

УДК 53 (075.8)

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ВРЕМЕННОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ СВЕТА В ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ПСФ, МСФ И ИПФ.

Черный В.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Рассмотрение вопроса о когерентности и монохроматичности света в известных учебниках по физики для технических вузов [1-3] проводится довольно формально и однообразно. Приведенная информация для успешного усвоения студентами требует дополнительного разъяснения и уточнения.

Например, в известном учебнике И.В. Савельева такое важное понятие, как время когерентности определяется как время, за которое случайное изменение фазы достигает значения порядка λ . На самом деле за время когерентности случайное изменение фазы может быть любым в интервале от нуля до λ .

Другой спорный тезис выдвинут в учебнике Т.И. Трофимовой. Утверждается, что прибор обнаружит интерференционную картину лишь тогда, когда время разрешения прибора значительно меньше времени когерентности накладываемых волн. Автор путает понятия мгновенной и стационарной интерференционной картины. Сказанное справедливо лишь для случая мгновенной интерференционной картины. Если бы приведенное утверждение было справедливо, мы не могли бы глазом наблюдать стационарную интерференционную картину от обычных источников света, так как время разрешения для глаза составляет несколько сотых долей секунды, а время когерентности обычных источников значительно меньше.

Под временной когерентностью понимают согласованность колебаний, происходящих в данной точке пространства с течением времени. В простейшем случае колебание будет когерентным, если по известной в начальный момент времени t_0 фазе, равной φ_0 , можно однозначно определить значение фазы в момент $t_0 + \Delta t$ следующим образом:

$$\varphi(t_0 + \Delta t) = \varphi_0 + \omega \Delta t, \quad (1)$$

где ω – циклическая частота. Для реальной световой волны данное равенство оказывается несправедливым. Первой причиной этого является тот факт, что световая волна представляет собой совокупность множества волн, излучаемых отдельными атомами или молекулами. При этом начальные фазы отдельных волн независимы друг от друга. Второй причиной является то, что процесс излучения является ограниченным во времени и источники излучают цуги конечной длительности τ .

Пока излучают одни и те же источники, имеет место наложение одних и тех же цугов. При этом начальная фаза суммарной волны остается постоянной и определяется по известной формуле:

$$\text{tg} \varphi_0 = \frac{\sum_i E_i \sin \varphi_{0i}}{\sum_i E_i \cos \varphi_{0i}}, \quad (2)$$

где E_i и φ_{0i} – амплитуда и начальная фаза для i -го колебания

Однако с течением времени одни источники прекращают излучение, другие начинают излучать. В подобные моменты времени фаза интегральной волны испытывает случайные скачкообразные изменения, условно изображенные на рис. 1, на котором представлена зависимость напряженности электрического поля от времени.

В результате в формуле (1) появляется дополнительное слагаемое, учитывающее именно эти случайные изменения. Конечно, на данном рисунке для наглядности величина случайного изменения фазы значительно преувеличена. В реальности при суперпозиции большого числа цугов подобные случайные скачки почти незаметны.

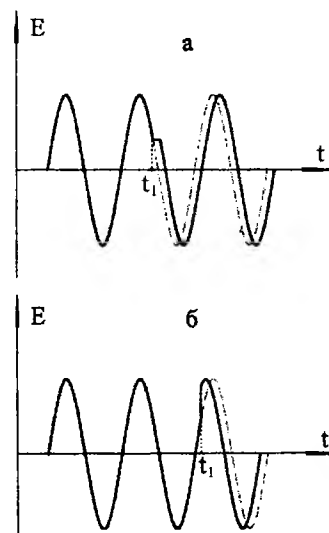


Рисунок 1

Случайное изменение фазы является непрерывно изменяющейся величиной. Подобные величины в теории вероятностей описываются с помощью плотности вероятности [4].

Представляется уместным сформулировать условие временной когерентности, используя именно этот широко применимый термин. Однако авторы цитируемых учебников пренебрегают такой возможностью.

