) μέσω δορυφόρου που βρίσκεται σε ύψος 36,000 km.

APPROACH The signal is carried on a telephone wire or in the air via satellite. In either case it is an electromagnetic wave. Electronics as well as the wire or cable slow things down, but as a rough estimate we take the speed to be $c = 3.0 \times 10^8\,\mathrm{m/s}$.

SOLUTION The distance from New York to London is about 5000 km.

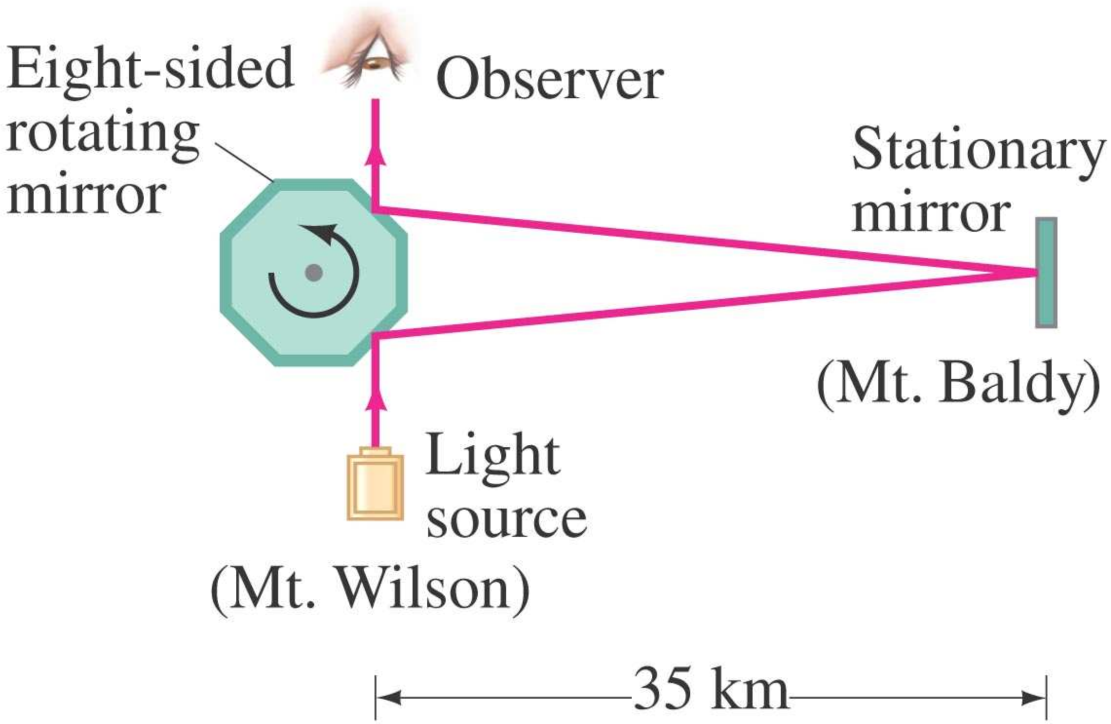
(a) The time delay via the cable is $t = d/c \approx (5 \times 10^6\,\mathrm{m})/(3.0 \times 10^8\,\mathrm{m/s}) = 0.017\,\mathrm{s}$.

(b) Via satellite the time would be longer because communications satellites, which are usually geosynchronous (Example 6–6), move at a height of 36,000 km. The signal would have to go up to the satellite and back down, or about 72,000 km. The actual distance the signal would travel would be a little more than this as the signal would go up and down on a diagonal. Thus $t = d/c \approx 7.2 \times 10^7\,\mathrm{m}/(3 \times 10^8\,\mathrm{m/s}) = 0.24\,\mathrm{s}$.

31-7 Μέτρηση ταχύτητας του Φωτός

Η ταχύτητα του φωτός ήταν γνωστό ότι είναι πολύ μεγάλη αλλά είναι πεπερασμένη.

Μια σημαντική μέτρηση από τον Michelson, έκανε χρήση περιστρεφόμενου κατόπτρου:



31-7 Μέτρηση ταχύτητας του Φωτός

Η «αποδεκτή» ταχύτητα του φωτός σήμερα είναι

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s.}$$

και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό (ορισμό) του μέτρου.

