

УДК 621.3.018.2/.372.8/.317.351

ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СИСТЕМЫ КВАЗИКОГЕРЕНТНЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

Глущенко А.А., Глущенко А.Г., Глущенко В.А.

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Самара, e-mail: gag646@yandex.ru*

Аннотация. Рассмотрены особенности распределения интенсивности электрического поля, формируемого системой осцилляторов в отсутствие точной когерентности излучения. Эффект интерференции при излучении когерентных излучателей широко используется в функциональной и измерительной технике, в частности в медицинском оборудовании, в современной технологии, в антенной технике. Когерентные осцилляторы формируют в области между ними стоячую волну и располагаются в узлах этой стоячей волны. Отклонение от когерентности, наблюдающееся в реальных конструкциях систем осцилляторов, приводит к качественному изменению интерференционной картины, формируемой излучателями, которая теряет симметрию и сползает в сторону излучателя с меньшей частотой осцилляции. Смещение интерференционной картины сопровождается нарушением симметрии взаимодействия осцилляторов: на высокочастотный осциллятор действует сила, стремящаяся сместить его в сторону осциллятора с меньшей частотой осцилляции, в область смещения узлов стоячей волны. Рассмотрено влияние степени рассогласования частот двух излучателей на характер интерференционной картины. Представлена временная динамика картины интерференции для конфигураций расположения осцилляторов, с расстояниями, кратными длине формируемых ими стоячих волн. Установлено, что рассогласование частот приводит к биению уровня интенсивности излучения во всех точках интерференционной картины в пространстве. Отклонение частоты излучения от когерентного приводит к переходу от статического распределения интенсивности картины интерференции к динамическому распределению.

Ключевые слова: квазикогерентные осцилляторы, пульсация интенсивности, интерференция

INTERFERENCE SYSTEMS OF QUASI-COHERENT OSCILLATORS

Glushchenko A.G., Glushchenko A.A., Glushchenko V.A.

*Volga State University of Telecommunications and Informatics, Samara,
e-mail: gag646@yandex.ru*

Annotation. The features of the intensity distribution of the electric field generated by a system of oscillators in the absence of precise radiation coherence are considered. The interference effect during radiation from coherent emitters is widely used in functional and measurement technology, in particular in medical equipment, in modern technology, and in antenna technology. Coherent oscillators form a standing wave in the region between them and are located at the nodes of this standing wave. The deviation from coherence observed in real designs of oscillator systems leads to a qualitative change in the interference pattern formed by the emitters, which loses its symmetry and slides towards the emitter with a lower oscillation frequency. The displacement of the interference pattern is accompanied by a violation of the symmetry of the interaction of the oscillators: a force acts on the high-frequency oscillator, tending to shift it towards the oscillator with a lower oscillation frequency in the region of displacement of the nodes of the standing wave. The influence of the degree of frequency mismatch of two emitters on the nature of the interference pattern is considered. The time dynamics of the interference pattern is presented for various configurations of the oscillator arrangement, with distances that are multiples of the length of the standing waves they generate. It has been established that frequency mismatch leads to a beating of the radiation intensity level at all points of the interference pattern in space. The deviation of the radiation frequency from coherent leads to a transition from a static intensity distribution of the interference pattern to a dynamic distribution.

Keywords: quasi-coherent oscillators, intensity pulsation, interference

При наложении волн, создаваемых когерентными источниками, возникает эффект интерференции, широко используемый на практике для создания различных оптических, акустических, радио- и квантовых устройств, таких как интерференционные фильтры, спектрометры, интерферометры и др. Эти устройства используются во многих областях науки и техники, включая оптику, электронику, устройства телекоммуникаций, медицину. Интерференция, возникающая при наложении волн, излучаемых когерентными осцилляторами, сравнительно хорошо изучена. Наиболее про-

