

СЛОЖЕНИЕ И ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ДВУХ КОГЕРЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С ПРОИЗВОЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ ЛИНИЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

О. В. Ломакина¹, Н. Я. Молотков², А. В. Ермаков³

*Кафедры: «Техническая механика и детали машин» (1); lomakinaolga@mail.ru;
«Физика» (2), ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;
компания Savvi Au Pty Ltd, Австралия (3)*

Ключевые слова: интерференция; когерентность; поляризация; сложение; электромагнитные волны.

Аннотация: Представлен общий случай сложения двух когерентных волн с произвольной ориентацией их электрических векторов, приводящий к образованию результирующей волны с эллиптической поляризацией, которая может вырождаться в волну с круговой и линейной поляризацией. Рассмотрен при наличии анализатора общий случай интерференции волн, линии поляризации которых ориентированы произвольно. Рассмотрены условия наиболее контрастной интерференции и связь между полярными диаграммами эллиптически поляризованных волн и характером поляризации результирующих волн, полученных от сложения. Традиционное взаимодействие однонаправленных и взаимно перпендикулярных колебаний рассмотрены как частные случаи. Разработано общедоступное программное обеспечение, являющееся демонстрацией изложенной теории.

В оптике различают сложение когерентных волн, линии поляризации которых параллельны и взаимно перпендикулярны [1 – 5]. Взаимодействие когерентных волн, линии поляризации которых параллельны, сводится к сложению однонаправленных колебаний и нахождению амплитуды или интенсивности результирующей волны в зависимости от разности фаз складываемых волн. Нет различия между сложением волн и их интерференцией. Когерентные волны с ортогональными линиями поляризации интерферировать не могут, но возможна операция сложения взаимно перпендикулярных колебательных движений, под которой понимают исключение времени из параметрических уравнений двух волн. Данная операция в общем случае приводит к образованию результирующей волны с эллиптической поляризацией, которая при определенных условиях может вырождаться в волну с круговой или линейной поляризацией; дополнительно возникает проблема анализа характера поляризации результирующей волны. Для наблюдения интерференции поляризованных волн необходимо на пути волн с ортогональными линиями поляризации установить анализатор, который выделяет параллельные компоненты однонаправленных колебаний. Представляет интерес исследование взаимодействия двух когерентных электромагнитных волн с произволь-

ной ориентацией их линий поляризации, которое позволит рассматривать взаимодействие волн с параллельными и перпендикулярными линиями поляризации как частные случаи и установить тесную связь между сложением и интерференцией волн, а также найти связь между интерференцией поляризованных волн и анализом характера поляризации результирующей волны.

Общий случай сложения волн.

Пусть в точку наблюдения от когерентных источников приходят две волны, линии поляризации \vec{E}_{m1} и \vec{E}_{m2} которых (рис. 1) составляют между собой произвольный угол α . Уравнения колебаний в точке наблюдения имеют вид:

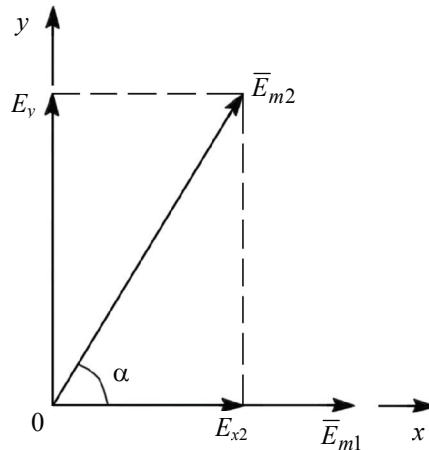


Рис. 1. Пространственная диаграмма ориентации электрических векторов \vec{E}_{m1} и \vec{E}_{m2} когерентных волн

$$\xi_1 = E_{m1} \cos \omega t; \tag{1}$$

$$\xi_2 = E_{m2} \cos(\omega t + \delta), \tag{2}$$

где ω – частота, Гц; t – время колебаний, с; δ – разность фаз волн в точке наблюдения, зависящая от их предварительной разности хода Δ , то есть $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$.

