

УДК 681.7.069.24: 53.088

ФАЗА ИЗЛУЧЕНИЯ В УСКОРЕННОМ РЕЗОНАТОРЕ

Б. В. Мелкумян

Рассматривается излучение резонатора при его ускоренном движении в пространстве. Ускорение движения может автономно определяться через параметры излучения и его источника, если у поля есть “фазовый скелет”, неизменный за время движения. Получена фаза излучения в прямоугольном резонаторе, движущемся с постоянным ускорением.

Ключевые слова: вектор излучения, действие, ускорение, фаза.

В данном сообщении рассматривается движение в пространстве поля без зарядов под действием внешних сил, которые одновременно сдвигают элементы обрамления излучения. Параметры движения элементов обрамления, закрепленных на объекте, автономно определяются через параметры излучения и его источника, если у поля, движущегося, как целое, есть “фазовый скелет”, неизменный за время движения.

Мы предположили, что неравномерное движение источника света приводит к появлению у поля излучения в собственной системе отсчёта комплексной фазы, определяемой ускорением источника и пространственными параметрами фазовой структуры источника, поскольку наблюдалось нелинейное относительно ускорения изменение интенсивности излучения и появление дополнительных, недифракционных пучков при движении резонатора. Предположение подтвердилось экспериментально и теоретически [1, 2].

В настоящей работе рассмотрены разрешённые направления и частоты излучения в неравномерно движущемся линейном лазерном резонаторе [1–3].

Здесь и далее резонатор излучения представляется как корпус из жестких элементов, которые остаются неподвижными друг относительно друга при его движении. Все элементы резонатора перемещаются:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 - \vec{S}(t). \quad (1)$$

Здесь в (1) \vec{r} – это радиус-вектор точки в неинерциальной системе отсчёта, неподвижной относительно резонатора, \vec{r}_0 – радиус-вектор той же точки в системе отсчё-

та инерциального наблюдателя и $\vec{S}(t)$ – вектор перемещения резонатора относительно инерциального наблюдателя. Время в системах одинаково.

Соотношение (1) ведёт к преобразованию операторов координат (1.1) и времени (1.2), как показано в [4, 5]:

$$\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial \vec{r}} \right) = \left(\frac{\partial}{\partial \vec{r}_0} \right) = \vec{\nabla}_0; \quad (1.1)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} \right)_{\vec{r}} = \left(\frac{\partial}{\partial t} \right)_{\vec{r}_0} + (\dot{\mathbf{S}}(t) \cdot \vec{\nabla}_0). \quad (1.2)$$

Учитывая преобразования (1.1) и (1.2) при перемещении (1) неинерциальной системы отсчёта, волновое уравнение для полной фазы излучения Φ примет вид (2):

$$\Delta_0 \Phi = \frac{\epsilon \mu}{c^2} \left\{ \frac{\partial}{\partial t} + (\dot{\mathbf{S}}(t) \cdot \vec{\nabla}_0) \right\}^2 \Phi. \quad (2)$$

Преобразованного волнового уравнения (2) недостаточно для определения неизвестной функции Φ через три независимые (так как движение произвольно) переменные $S_x; S_y; S_z$.

Мы предположили, что для решения задачи собственных функций – собственных значений для света в неинерциальной системе отсчёта необходимо дополнить уравнение (2) соотношениями (3) и (6), или соотношениями (7) и (8), соответственно (см. ниже).

При нерелятивистском перемещении любой физической системы, имеющей собственный импульс, её энергия изменяется согласно преобразованию (3)

$$\hat{E} = \hat{E}_0 - (\dot{\mathbf{S}} \cdot \hat{\mathbf{P}}). \quad (3)$$

В (3) операторы \hat{E} и \hat{E}_0 определяют энергию электромагнитного поля в неравномерно движущемся резонаторе и в системе инерциального наблюдателя соответственно, $\hat{\mathbf{P}}$ – оператор импульса в собственной системе отсчёта резонатора, а первая производная по времени $\dot{\mathbf{S}}(t) = \mathbf{v}(t)$ – это скорость резонатора относительно инерциальной системы отсчёта.