стой моделью интерференции от излучения двух когерентных источников оптического диапазона длин электромагнитных волн является известный опыт Юнга [1], который имеет аналоги и для других типов волновых процессов. В многочисленных работах, посвященных исследованию явления интерференции, основное внимание уделяется удаленным фотонным когерентным системам передачи информации [2-4] многолучевой интерференции когерентных излучателей [5], влиянию интерференции на передачу сигналов по линиям связи [6], влиянию на интерференцию поляризации [7],

временной интерференции [8; 9], вопросам взаимодействия когерентных и квазикогерентных осцилляторов [10]. Вопросы нарушения когерентности излучения и временные аналоги опыта интерференции на двух щелях рассматривались в [9; 10]. В настоящей работе установлено, что отклонение частот излучения осцилляторов от точной когерентности приводит к качественному изменению картины интерференции – статическое распределение интенсивности меняется на динамическое, и в каждой точке пространства возникает биение интенсивности результирующего излучения с частотой, определяемой величиной сдвига частот осцилляторов. Рассмотрена интерференционная картина, формируемая квазикогерентными осцилляторами для различных положений осцилляторов.

Целью исследования являлся анализ изменения физических свойств системы при малом нарушении когерентности излучения двух точечных осцилляторов, получение аналитических решений для расчета распределения интенсивности излучения и сопоставление с картиной интерференции, создаваемой системой когерентных осцилляторов.

Материалы и методы исследования

Рассматривается суперпозиция электромагнитных волн, создаваемых системой квазикогерентных осцилляторов, получены аналитические соотношения для расчета интенсивности излучения системы квазикогерентных осцилляторов в зависимости от разности частот излучения. Представлены графики полученной картины интерференции пространственного распределения излучения при некогерентности излучения осцилляторов.

Базовые соотношения

Для простоты физической модели с целью получения аналитического решения рассмотрим два осциллятора с различными (но близкими) частотами осцилляции. В соответствии с принципом суперпозиции результирующее поле в произвольной точке Р пространства (рис. 1) можно представить в виде:

$$E = E_1(t + \tau_1) + E_2(t + \tau_2), \quad (1)$$

где τ_1, τ_2 – время запаздывания колебаний в точке наблюдения Р (рис. 1) от колебаний,

$$E_i^2(r, t) = [A_1 \cos(\omega_1 t - k_1 r_1) + A_1 \cos(\omega_2 t - k_2 r_2)]^2 + [A_2 \sin(\omega_1 t - k_1 r_1) + A_2 \sin(\omega_2 t - k_2 r_2)]^2, \quad (3)$$

где частоты квазикогерентных колебаний различаются и соответственно равны:

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T}, \quad \omega_2 = \frac{2\pi}{T + \Delta T}, \quad \Delta T \ll T,$$

создаваемых в момент времени t осцилляторами, расположенными в точках с координатами: $x = 0, y = d$ и $x = 0, y = -d$.

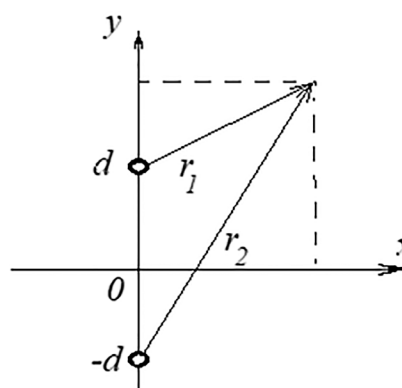


Рис. 1. Конфигурация двух квазикогерентных осцилляторов

Расстояния от каждого осциллятора до точки наблюдения определяются в соответствии с рисунком 1 соотношениями:

$$r_1 = \sqrt{(x)^2 + (y - d)^2}$$

$$r_2 = \sqrt{(x)^2 + (y + d)^2}$$

Каждое из двух однонаправленных колебаний описывается функцией:

$$E_i(r, t) = E_{1,2} \cos(\omega_{1,2} t - k_{1,2} r_{1,2} + \varphi_{1,2}), \quad (2)$$