Методика сложения колебаний, совершающихся под произвольным углом друг к другу, изложена в работе [6]. Перейдем к прямоугольной системе координат xOy . Учитывая, что вектор \vec{E}_{m1} совпадает с осью x , найдем проекции вектора \vec{E}_{m2} на оси координат:

$$E_{x2} = E_{m2} \cos \alpha; \tag{3}$$

$$E_y = E_{m2} \sin \alpha. \tag{4}$$

На основании данных выражений составим уравнения трех колебаний в точке наблюдения, совершающихся по осям x и y :

$$\xi_1 = E_{m1} \cos \omega t; \tag{5}$$

$$\xi_{x2} = E_{x2} \cos(\omega t + \delta) = E_{m2} \cos \alpha \cos(\omega t + \delta), \tag{6}$$

$$\xi_y = E_y \cos(\omega t + \delta) = E_{m2} \sin \alpha \cos(\omega t + \delta). \tag{7}$$

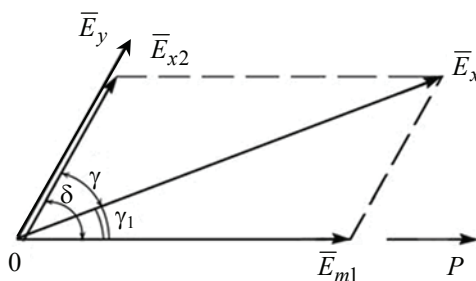


Рис. 2. Векторная диаграмма сложения электрических векторов

Чтобы вычислить амплитуды и фазы результирующих колебаний по осям x и y , на основании выражений (5) – (7) построим векторную диаграмму рассматриваемых колебаний (рис. 2). Осуществляя сложение векторов \vec{E}_{x2} и \vec{E}_{m1} , считаем вектор $\vec{E}_x = \vec{E}_{m1} + \vec{E}_{x2}$. Следовательно, амплитуда результирующего колебания по оси x равна

$$E_x^2 = E_{m1}^2 + E_{x2}^2 + 2E_{m1}E_{x2} \cos \delta = E_{m1}^2 + E_{m2}^2 \cos^2 \alpha + 2E_{m1}E_{m2} \cos \alpha \cos \delta. \quad (8)$$

Фазу γ_1 этого колебания так же можно найти из векторной диаграммы

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = \frac{E_{x2} \sin \delta}{E_{m1} + E_{x2} \cos \delta} = \frac{E_{m2} \cos \alpha \sin \delta}{E_{m1} + E_{m2} \cos \alpha \cos \delta}. \quad (9)$$

Следовательно, исходные колебания, совершающиеся под произвольным углом α , сведены к двум колебаниям ξ_x и ξ_y с амплитудами E_x и E_y , которые определяются формулами (4) и (8). Разность фаз γ между данными колебаниями по осям x и y находится из векторной диаграммы

$$\gamma = \delta - \gamma_1. \quad (10)$$

Результирующие колебания по осям x и y имеют вид:

$$\xi_x = E_x \cos \omega t; \quad (11)$$

$$\xi_y = E_y \cos(\omega t + \gamma). \quad (12)$$

Исключая из полученных уравнений время t , получим уравнение эллиптически поляризованной волны

$$\frac{\xi_x^2}{E_x^2} - 2 \frac{\xi_x \xi_y}{E_x E_y} \cos \gamma + \frac{\xi_y^2}{E_y^2} = \sin^2 \gamma. \quad (13)$$

Показано, что при сложении двух когерентных волн с произвольной ориентацией линий поляризации образуется волна с эллиптической поляризацией, которая может при определенных условиях вырождаться в волну с линейной или круговой поляризацией. Покажем это на конкретном примере.

Случай сложения двух когерентных волн равных амплитуд $E_{m1} = E_{m2} = E_m$, линии поляризации которых образуют угол $\alpha = 60^\circ$. На основании формул (4), (8) – (10) найдем амплитуды и фазы колебаний по осям x и y :

$$E_y = \frac{\sqrt{3}}{2} E_m; \quad (14)$$

$$E_x = \sqrt{1,25 + \cos \delta} E_m; \quad (15)$$

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = \frac{\sin \delta}{2 + \cos \delta}; \quad (16)$$

$$\gamma = \delta - \gamma_1. \quad (17)$$

В частных случаях при $\alpha = 60^\circ$ имеем, согласно формулам (13) – (17):

1) при разности фаз $\delta = 0$ найдем уравнение прямой

$$\frac{\xi_y}{\xi_x} = 0,58 = \operatorname{tg} 30^\circ, \quad (18)$$

следовательно, результирующая волна обладает линейной поляризацией (рис. 3, а). Линия поляризации результирующей волны составляет с осью x угол 30° ;

2) при $\delta = \frac{\pi}{2}$ получим неканоническое уравнение эллипса (см. рис. 3, б)

$$\frac{\xi_x^2}{1,25} - 0,92 \xi_x \xi_y + \frac{\xi_y^2}{0,75} = 0,79 E_m^2, \quad (19)$$

