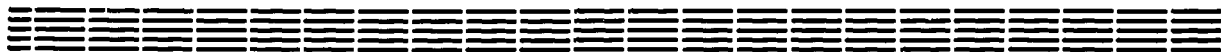


802807258

ПРЕПРИНТ ЕФИ-964(14)-87

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱԶԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
YEREVAN PHYSICS INSTITUTE



Қ.А.БАРСУКОВ, Э.А.БЕГЛОЯН, Э.М.ЛАЗИЕВ,
Н.В.РЯЗАНЦЕВ

**ИЗЛУЧЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ, СОВЕРШАЮЩЕЙ
КОЛЕБАНИЯ ВДОЛЬ НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ
ПРИ ПОЛЕТЕ ЧЕРЕЗ ВОЛНОВОД**

ЦНИИАтоминформ
ЕРЕВАН — 1987

Նախնատիպ EՀ/1-964(I4)-87

Կ.Ա.ԲԱՐՍՈՒԿՈՎ,* Է.Ա.ԲԵԳԼՈՅԱՆ, Է.Մ.ԼԱԶԻԵՎ, Ն.Վ.ՌՅԱԶԱՆՑԵՎԱ *

ԱԼԻՔԱՏԱՐՈՎ ՇԱՐՔՄԱՆ ՈՒՂՂՈՒԹՅԱՄԲ ՏԱՏԱՆՎՈՂ ԼԻՑԵԱՎՈՐՎԱԾ
ՄԱՍՆԻԿԻ ՃԱՌԱԳԱՑՔՈՒՄԸ

Հետազոտված է ալիքատարով հարմոնիկ օրենքով շարժվող Լիցքավոր
ված մասնիկի մտազայթումը: Ստացված են վերջավոր թվով տատանվող
մասնիկների համար դաշտերի և էներգիայի մտազայթման արտահայտու-
թյուններ: Վերլուծված է նաև մտազայթման սպեկտրը:

Երևանի Փիզիկայի ինստիտուտ

ԵՐԵՎԱՆ 1987

* Լենինգրադի էլեկտրոտեխնիկական ինստիտուտ



Препринт ВФИ-964(14)-87

УДК 538.56:539.12

К.А.БАРСУКОВ,^{*} Э.А.БЕГЛОЯН, Э.М.ЛАЗИЕВ,
Н.В.РЯЗАНЦЕВА^{*}

ИЗЛУЧЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ, СОВЕРШАЮЩЕЙ
КОЛЕБАНИЯ ВДОЛЬ НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПРИ ПРОЛЕТЕ
ЧЕРЕЗ ВОЛНОВОД

Исследовано излучение заряженной частицы, движущейся в волноводе по гармоническому закону. Получены выражения для полей и энергии излучения в случае, когда частица совершает конечное число колебаний. Проведен анализ спектра излучения.

Ереванский физический институт
Ереван 1987

*Ленинградский электротехнический институт

Preprint ~~EDM~~-964(I4)-87

K.A. BARSUKOV*, E.A. BEGLOYAN, E.M. LAZIEV
N.V. RJAZANTSEVA*

THE RADIATION FROM A CHARGED PARTICLE,
MAKING OSCILLATIONS ALONG THE DIRECTION
OF MOTION THROUGH THE WAVEGUIDE

The radiation of a charged particle, moving by harmonic law in the waveguide is studied. The expressions for the fields and energy are obtained for the case of finite number of oscillations. The radiation spectrum was analyzed.

Yerevan Physics Institute

Yerevan 1987

*Leningrad Electrical Engineering Institute

Одна из возможных реализаций экспериментального наблюдения эффекта Доплера в волноводе предполагает использование периодической последовательности заряженных ступок, раскачиваемых мощным электромагнитным полем при их пролете через волновод. Учитывая практическую значимость такого класса задач, рассмотрим случай, когда заряженная частица пролетает через волновод, совершая колебательные движения вдоль направления движения.

Рассмотрим регулярный цилиндрический волновод, образующая которого параллельна оси OZ некоторой декартовой системы координат, заполненный диэлектрической средой с проницаемостью ϵ . Вдоль оси OZ движется заряженная частица, уравнения траектории которой являются

$$\begin{aligned}
 x = x_0, \quad y = y_0 & \quad \text{при} \quad -\infty < t < \infty, \\
 z(t) = vt & \quad \text{при} \quad t < -\frac{a}{v}, \\
 z(t) = vt + z_0 \sin \Omega t & \quad \text{при} \quad -\frac{a}{v} < t < \frac{a}{v}, \\
 z(t) = vt & \quad \text{при} \quad t > \frac{a}{v},
 \end{aligned} \tag{I}$$

где Ω - частота колебательного движения заряда, z_0 - амплитуда, $v = \text{const}$.

