Non-reciprocal wave processes

Glushchenko A.[1], Glushchenko E.[2], Ustinova E.[3]

Невзаимные волновые процессы

Глущенко А.Г.[1], Глущенко Е.П.[2], Устинова Е.С.[3]

[1]Глущенко Александр Григорьевич / Glushchenko Alexander – доктор физико-математических наук, профессор;
[2]Глущенко Евгения Павловна / Glushchenko Evgeniya – кандидат физико-математических наук, доцент;
[3]Устинова Елена Сергеевна / Ustinova Elena – старший преподаватель,
Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти

Аннотация: *рассмотрены особенности интерференции волн в невзаимной среде. Показано, что невзаимность, формируемая движением среды, меняет характер стоячих волн: на стоячую волну накладывается дополнительно волновой процесс, меняются расстояния между узлами и пучностями, невзаимность протекания времени может привести к изменению характера колебаний резонаторов.*
Abstract: *the features of interference waves in a non-reciprocal environment. It is shown that the non-reciprocity, formed by the movement of the medium changes the nature of standing waves in the standing wave is applied further wave process, changing the distance between the nodes and antinodes, nonreciprocity course of time may lead to a change of the mode resonators.*

Ключевые слова*: движение сред, невзаимность, интерференция.*
Keywords*: motion media, non-reciprocity, interference.*

Известно, что при наложении когерентных волн, движущихся во взаимно противоположных направлениях, наблюдается интерференция и формируются стоячие волны, которые позволяют накапливать энергию колебательных процессов [1,2]. Интерференция в средах и структурах, обладающих одинаковыми параметрами во взаимно противоположных направлениях, дает стабильное во времени распределение поля [3]. Распространение волн в невзаимных средах или структурах имеет особенности [2,4]. Рассмотрим влияние невзаимности параметров структур или сред в пространстве, а также и во времени на интерференцию волн. Установлено, что на известную картину стоячих волн накладываются дополнительные колебательные и волновые процессы, величина которых зависит от степени невзаимности параметров структур.

Если скорости различны для волн, распространяющихся во взаимно противоположных направлениях, то в этом случае среда или волноводная структура обладают невзаимными свойствами. Невзаимность волн в прямом и обратном направлениях является, например, следствием движения сред [4] или воздействием полей подмагничивания в гиротропных средах [5]. Невзаимные свойства структур с гиротропными средами применяются в конструировании функциональных элементов микроволнового и оптического диапазонов. Рассмотрим здесь особенности формирования интерференционной картины в среде, обладающей невзаимными свойствами. На рис.1 показана одномерная волноводная структура. Фазовая скорость распространения волн в среде υ. Если среда движется вдоль оси 0x, фазовая скорость различна для прямых $\upsilon_1 = \upsilon + u$ и обратных $\upsilon_2 = \upsilon - u$ волн. Скорость среды *u* здесь играет роль параметра невзаимности (при *u* = 0 структура обладает взаимными свойствами). Помимо скоростей различаются волновые числа и длины прямой и обратной волн:

$$k_1 = \frac{\omega}{\upsilon + u},\ k_2 = \frac{\omega}{\upsilon - u},\ \lambda_1 = \frac{\upsilon + u}{\nu},\ \lambda_2 = \frac{\upsilon - u}{\nu}.$$

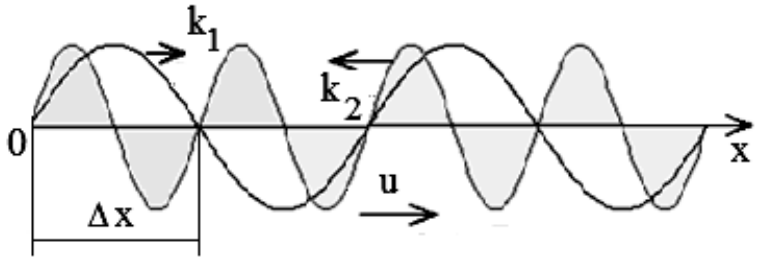

*Рис.1. Наложение прямой и отраженной волн в невзаимной среде (**k**$_1$, **k**$_2$- волновые числа, u – скорость движения среды)*

