

Раздел курса
«Колебания и волны»

Тема

Групповая скорость волн.

Дисперсия волн.

Бесконечная монохроматическая волна,
уравнение которой имеет вид

$$\psi(x, t) = A \cos(\omega t - kx + \varphi),$$

не может быть использована для передачи информации.

Для того, чтобы волна могла переносить информацию, необходимо изменять со временем (**модулировать**) её параметры A , ω или ϕ . Соответственно существуют **амплитудная, частотная и фазовая модуляции волны.**

Рассмотрим волну с амплитудной модуляцией.

Для того, чтобы создавать волну, амплитуда которой изменяется со временем, источник волны должен совершать колебания то с большей, то с меньшей амплитудой, то есть в простейшем случае совершать биения.

Ранее было показано, что биения возникают при сложении двух однонаправленных гармонических колебаний, частоты которых ω_1 и ω_2 различны, но мало отличаются друг от друга:

$$\omega_2 - \omega_1 = \Delta\omega \ll \omega_1, \omega_2.$$

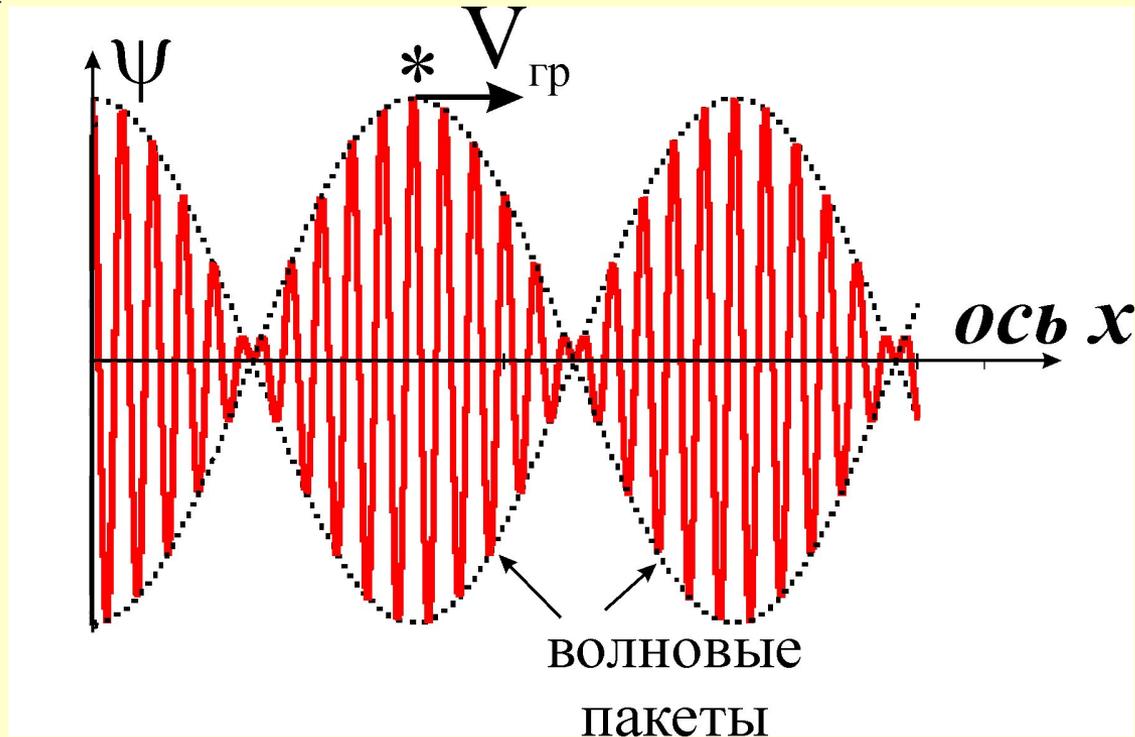
Следовательно, источник, который совершает биения, создает **две гармонические волны**, бегущие в одном направлении, частоты которых ω_1 и ω_2 .

Обе волны возбуждают одинаково направленные колебания в одних и тех же точках пространства.

Получим уравнение результирующей волны считая, что колебания источника происходят при сложении гармонических косинусоидальных колебаний с нулевой начальной фазой и одинаковыми амплитудами.

$$\begin{aligned}\psi &= \psi_1 + \psi_2 = \\ &= A \cos(\omega_1 t - k_1 x) + A \cos(\omega_2 t - k_2 x) = \\ &= 2A \cos\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t - \frac{k_2 - k_1}{2} x\right) \cdot \\ &\quad \cdot \cos\left(\frac{\omega_2 + \omega_1}{2} t - \frac{k_2 + k_1}{2} x\right).\end{aligned}$$

«Фотография» полученной волны в некоторый момент времени имеет вид



Скорость перемещения в пространстве максимума волнового пакета (точка *) называется групповой скоростью $V_{гр}$ волн, составляющих волновой пакет.

Огибающая волнового пакета определяется в уравнении модулированной волны членом

$$\cos\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t - \frac{k_2 - k_1}{2} x\right).$$

В процессе перемещения такой модулированной волны для точки, обозначенной звездочкой (*), постоянной остается фаза, стоящая в этом выражении:

$$\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t - \frac{k_2 - k_1}{2} x^* \right) = \textit{const.}$$

Здесь x^* - координата максимума волнового пакета.