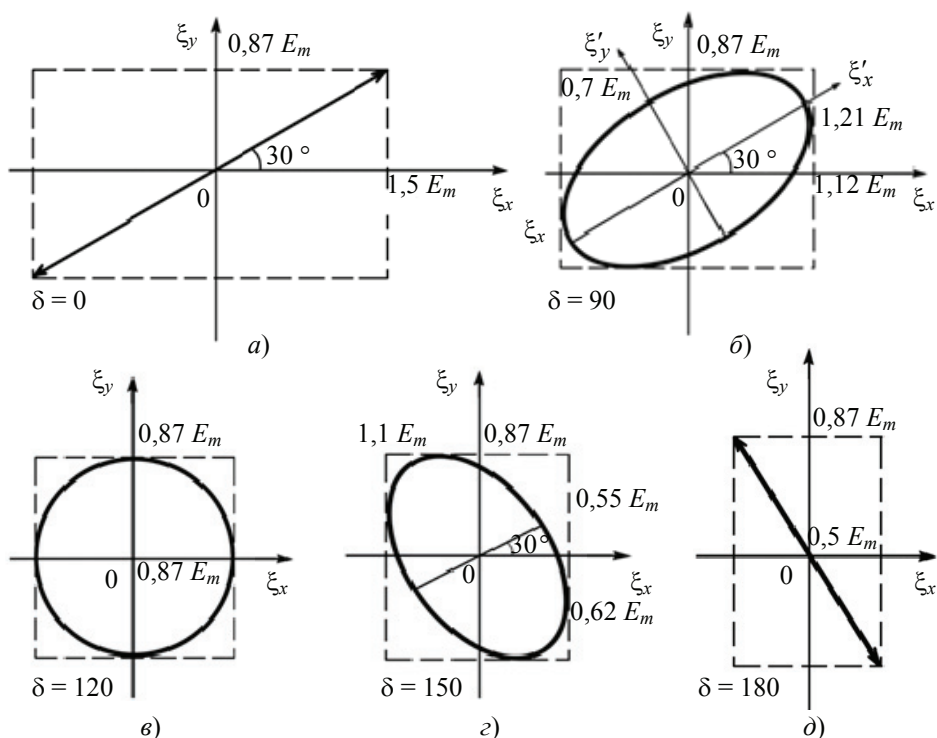


Рис. 3. Характер поляризации результирующих волн, полученных от сложения:

$$a - \delta = 0; \text{ б} - \delta = \frac{\pi}{2}; \text{ в} - \delta = \frac{2\pi}{3}; \text{ з} - \delta = \frac{5\pi}{6}; \text{ д} - \delta = \pi$$

которое при повороте осей координат на 30° превращается в каноническое уравнение

$$\frac{\xi_x'^2}{1,21^2 E_m^2} + \frac{\xi_y'^2}{0,7^2 E_m^2} = 1; \quad (20)$$

3) при $\delta = \frac{2\pi}{3}$ наблюдается волна (см. рис. 3, в) с круговой поляризацией

$$\xi_x^2 + \xi_y^2 = 0,75 E_m^2; \quad (21)$$

4) при разности фаз $\delta = \frac{5\pi}{6}$, получим неканоническое уравнение эллипса

$$\frac{\xi_x^2}{0,38} + 2,18 \xi_x \xi_y + \frac{\xi_y^2}{0,75} = 0,66 E_m^2, \quad (22)$$

которое после поворота осей координат на угол 30° превращается (см. рис. 3, з) в уравнение

$$\frac{\xi_x'^2}{0,55^2 E_m^2} + \frac{\xi_y'^2}{1,19^2 E_m^2} = 1; \quad (23)$$

5) при разности фаз $\delta = \pi$ найдем уравнение прямой линии (см. рис. 3, д)

$$\frac{\xi_y}{\xi_x} = -1,73 = \text{tg}120^\circ. \quad (24)$$

Можно легко получить уравнения результирующих электромагнитных волн при дальнейшем изменении разности фаз складываемых волн с произвольной ориентацией их линий поляризации. Таким образом, теоретически показано, что при сложении двух когерентных электромагнитных волн с произвольной ориентацией линий поляризации образуется результирующая волна с эллиптической поляризацией, которая в зависимости от амплитуд и фаз складываемых волн превращается в волну с круговой или линейной поляризацией. Данные выводы подтверждаются экспериментально при сложении низкочастотных электрических колебаний и колебаний в диапазоне СВЧ [6, 7]. Следует заметить, что в диапазоне СВЧ и оптическом диапазоне нельзя наблюдать вращение электрического вектора в волне с эллиптической или круговой поляризацией в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, также нельзя наблюдать колебания электрического вектора в линейно поляризованной волне. Далее рассмотрим анализ поляризации результирующей волны.

