

ВЛИЯНИЕ ВРАЩЕНИЯ СИСТЕМЫ КОГЕРЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ НА КАРТИНУ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

¹Глущенко А.Г., ¹Глущенко В.А., ¹Глущенко Е.П.

¹*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, e-mail:gag646@yandex.ru*

АННОТАЦИЯ

Интерференция света, создаваемая точечными когерентными источниками, является одной из основных задач физики волновых процессов, в частности, волновой оптики. Когерентность источников является одним из основных условий формирования стабильной картины распределения интенсивности поля и обычно обеспечивается формированием источников излучения как вторичных источников из одного первичного источника излучения и стационарностью параметров среды в зоне интерференции. В реальных структурах картина интерференции может искажаться под действием различных факторов. В работе проведено исследование влияния подвижности источников на интерференционную картину, формируемую когерентными источниками в случае равномерного вращения системы когерентных излучателей. Показано, что вращение системы приводит к нарушению когерентности источников в зоне интерференции, прежде всего из-за эффекта Доплера. Получено аналитическое решение задачи, показана зависимость разности фаз когерентных волн от времени, оптической разности хода от времени. Проведен расчет временной зависимости разности фаз от скорости вращения системы излучателей. Установлено, что вращение источников формирует модуляцию интерференционной картины с частотой вращения системы осцилляторов и глубину модуляции, определяемую отношением радиуса вращения к длине волны излучателей. С ростом скорости вращения растет частота модуляции.

Ключевые слова: интерференция, вращение, когерентность, осцилляторы, модуляция, эффект Доплера.

INFLUENCE OF ROTATION OF THE SYSTEM OF COHERENT SOURCES TO PICTURE OF INTERFERENCE

¹Glushchenko A.G., ¹Glushchenko V.A., ¹Glushchenko E.P.

¹*Volga State University of Telecommunications and Informatics, e-mail:gag646@yandex.ru*

ABSTRACT

The interference of light created by a coherent point sources, is one of the main problems of physics of wave processes, in particular, wave optics. Coherence of sources is one of the main conditions for forming a stable pattern of the field intensity distribution is ensured and the formation of radiation sources as secondary sources from a single primary source of radiation and stationarity of the environment settings in the interference zone. In real structures the pattern of interference can be distorted under the influence of various factors. In the work the influence of the mobility of sources on the interference pattern formed by coherent sources in the case of uniform rotation system of coherent emitters. It is shown that the rotation of the system leads to disruption of coherence of the sources in the interference zone, primarily due to the Doppler effect. The obtained analytical solution, the dependence of the phase difference between the coherent waves from time to time, the optical path difference from the time. The calculation of the time dependence of the phase difference of the speed of rotation of the emitters. It is established that the rotation of the sources generates a modula-

tion of the interference pattern with the frequency of rotation of the system of oscillators and the modulation depth, defined by the ratio of the radius of rotation to the wavelength emitters. With increasing speed of rotation increases the modulation frequency.

Keywords: interference, rotation, coherence, oscillators, modulation, Doppler effect.

Интерференция волн является одним из основных физических эффектов, широко распространенных в природе и получивших наибольшее применение в технике. Это явление заключается в перераспределении энергии поля в пространстве при наложении двух или большего числа когерентных волн любой природы. Электромагнитное излучение является одним из наиболее распространенных явлений природы. Оно наблюдается в природе во всех диапазонах частот: от низких частот до микроволнового, инфракрасного, оптического, рентгеновского, диапазона гамма-излучения в физических процессах различного масштаба (от атомного до космического). Широко применяются искусственные источники излучения. В технике телекоммуникаций и измерительной технике широко используется излучение разнесенных в пространстве когерентных источников. Оно сопровождается формированием интерференционной картины в виде стационарного перераспределения интенсивности поля для волновых процессов любой физической природы. Расчет пространственного распределения интенсивности является классической задачей излучения в антенной технике акустических и электромагнитных источников и проводится в аналитическом виде обычно для неподвижных источников в изотропных средах [1-2], в подвижных средах [3,4], численно для более сложных конфигураций [5,6].

Вместе с тем, модель неподвижных источников является частной, идеализированной конструкцией, в реальных структурах и средах необходим учет подвижности источников излучения, играющей существенную роль во всех волновых процессах, в том числе и в наиболее важных для практики процессах интерференции и дифракции.

Целью работы является исследование изменения картины интерференции волн, создаваемых когерентными источниками в новых условиях – вращения системы излучателей.