Поставим задачу: выразить групповую скорость $V_{\text{гр}}$ через циклические частоты ω_1 , ω_2 и волновые числа k_1 , k_2 волн, составляющих волновой пакет.

Итак, показано, что групповая скорость волн равна производной от циклической частоты по волновому числу:

$$V_{гр} = \frac{d\omega}{dk}.$$

Поставим задачу: найти связь групповой и фазовой скорости волны:

$$V_{гр} = f(V_{ф}) - ?$$

Итак, показано, что групповая скорость волны выражается через фазовую скорость формулой

$$V_{gp} = V_{\phi} - \lambda \frac{dV_{\phi}}{d\lambda}.$$

Рассмотрим три случая:

1) $V_{\phi} \neq f(\lambda)$ – фазовая скорость не зависит от длины волны (явление дисперсии волн отсутствует);

$$\frac{dV_{\phi}}{d\lambda} = 0$$

2) V_{ϕ} растет с ростом длины волны λ , то есть

$$\frac{dV_{\phi}}{d\lambda} > 0$$

(наблюдается нормальная дисперсия);

3) V_{ϕ} уменьшается с ростом длины волны λ ,

то есть

$$\frac{dV_{\phi}}{d\lambda} < 0$$

(наблюдается аномальная дисперсия).

Итак,

- 1) если дисперсия отсутствует, то групповая скорость волн равна фазовой

$$V_{gr} = V_{\phi};$$

- 2) если наблюдается нормальная дисперсия, то групповая скорость волн меньше фазовой

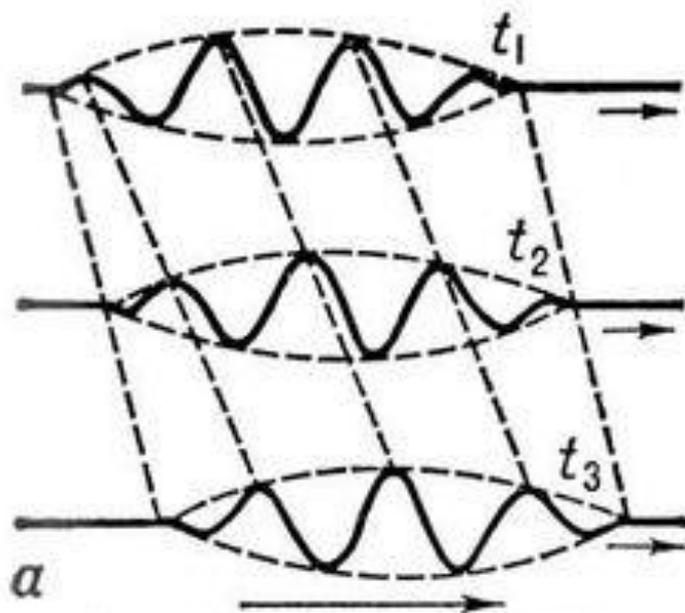
$$V_{gr} < V_{\phi};$$

- 3) если наблюдается аномальная дисперсия, то групповая скорость волн больше фазовой

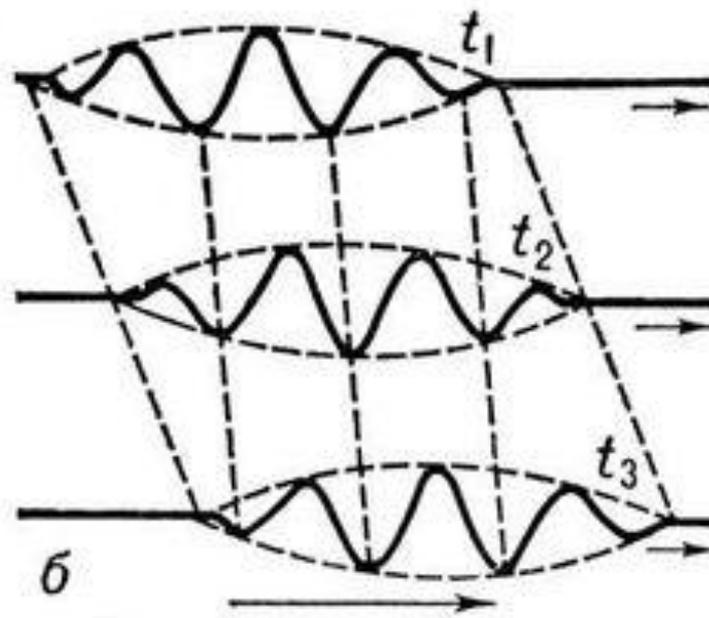
$$V_{gr} > V_{\phi}.$$

Последовательные моментальные «фотографии» волнового пакета в моменты времени t_1, t_2, t_3

- а) нормальная дисперсия,
- б) аномальная дисперсия.



Распространение волны



Распространение волны

График зависимости циклической частоты волны от волнового числа $\omega=f(k)$ называется **дисперсионным**.

Для трех рассмотренных выше случаев этот график имеет вид