Общий случай интерференции волн с произвольной ориентацией линий поляризации. В формуле для интерференции двух когерентных радиоволн с произвольной ориентацией электрических векторов, предложенной в [9], использована зависимость интерференции для волн, линии поляризации которых параллельны, и введен угол между данными линиями, но не учтено, что для наблюдения интерференции поляризованных волн необходим анализатор, установленный на их пути [1 – 5].

Пусть в точку наблюдения от двух когерентных источников приходят электромагнитные волны, линии поляризации которых \vec{E}_{m1} и \vec{E}_{m2} составляют произвольный угол α , OA – главная линия анализатора, установленного на их пути (рис. 4). Волны распространяются перпендикулярно к плоскости рисунка. Анализатор выделяет две параллельные составляющие E_{11} и E_{22} от когерентных волн \vec{E}_{m1} и \vec{E}_{m2} , которые могут интерферировать. Амплитуды интерферирующих волн могут быть найдены из пространственной диаграммы. При $E_{m1} = E_{m2} = E_m$ найдем:

$$E_{11} = E_m \cos \varphi; \quad E_{22} = E_m \cos(\alpha - \varphi), \quad (25)$$

где φ – угол, определяющий положение главной линии анализатора по отношению к линиям поляризации когерентных волн. В результате сложения однонаправленных колебаний анализатор пропускает результирующую волну, амплитуда которой может быть найдена на основе векторной диаграммы интерферирующих волн E_{11} и E_{22} при их разности фаз δ в точке наблюдения:

$$E^2 = E_{11}^2 + E_{22}^2 + 2E_{11}E_{22} \cos \delta \quad (26)$$

или

$$E^2 = (E_{11} + E_{22})^2 - 4E_{11}E_{22} \sin^2 \frac{\delta}{2}. \quad (27)$$

От разности фаз δ интерферирующих волн можно перейти к соответствующей разности хода Δ волн, приходящих в точку наблюдения от двух источников

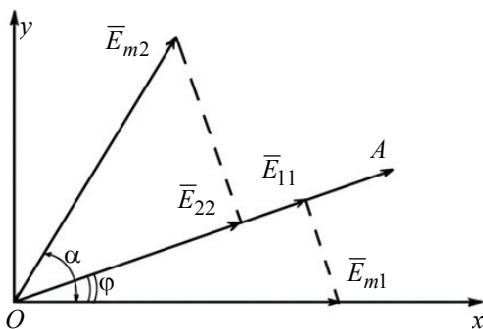


Рис.4. Пространственная ориентация электрических векторов \vec{E}_{m1} и \vec{E}_{m2} когерентных волн и главной линии OA анализатора

$$\delta = k\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta,$$

где k – волновое число. Учитывая формулы (25), получим

$$E^2 = E_m^2 \left\{ [\cos \varphi + \cos(\alpha - \varphi)]^2 - 4 \cos \varphi \cos(\alpha - \varphi) \sin^2 \frac{\delta}{2} \right\}. \quad (28)$$

При интенсивностях $E_m^2 \approx I_0$ – одной из первичных когерентных волн и $E^2 \approx I$ – результирующей волны, полученной при интерференции, получим основную формулу

$$I = I_0 \left\{ [\cos \varphi + \cos(\alpha - \varphi)]^2 - 4 \cos \varphi \cos(\alpha - \varphi) \sin^2 \frac{\delta}{2} \right\}. \quad (29)$$

Из оптики известно, что наиболее контрастная интерференционная картина наблюдается, когда амплитуды интерферирующих компонент E_{11} и E_{22} одинаковы. Из формул (25) следует, что при

$$\varphi = \frac{\alpha}{2} \quad \text{и} \quad \varphi = \left(\frac{\alpha}{2} + 90^\circ \right) \quad (30)$$

получим в первом случае

$$E_{11} = E_{22} = E_m \cos \frac{\alpha}{2}, \quad (31)$$

во втором

$$E_{11} = E_{22} = E_m \cos \left(\frac{\alpha}{2} + 90^\circ \right). \quad (32)$$

В качестве примера рассмотрим частный случай интерференции двух когерентных волн, линии поляризации которых образуют угол $\alpha = 60^\circ$. Согласно формул (30) наиболее контрастная интерференция наблюдается при $\varphi = 30^\circ$ и $\varphi = 120^\circ$.

