

Интерференция на вълни. Стоящи вълни. Звукови вълни – основни характеристики. Скорост на звука. Ефект на Доплер. Електромагнитни вълни. Скала на електромагнитните вълни

Интерференция на вълни. Стоящи вълни

Досега разглеждахме случаи, когато в дадена среда се разпространява само една вълна (от един източник). Ако в средата се намират два или повече източника, в някои точки от пространството около тях вълните се пресичат т.е. тези точки ще участват едновременно в няколко трептения. Като имаме предвид векторното представяне на трептенията (13 въпрос), можем да използваме принципа на суперпозицията за получаване на резултантните трептения на частиците в тези точки т.е. за вълните също е валиден принципът на суперпозицията. След точките на наслагването всяка от вълните продължава разпространението си в своята посока независимо от другите. Опитът показва, че при пресичането на две или повече вълни те не взаимодействат помежду си и поведението на всяка от тях е такова, каквото би било и в отсъствие на другите (това се отнася само за среди, които не променят свойствата си от разпространяващите се в тях вълнови процеси).

Ще разгледаме най-простия случай – когато в дадена точка се наслагват трептения, породени от две плоски хармонични вълни

$$y_1 = A_1 \cos \Phi_1 = A_1 \cos(\omega_1 t - k_1 x_1 + \varphi_1)$$

$$y_2 = A_2 \cos \Phi_2 = A_2 \cos(\omega_2 t - k_2 x_2 + \varphi_2)$$

разпространяващи се в еднородна среда, т.е. в тази точка трябва да съберем две хармонични трептения. Ако тези трептения са в една посока, можем лесно да получим амплитудата на резултантното трептение (13 въпрос):

$$(1) A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos \Delta\Phi}.$$

Виждаме, че амплитудата A на резултантното трептение зависи от фазовата разлика на двете вълни в тази точка:

$$(2) \Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = (\omega_1 - \omega_2)t + (k_2 x_2 - k_1 x_1) + (\varphi_1 - \varphi_2).$$

Ако фазовата разлика $\Delta\Phi$ зависи от времето t , във всеки момент от време и във всяка точка от средата $\cos\Delta\Phi$ ще се изменя непрекъснато от минималната си стойност -1 до максималната 1 и средното му значение за всеки краен интервал от време ще бъде 0 . Тогава A^2 (а следователно и енергията на вълната в единица обем $w \sim A^2$) ще има една и съща стойност във всички точки от средата – $A^2 = A_1^2 + A_2^2$ (съответно за интензитета I на вълната ще получим (17 въпрос) – $I = I_1 + I_2$). Ако тази фазова разлика (2) не зависи от времето, вълните се наричат кохерентни. Виждаме от (2), че това е възможно само ако двете вълни имат еднакви честоти ($\omega_1 = \omega_2 = \omega$, $\omega = 2\pi f$). Тъй като средата е еднородна, скоростите на разпространение на двете вълни (фазовите скорости) също трябва да са равни – $v_1 = v_2 = v$. Но в такъв случай (17 въпрос) и вълновите числа на двете вълни трябва да са равни – $k_1 = k_2 = k$. Тогава (2) ще придобие вида:

$$(3) \Delta\Phi = k(x_2 - x_1) + (\varphi_1 - \varphi_2),$$

т.е. фазовата разлика на двете кохерентни вълни зависи само разликата в пътищата на вълните до дадената точка $\Delta = x_2 - x_1$. Двете константи φ_1 и φ_2 зависят само от началния момент на двете трептения, породили вълните y_1 и y_2 (това са началните фази на тези трептения), и са едни и същи за всички точки от средата. Ако можем да синхронизираме двата източника така, че да започнат трептенията си в един и същ момент, началните им фази φ_1 и φ_2 ще бъдат равни и (3) ще се опрости:

$$(4) \Delta\Phi = k(x_2 - x_1) = k\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$$

Ако за дадена точка от средата Δ има такава стойност, че $\Delta\Phi = 2m\pi$, $\cos\Delta\Phi = 1$ и амплитудата A на резултантното трептение (1) и интензитетът I на вълната в тази точка във всеки момент от време ще бъдат:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2} = A_1 + A_2 > \sqrt{A_1^2 + A_2^2},$$
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} > I_1 + I_2$$

