

INTERFERENCIA

22.1 *Introducción*

22.2 *Interferencia de ondas producidas por dos fuentes sincrónicas*

22.3 *Interferencia de ondas producidas por varias fuentes sincrónicas*

22.4 *Ondas estacionarias en una dimensión*

22.5 *Ondas estacionarias y la ecuación de onda*

22.6 *Ondas electromagnéticas estacionarias*

22.7 *Ondas estacionarias en dos dimensiones*

22.8 *Ondas estacionarias en tres dimensiones; cavidades resonantes*

22.9 *Guías de onda*

22.1 Introducción

Una característica muy importante del movimiento ondulatorio es el fenómeno de interferencia. Este ocurre cuando dos o más movimientos ondulatorios coinciden en el espacio y en el tiempo. En el capítulo 12 estudiamos la superposición de dos movimientos armónicos simples. La teoría allí desarrollada se puede aplicar directamente al presente problema para el caso de ondas armónicas o monocromáticas.* La región en la cual coinciden las ondas incidente y reflejada es uno de los lugares donde ocurre interferencia. En efecto, éste es uno de los métodos más comunes de producir interferencia. Otro ejemplo importante de interferencia se halla en el movimiento ondulatorio confinado a una región limitada del espacio, tal como una cuerda fija por sus extremos, o un líquido en un canal, o una onda electromagnética en una cavidad metálica. La interferencia en estos casos da lugar a ondas estacionarias.

Con el fin de aplicar las fórmulas desarrolladas en el capítulo 12, escribiremos para una onda armónica que se mueve en la dirección $+X$

$$\xi = \xi_0 \text{ sen } (\omega t - kx), \tag{22.1}$$

y para una que se mueve en la dirección $-X$

$$\xi = \xi_0 \text{ sen } (\omega t + kx), \tag{22.2}$$

en lugar de las ecs. (18.5) y (18.9). Esto involucra sólo un cambio de signo y, en tanto seamos consistentes, es un procedimiento correcto, como se indicó al final de la sección 18.2 en la ec. (18.10) y se usó en el ejemplo 20.2.

Como se dijo en los capítulos precedentes, la teoría desarrollada aquí es aplicable a cualquier tipo de movimiento ondulatorio, pero en general se referirán nuestros ejemplos y aplicaciones a las ondas electromagnéticas.

22.2 Interferencia de ondas producidas por dos fuentes sincrónicas

Consideremos dos fuentes puntuales S_1 y S_2 (fig. 22-1) que oscilan en fase con la misma velocidad angular ω y amplitudes ξ_{01} y ξ_{02} . Sus ondas esféricas respectivas son

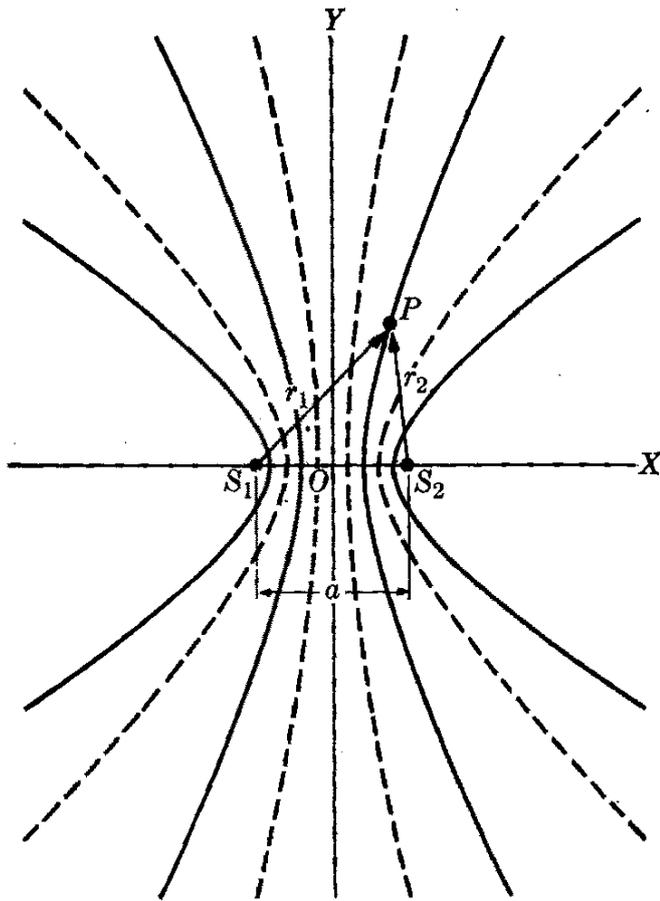
$$\xi_1 = \xi_{01} \text{ sen } (\omega t - kr_1) \tag{22.3}$$