Объектом исследования является процесс наложения волн излучаемых системой двух когерентных излучателей в ранее не рассматривавшемся, но важном для практики случае влияния на картину интерференции равномерного вращения системы когерентных излучателей, используемых при анализе и проектировании антенн различных частотных диапазонов.

Метод исследования – электродинамический анализ математической модели физического процесса интерференции волн, создаваемых системой когерентных источников.

Интерференция от неподвижных источников

Рассмотрим картину интерференции двух неподвижных когерентных источников, расположенных на расстоянии d друг от друга и расстоянии l от экрана. Сложение волн с однонаправленными колебаниями в точке экрана P (рис.1) описывается уравнениями:

$$E = E_1(t, r_1) + E_2(t, r_2) = E_0 \cos(\omega t - kr_1) + E_0 \cos(\omega t - kr_2),$$

где ω – частота, $k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ – волновое число, v – скорость распространения волн, λ_0 – длина волны. Условие максимума для разности хода Δr при сложении когерентных волн имеет вид:

$$\Delta r = r_1 - r_2 = m\lambda_0,$$

где r_1, r_2 – оптическая длина пути первой и второй волн, $m = 1, 2, 3, \dots$ – номер максимума.

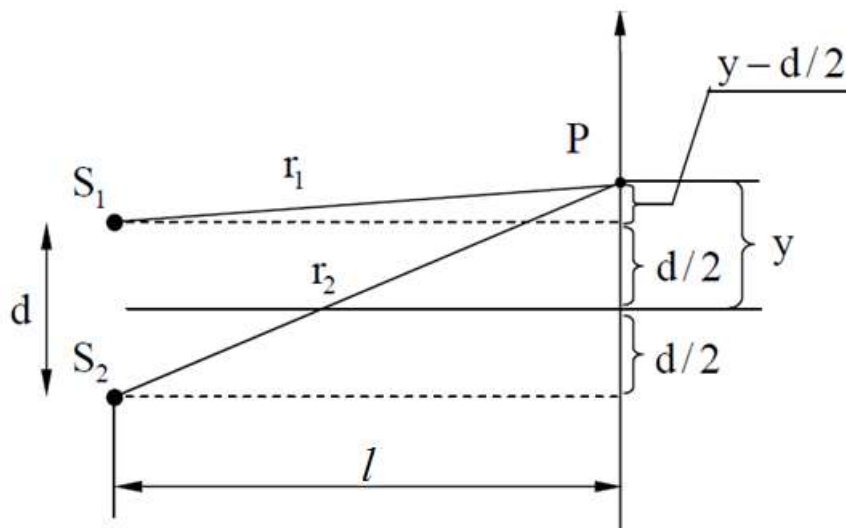


Рис.1. Суперпозиция волн от системы неподвижных когерентных источников

На экране наблюдается стационарное положение максимумов

$$y_{\max} = \frac{l}{d} m\lambda_0, \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

и минимумов

$$y_{\min} = \frac{l}{d} (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2}, \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Расстояние между любыми соседними минимумами и максимумами одинаковое, ширина полос равна:

$$\Delta y = \frac{l}{d} \lambda_0.$$

Вращение когерентных источников

Рассмотрим здесь распределение поля, создаваемого вращающейся системой двух зарядов (рис.2) в среде, характеризуемой скоростью распространения волн c . В этом случае условия интерференции нарушаются.

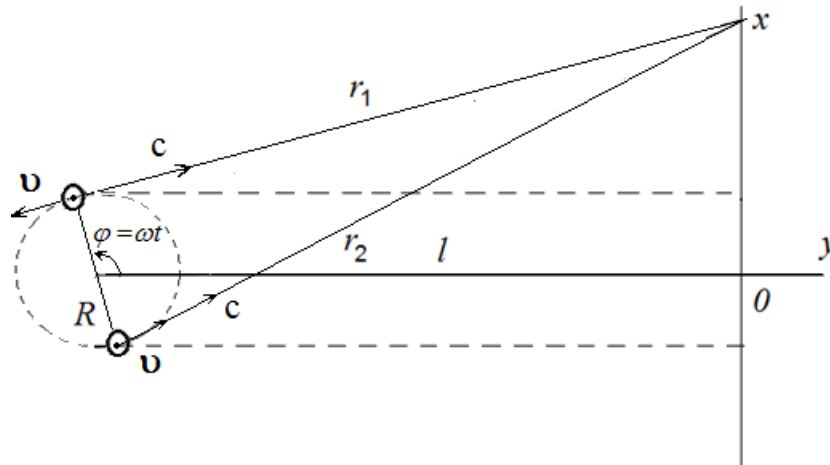


Рис.2. Суперпозиция волн от системы подвижных источников

Условия минимумов и максимумов становятся зависящими от времени. Причем, из-за эффекта Доплера, связанного с движением источников, нарушается условие когерентности $\omega_1 \neq \omega_2$.