где $E_{1,2}$ – амплитуды, $\omega_{1,2} t - k_{1,2} r_{1,2} + \varphi_{1,2}$ – фазы колебаний, создаваемых осцилляторами в точке наблюдения Р, частоты осцилляторов в общем случае различаются $\omega_1 \neq \omega_2$, при этом для квазикогерентных колебаний двух источников $\omega_1 \approx \omega_2$, $k_{1,2}$ – волновые векторы. Для простоты полагаем $\varphi_{1,2} = 0$ и амплитуды осцилляторов одинаковыми. Обобщение на случай большого числа осцилляторов проводится аналогично [5].

Результаты исследования и их обсуждение

В частном случае одиночного излучателя из (1) следует, что распределение интенсивности волн стабильно во времени и имеет равномерное распределение в пространстве. Для двух квазикогерентных источников имеем соотношение:

волновые числа $k_1 = \frac{\omega_1}{v}, k_2 = \frac{\omega_2}{v}$,

v – скорость распространения волн.

В рассматриваемом случае амплитуда результирующего колебания зависит не только от положения точки наблюдения в простран-

стве (как в стабилизированной картине распределения энергии при интерференции волн когерентных источников), но и от времени t . Соотношение (3) представим в другом виде, более удобном для аналитического исследования картины интерференции. Сложение колебаний (3) дает соотношение:

$$E(r, t) = \sum_{i=1}^2 A_i \cos(\omega_i t - k_i r_i) = A_1 \cos(\omega_1 t - k_1 r_1) + A_2 \cos(\omega_2 t - k_2 r_2) =$$

$$= 2A \cdot \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t - \frac{k_1 r_1 - k_2 r_2}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t - \frac{k_1 r_1 + k_2 r_2}{2}\right) \quad (4)$$

Из которого следует, что в частном случае когерентных источников ($\omega_1 = \omega_2$) амплитуда результирующего поля зависит только от положения точки наблюдения в пространстве: от параметра $k_1 r_1 - k_2 r_2$, и не зависит от времени. В случае же некогерентных источников $\omega_1 \neq \omega_2$ и амплитуда $2A \cdot \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t - \frac{k_1 r_1 - k_2 r_2}{2}\right)$ зависит не только от положения точки наблюдения в пространстве, но и меняется со временем

с частотой $\Delta\omega/2$, определяемой расстройкой частот осцилляции. В каждой точке пространства наблюдается биение интенсивности. На рисунке 2а показано распределение интенсивности картины интерференции двух когерентных источников, и для сравнения на рисунке 2б показано распределение интенсивности тех же источников при нарушении когерентности излучения этих осцилляторов (для $\Delta\omega \approx 0.1\omega$). Осцилляторы расположены на расстоянии длины волны. Нарушение когерентности меняет структуру поля.

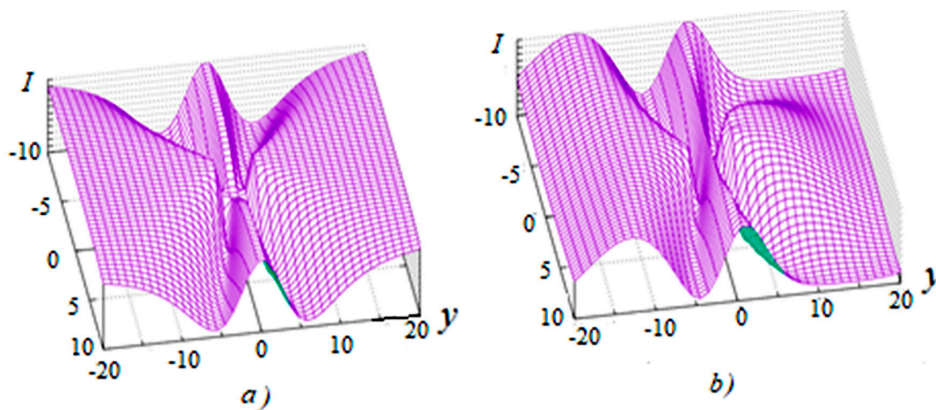


Рис. 2. Интерференция когерентных (а) и квазикогерентных (б) источников, расположенных на расстоянии $d = \lambda$