y

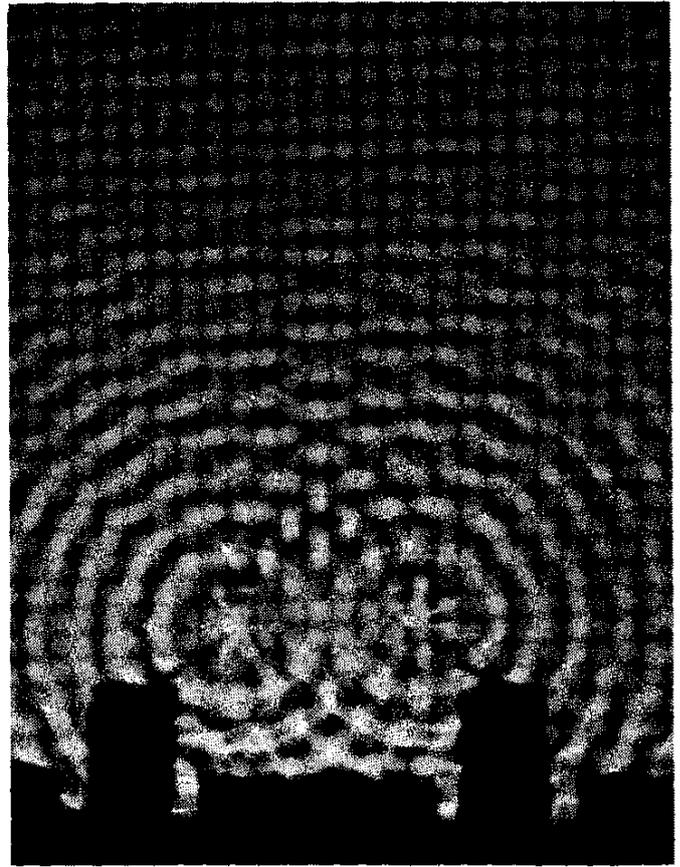
$$\xi_2 = \xi_{02} \text{ sen } (\omega t - kr_2), \tag{22.4}$$

donde r_1 y r_2 son las distancias desde cualquier punto a S_1 y S_2 , respectivamente. Obsérvese que, aunque las dos fuentes son idénticas, no producen la misma amplitud en P si r_1 y r_2 son diferentes, porque, como vimos en la sección 18.11, la amplitud de una onda esférica disminuye según la ley $1/r$.

* Sugérimos al estudiante que antes de estudiar este capítulo relea en el capítulo 12 las secciones 12.7 a 12.9.



(a)



(b)

Fig. 22-1. (a) Líneas nodales y ventrales resultantes de la interferencia de ondas producidas por dos fuentes idénticas. (b) Diagrama real de interferencia de ondas en el agua. (Fotografía cortesía de Educational Services, Inc.)

Supongamos que ξ es una propiedad escalar, tal como una perturbación de la presión. Si ξ corresponde a una cantidad vectorial, supondremos que ξ_1 y ξ_2 tienen la misma dirección de modo que la combinación de las dos ondas pueda ser tratada escalarmente. Cuando comparamos las ecs. (22.3) y (22.4) con la ec. (12.1) [esto es, $\xi = A \sin(\omega t + \alpha)$], las cantidades kr_1 y kr_2 juegan el mismo papel que las fases iniciales. Entonces el defasaje entre los dos movimientos ondulatorios en cualquier punto P (si recordamos que $k = 2\pi/\lambda$) es

$$\delta = kr_1 - kr_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (r_1 - r_2). \quad (22.5)$$

Cuando usamos la técnica de los vectores rotatorios explicada en la sección 12.7, los dos movimientos ondulatorios que interfieren pueden ser representados por vectores, de longitud ξ_{01} y ξ_{02} respectivamente, los cuales forman los ángulos $\alpha_1 = kr_1$ y $\alpha_2 = kr_2$ con el eje X (fig. 22.2). La amplitud ξ_0 y la fase α del movimiento ondulatorio resultante están dadas por el vector resultante. Por lo tanto podemos expresar la amplitud de la perturbación resultante en P por

$$\xi_0 = \sqrt{\xi_{01}^2 + \xi_{02}^2 + 2\xi_{01}\xi_{02} \cos \delta}. \quad (22.6)$$