Для решения задачи воспользуемся результатами работы [2]

в которой приведены выражения для полей излучения заряда, движущегося в волноводе по произвольному закону. Из условий возбуждения следует, что в волноводе генерируются лишь TM волны, тогда согласно [2] вычисление полей излучения сводится к вычислению интеграла

$$E_{\omega, n}(z) = - \frac{q \lambda_n^2 \Psi_n(x_0, y_0)}{\epsilon \omega \gamma_n} \int_t^{\infty} v_z(t) e^{-i \gamma_n |z - z(t)| - i \omega t} dt, \quad (2)$$

где ω - указывает на фурье-компоненту соответствующей величины, q - заряд частицы, $E_{\omega, n}(z)$ - амплитуда разложения $E_{z, \omega}$ составляющей поля по собственным функциям волновода, λ_n - собственные значения первой краевой задачи для поперечного сечения волновода, $\gamma_n = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} \epsilon - \lambda_n^2}$, интегрирование производится по всему времени нахождения заряда в волноводе.

Если точка наблюдения находится в области $z > a$, то (2) распадается на четыре интеграла

$$E_{\omega, n}(z) = - \frac{q \lambda_n^2 \Psi_n(x_0, y_0)}{\epsilon \omega \gamma_n} \left[v e^{-i \gamma_n z} \int_{-\infty}^{a/v} e^{-i(\gamma_n v - \omega)t} dt + e^{-i \gamma_n z} \int_{-a/v}^{+a/v} \left(v + \frac{z_0}{\Omega} \cos \Omega t \right) \times \right. \quad (3)$$

$$\left. \times e^{i(\gamma_n v t - \gamma_n z_0 \sin \Omega t - \omega t)} dt + v e^{-i \gamma_n z} \int_{a/v}^{z/v} e^{i(\gamma_n v - \omega)t} dt + v e^{i \gamma_n z} \int_{z/v}^{\infty} e^{-i(\gamma_n v + \omega)t} dt \right]$$

Первое и третье слагаемые описывают поля излучения, возникающие при равномерном движении заряда левее точки наблюдения и распространяющиеся в положительном направлении оси Oz . Четвертое слагаемое описывает поля излучения равномерно движущегося заряда правее точки наблюдения и вклада в энергию излучения не дает. Второе слагаемое в (3) описывает поля излучения заряда, совершающего колебательные движения.

Для вычисления второго интеграла в (3) воспользуемся разложением в ряды по функциям Бесселя первого рода и после ряда преобразований для полей излучения в волноводе окончательно получим:

$$E_{\omega,n}(z) = -\frac{q\lambda_n^2\Psi_n(x_0, y_0)}{\varepsilon\omega\gamma_n} \left[\frac{e^{i(\gamma_n - \frac{\omega}{v})a}}{i(\gamma_n - \frac{\omega}{v})} + \frac{2\sin(\gamma_n - \frac{\omega}{v})\frac{(z-a)}{2}}{\gamma_n - \frac{\omega}{v}} e^{i(\gamma_n + \frac{\omega}{v})\frac{(z+a)}{2}} + \right. \\ \left. + 2 \sum_{k=-\infty}^{+\infty} J_k(\gamma_n z_0) \left(v + \frac{\kappa\Omega}{\gamma_n} \right) \frac{\sin(\gamma_n v + \kappa\Omega - \omega)\frac{a}{v}}{(\gamma_n v + \kappa\Omega - \omega)} \right] e^{-i\gamma_n z}, \quad (4)$$

где $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ - номер гармоники частоты колебательного движения заряда.

Первые два члена определяют поля излучения Вавилова-Черенкова, возникающего в областях $-\infty < z < -a$ и $z > a$, соответственно. Третий член при $k = 0$ также описывает поля излучения Вавилова-Черенкова в области $-a < z < a$. Действительно, все они обладают простыми полюсами на частотах, для которых скорость поступательного движения заряда равна фазовой скоро-

сти соизлучающей волны $U = \omega_n \chi_n^{-1}$. На этих частотах на фоне непрерывного спектра возникает пик излучения Вавилова-Черенкова, высота которого пропорциональна квадрату длины пути, пройденного зарядом. При $\kappa \neq 0$ третий член в (4) описывает поле излучения заряда, движущегося поступательно и одновременно совершающего гармонические колебания. Он имеет полюса на частотах, являющихся решением уравнений

$$\chi_n U + \kappa \Omega - \omega = 0. \quad (5)$$

При $\kappa > 0$ (5) описывает спектр нормального доплер-эффекта, когда волна излучения распространяется в направлении движения заряда, если же $\kappa < 0$ - спектр аномального доплер-эффекта. Отметим, что условия $U = \omega_n \chi_n^{-1}$ и (5) не могут одновременно выполняться на одной и той же волноводной моде.