Уравнение (3), выраженное в операторах энергии и импульса, имеет вид:

$$\left[i\hbar \cdot \frac{\partial}{\partial t} + i\hbar(\dot{\mathbf{S}} \cdot \vec{\nabla}_0) \right] \Psi = E \cdot \Psi. \quad (4)$$

Собственные функции задачи (4) ищем в виде векторов напряженности поля:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot \exp[\mp i \cdot \Phi(t; \vec{r})], \quad (5)$$

где $\Phi(t; \vec{r})$ – это фаза излучения для собственных функций (5) уравнения (3).

В единицах \hbar уравнение (4) примет форму (6) для энергии $E = \hbar \cdot \omega(t; \vec{r})$:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + (\dot{\mathbf{S}} \cdot \vec{\nabla}_0) \Phi = \omega(t; \vec{r}). \quad (6)$$

В то же время, при перемещении любой физической системы, имеющей собственный импульс, изменяется также такая её величина, как действие.

Действие $A(t; \vec{r})$ при смещении резонатора (1) изменится как:

$$A(t; \vec{r}) = A(0; \vec{r}) - (\mathbf{S}(t) \cdot \hat{\mathbf{P}}), \quad (7)$$

где начальное действие перед началом неравномерного движения равно $A(0; \vec{r}) = A(t = 0; \vec{r})$. Для действия в единицах \hbar соотношение (7) примет вид:

$$\Phi = \Phi(0; \vec{r}) + (\mathbf{S} \cdot \vec{\nabla}_0) \Phi, \quad A = \hbar \Phi, \quad (8)$$

где $\Phi(0; \vec{r})$ – это начальное распределение фазы. Уравнения (2), (5) и (7) мы преобразовали в следующее уравнение для фазы излучения в ускоренном резонаторе:

$$\ddot{\Phi} - \left\{ \frac{1}{2} \cdot (\ddot{\mathbf{S}})^2 \right\} \cdot \Delta_0 \Phi = \dot{\omega} - (\dot{\mathbf{S}} \cdot \vec{\nabla}_0) \omega - (\ddot{\mathbf{S}} \cdot \vec{\nabla}_0) \Phi(0; \mathbf{r}). \quad (9)$$

Решение уравнения (9) нашли как сумму общего решения $\Phi^0(t; \vec{r})$ однородной части и частного решения уравнения (9), как в соотношении:

$$\Phi(t; \vec{r}) = \Phi^0(t; \vec{r}) + \tilde{\Phi}(t; \vec{r}). \quad (10)$$

Частное решение уравнения (9) найдено в форме:

$$\tilde{\Phi}(t; \vec{r}) = \omega(t; \vec{r}) \cdot t - (\mathbf{S}(t) \cdot \vec{\nabla}) \tilde{\Phi}(0; \vec{r}). \quad (11)$$

Соответствующее уравнение для частоты в случае постоянного ускорения (а) имеет вид

$$t\ddot{\omega} + \dot{\omega} + t(\vec{a} \cdot \vec{\nabla})\omega = \frac{3}{2}a^2t^2 \cdot \Delta \tilde{\Phi}. \quad (12)$$

Низкочастотная часть решения $\Phi(t; \vec{r})$ уравнения (9) рассматривалась как функция обобщенного эйконала.

Общее решение однородной части уравнения (9) от $\Phi^0(t; \vec{r})$ получено в [6, 7]. Пространственная часть решения $\Phi^0(t; \vec{r}) = T(t) \cdot V(\vec{r})$ для прямоугольного резонатора оказывается чисто мнимой функцией

$$V(\vec{r}) = i \cdot C(t) \cdot \sin(\vec{\Xi} \cdot \vec{r}). \quad (13)$$

Здесь величина $C(t)$ – произвольная функция от времени, а “вектор излучения” $\vec{\Xi}$ определяет разрешённые направления излучения для неравномерно движущегося резонатора и в случае ограниченного резонатора перпендикулярен им [8]. Чтобы решить (12), мы заменили лапласиан в его правой части частным решением для фазы:

$$\Delta \tilde{\Phi} = -i \cdot (\vec{\Xi})^2 \cdot \sin(\vec{\Xi} \cdot \vec{r}). \quad (14)$$