1. При $\alpha = 60^\circ$ и $\varphi = 30^\circ$ интерферирующие амплитуды согласно формуле (31) равны $E_{11} = E_{22} = E_m \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} E_m$. На основании формулы (29) найдем

$$I = 3I_0 \left\{ 1 - \sin^2 \frac{\delta}{2} \right\} = 3I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2}. \quad (33)$$

Интерференционная картина показана на рис. 5 (кривая a). Если в точку наблюдения когерентные волны приходят с разностью фаз, равной четному числу π ($\delta = 2m\pi$, где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$), то интенсивность принимаемой волны равна $I = 3I_0$ и, следовательно, наблюдается максимум интерференции. В центре интерференционного поля при $\delta = 0$ наблюдается максимум интерференции. Если разность фаз волн, приходящих в точку наблюдения, равна нечетному числу π ($\delta = (2m - 1)\pi$,

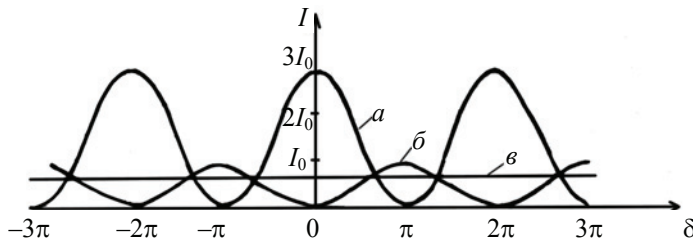


Рис. 5. Интерференционные картины при наличии анализатора двух волн, линии поляризации которых составляют угол 60°

где $m = 1, 2, 3, \dots$), то $I = 0$ и, следовательно, наблюдается минимум интерференции.

2. При $\alpha = 60^\circ$ и $\varphi = 120^\circ$ интерферирующие компоненты согласно формуле (32) равны $E_{11} = E_{22} = E_m \cos 60^\circ = \frac{1}{2} E_m$. На основании формулы (29) найдем

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\delta}{2}. \quad (34)$$

Соответствующая интерференционная картина показана на рис. 5 (кривая б). При разности фаз интерферирующих волн $\delta = 2m\pi$ наблюдается минимум интерференции $I = 0$; при $\delta = (2m - 1)\pi$ – максимум интерференции $I = I_0$. В центре картины при $\delta = 0$ наблюдается минимум интерференции. Следовательно, при переходе от $\varphi = 30^\circ$ к $\varphi = 120^\circ$, то есть при повороте анализатора на 90° , интерференционная картина становится дополнительной.

3. При $\alpha = 60^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$ или $\varphi = 90^\circ + 60^\circ$ из формулы (29) следует, что

$$I = \frac{3}{4} I_0 = \text{const}. \quad (35)$$

Следовательно, при указанных положениях анализатора (рис. 5, прямая в) интерференционная картина не наблюдается, так как главная линия анализатора OA (см. рис. 4) оказывается перпендикулярной к одному из векторов \vec{E}_{m1} и \vec{E}_{m2} и одна из интерферирующих компонент E_{11} или E_{22} оказывается равной нулю.

Если в рассматриваемом случае при $\alpha = 60^\circ$ главная линия анализатора составляет произвольный угол φ , который не равен рассмотренным углам, то интерферирующие компоненты E_{11} и E_{22} оказываются не равными друг другу и интерференционная картина становится менее выразительной: в точках минимумов интенсивность результирующей волны становится не равной нулю, а величина максимумов уменьшается.

Анализ поляризации результирующей волны. Так как при сложении волн, линии поляризации которых не параллельны, образуется результирующая волна, обладающая в общем случае эллиптической поляризацией при $\varphi = 30^\circ$, то полученной формуле (29) можно придать другую трактовку. Действительно, данная формула определяет зависимость интенсивности I волны, выходящей из анализатора от угла φ его поворота, то есть функцию $I = I(\varphi)$ в данной точке пространства, характеризуемой постоянным значением разности фаз $\delta = \text{const}$ взаимодействующих волн \vec{E}_{m1} и \vec{E}_{m2} . Данная зависимость $I = I(\varphi)$, выраженная графически в полярных координатах называется *полярной диаграммой поляризации* результирующей волны, на основе которой осуществляется анализ поляризованного излучения в любой точке пространства.