Рассмотрим общий случай, когда в структуре накладываются два волновых процесса: прямой и отраженной волн, у которых различаются частотно-временные ωt параметры и волновые числа k_1, k_2. Обычно рассматривается случай, когда параметр ωt прямой и обратной волн время не различается, или отличаются частоты прямой и отраженной волн. Ввиду равноправия пространственной и временной координат интересна возможность неравенство времени для прямых и для обратных волн. Результирующий процесс описывается уравнением:

$$\xi(x,t) = \xi_1 + \xi_2 = A\cos(\omega_1 t_1 - k_1 x) + A\cos(\omega_2 t_2 + k_2 x) =$$

$$= 2A\cos\left(\frac{\omega_2 t_2 - \omega_1 t_1}{2} + \frac{k_1 + k_2}{2}x\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega_2 t_2 + \omega_1 t_1}{2} - \frac{k_1 - k_2}{2}x\right). \qquad (1)$$

Уравнение описывает нестабильную в пространстве и во времени «квазистоячую» волну. Рассмотрим частные случаи. При $\omega_1 t_1 = \omega_2 t_2 = \omega t$ и $k_1 = k_2$ имеем обычную стоячую волну:

$$\xi(x,t) = 2A\cos\left(\frac{k_1 + k_2}{2}x\right) \cdot \cos(\omega t),$$

При $\omega_1 t_1 = \omega_2 t_2 = \omega t$ и $k_1 \neq k_2$ имеем пульсирующую стоячую волну:

$$\xi(x,t) = 2A\cos\left(\frac{k_1 + k_2}{2}x\right) \cdot \cos\left(\omega t - \frac{k_1 - k_2}{2}x\right) = 2A\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_r}x\right) \cdot \cos(\omega t - k_r x), \qquad (2)$$

где для результирующего волнового процесса длина стоячей волны λ_r, волновое число k_r и скорость υ_r определяются соотношениями:

$$\lambda_r = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}, \; k_r = \frac{k_1 - k_2}{2} = \frac{\omega}{\upsilon_r}, \; \upsilon_r = \frac{2\upsilon_1 \upsilon_2}{\upsilon_2 - \upsilon_1} = \frac{u^2 - \upsilon^2}{u}.$$

Уравнение (2) описывает «квазистоячую» волну, у которой соседние точки не находятся в состоянии синфазных колебаний. На стоячую волну накладывается волновой процесс с волновым числом k_r и фазовой скоростью υ_r. Направление распространения волнового процесса от соотношения скоростей среды u и фазовой скорости волны в среде υ:

а) совпадает с осью 0*x* при скоростях, удовлетворяющих соотношениям:

$$-|\upsilon| < u < 0 \text{ или } u > \upsilon;$$

б) противоположно оси 0*x* при скоростях:

$$u < \upsilon < 0 \text{ или } 0 < u < \upsilon.$$

Положение узлов стоячей волны не зависит от времени. Расстояние между узлами

$$\Delta x = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{\upsilon_1 \upsilon_2}{\nu(\upsilon_1 + \upsilon_2)} = \frac{\upsilon^2 - u^2}{2\nu\upsilon}$$

зависит от скорости движения волн в среде υ и от скорости движения самой среды u. При неподвижной среде $u \to 0$ расстояние между узлами равно половине длины волны $\Delta x \to \lambda/2$. С ростом скорости движения среды расстояние между узлами уменьшается (структура стоячей волны «сжимается») и при $u \to \upsilon$ расстояние между узлами $\Delta x \to 0$. В отличие от стоячих волн во взаимных средах, амплитуда колебаний во всех точках (кроме узлов) с течением времени меняется и носит периодический характер.