31-8 Ενέργεια ΗΜ κυμάτων- το Διάνυσμα Poynting

Η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο προσδιορίζει την συνολική ενέργεια του ΗΜ κύματος :

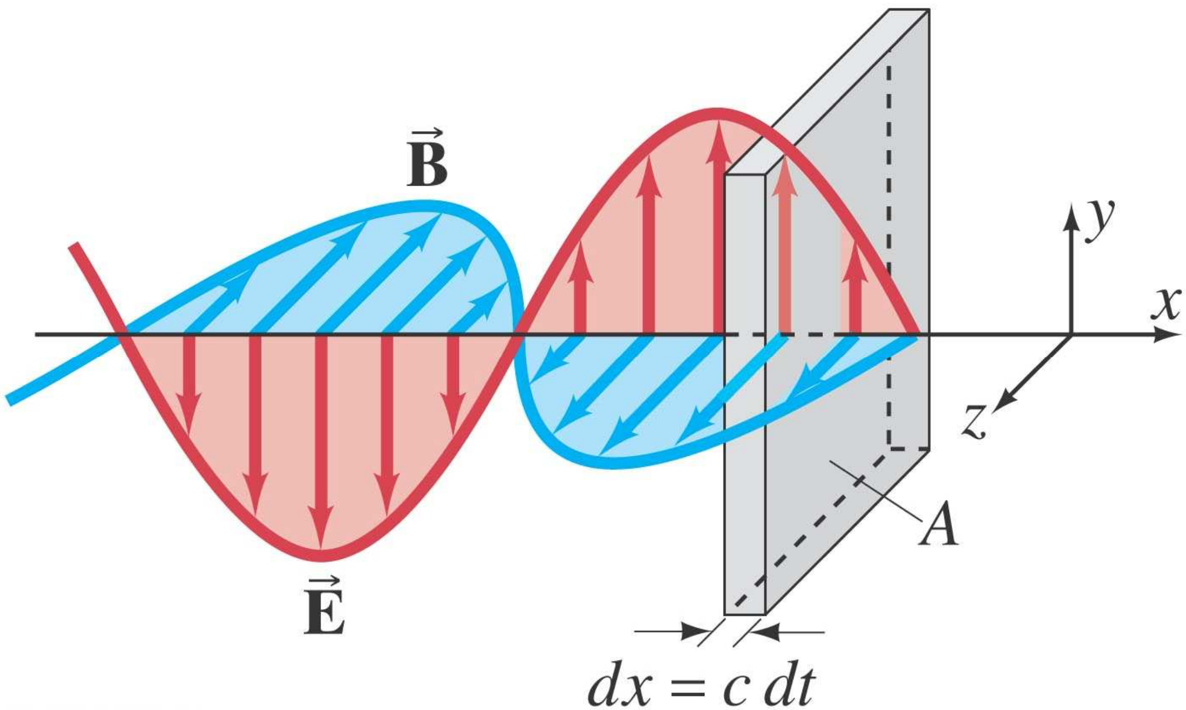
$$u = u_E + u_B = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0}.$$

Κάθε πεδίο συνεισφέρει το ήμισυ:

$$u = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2}\frac{\epsilon_0 \mu_0 E^2}{\mu_0} = \epsilon_0 E^2.$$

31-8 Ενέργεια ΗΜ κυμάτων- το Διάνυσμα Poynting

Η Ενέργεια μεταφέρεται από το κύμα.



31-8 Ενέργεια ΗΜ κυμάτων- το Διάνυσμα Poynting

Ένταση ορίζουμε την ενέργεια που μεταφέρεται από μια μονάδα επιφάνειας ανά μονάδα χρόνου:

$$S = \frac{1}{A}\frac{dU}{dt} = \epsilon_0 c E^2.$$

Την ένταση εκφράζει το διάνυσμα Poynting

$$\vec{\mathbf{S}} = \frac{1}{\mu_0}(\vec{\mathbf{E}} \times \vec{\mathbf{B}}).$$

31-8 Ενέργεια ΗΜ κυμάτων- το Διάνυσμα Poynting

Συνήθως μας ενδιαφέρει η ένταση $\overline{S}$:

$$\overline{S} = \frac{1}{2}\epsilon_0 c E_0^2 = \frac{1}{2}\frac{c}{\mu_0}B_0^2 = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0}.$$

$$\overline{S} = \frac{E_{\rm rms} B_{\rm rms}}{\mu_0}.$$

31-8 Ενέργεια ΗΜ κυμάτων- το Διάνυσμα Poynting

Η ακτινοβολία από τον Ήλιο φτάνει στη Γη με ρυθμό 1350 J/s·m² (= 1350 W/m²). Εάν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα ΗΜ κύμα βρείτε τις μέγιστες τιμές των πεδίων E και B.