Найдем полярные диаграммы результирующих волн, полученных от сложения двух когерентных волн, линии поляризации которых образуют угол $\alpha = 60^\circ$:

– $\delta = 0$: в центре интерференционного поля из формулы (29) найдем

$$I(\varphi) = I_0 \left(\frac{3}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi \right)^2. \quad (36)$$

Данная полярная диаграмма результирующей волны показана на рис. 6, а. Она соответствует линейно поляризованной волне в соответствии с законом Малюса

$$I(\varphi) = 3I_0 \cos^2(\varphi - 30^\circ); \quad (37)$$

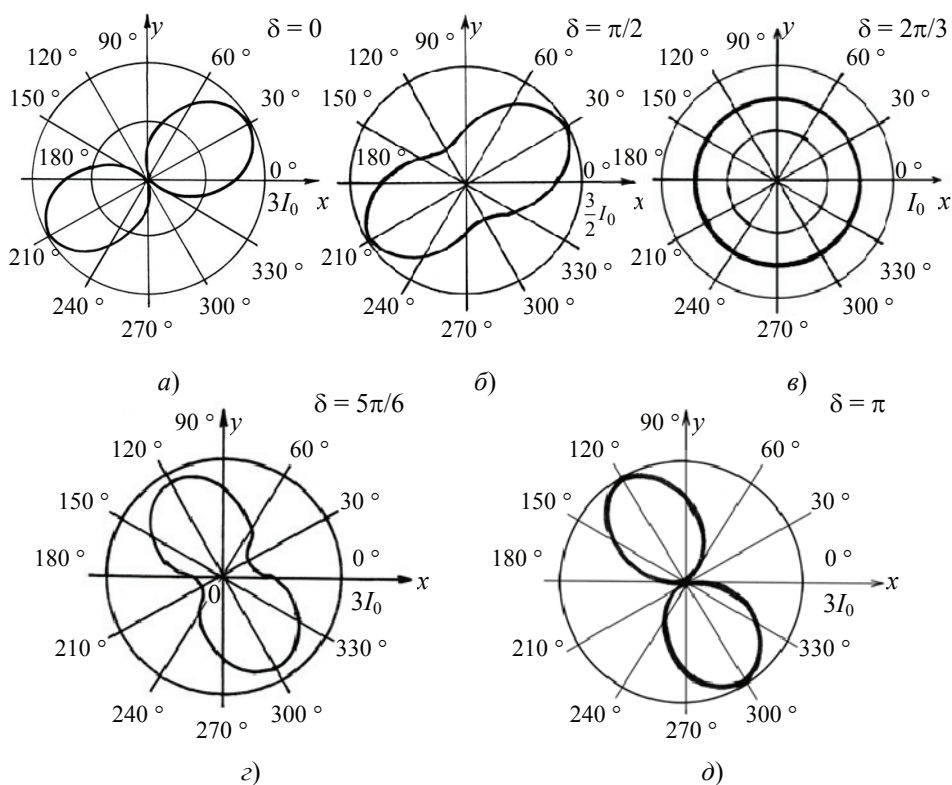


Рис. 6. Полярные диаграммы результирующих волн, полученных от сложения:

$$a - \delta = 0; \quad b - \delta = \frac{\pi}{2}; \quad c - \delta = \frac{2\pi}{3}; \quad e - \delta = \frac{5\pi}{6}; \quad d - \delta = \pi$$

– $\delta = \frac{\pi}{2}$: полярная диаграмма результирующей волны согласно (29) (см. рис.

6, б) представлена формулой

$$I(\varphi) = I_0 \left(\cos^2 \varphi + \cos^2 (60^\circ - \varphi) \right). \quad (38)$$

Результирующая волна обладает эллиптической поляризацией;

– $\delta = \frac{2\pi}{3}$: рассматривая интерференционные картины (см. рис. 5), можно за-

метить, что интенсивности волн, проходящих через анализатор, в некоторых точках, например, при разности фаз, одинаковы, то есть интенсивность волн в этих точках не зависит от углового положения анализатора. Следовательно, при сложении двух когерентных волн, линии поляризации которых составляют угол $\alpha = 60^\circ$ при разности фаз равной $\delta = \frac{2\pi}{3}$ образуется волна с круговой поляризацией (см. рис. 6, в). Полярная диаграмма данной волны согласно формуле (29) пред-

ставлена уравнением

$$I(\varphi) = \frac{3}{4} I_0 = \text{const}; \quad (39)$$

– $\delta = \frac{5\pi}{6}$: полярную диаграмму результирующей волны выразим уравнением

$$I = I_0 \left\{ \frac{1}{4} + \cos^2 (60^\circ - \varphi) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos (60^\circ - \varphi) \right\}, \quad (40)$$

которое соответствует волне с эллиптической поляризацией (см. рис. 6, з);

– $\delta = \pi$: полярная диаграмма результирующей волна согласно формуле (29) рассчитаем с помощью уравнения

$$I(\varphi) = I_0 \cos^2(\varphi - 120^\circ), \quad (41)$$

которое характерно для волны с линейной поляризацией (см. рис. 6, д). Сравним полученные полярные диаграммы результирующих волн с их соответствующими траекториями (см. рис. 3), найденными на основе теории сложения волн.