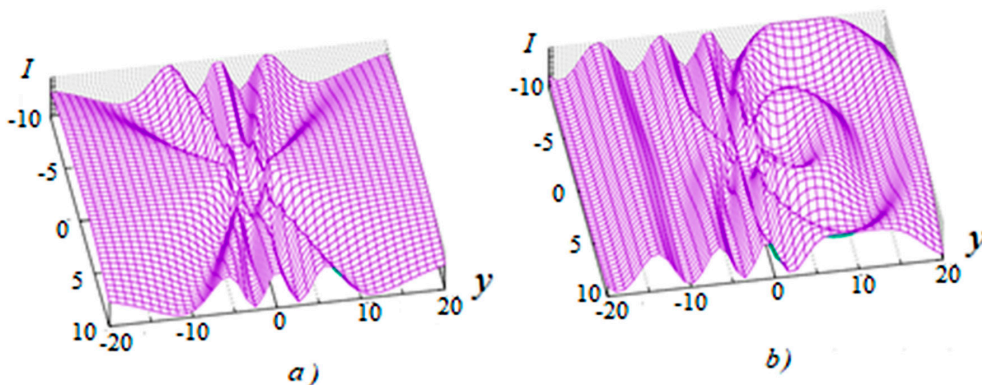


Рис. 3. Интерференция когерентных (а) и квазикогерентных (б) источников излучения, расположенных на расстоянии $d = 2\lambda$

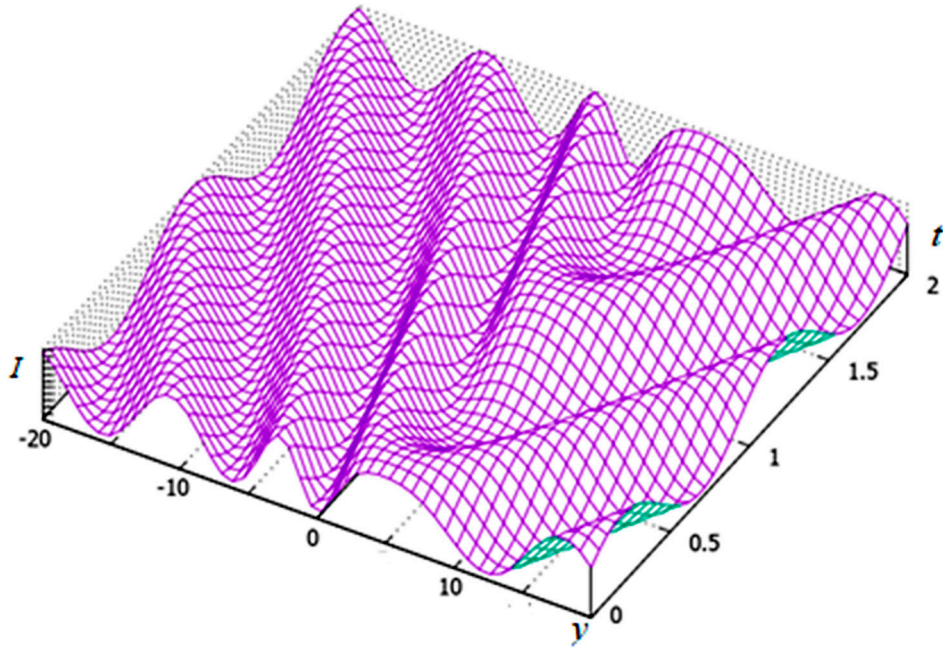


Рис. 4. Изменение со временем интерференционного распределения интенсивности излучения некогерентных осцилляторов на экране, расположенном по оси Oy в плоскости $x = 5$