APPROACH We solve Eq. 31–19a $\left(\overline{S} = \frac{1}{2}\epsilon_0 c E_0^2\right)$ for E_0 in terms of $\overline{S}$ using $\overline{S} = 1350\ \mathrm{J/s \cdot m^2}$.

SOLUTION
$$E_0 = \sqrt{\frac{2\overline{S}}{\epsilon_0 c}} = \sqrt{\frac{2(1350\ \mathrm{J/s\cdot m^2})}{(8.85 \times 10^{-12}\ \mathrm{C^2/N\cdot m^2})(3.00 \times 10^8\ \mathrm{m/s})}}$$
$$= 1.01 \times 10^3\ \mathrm{V/m}.$$

From Eq. 31–11, $B = E/c$, so
$$B_0 = \frac{E_0}{c} = \frac{1.01 \times 10^3\ \mathrm{V/m}}{3.00 \times 10^8\ \mathrm{m/s}} = 3.37 \times 10^{-6}\ \mathrm{T}.$$

NOTE Although B has a small numerical value compared to E (because of the way the different units for E and B are defined), B contributes the same energy to the wave as E does, as we saw earlier (Eqs. 31–15 and 16).

31-9 Πίεση της Ακτινοβολίας

Εκτός από ενέργεια τα ΗΜ έχουν ορμή. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να ασκήσουν δύναμη.

Η πίεση της ακτινοβολίας είναι ανάλογη της έντασης. Είναι ελάχιστη όταν το κύμα απορροφηθεί πλήρως :

$$P = \frac{F}{A} = \frac{1}{A}\frac{dp}{dt} = \frac{1}{Ac}\frac{dU}{dt} = \frac{\overline{S}}{c}. \qquad \left[\begin{array}{l}\text{fully}\\ \text{absorbed}\end{array}\right]$$

Και μέγιστο στην περίπτωση της πλήρους ανάκλασης :

$$P = \frac{2\overline{S}}{c}. \qquad \left[\begin{array}{l}\text{fully}\\ \text{reflected}\end{array}\right]$$

31-9 Πίεση της Ακτινοβολίας

Η ακτινοβολία από τον Ήλιο φτάνει στη Γη μεταφέροντας ενέργεια με ρυθμό 1000 W/m². Βρείτε την πίεση και τη δύναμη που ασκείται από τον ήλιο στο προεκτεταμένο χέρι σας.

APPROACH The radiation is partially reflected and partially absorbed, so let us estimate simply $P = \overline{S}/c$.

SOLUTION $$P \approx \frac{\overline{S}}{c} = \frac{1000\ \mathrm{W/m^2}}{3 \times 10^8\ \mathrm{m/s}} \approx 3 \times 10^{-6}\ \mathrm{N/m^2}.$$

An estimate of the area of your outstretched hand might be about 10 cm by 20 cm, so $A = 0.02\ \mathrm{m^2}$. Then the force is

$$F = PA \approx (3 \times 10^{-6}\ \mathrm{N/m^2})(0.02\ \mathrm{m^2}) \approx 6 \times 10^{-8}\ \mathrm{N}.$$

NOTE These numbers are tiny. The force of gravity on your hand, for comparison, is maybe a half pound, or with $m = 0.2\ \mathrm{kg}$, $mg \approx (0.2\ \mathrm{kg})(9.8\ \mathrm{m/s^2}) \approx 2\ \mathrm{N}$. The radiation pressure on your hand is imperceptible compared to gravity.