т.е. в тази точка се наблюдава усилване на трептенията (и следователно увеличаване на енергията в тази област) в сравнение с наслагването на некохерентни вълни. В точките, в които Δ има такава стойност,

че $\Delta\Phi=(2m+1)\pi$, $\cos\Delta\Phi=-1$, амплитудата на резултантното трептение (1) и интензитетът I на вълната във всеки момент от време ще бъдат:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2} = |A_1 - A_2| < \sqrt{A_1^2 + A_2^2}$$

$$I = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1I_2} < I_1 + I_2$$

и ще наблюдаваме отслабване на трептенията (намаляване на енергията в тези области) в сравнение с наслагването на некохерентни вълни. Явлението, при което се наблюдава преразпределение на енергията на вълните в средата, вследствие наслагването на две или повече кохерентни вълни се нарича интерференция. Точките, в които се наблюдава усилване на трептенията (увеличаване на енергията и интензитета на вълната), се наричат интерференчни максимуми, а тези, в които се наблюдава отслабване на трептенията (намаляване на енергията и интензитета на вълната) – интерференчни минимуми. Местоположението на тези точки се определя само от разликата Δ в пътищата на двете (или повече) вълни от източника до съответната точка. Лесно можем да получим условията за минимум и максимум от (4). Интерференчен максимум се наблюдава в тези точки, за които $\Delta\Phi=2m\pi$:

$$\Delta\Phi = 2m\pi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$$

$$\Delta = 2m \frac{\lambda}{2} = m\lambda$$

т.е. в тези точки, за които разликата в пътищата на вълните е четно число полувълни. В точките, за които $\Delta\Phi=(2m+1)\pi$, ще наблюдаваме интерференчен минимум:

$$\Delta\Phi = (2m+1)\pi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$$

$$\Delta = (2m+1) \frac{\lambda}{2}$$

т.е. точките, за които разликата в пътищата на вълните е нечетно число полувълни.

Ще разгледаме един интересен в практическо отношение случай на интерференция – когато се наслагват две плоски кохерентни бягащи вълни с еднакви амплитуди, които се разпространяват в противоположни посоки. Явлението се наблюдава при отражение на вълна от преграда, която е перпендикулярна на посоката на разпространение на вълната, и се нарича стояща вълна. Нека да определим резултата от интерференцията на две такива вълни – y_1 и отразената вълна y_2 , разпространяващи се в двете противоположни посоки на оста X (допускаме, че в средата, в която се разпространяват вълните, няма загуба на енергия):

$$y_1 = A \sin(\omega t - kx)$$

$$y_2 = A \sin(\omega t + kx)$$

като в случая сме избрали за начален момент на трептението моментът, в който източникът на трептенията (с координата $x=0$) преминава през равновесното си положение (при $t=0 \rightarrow y_1=0$). Резултантното трептене в произволна точка с координата x съгласно принципа на суперпозицията е:

$$(5) y = y_1 + y_2 = 2A \cos kx \sin \omega t = \pm A^* \sin \omega t,$$

откъдето следва, че в резултат на интерференцията на двете вълни във всяка точка от средата с фиксирана координата x ще се извършва хармонично трептене със същата честота ω , но с друга амплитуда

$$A^* = |2A \cos kx| = \left| 2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \right|,$$

която зависи само от координатата x . В точките от средата, в които $\cos(2\pi x/\lambda)=0$, $y=0$, т.е. в тях няма трептения ($A^*=0$). В точките, където $\cos(2\pi x/\lambda)=\pm 1$, амплитудата на трептенията е максимална, т.е. $A^*=2A$. Точките от средата, за които е изпълнено условието:

$$(6) \frac{2\pi x}{\lambda} = \pm \left(m + \frac{1}{2} \right) \pi$$

се наричат възли на стоящата вълна ($A^*=0$), а тези, за които

$$(7) \frac{2\pi x}{\lambda} = \pm m\pi$$

– върхове на стоящата вълна ($A^*=2A$). От (6) и (7) непосредствено следва, че за всеки връх е изпълнено $x=\pm m\lambda/2$, а за всеки възел $x=\pm(m+1/2)\lambda/2$. Лесно може да се покаже, че разстоянието между съседните възли или върхове е равно на $\lambda/2$, а между всеки възел и връх – $\lambda/4$.