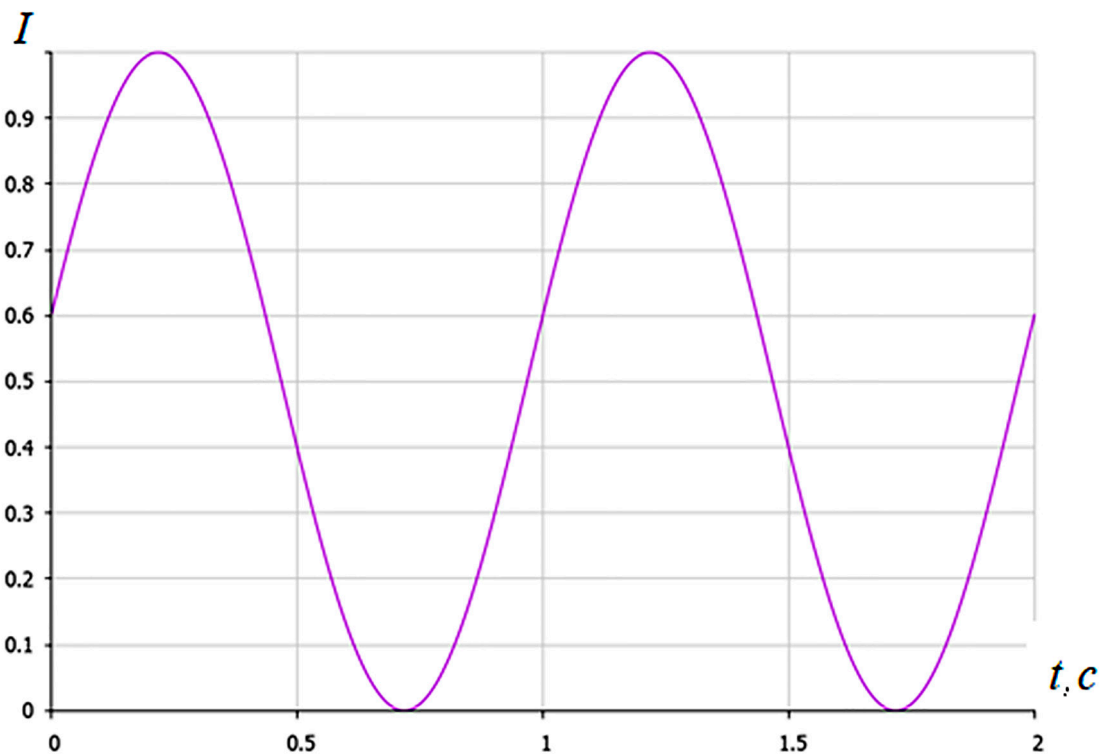


Рис. 5. Зависимость интенсивности излучения от времени

На рисунке 3а показано распределение интенсивности излучения картины интерференции двух когерентных источников, и для сравнения на рисунке 3б показано распределение интенсивности тех же источни-

ков при таком же нарушении когерентности для источников, расположенных на расстоянии $d = 2\lambda$. При удалении осцилляторов друг от друга наблюдается более значительная деформация картины интерференции.

На рисунке 4 показано изменение со временем картины интерференционного распределения интенсивности излучения двух некогерентных осцилляторов на проекционном экране, расположенном на расстоянии $x = 5$ см от линии, проходящей через заряды. С течением времени интерференционная картина смещается со скоростью, пропорциональной разности частот осцилляторов.

На рисунке 5 показана зависимость изменения интенсивности излучения двух осцилляторов от времени, наблюдающаяся в каждой точке пространства.