31-9 Πίεση της Ακτινοβολίας

Έχει προταθεί η χρήση της Ηλιακής πίεσης για την προώθηση διαστημοπλοίων στο ηλιακό σύστημα . (a) πόση δύναμη ασκείται σε ένα «πανί-κάτοπτροο» διαστάσεων 1 km x 1 km, και (b) πόσο θα αυξηθεί η ταχύτητα ενός διαστημόπλοιου μάζας 5000-kg, σε ένα χρόνο; (c) Εάν το διαστημόπλοιο ήταν αρχικά ακίνητο πόσο διάστημα θα ειχε διανύσει στον 1 χρόνο;

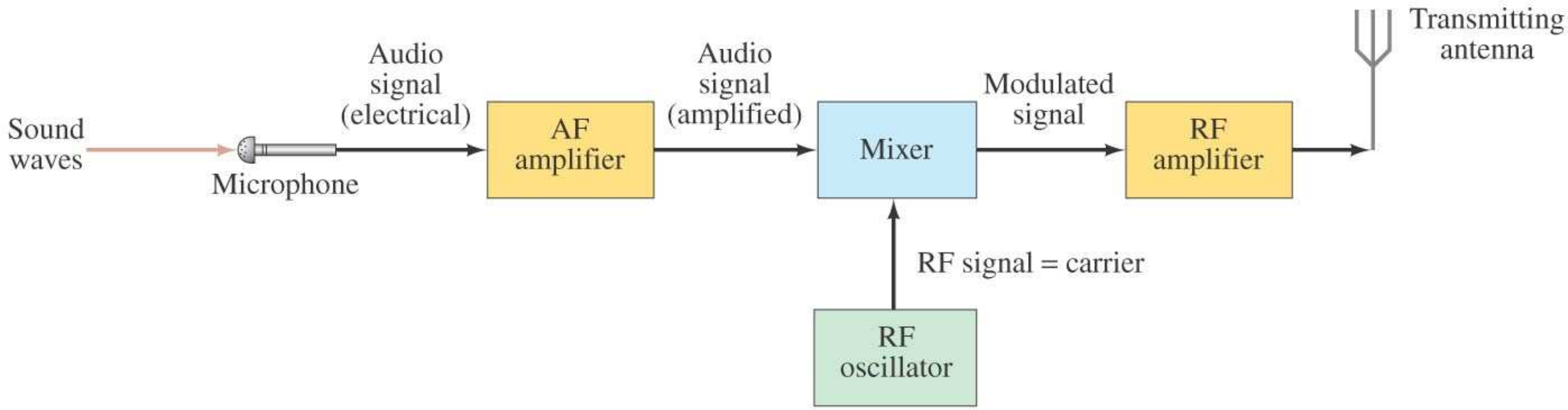
APPROACH Pressure P is force per unit area, so $F = PA$. We use the estimate of Example 31–7, doubling it for a reflecting surface $P = 2\overline{S}/c$. We find the acceleration from Newton's second law, and assume it is constant, and then find the speed from $v = v_0 + at$. The distance traveled is given by $x = \frac{1}{2}at^2$.

SOLUTION (*a*) Doubling the result of Example 31–7, the solar pressure is $2\overline{S}/c = 6 \times 10^{-6}\,\mathrm{N/m^2}$. Then the force is $F \approx PA = (6 \times 10^{-6}\,\mathrm{N/m^2})(10^6\,\mathrm{m^2}) \approx 6\,\mathrm{N}$.
(*b*) The acceleration is $a \approx F/m \approx (6\,\mathrm{N})/(5000\,\mathrm{kg}) \approx 1.2 \times 10^{-3}\,\mathrm{m/s^2}$. The speed increase is $v - v_0 = at = (1.2 \times 10^{-3}\,\mathrm{m/s^2})(365\,\mathrm{days})(24\,\mathrm{hr/day})(3600\,\mathrm{s/hr}) \approx 4 \times 10^4\,\mathrm{m/s}$ ($\approx 150{,}000$ km/h!). (*c*) Starting from rest, this acceleration would result in a distance of about $\frac{1}{2}at^2 \approx 6 \times 10^{11}$ m in a year, about four times the Sun-Earth distance. The starting point should be far from the Earth so the Earth's gravitational force is small compared to 6 N.

NOTE A large sail providing a small force over a long time can result in a lot of motion.