Частота излучения, фиксируемая в точке наблюдения P (рис.2) от каждого источника определяется соотношением [4]:

$$\omega_{1,2} = \omega_0 \frac{c}{c - v_{1,2}} = \omega_0 \frac{1}{1 - \frac{v_{1,2}}{c}},$$

где $v_{1,2}$ – скорости волн от первого и от второго источников излучения.

Проекции векторов скоростей волн, создаваемых вращающимися источниками излучения на направление точки наблюдения определяются соотношениями

$$v_1 = \omega R \cos \omega t, \quad v_2 = \omega R \cos(\omega t + \pi).$$

Движение излучателей приводит к эффекту:

$$v_1 = v_0 \frac{c}{c - v_1} = v_0 \frac{1}{1 - \frac{v_1}{c}} = v_0 \frac{1}{1 - \frac{\omega R \cos \omega t}{c}},$$

$$v_2 = v_0 \frac{c}{c - v_2} = v_0 \frac{1}{1 - \frac{v_2}{c}} = v_0 \frac{1}{1 + \frac{\omega R \cos \omega t}{c}}.$$

Это означает, что вращение когерентных источников приводит к нарушению когерентности сигналов этих источников во всех точках пространства. Зависимость изменения частот складываемых сигналов показана на рис. 3.

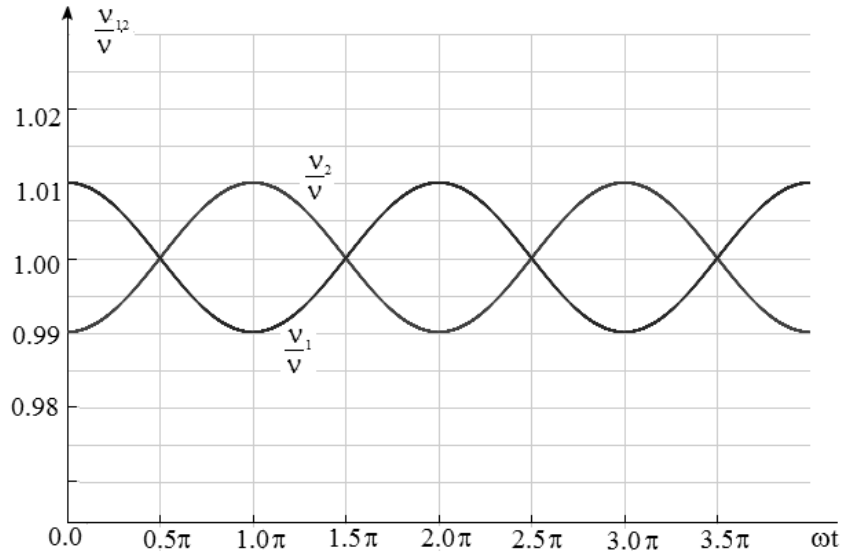


Рис. 3. Модуляция частот сигналов при вращении системы источников

Таким образом в точке Р наблюдается периодическое изменение частот складываемых сигналов одновременно в сторону увеличения (создаваемого приближающимся источником) и в сторону уменьшения (удаляющимся в это же время источником).

Разность фаз складываемых волн когерентных источников определяется оптической разностью хода волн от двух источников и разностью фаз, связанной с нарушением когерентности из-за движения источников и равна

$$\Delta\varphi = (\omega_1 t - k_2 r_2) - (\omega_2 t - k_1 r_1) = (\omega_1 - \omega_2)t - k\Delta r = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2,$$

$$\Delta\varphi_1 = (\omega_1 - \omega_2)t = 2\pi t(v_1 - v_2) = 2\pi v_0 t \left(\frac{1}{1 - \frac{v_1}{c}} - \frac{1}{1 - \frac{v_2}{c}} \right) = \frac{4\pi v_0 t \frac{v}{c}}{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

где $v = \omega R \cos \omega t$ – проекция вектора скорости движения источника на направление точки наблюдения. Разность фаз за счет эффекта Доплера теперь зависит от времени.