Излучение Вавилова-Черенкова в волноводе детально исследовано в ряде работ, например, [3], и на нем мы останавливаться не будем, а для потока энергии излучения заряда за счет колебательного движения получим:

$$S = 4q^2 \sum_n \chi_n^2 \left| \Psi_n(x_0, y_0) \right|^2 \left| \sum_{\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{J_{\kappa}(\chi_n z_0)}{\varepsilon \chi_n} \frac{\sin(\chi_n U + \kappa \Omega - \omega) \frac{\alpha}{V}}{(\chi_n U + \kappa \Omega - \omega)} \left(U + \frac{\kappa \Omega}{\chi_n} \right) \frac{d\omega}{\omega} \right|^2. \quad (6)$$

Спектр излучения непрерывный, в нем отсутствуют частоты, удовлетворяющие условиям

$$\frac{\alpha}{V} (\chi_n U + \kappa \Omega - \omega) = \pi z \quad , \quad J_{\kappa}(\chi_n z_0) = 0 \quad , \quad z = \pm 1, \pm 2, \pm 3. \quad (7)$$

На этих частотах волны излучаются в противофазе и гасят друг друга.

В спектре излучения на частотах ω_k , удовлетворяющих уравнениям (5), возникают пики излучения, высоты которых равны

$$\frac{\partial S_{n,k}}{\partial \omega} = \frac{4q^2 \lambda_n^2 |\Psi_n(x_0, y_0)|^2}{\varepsilon \omega v^2 \gamma_n} a^2 J_k(\gamma_n z_0) \left(v + \frac{k\Omega}{\gamma_n} \right)^2 \Big|_{\omega=\omega_k}, \quad (6)$$

а эффективная ширина

$$\Delta \omega = \frac{\pi v c \gamma_n}{a(\beta \omega \varepsilon - c \gamma_n)} \Big|_{\omega=\omega_k}, \quad \beta = \frac{v}{c}. \quad (9)$$

Энергию излучения в пике вычислим как произведение высоты пика на его эффективную ширину и окончательно получим:

$$S_k = \frac{4\pi q^2}{\beta \varepsilon \omega_k} \sum_n \frac{\lambda_n^2 |\Psi_n(x_0, y_0)|^2}{\gamma_n (\beta \omega \varepsilon - \gamma_n)} \left(v + \frac{k\Omega}{\gamma_n} \right)^2 J_k^2(\gamma_n z_0) \Big|_{\omega=\omega_k}. \quad (10)$$

Поля излучения в области $z < -a$ вычисляются аналогично проделанному выше. При этом вместо уравнения (5) получаем

$$\gamma_n v - k\Omega + \omega = 0. \quad (11)$$

Оно описывает спектр излучения нормального доплер-эффекта, когда излученная волна и заряд движутся в разных направлениях.

Условия (11) и $v = \omega_n \gamma_n^{-1}$ могут одновременно выполняться на частотах $\omega = k\Omega/2$, причем индекс моды волны, для которой это

возможно, определяется из условия

$$\lambda_n = \frac{\kappa \Omega}{2\nu} \sqrt{\beta^2 \epsilon - 1} \quad (12)$$

Таким образом, на моде волны, индекс которой определяется из (12), пики излучения Вавилова-Черенкова и излучения заряда за счет колебательного движения совпадают. Поля этих двух видов излучения взаимно усиливают друг друга, и энергия излучения на частоте возрастает.

Отметим, что возникающая ситуация и условие $\omega = \kappa \Omega / 2$ аналогичны параметрическому резонансу в системах с переменными параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барсуков К.А., Газазян Э.Д., Лазиев Э.М. К теории переходного излучения в волноводе. Изв.ВУЗов , Радиофизика, 1972, т.15, № 2, с.586.
2. Барсуков К.А., Беллоян Э.А., Лазиев Э.М., Рязанцева Н.В. Поле излучения заряженной частицы в волноводе при её произвольном движении. Препринт БФИ-86I(12)-86, Ереван, 1986.
3. Газазян Э.Д., Лазиев Э.М.. О черенковском излучении в волноводе. Изв.АН Арм ССР. Физика, 1963, т.16, с.279.

Рукопись поступила 16 февраля 1987 г.

К.А.БАРСУКОВ, Э.А.БЕГЛОЯН, Э.М.ЛАЗИЕВ, Н.В.РЯЗАНЦЕВА
ИЗЛУЧЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ, СОВЕРШАЮЩЕЙ КОЛЕБАНИЯ ВДОЛЬ
НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПРИ ПРОЛЕТЕ ЧЕРЕЗ ВОЛНОВОД

Редактор Л.П.Мукаян

Технический редактор А.С.Абрамян

Подписано в печать 9/IV-87г.	ВФ-02760	Формат 60x84/16
Офсетная печать. Уч.изд.л. 0,5		Тираж 299 экз.Ц.7 к.
Зак.тип.№ 223		Индекс 3624

Отпечатано в Ереванском физическом институте
Ереван 36, Маркарян 2

The address for requests:
Information Department
Yerevan Physics Institute
Markaryan St., 2
Yerevan, 375036
Armenia, USSR

индекс 3624



ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