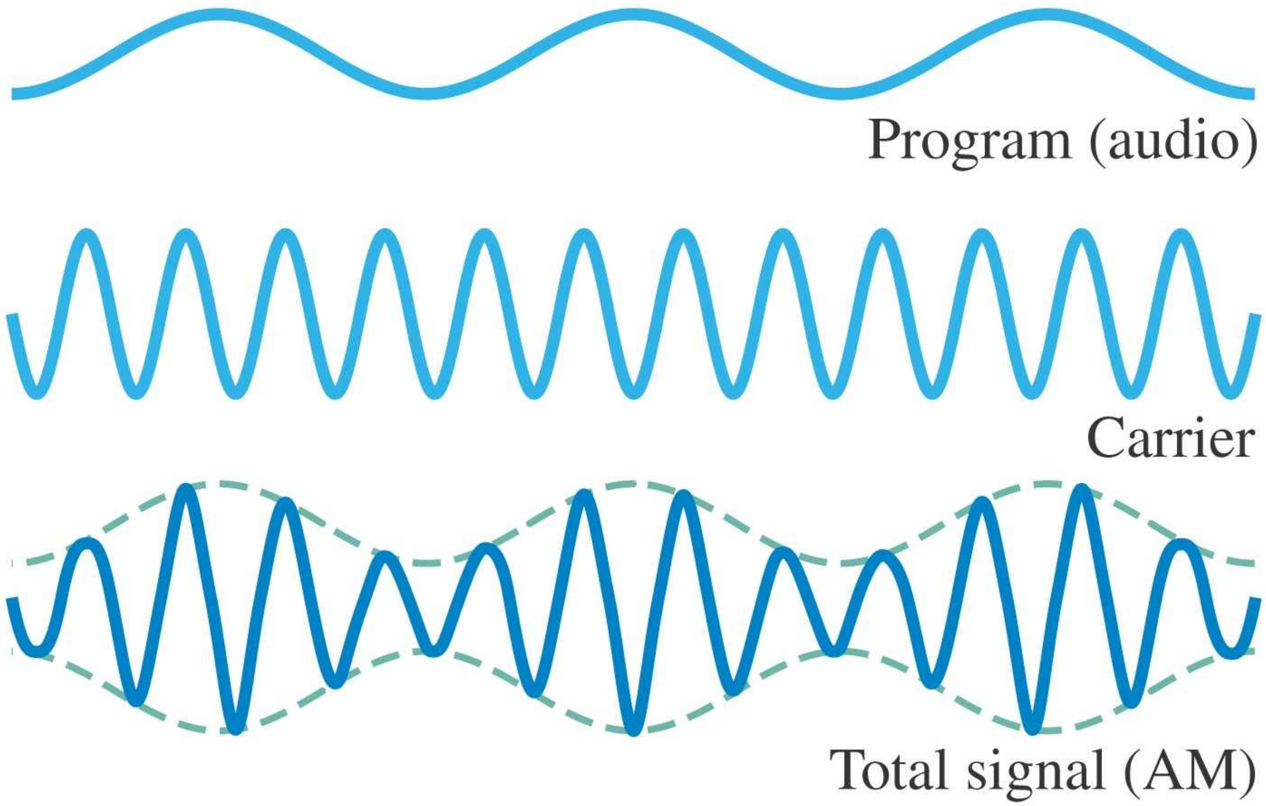
31-10 Ραδιοτηλεόραση-Ασύρματη Επικοινωνία

Το διάγραμμα δείχνει πώς έχουμε την εκπομπή ραδιοφωνικού σήματος. Το σήμα προστίθεται σε κύμα μεταφοράς.