Характерните особености на стоящата вълна в сравнение с бягащата са няколко:

- В стоящата вълна амплитудите на трептене са различни в различните точки ($A^*=f(x)$). Съществуват възли и върхове на трептенията. В бягащата вълна всички амплитуди са еднакви (A не зависи от x);
- В областта, заключена между два съседни възела, всички точки от средата трептят с еднаква фаза; при преход към съседната такава област фазите на трептенията се изменят с π (знакът пред $\sin\omega t$ се променя съгласно (5) от „+“ на „-“ или обратно: от „-“ на „+“, $-\sin\omega t = \sin(\omega t \pm \pi)$). Следователно точките от двете страни на даден възел трептят с противоположни фази. В бягащата вълна фазите на трептене зависят от координатата x на точката ($\Phi(t)=(\omega t - kx)$);
- При стоящата вълна не се пренася енергия, тъй като двете наслагващи се вълни пренасят еднаква енергия в две противоположни посоки (амплитудите на двете вълни са еднакви); при бягащата вълна се пренася енергия в посока на разпространението ѝ.

Звукови вълни – основни характеристики. Скорост на звука. Ефект на Доплер

Звуковите вълни представляват механични трептения, които се разпространяват в материална еластична среда с определена честота, варираща в граници от **20 Hz** до **20 kHz**. Те предизвикват в нашите слухови органи специфично възприятие, наречено звук.

Като физично явление звукът се характеризира освен с честотата си (определена по-горе) и с величините интензитет и скорост.

Интензитетът (силата) на звука се определя както интензитетът на всяка еластична вълна (17 въпрос) като средната енергия, пренасяна от звуковите вълни за единица време през единица площ, разположена перпендикулярно на посоката на разпространение на вълните:

$$I = \frac{E}{St}$$

$$I = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 A^2$$

Мерната единица за интензитет на звука също е ват на квадратен метър [W/m^2].

Скоростта v на разпространение на звука зависи от свойствата на средата – основно от плътността ѝ ρ и способността ѝ да се деформира. В газовете звука се разпространява като надлъжна вълна, а скоростта ѝ се определя от промяната на налягането P в даден обем при промяната на плътността ρ на средата, вследствие деформацията – $v = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}}$.

Като имаме предвид голямата скорост на разпространение (~ 340 m/s), можем да считаме процеса за адиабатен и от уравненията на Поасон и Клапейрон–Менделеев можем да получим често използваната формула $v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}$, където R е

универсалната газова константа, а $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$, T и μ съответно са коефициентът на Поасон, термодинамичната температура и моларната маса на газа. В течностите скоростта на звука зависи от

модула на обемна деформация K – $v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$, а в твърдите тела, където може да се разпространява като надлъжна и напречна вълна, от модулите E на надлъжна и G на напречна деформация ($v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ за надлъжните вълни и $v = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ за напречните).

В разглеждания дотук предпологахме, че източникът на звук е неподвижен. Оказва се, че ако източникът на звука и приемникът, с който го регистрираме, се движат един спрямо друг, честотата на звука f' , която регистрира приемникът, се различава от честотата f на излъчените звукови вълни. Това явление се нарича ефект на Доплер, на името на австрийския физик К. Доплер, който пръв го е обяснил. В най-простия случай, когато източникът и приемникът се движат по една права със скорости съответно

В разглеждания дотук предпологахме, че източникът на звук е неподвижен. Оказва се, че ако източникът на звука и приемникът, с който го регистрираме, се движат един спрямо друг, честотата на звука f' , която регистрира приемникът, се различава от честотата f на излъчените звукови вълни. Това явление се нарича ефект на Доплер, на името на австрийския физик К. Доплер, който пръв го е обяснил. В най-простия случай, когато източникът и приемникът се движат по една права със скорости съответно

v_1 и v_2 , а положителната посока на оста X насочим от източника към приемника, честотата f' , която се регистрира от приемника ще бъде:

$$f' = f \frac{v - v_2}{v - v_1},$$

където с v сме означили скоростта на разпространение на звука в дадената среда, а с f – честотата на излъчваните от източника вълни.