Предположим, что многократно произведены измерения фаз световой волны в моменты времени t_0 и $t_0 + \Delta t$.

Пока величина Δt мала по сравнению с длительностью цуга, случайное изменение фазы за это время оказывается незначительным. Две волны, полученные делением исходной, и приходящие в некоторую точку с задержкой по времени друг относительно друга, равной Δt , будут когерентными и создадут стационарную интерференционную картину.

Как известно, интенсивность I волны, получаемой суперпозицией двух когерентных волн одинаковой интенсивности I_1 равна

$$I = 2I_1 + 2I_1 \cos \delta,$$

где δ - угол сдвига фаз между волнами.

В общем случае величина δ испытывает случайные изменения. Однако при $\Delta t \ll \tau$ величина δ будет изменяться незначительно. Точно также будет незначительно изменяться во времени и среднее значение $\cos \delta$ за время разрешения приемника излучения t_r . Например, оно будет незначительно отличаться от плюс единицы для точек, где наблюдаются максимумы или незначительно отличаться от минус единицы для точек, в которых наблюдаются минимумы. Интерференционная картина будет наблюдаться независимо от величины t_r . Последняя для большинства приемников излучения, в том числе и для глаза человека, много больше τ . Случайные изменения фаз будут происходить в обеих волнах, однако они будут синхронными и одинаковыми.

С другой стороны, в рассматриваемом случае плотность вероятности случайного изменения фазы будет отлична от нуля только в узком интервале значений случайного изменения фазы. Этот интервал начинается с нуля и имеет ширину порядка $\frac{\pi \Delta t}{\tau}$. На таком интервале $\cos \delta$ изменяется незначительно и приблизительно равен единице. По мере увеличения Δt степень согласованности колебаний в моменты t_0 и $t_0 + \Delta t$ будет ослабляться, поскольку между этими

моментами произойдет все большее число случайных скачков фазы.

Соответственно, ширина интервала случайного изменения фазы, в котором плотность вероятности случайного изменения фазы становится отличной от нуля, возрастает. Среднее значение $\cos \delta$ уже определяется по более широкому интервалу изменений δ . Поэтому оно начинает уменьшаться, и интерференционная картина становится менее четкой.

Если $\Delta t = \tau$, то все цуги, существовавшие в момент t_0 , к моменту $t_0 + \Delta t$ полностью исчезнут. Фаза волны будет определяться фазами других цугов, фазы которых никак не связаны с фазами цугов, существовавших в момент t_0 . Две волны, полученные делением исходной, и приходящие в некоторую точку с задержкой по времени друг относительно друга, равной Δt , уже не будут когерентными. Их разность фаз будет случайным образом изменяться во времени и интерференционная картина не возникнет. Среднее значение $\cos \delta$ будет равно нулю для всех точек пространства, где накладываются волны. Соответственно, интервал случайного изменения фазы, в котором плотность вероятности этой величины становится одинаковой при многочисленных повторениях, простирается от нуля до π . При значениях $\Delta t > \tau$ ширина этого интервала не изменяется. Если уравнение волны записать, используя синус, то подобный интервал будет простирается от $-\pi/2$ до $+\pi/2$.

Исходя из изложенного выше, под временем когерентности следует понимать минимальное время, по истечении которого плотность вероятности случайного изменения фазы при многочисленных повторениях оказывается одинаковой на интервале шириной π .

1. Савельев, И.В. Курс общей физики: учеб. пособие. В 3-х т. Т.2/ И.В. Савельев – 3-е изд., – М.: Наука, 1988. С.347 – 360.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. –15-е изд., – М.: Издательский центр «Академия», 2007. С.318 – 320.
3. Детлаф, А.А. Курс физики. / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. –3-е изд., –М.: ВШ, 2001. С.420 – 426.
4. Савельев, И.В. Курс физики: учеб. пособие. В 3-х т. Т.1/ И.В. Савельев – М.: Наука, 1988. С. 250 – 253.