Преобразовав (12) с учётом (14), мы получили для комплексной частоты излучения:

$$t\ddot{\omega} + \dot{\omega} + t(\vec{a} \cdot \vec{\nabla})\omega = -i\frac{3}{2}a^2t^2 \cdot (\vec{\Xi})^2 \cdot \sin(\vec{\Xi} \cdot \vec{r}). \quad (15)$$

Решение уравнения (15) также ищем в виде суммы общего решения соответствующего однородного уравнения и частного решения исходного уравнения:

$$\omega = \omega^0 + \tilde{\omega}. \quad (16)$$

Представление (16) позволяет разделить переменные в однородном уравнении для (15).

Частное решение для уравнения (15) ищем при условии:

$$t \cdot (\vec{a} \cdot \vec{\nabla})\tilde{\omega} = 0. \quad (17)$$

Условие (17) показывает трёхмерный характер исследуемых явлений, когда наличие внешнего воздействия (движение с произвольным постоянным ускорением) сопровождается градиентом фазы излучения в направлении, перпендикулярном вектору ускорения, и подтверждается экспериментально.

Окончательно, фаза излучения в прямоугольном резонаторе, движущемся с постоянным ускорением \vec{a} , есть

$$\Phi_{\pm} = \left[\omega_0 t - \left(\frac{\vec{a} \cdot t^2}{2} \cdot \vec{\nabla} \right) \tilde{\Phi}(0; \vec{r}) \right] + i \cdot \left[T(t) \cdot \sin(\vec{\Xi} \cdot \vec{r}) \mp \frac{a^2 t^4}{6} \Xi^2 \right]. \quad (18)$$

Здесь, в формуле (18), функция $T(t)$ – это временная часть решения однородного уравнения для (9), два индекса в величине Φ_{\pm} соответствуют двум разрешённым направлениям излучения для каждой моды линейного резонатора, $\vec{\Xi}$ – это вектор излучения из [2, 8], угловой спектр которого определяется собственными значениями пространственной части решения однородного уравнения для (9).

Экспериментально обнаруженные и теоретически обоснованные явления динамического изменения моды света имеют трёхмерный характер и позволяют измерять линейное ускорение объекта относительно инерциальной системы отсчёта [6, 7, 9].

Автор выражает свою глубокую благодарность А. А. Рухадзе и участникам руководимого им семинара в Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН за полезные замечания и плодотворные обсуждения.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] B. V. Melkounian, “Dynamic changing of laser radiation mode”. Proceedings of the 11th Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. Ed. V. A. Bityurin (Moscow, Joint Institute of High Temperature of RAS, 2012), p. 366.
- [2] B. V. Melkounian, “Light in non-inertial reference systems with constant phase structure”. The 11th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics (Abstracts) (Joint Institute of High Temperature of RAS, Moscow, 2012), p. 131.
- [3] B. V. Melkounian, “New solutions for autonomous control & navigation”, The 12th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics (Abstracts) (Joint Institute of High Temperature of RAS, Moscow, 2013), p. 126.
- [4] B. V. Melkounian, “Classical theory of autonomous laser accelerometer”. SPIE paper № **6736-12**, (2007), pp. 67360D–1–67360D-9.
- [5] B. V. Melkounian, “Optodynamics effects”. Proceedings of SPIE, Vol. 4348, SPIE paper № 4348-02, (2000).
- [6] Б. В. Мелкумян, Инженерная физика, № 4, 3 (2011).
- [7] B. V. Melkounian, “Vibrosensor of new generation”. Proceedings of SPIE, Vol. 4627, SPIE paper № 4627-37 (2002).
- [8] Б. В. Мелкумян, Краткие сообщения по физике ФИАН, **41**(2), 9 (2014).
- [9] B. V. Melkounian, “Method and device for autonomous measurement of an irregular movement based on resonatory sensor”. Application № 08/568,815; priority date: Dec. 07, 1995; US patent № 5,652,390; date of patent: July 29, 1997. Class: 073-657.000.

Поступила в редакцию 15 января 2014 г.