Отметим справедливость выражения для полуосей эллипсов

$$\frac{a}{b} = \sqrt{\frac{I_{\max}}{I_{\min}}}. \quad (42)$$

Из формулы (29) при $\alpha = 0$ или $\alpha = 90^\circ$ можно найти закономерности интерференции двух волн, линии поляризации которых параллельны и взаимно перпендикулярны.

Рассмотренная теория взаимодействия волн с произвольной ориентацией линий поляризации подтверждена экспериментально с использованием низкочастотных колебаний и диапазона СВЧ [7–8]. Кроме того любой желающий может провести модельный компьютерный эксперимент по изложенной выше теории [10]. Компьютерная программа демонстрирует результаты взаимодействия волн с произвольной ориентацией линий поляризации как в числовом виде, так и в виде диаграмм, которые можно сохранять на любом носителе информации в форматах jpeg, png, pdf или svg.

На основании изложенного сделаны выводы:

– сложение двух когерентных волн, линии поляризации которых имеют произвольную ориентацию, приводит к образованию результирующей эллиптически поляризованной волны, вырождающейся при определенных условиях в волну с линейной и круговой поляризациями;

– интерференция волн с произвольной ориентацией электрических векторов возможна при наличии анализатора, установленного на их пути. Найдены условия наиболее контрастной интерференции и условия ее отсутствия. Приводятся интерференционные картины при различных условиях наблюдения;

– найдена связь между характером поляризации результирующих волн, полученных от сложения, и полярными диаграммами результирующих волн, вытекающих из теории интерференции;

– традиционное взаимодействие однонаправленных и взаимно перпендикулярных волн рассматривается как частный случай общей теории;

– результаты работы предлагается использовать при изложении теории интерференции в курсах оптики университетов для студентов, обучающихся по естественнонаучным и техническим направлениям и специальностям.

Список литературы

1. Френель, О. Избранные труды по оптике / О. Френель. – М. : Гос. изд-во технико-теорет. лит., 1955. – 608 с.
2. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф ; пер. с англ. С. Н. Бреуса, А. И. Головашкина, А. А. Шубина. – М. : Наука, 1970. – 856 с.
3. Физический энциклопедический словарь / Б. А. Введенский, Б. М. Вул. – М. : Сов. энцикл., 1965. – Т. 4. – 592 с.
4. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Оптика / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1980. – Т. IV. – 752 с.
5. Детлаф, А. А. Курс физики. Т. III : Волновые процессы. Оптика. Атомная и ядерная физика / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский, М. Б. Милковская. – М. : Высш. шк., 1979. – 511 с.

6. Молотков, Н. Я. Колебательные процессы. Учебный эксперимент : учеб. пособ. / Н. Я. Молотков. – Долгопрудный : Интеллект, 2013. – 288 с.
7. Молотков, Н. Я. Учебные эксперименты по волновой оптике. СВЧ-демонстрации / Н. Я. Молотков. – Долгопрудный : Интеллект, 2011. – 347 с.
8. Молотков, Н. Я. Волновые электромагнитные процессы. Оптика и СВЧ / Н. Я. Молотков., О. И. Гайнутдинов. – Германия: Palmarium Akademik Publishing, 2015. – 538 с.
9. Физическая энциклопедия / А. М. Прохоров. – М. : Сов. энцикл., 1990. – Т. 2. – 703 с.
10. Интерференция электромагнитных волн с произвольной ориентацией линий поляризации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mrcpk.tstu.ru/interferenceRnd/> (дата обращения: 18.05.2017).

Addition and Interference of Two Coherent Electromagnetic Waves with Arbitrary Orientation Polarization Lines

O. V. Lomakina¹, N. Ya. Molotkov², A. V. Ermakov³

Departments: "Technical Mechanics and Machine Parts" (1); lomakinaolga@mail.ru; "Physics" (2), TSTU, Tambov, Russia; Savvi Au Pty Ltd, Australia (3)

Keywords: addition; coherence; electromagnetic waves; interference; polarization.

Abstract: The general case of adding two coherent waves with an arbitrary orientation of the electric vectors is observed. The article confirms that resultant wave with elliptical polarization can transform into a wave with circular and linear polarization. The general case of waves' interference with the random orientation of their lines polarization is considered in the presence of the analyzer. The conditions of the most contrast interference are described. The article shows the relationship between polar diagrams of elliptically polarized waves and the nature of resulting waves received from the addition. The traditional one-way interaction and mutually perpendicular vibrations are considered as special cases. The special software for providing theory was developed and published on the web site.