Из рисунков 2 и 3 видно, что для всех точек пространства, расположенных на оси Ox , перпендикулярной к линии расположения излучателей, амплитуда колебаний максимальна и постоянна для всех точек, относительно которых осцилляторы расположены симметрично (для которых выполняется соотношение: $k_1 r_1 - k_2 r = 0$). В других точках пространства амплитуда, наоборот, пульсирует с частотой $\Delta\omega$ и периодом $T = 2\pi / \Delta\omega$. Период пульсаций растет с уменьшением разности частот осцилляторов. Пульсации исчезают для когерентных осцилляторов ($T \rightarrow \infty$ при $\Delta\omega \rightarrow 0$).

Заклучение

Рассмотрено изменение интерференционной картины при нарушении когерентности частот излучения осцилляторов, расположенных в изотропной однородной среде. Установлено, что отклонение от когерентности излучения приводит к нарушению симметрии интерференционной картины относительно осцилляторов: область минимумов интенсивности излучения смещается в сторону осциллятора с наименьшей частотой излучения. Кроме того, уменьшается длина волны, формируемой между осцилляторами. Это приводит к формированию воздействия на осцилляторы: на осцилляторы с более высокой частотой осцилляции действуют силы в направлении осцилляторов с низкой частотой осцилляции. Нарушение когерентности приводит к неустойчивости

системы свободных осцилляторов, к возникновению зависимости результирующей амплитуды колебаний не только от положения точки наблюдения, но и от времени. Возникает пульсация величины интенсивности излучения во всех точках пространства с частотой, равной разности частот излучателей. Показана зависимость интерференционной картины от величины разности частот излучения квазикогерентных излучателей и их взаимного положения в пространстве.

Список литературы

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 4. Оптика. М.: Физматлит, 2021. 746 с.
2. You X., Zheng M., Chen S., Liu R. et al. Quantum interference with independent single-photon sources over 300 km fiber // *Advanced Photonics*. 2022. Vol. 4(6). P. 066003. DOI: 10.1117/1.AP.4.6.066003.
3. Fernandes-Guasti M., Garsia-Guerrero C. Time and Space Resolved First Order Optical Interference between Distinguishable // *Photon Paths*. *Front. Phys.* 2022. Vol. 9. P. 813565. DOI: 10.3389/fphy.2021.813565.
4. Deng Y., Wang H., Ding X. et al. Quantum Interference between Light Sources Separated by 150 Million Kilometers // *Phys. Rev. Lett.* 2019. Vol. 123. P. 080401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.080401.
5. Glushchenko A.A., Glushchenko A.G., Glushchenko E.P. Generalization of the Cosines Theorem to Polygons and Its Application to the Analytical Calculation of Multi-Beam Interference of Coherent Radiation of Light with an Arbitrary Phase Distribution // *European J. of Physics Education*. 2020. Vol. 11. Is. 3. P. 38-46.
6. Дорохова М.А., Конохов А.И., Мельников Л.А., Платун А.С. Конструктивная интерференция оптических солитонов в волокне с периодическим изменением дисперсии // *Известия Саратовского университета. Сер. Физика*. 2014. Т.14. Вып. 1. С. 32-35. DOI: 10.18500/1817-3020-2014-14-1-32-35.
7. Молотков Н.Я. Интерференция электромагнитных волн с эллиптическими, круговыми или линейными поляризациями // *Вестник ТГУ*. 1998. Т. 3. Вып 2. С. 142-148.
8. Kaneyasu T., Hikosaka Y., Wada S. et al. Time domain double slit interference of electron produced by XUV synchrotron radiation // *Sic. Rep.* 2023. Vol. 13. P.6142. DOI: 10.1038/s41598-023-33039-9.
9. Tirole R., Vezzoli S., Galiffi E. et al. Double-slit time diffraction at optical frequencies // *Nat. Phys.* 2023. Vol. 19. P. 999–1002. DOI: 10.1038/s41567-023-01993-w.
10. Glushchenko A.A., Glushchenko A.G., Glushchenko V.A. Features of the interaction of stationary oscillating charges E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 431. P. 02025. DOI: 10.1051/e3sconf/202343102025.