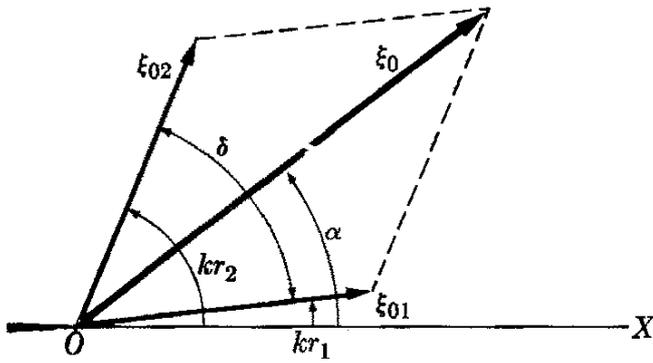


Fig. 22-2. Amplitud resultante de dos ondas que interfieren. El eje X se ha tomado como línea de referencia.

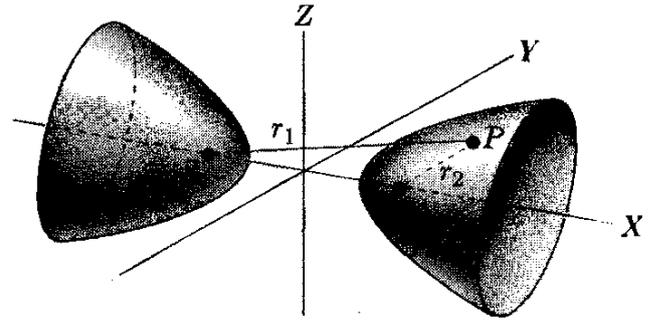


Fig. 22-3. Superficies de defasaje constante para ondas esféricas producidas por dos fuentes puntuales S_1 y S_2 coherentes.

En la ec. (22.6), vemos que ξ está comprendido entre los valores $\xi_{01} + \xi_{02}$ y $\xi_{01} - \xi_{02}$ dependiendo de que sea

$$\cos \delta = +1 \text{ ó } -1 \quad \text{ó} \quad \delta = 2n\pi \text{ ó } (2n + 1)\pi,$$

donde n es un número entero positivo o negativo. En el primer caso tenemos máximo refuerzo de los dos movimientos ondulatorios, o *interferencia constructiva*, y en el segundo hay máxima atenuación, o *interferencia destructiva*. Esto es,

$$\delta = \begin{cases} 2n\pi & \text{interferencia constructiva,} \\ (2n + 1)\pi & \text{interferencia destructiva.} \end{cases}$$

Usando la ec. (22.5), podemos entonces escribir

$$\frac{2\pi}{\lambda} (r_1 - r_2) = \begin{cases} 2n\pi & \text{interferencia constructiva,} \\ (2n + 1)\pi & \text{interferencia destructiva,} \end{cases} \quad (22.7)$$

o sea

$$r_1 - r_2 = \begin{cases} n\lambda & \text{interferencia constructiva,} \\ (2n + 1)\frac{\lambda}{2} & \text{interferencia destructiva.} \end{cases} \quad (22.8)$$

Pero $r_1 - r_2 = \text{const}$ define una hipérbola cuyos focos son S_1 y S_2 ó, como el problema es realmente en el espacio, esta ecuación define superficies hiperbólicas de revolución, tales como las de la fig. 22-3. Por consiguiente concluimos de la ec. (22.8) que en las superficies hiperbólicas cuyas ecuaciones son $r_1 - r_2 = \pm \lambda, \pm 2\lambda, \pm 3\lambda, \dots$, los dos movimientos ondulatorios interfieren reforzándose. Estas superficies se denominan *superficies ventrales* o *antinodales*. En las superficies hiperbólicas cuyas ecuaciones son $r_1 - r_2 = \pm \frac{1}{2}\lambda, \pm \frac{3}{2}\lambda, \dots$, los dos movimientos ondulatorios interfieren atenuándose. Estas superficies se denominan *nodales*. El diagrama en su totalidad es de este modo una sucesión de superficies ventrales y nodales alternadas. Las hipérbolas que se ilustran en la fig. 22-1 son las intersecciones de estas superficies con un plano que pasa por el eje X.