References

1. Frenel' O. *Izbrannye trudy po optike* [Selected Works on Optics], Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoi literatury, 1955, 608 p. (In Russ.)
2. Born M., Vol'f E., Breusa S.N., Golovashkina A.I., Shubina A.A. *Osnovy optiki* [Fundamentals of Optics], Moscow: Nauka, 1970, 856 p. (In Russ.)
3. Vvedenskii B.A., Vul B.M. *Fizicheskii entsiklopedicheskii slovar'* [Physical encyclopedic dictionary], Moscow: Sov. entsikl., 1965, vol. 4, 592 p. (In Russ.)
4. Sivukhin D.V. *Obshchii kurs fiziki. Optika* [General course of physics. Optics], Moscow: Nauka, 1980, vol. IV, 752 p. (In Russ.)
5. Detlaf A.A., Yavorskii B.M., Milkovskaya M.B. *Kurs fiziki. T. III : Volnovye protsessy. Optika. Atomnaya i yadernaya fizika* [Course of Physics. T. III: Wave processes. Optics. Atomic and nuclear physics], Moscow: Vysshaya shkola, 1979, 511 p. (In Russ.)
6. Molotkov N.Ya. *Kolebatel'nye protsessy. Uchebnyi eksperiment : uchebnoe posobie* [Oscillatory processes. Learning experiment : textbook], Dolgoprudnyi: Intellect, 2013, 288 p. (In Russ.)
7. Molotkov N.Ya. *Uchebnye eksperimenty po volnvoi optike. SVCh demonstratsii* [Educational experiments on wave optics. Microwave demonstrations], Dolgoprudnyi: Intellect, 2011, 347 p. (In Russ.)

8. Molotkov N.Ya., Gainutdinov O.I. *Volnovye elektromagnitnye protsessy. Optika i SVCh* [Wave electromagnetic processes. Optics and Microwave], Germany: Palmarium Academic Publishing, 2015, 538 p. (In Russ.)

9. Prokhorov A.M. *Fizicheskaya entsiklopediya* [Physical encyclopedia], Moscow: Sov. Entsikl, 1990, vol. 2, 703 p. (In Russ.)

10. available at: <http://mrcpk.tstu.ru/interferenceRnd/> (accessed 18 March 2017). (In Russ.)

Addition und Interferenz der zwei kohärenten elektromagnetischen Wellen mit der willkürlichen Orientierung der Linien der Polarisation

Zusammenfassung: Es ist der allgemeine Fall der Addition der zwei kohärenten Wellen mit der willkürlichen Orientierung ihrer elektrischen Vektoren dargelegt, der zur Bildung der Endwelle mit der elliptischen Polarisation bringt, die in die Welle mit der kreisförmigen und linearen Polarisation ausarten kann. Es ist bei dem Vorhandensein vom Analysator der allgemeine Fall der Interferenz der Wellen der Linie betrachtet, deren Polarisationen beliebig ausgerichtet sind. Es sind die Bedingungen der kontrastreichsten Interferenz und die Verbindung zwischen den polaren Diagrammen der elliptisch polarisierten Wellen und dem Charakter der Polarisation der von der Addition erhaltenen Endwellen besprochen. Die traditionelle Wechselwirkung der einseitigen und gegenseitig senkrechten Schwingungen sind wie die Sonderfälle betrachtet. Es ist die allgemeinverständliche Software entwickelt, die die Demonstration der dargelegten Theorie ist.

Addition et interférence de deux ondes cohérentes électromagnétiques avec une orientation arbitraire des lignes de polarisation

Résumé: Est présenté un cas général de l'addition de deux ondes cohérentes avec une orientation arbitraire de leur vecteurs électriques menant à la formation de l'onde résultante avec une polarisation elliptique, ce qui peut être transformé en onde de la polarisation circulaire et linéaire. Est examiné le cas général de l'interférence des ondes dont les lignes de la polarisation sont orientées de façon aléatoire. Sont discutées les conditions de la plus contraste interférence ainsi que le lien entre les diagrammes polaires. Est conçu le logiciel spécial qui est la démonstration de la théorie énoncée.

Авторы: *Ломакина Ольга Владимировна* – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин»; *Молотков Николай Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Физика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Ермаков Антон Владимирович* – инженер, Savvi Au Pty Ltd, Австралия.

Рецензент: *Лазарев Сергей Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная геометрия и компьютерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.