Честотната област на звука се разделя на три обхвата: инфразвуков, звуков и ултразвуков. Въздействието на инфразвуковите вълни върху живите организми все още не е добре изучено и е предмет на изследвания. За тях е характерно, че се поглъщат слабо от средата, поради което се разпространяват на големи разстояния.

Ултразвуковите вълни намират широко приложение в техниката и медицината.

Поради голямата си честота те имат силно диспергиращо действие, което се използва при различни технологични процеси: приготвяне на емулсии и суспензии, получаване на сплави с дребнозърнеста структура, обработка на твърди материали (рязане, шлайфане, пробиване на отвори и т.н.), почистване повърхностите на различни малки детайли и др. Ултразвукът се разпространява във водата без чувствителни загуби на енергия, поради което се използва за подводна сигнализация, откриване на най-различни обекти под водата, както и за изследване релефа на морското дъно. Уредите, които се прилагат за тези цели, се наричат ултразвукови локатори. Чрез тях се откриват и вътрешни дефекти в различните твърди материали.

В медицината ултразвуковите вълни се използват за най-различни цели. Напоследък ултразвуковите апарати за диагностика заменят успешно рентгеновите апарати. В неврохирургията ултразвукът се използва за третиране на много малки участъци от мозъка, върху които оказва разрушително действие, без да се нарушава нормалното функциониране на останалите части от мозъка.

Електромагнитни вълни. Скала на електромагнитните вълни

Когато дефинирахме електромагнитното поле (10 въпрос) казахме, че то се създава вследствие на преобразуване на енергията на променливо електрично поле в енергия на променливо магнитно поле и обратно. При това преобразуване на енергията интензитетите \vec{E} на електричното и \vec{H} на магнитното поле се променят периодично. Като се използват уравненията на Максвел (10 въпрос) може да се покаже, че при разпространението на електромагнитното поле в някаква среда, интензитетите \vec{E} и \vec{H} удовлетворяват уравнения от вида:

$$(2) \quad \begin{aligned} \Delta \vec{E} &= \varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \\ \Delta \vec{H} &= \varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \end{aligned}$$

които (17 въпрос) са диференциални вълнови уравнения. В такъв случай решенията на (2) трябва да описват някаква вълна с фазова скорост:

$$(3) \quad v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon \mu}}.$$

Тази вълна Максвел нарича електромагнитна вълна, а за скоростта ѝ във вакуум ($\varepsilon = \mu = 1$) получава:

$$(4) \quad v_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}.$$

Стойността, получена от (4) – 3×10^8 m/s, е много близка до определената по-рано стойност на скоростта на светлината във вакуум c . Това дава основание на Максвел да направи предположението, че светлината също е електромагнитна вълна и $v_0 = c$. Оказало се също така, че $\sqrt{\varepsilon \mu}$ за прозрачните вещества съвпада с коефициента им на пречупване n . Така скоростта на светлината v в дадено вещество с показател на пречупване n ще бъде (3), (4):

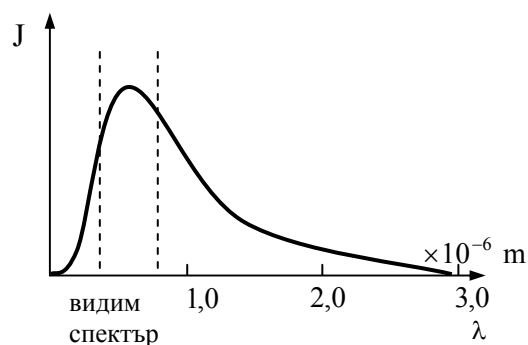
$$v = \frac{c}{n}.$$

В 9 въпрос показахме, че $\vec{E} \perp \vec{B} \Rightarrow \vec{E} \perp \vec{H}$. Следователно векторите \vec{E} и \vec{H} трептят във взаимно перпендикулярни посоки, а посоката на разпространение на електромагнитната вълна е перпендикулярна и на двата вектора т.е. електромагнитната вълна е напречна вълна. Основната разлика

между електромагнитните и еластичните вълни е, че при електромагнитната вълна се променят периодично интензитетите на електричното и магнитното поле т.е. характеристики на самата вълна, а не както при еластичната вълна – положенията на частици от средата. Затова електромагнитните вълни могат да се разпространяват и във вакуум, а еластичните не могат.