Кроме того, движение зарядов приводит к зависимости от времени и оптической разности хода лучей от источников $\Delta r(t) = r_1(t) - r_2(t)$ и соответственно разности фаз $\Delta\varphi_2 = k\Delta r(t) = k[r_1(t) - r_2(t)]$.

При этом расстояния от источников до точки наблюдения могут быть представлены в виде:

$$r_1^2 = \left(x - \frac{R}{2} \sin \varphi\right)^2 + \left(l - \frac{R}{2} \cos \varphi\right)^2,$$

$$r_2^2 = \left(x + \frac{R}{2} \sin(\varphi + \pi)\right)^2 + \left(l + \frac{R}{2} \cos(\varphi + \pi)\right)^2,$$

где $\varphi = \omega t$, ω – частота вращения когерентных источников.

Для нахождения геометрической разности хода лучей найдем

$$r_2^2 - r_1^2 = \left(x + \frac{R}{2} \sin(\varphi + \pi)\right)^2 + \left(l + \frac{R}{2} \cos(\varphi + \pi)\right)^2 - \left(x - \frac{R}{2} \sin \varphi\right)^2 - \left(l - \frac{R}{2} \cos \varphi\right)^2 =$$

$$= 2R \left[\sin \varphi \left(x + \frac{R}{2} \sin \varphi\right) + \cos \varphi \left(l + \frac{R}{2} \cos \varphi\right) \right].$$

Учитывая, $r_1 + r_2 \approx 2l$, $r_2 - r_1 = \Delta r$, геометрическая разность хода

$$\Delta r \approx R \left[\sin \omega t \cdot \left(\frac{x}{l} + \frac{R}{2l} \sin \omega t\right) + \cos \omega t \cdot \left(1 + \frac{R}{2l} \cos \omega t\right) \right].$$

Разность хода, таким образом, зависит от времени, от частоты вращения системы когерентных источников. Разность фаз

$$\Delta \varphi_2 = k \Delta r \approx \frac{\pi R}{\lambda} \left[\sin \omega t \cdot \left(\frac{x}{l} + \frac{R}{2l} \sin \omega t\right) + \cos \omega t \cdot \left(1 + \frac{R}{2l} \cos \omega t\right) \right].$$

Учет обоих факторов дает соотношение

$$\Delta \varphi = \Delta \varphi_1 + \Delta \varphi_2 = \frac{4\pi \nu_0 t \frac{\omega R \cos \omega t}{c}}{1 - \frac{(\omega R \cos \omega t)^2}{c^2}} - \frac{\pi R}{\lambda} \left[\sin \omega t \cdot \left(\frac{x}{l} + \frac{R}{2l} \sin \omega t\right) + \cos \omega t \cdot \left(1 + \frac{R}{2l} \cos \omega t\right) \right].$$

Обычно скорость движения источников $v \ll c$. В этом случае вклад эффекта Доплера в нарушение когерентности маленький и $\omega_{1,2} \approx \omega_0$. Основной вклад в нарушение картины интерференции связан с перемещением источников и изменением разности хода лучей от источников до точки наблюдения ($\Delta \varphi_1 \ll \Delta \varphi_2$).

Эффект Доплера становится существенным в изменении картины интерференции при скоростях вращения $v_{1,2} = \omega R \sim c$.

В соответствии с принципом суперпозиции, суммарное поле в любой точке пространства P определяется суммой полей, создаваемых каждым источником:

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

где $\tau_1 = \frac{r_2 - r_1}{v} \approx \frac{\Delta r}{v}$, r_1, r_2 – расстояния от источников до точки наблюдения.

Интенсивность сигнала пропорциональна квадрату амплитуды напряженности электрического поля:

$$E^2(\mathbf{r}, t) = (E_1 \cos k r_1 + E_2 \cos k r_2)^2 + (E_1 \sin k r_1 + E_2 \sin k r_2)^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos k(r_2 - r_1).$$

Интенсивность волнового процесса:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos k(r_2 - r_1).$$

Фаза результирующего колебания:

$$\Phi = \operatorname{arctg} \frac{E_1 \sin k r_1 + E_2 \sin k r_2}{E_1 \cos k r_1 + E_2 \cos k r_2},$$

где

$$r_1 = k \sqrt{\left(x - \frac{R}{2} \sin \varphi\right)^2 + \left(l - \frac{R}{2} \cos \varphi\right)^2},$$

$$r_2 = k \sqrt{\left(x + \frac{R}{2} \sin(\varphi + \pi)\right)^2 + \left(l + \frac{R}{2} \cos(\varphi + \pi)\right)^2}.$$