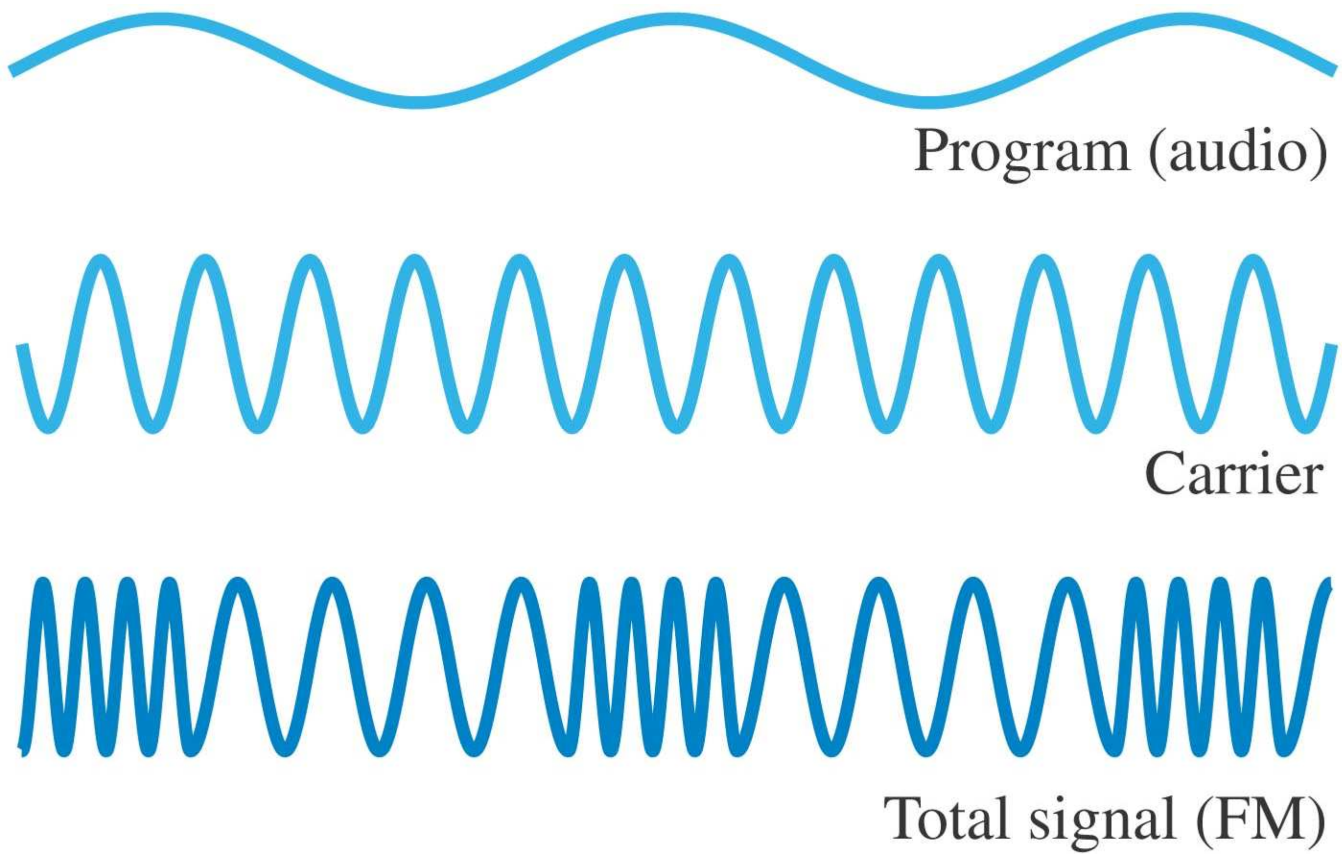
31-10 Ραδιοτηλεόραση-Ασύρματη Επικοινωνία

Η μίξη σήματος και φορέα γίνεται με δύο τρόπους: μεταβολή του πλάτους του φορέας από το σήμα (AM):



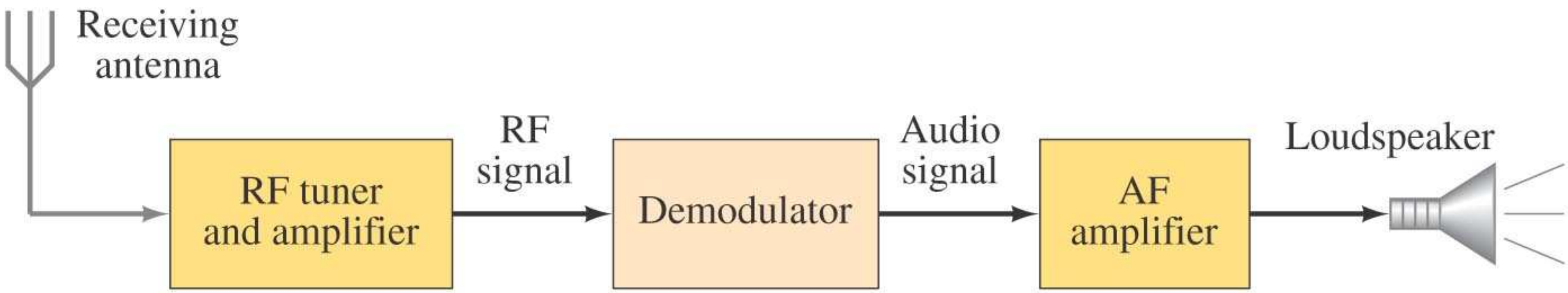
31-10 Ραδιοτηλεόραση-Ασύρματη Επικοινωνία