Електромагнитните вълни имат твърде широк диапазон от честоти. Обикновено те се класифицират по дължината на вълната и се разделят на няколко области:

- Диапазон на дългите радиовълни ($10^4 \div 10^2 \text{ m}$); използва се най-много за радиовръзки. Основният недостатък на разглежданите радиовълни се дължи на факта, че йоносферата (въздушният слой с повишена концентрация на заредени частици, който има височина $100 \div 300 \text{ km}$ над земната повърхност) ги поглъща. По тази причина те не са ефективни за радиовръзка на големи разстояния. Използват се повече за радиовръзки в подводния флот.
- Диапазон на средните и късите радиовълни ($10^2 \div 10 \text{ m}$); използва се основно за радиосъобщения. За разлика от дългите вълни тези вълни се отразяват от йоносферата. Вследствие на многократно отражение от нея те могат да обходят земното кълбо и да осигурят далечна радиовръзка.
- Метров диапазон ($10 \div 1 \text{ m}$); използва се за телевизия и радиолокация. В телевизията е необходимо да се предават на големи разстояния не само звукови сигнали, но и изображения. Всяко изображение посредством фотоелектронен преобразувател се превръща в редица от електрични сигнали. Вълните от този диапазон се разпространяват добре през йоносферата и не се връщат към повърхността на Земята. Поради това, за да се увеличи разстоянието на телепредаванията, излъчвателите на телевизионните станции трябва да се поставят на много високи места (телевизионни кули). В днешно време на специално избрани околоземни орбити се изпращат спътници, които постоянно се намират над определени райони и служат за ретранслация на телевизионните предавания.
- Сантиметров диапазон ($1 \div 10^{-2} \text{ m}$); използват се в авиацията за точна и близка радиолокация. Вълните от сантиметровия диапазон се поглъщат силно от веществото, поради което са удобни за изучаване на неговите свойства.
- Милиметров (микровълнов) диапазон ($10^{-2} \div 10^{-3} \text{ m}$); използва се за точна радиолокация и за научни цели. При изучаване поглъщането на микровълните от многоатомните молекули се получава информация за строежа им. С помощта на този метод неотдавна е открито, че в Космоса съществуват не само прости молекули като амоняк, водород и др., но и молекули на сложни съединения – аминокиселини. Общият брой на откритите сложни молекули достига около **200**.
- Инфрочервен диапазон ($10^{-3} \div 10^{-6} \text{ m}$); използва се при изучаване вътрешната структура на веществата – определяне вида на взаимодействието между молекулите, характера на движението на ядрата в атомите и др.
- Видима светлина ($7.5 \times 10^{-7} \div 4 \times 10^{-7} \text{ m}$); – електромагнитните вълни, които се възприемат от зрителния орган на човека, и включва цялата информация, която той получава за заобикалящия го свят. Спектърът на видимата светлина е показан на фиг. 2.
- Ултравioletов диапазон ($4 \times 10^{-7} \div 10^{-7} \text{ m}$); тези вълни имат способността да въздействат много силно на веществото. Поради силното си взаимодействие с веществото ултравioletовото излъчване на Слънцето се поглъща почти напълно (**99%**) от атмосферата и по този начин се предпазва Земята.
- Диапазон на рентгеновите лъчи и гама-лъчите ($\lambda < 10^{-7} \text{ m}$); рентгеновото излъчване се използва в медицината за рентгенова диагностика, а в техниката за откриване на различни дефекти в материалите (рентгенова дефектоскопия). Гама-лъчите поради голямата си проникваща способност ($f > 10^{20} \text{ Hz}$) намират приложение за изследване структурата на ядрата.



фиг. 2