Интересно рассмотреть результат наложения двух колебаний или волн встречных не только в пространстве, но и во времени. Известно, что уравнения физики обладают симметрией по отношению к изменению знака временной зависимости. В тоже время реальные физические процессы часто имеют выраженную направленность во времени. Причины этой направленности часто ищутся в области статической физики и являются одной из наиболее важных проблем физики [6]. Рассмотрим здесь случай возможности влияния на колебательный процесс различного частотно-временного параметра ωt (за счет различия частоты или течения времени в прямом и в обратном направлениях). Пусть $x = 0$ и два однонаправленных колебания происходят во времени в прямом и в обратном направлениях с

различными частотно-временными параметрами $\omega_1 t_1 \neq \omega_2 t_2$. Пусть $\omega_1 t_1 = \omega t$, $\omega_2 t_2 = \alpha \omega t$. Тогда имеем:

$$\xi(t) = A exp(i\omega t) + A exp(-i\alpha\omega t) = 2A cos\left(\frac{1+\alpha}{2}\omega t\right) \cdot exp\left(i\frac{1-\alpha}{2}\omega t\right) =$$

$$= 2A cos(\Omega_1 t) \cdot exp(i\Omega_2 t), \qquad (3)$$

где α - параметр, характеризующий скорость протекания времени в обратном направлении. В частном случае при $\alpha = 1$ (невзаимность не проявляется) имеем известное соотношение:

$$\xi(t) = A exp(i\omega t) + A exp(-i\alpha\omega t) = 2A cos(\omega t).$$

Соотношение (3) показывает принципиальную возможность измерения невзаимности (α) частотно-временных процессов путем измерения параметров колебательной системы Ω_1, Ω_2. Различие в масштабе ωt времени в прямом и в обратном направлениях, например, в 1% может привести к изменению частоты колебаний $\Omega_1, \Omega_2 \sim 0$, 5%. В резонаторе бегущая и отраженная волны при различии времени протекания прямого и обратного процессов дают соотношение:

$$\xi(x,t) = \xi_1 + \xi_2 = A\cos(\omega t - kx) + A cos(\omega\alpha t + kx) =$$

$$= 2A cos\left(\frac{1+\alpha}{2}\omega t\right) cos\left(\frac{1-\alpha}{2}\omega t + kx\right) \cdot \qquad (4)$$

В этом случае стоячая волна не образуется, а формируется волна, бегущая в обратную сторону с частотой $(1-\alpha)\omega/2$ и амплитудой, меняющейся с частотой $(1+\alpha)\omega/2$.

Выводы. Можно выделить пространственную и частотно-временную невзаимность параметров физических систем. Частотно-временная невзаимность меняет резонансные параметры колебательных систем. Пространственная невзаимность проявляется в особенности интерференции прямых и обратных когерентных волн: образуются нестационарные стоячие волны – на распределение поля стоячей волны накладывается волновой процесс, направление которого определяется параметром невзаимности. Колебания соседних точек теряют свойство синфазности. Резонансные частоты зависят от параметра невзаимности среды. Таким образом, колебательные и резонансные структуры позволяют исследовать невзаимные свойства сред и структур. В свою очередь исследование параметров резонаторов позволяет фиксировать протекание невзаимных процессов и существенно расширить возможности практического использования различных волноводных, резонансных структур.

Литература

1. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 344 с.
2. *Глущенко А. Г., Глущенко Е.П., Иванов В.В., Устинова Е.С.* Особенности стоячих волн в невзаимных средах // Естественные и технические науки. 2012. №1(57). С.257–259.
3. *Гринченко В.Т., Вовк И.В., Мацыпура В.Т.* Основы акустики. Київ: Наукова думка, 2007. 640 с.
4. *Осташев В. Е.* Распространение звука в движущихся средах. М.: Наука, 1992. 208 с.
5. *Садовников А. В., Бубликов К. В., Бегинин Е. Н., Шешукова С. Е., Шараевский Ю. П., Никитов С. А.* Невзаимное распространение гибридных электромагнитных волн в слоистой структуре феррит–сегнетоэлектрик конечной ширины // Письма в ЖЭТФ. 1915. т.102. вып.3. С.167 – 172.
6. *Рейхенбах Г.* Направление времени. М.: УРСС, 2003. 360 с.