Μεταβολή της συχνότητας του φρέας από το σήμα (FM):



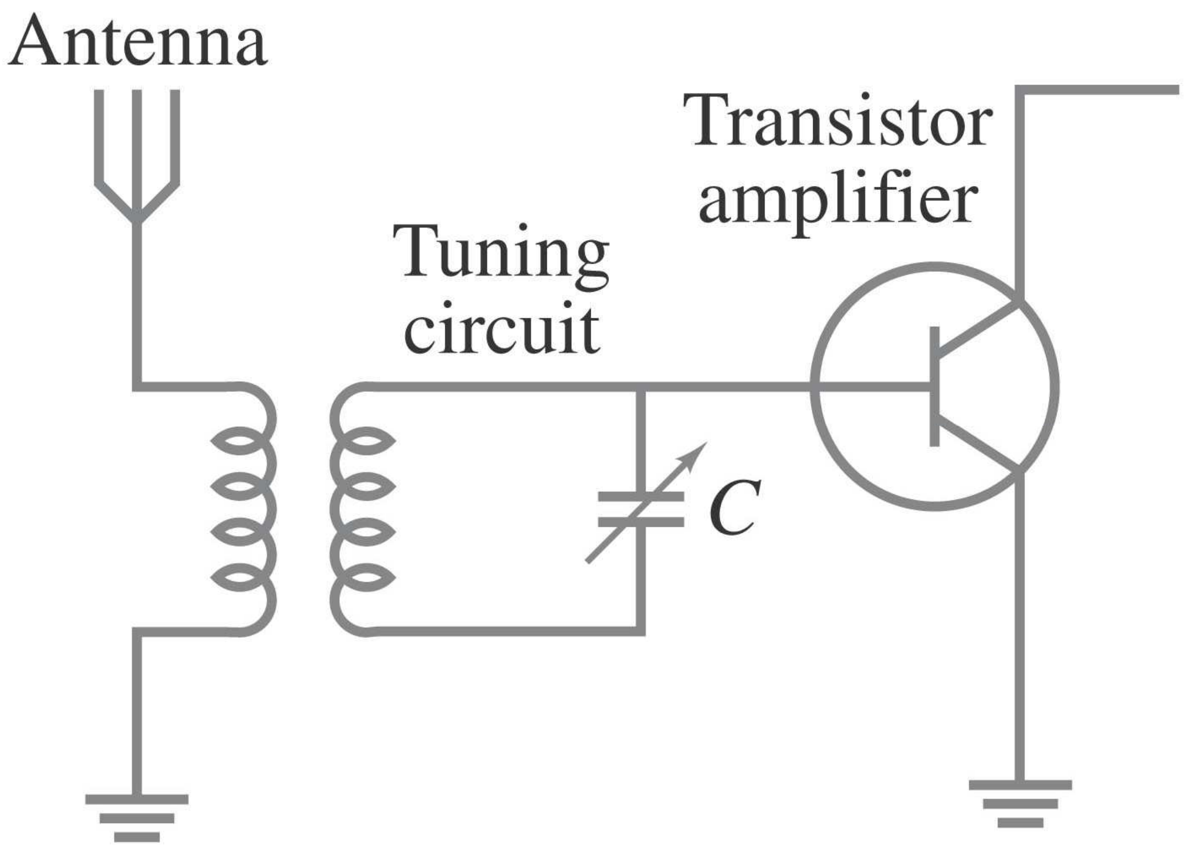
31-10 Ραδιοτηλεόραση-Ασύρματη Επικοινωνία

Στην πλευρά του δέκτη, το κύμα αποσυντίθεται ενισχύεται και διοχετεύεται στο ηχείο.