Максимальная интенсивность

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2}$$

будет наблюдаться в тех точках, для которых выполняются соотношения:

$$\Delta\varphi = k(r_2 - r_1) = 2m\pi, m = 0, 1, 2, \dots$$

При равной интенсивности излучения обоих источников $I_1 = I_2 = I_0$ имеем:

$$I = 2I_0 \left[2 + \cos \left\{ \frac{2\pi R}{\lambda} \left[\sin \omega t \cdot \left(\frac{x}{l} + \frac{R}{l} \sin \omega t \right) + \cos \omega t \cdot \left(1 + \frac{R}{l} \cos \omega t \right) \right] \right\} \right].$$

На рис.4 показана зависимость разности фаз в точке наблюдения от времени, определяющая характер зависимости от времени интенсивности волнового процесса

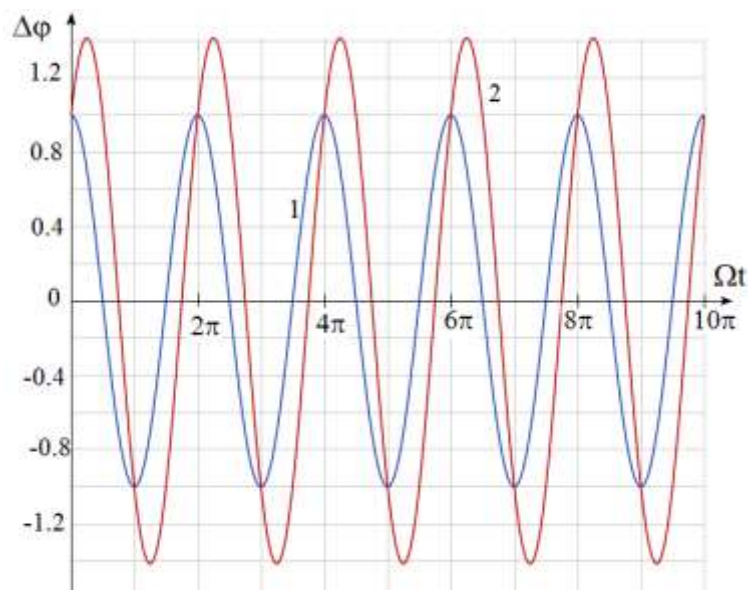


Рис.4. Временная зависимость разности фаз от скорости вращения системы излучателей (1- $x/l = 0.001$, 2- $x/l = 1$)

Полученные соотношения позволяют рассчитать распределение интенсивности и фазы результирующего колебания в произвольной точке пространства при любом пространственном расположении источников.

Вращение источников формирует амплитудную модуляцию интерференционной картины, создаваемой когерентными источниками с частотой модуляции равной частоте вращения. С ростом скорости вращения растет частота модуляции.

Она зависит как от положения точки наблюдения P , так и от времени. В каждой точке пространства наблюдается модуляция интенсивности излучения с частотой вращения ω системы двух излучателей.

Заключение

Вращение системы когерентных источников приводит к нарушению когерентности волн в любой точке пространства и стационарная картина интерференционного распределения интенсивности нарушается.

В каждой точке пространства наблюдается модуляция амплитуды интенсивности и модуляция частот волн источников с частотой вращения источников. Это необходимо учитывать при расчете диаграммы направленности излучателей подвижных антенных систем, что имеет большое практическое значение.

Библиографический список

1. Бутиков Е. И. Оптика. М.: Спб. Лань, 2012. 608 с.
2. Глущенко А.Г., Глущенко Е.П. Методика расчета пространственного распределения интенсивности волнового процесса, формируемого точечными источниками // Вестник науки и образования. 2016. №11(23). С.6-9.
3. Jun Xiong, lu Gao. Patial Interference: From coherent to incoherent. Physical Review Letters 102 (7): 073904 · March 2009 with 399 Reads DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.073904 ·
4. Глущенко А.Г., Глущенко Е.П., Устинова Е.С. Интерференционная картина в подвижных средах // Международный журнал экспериментального образования. 2017. №1. С.48-51.
5. Ivezić T. The electromagnetic field equations for moving media J. Phys. Conf. Ser. 845 (2017) 1, 012013 DOI: 10.1088/1742-6596/845/1/012013
6. Гринченко В.Т., Вовк И.В., Мацыпура В.Т. Основы акустики. Київ: Наукова думка, 2007. 640 с.
7. Григорьев А.Д. Методы вычислительной электродинамики. М.: Физматлит, 2012. 432 с.