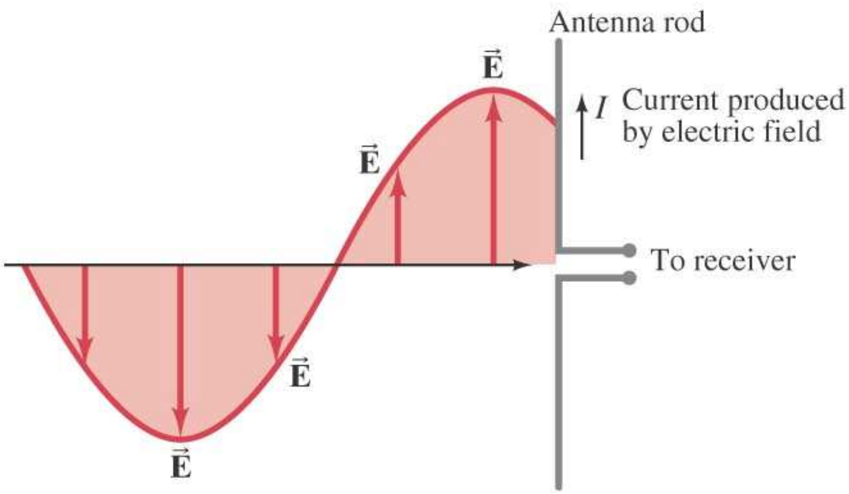
31-10 Ραδιοτηλεόραση-Ασύρματη Επικοινωνία

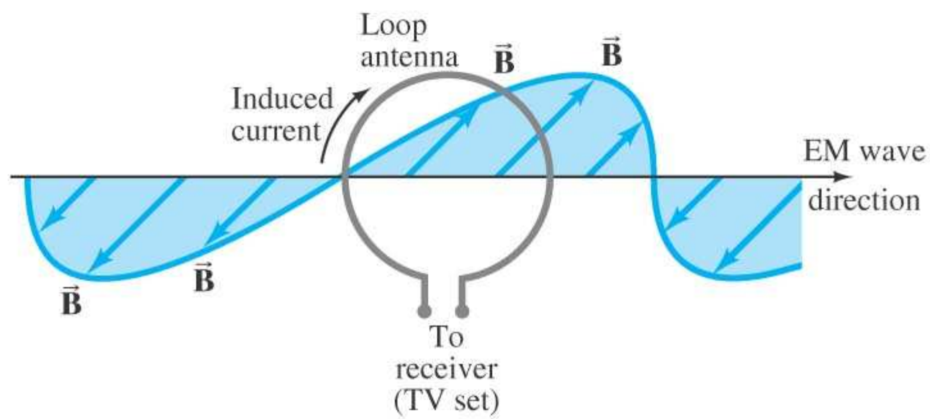
Η αντένα, λαμβάνει κύματα με πολλές συχνότητες. Η συχνότητα που μας ενδιαφέρει επιλέγεται από κάποιο συντονιστή.



31-10 Ραδιοτηλεόραση-Ασύρματη Επικοινωνία

Μια ευθύγραμμη κεραία, έχει μεταβολή του ρεύματος της λόγω του μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Σε μια κυκλική κεραία έχουμε μεταβολή του ρεύματος της λόγω της μεταβολής της μαγνητικής ροής.





31-10 Ραδιοτηλεόραση-Ασύρματη Επικοινωνία

Βρείτε το μήκος κύματος για ένα σταθμό που εκπέμπει στα 100 MHz.

APPROACH Radio is transmitted as an EM wave, so the speed is $c = 3.0 \times 10^8\,\mathrm{m/s}$. The wavelength is found from Eq. 31–14, $\lambda = c/f$.

SOLUTION The carrier frequency is $f = 100\,\mathrm{MHz} = 1.0 \times 10^8\,\mathrm{s^{-1}}$, so

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{(3.0 \times 10^8\,\mathrm{m/s})}{(1.0 \times 10^8\,\mathrm{s^{-1}})} = 3.0\,\mathrm{m}.$$

NOTE The wavelengths of other FM signals (88 MHz to 108 MHz) are close to the 3.0-m wavelength of this station. FM antennas are typically 1.5 m long, or about a half wavelength. This length is chosen so that the antenna reacts in a resonant fashion and thus is more sensitive to FM frequencies. AM radio antennas would have to be very long to be either $\frac{1}{2}\lambda$ or $\frac{1}{4}\lambda$.