

02;07;10;12

Использование двумерной распределенной обратной связи для синхронизации многопучковой системы планарных МСЭ

© Н.С. Гинзбург, Н.Ю. Песков, А.С. Сергеев,
А.В. Аржанников, С.Л. Синицкий

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород
Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН, Новосибирск

Поступило в Редакцию 8 августа 2000 г.

Предложено использование двумерной распределенной обратной связи для синхронизации излучения в многопучковом генераторе, представляющем собой совокупность МСЭ-модулей планарной геометрии, каждый из которых запитывается ленточным РЭП. Показано, что связь различных модулей может быть осуществлена через возникающие в двумерных брэгговских структурах поперечные потоки электромагнитной энергии.

1. В настоящее время ведутся достаточно интенсивные теоретические [1–4] и экспериментальные [5–7] исследования использования двумерной распределенной обратной связи (РОС) для генерации мощного когерентного излучения релятивистскими электронными пучками ленточной и трубочатой геометрии. Подобный механизм обратной связи может быть реализован с помощью двумерных брэгговских резонаторов планарной и коаксиальной геометрии. Теоретический анализ показывает, что для обеих конфигураций возможно получение пространственно-когерентного излучения при одном из поперечных размеров системы, на несколько порядков превосходящих длину волны. Работоспособность новой схемы обратной связи продемонстрирована недавно [5,6] экспериментально в мазере на свободных электронах (МСЭ) 4-миллиметрового диапазона, реализованном на базе специализированного ускорителя ЭЛМИ (ИЯФ СО РАН), формирующего ленточный релятивистский электронный пучок (РЭП) с энергией частиц 1 MeV, погонным током 200 A/cm, поперечным сечением 0.3×20 cm и длительностью импульсов более 5 μ s. В качестве развития этих исследований предлагается созда-

ние мощных источников электромагнитного излучения как совокупности синфазно работающих генераторных или усилительных модулей в виде планарных МСЭ, примыкающих друг к другу и тем самым создающих единое устройство с многослойной электродинамической структурой и пространством взаимодействия, развитым по двум поперечным координатам. В данной работе будет показано, что синхронизация фазы колебаний может быть осуществлена путем связи различных модулей через поперечные (по отношению к направлению поступательного движения частиц) потоки электромагнитной энергии, которые возникают в двумерных брэгговских структурах. При этом возможна реализация как генераторных, так и усилительных схем. В первом случае должно иметь место замыкание в кольцо потоков энергии с первого и последнего модуля. Во втором случае данное кольцо оказывается разомкнутым, и его концы используются для подачи входного сигнала. Первоначальную экспериментальную проверку предложенного механизма синхронизации предполагается осуществить на установке ЭЛМИ путем объединения в единое устройство двух планарных мазеров.

2. Общая схема многомодульного МСЭ-генератора изображена на рис. 1, *a*. Каждый из модулей (рис. 1, *b*) представляет собой генератор с двумерным планарным брэгговским резонатором, пластины которого гофрированы по закону

$$a = a_1 \cos(\bar{h}z) \cos(\bar{h}x), \quad (1)$$

$\bar{h} = \sqrt{2}\pi/d$, d — период гофрировки, $2a_1$ — глубина гофрировки. МСЭ-модуль запитывается ленточным РЭП, поступательная скорость которого направлена вдоль оси z . Электроны пучка, фокусируемые ведущим продольным магнитным полем, осциллируют в поле планарного ондулятора, примыкающего к каждому из модулей. Различные модули связаны последовательно через поперечные потоки энергии, возникающие за счет рассеяния при возбуждении двумерного брэгговского резонатора ленточным РЭП. При этом для замыкания кольца обратной связи первый и последний модули должны быть также связаны друг с другом.

Электромагнитное поле внутри модуля с индексом n представим как совокупность 4 парциальных волн, две из которых (A_{\pm}) распространяются в продольном, а две другие (B_{\pm}) в поперечном по отношению к

движению электронного пучка направлении:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \operatorname{Re} \left(\left[\mathcal{A}_{+,n} e^{-i\bar{h}z} + \mathcal{A}_{-,n} e^{i\bar{h}z} + \mathcal{B}_{+,n} e^{-i\bar{h}x} + \mathcal{B}_{-,n} e^{i\bar{h}x} \right] e^{i\bar{\omega}t} \right), \quad (2)$$

где $\mathcal{A}_{\pm}(x, z, t)$, $\mathcal{B}_{\pm}(x, z, t)$ — медленные функции, $\bar{\omega} = \bar{h}c$ — несущая частота, в качестве которой выбрана брэгговская частота (частота точного брэгговского резонанса). Процесс электронно-волнового взаимодействия в n -м модуле может быть описан с помощью следующей системы уравнений (ср. с [2,3]):

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial}{\partial Z} + \beta_{gr}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) A_{+,n} + i\alpha(B_{+,n} + B_{-,n}) &= J_n, \quad J_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta_n} d\theta_{0n}, \\ \left(\frac{\partial}{\partial Z} - \beta_{gr}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) A_{-,n} + i\alpha(B_{+,n} + B_{-,n}) &= 0, \\ \left(\frac{\partial}{\partial X} \pm \beta_{gr}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) B_{\pm,n} + i\alpha(A_{+,n} + A_{-,n}) &= 0, \\ \left(\frac{\partial}{\partial Z} + \beta_{\parallel}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right)^2 \theta_n &= \operatorname{Re}(A_{+,n} e^{i\theta_n}), \end{aligned} \quad (3)$$

$Z = z\bar{h}C$, $X = x\bar{h}C$, $\tau = t\bar{\omega}C$, $(A_{\pm}, B_{\pm}) = (A_{\pm}, B_{\pm})eK\mu/\gamma m\bar{\omega}cC^2$, $K \approx \beta_{\perp}/2\beta_{\parallel}$ — параметр связи электронов с волной, $\mu \approx \gamma^{-2}$ — параметр инерционной группировки, γ — релятивистский масс-фактор электронов, $v_{\parallel,\perp} = \beta_{\parallel,\perp}c$ — поступательная и осцилляторная скорость частиц соответственно, $v_{gr} = \beta_{gr}c$ — групповая скорость волн, $\theta = \bar{\omega}t - hz - h_w z$ — фаза электронов относительно синхронной волны, $h_w = 2\pi/d_w$, d_w — период ондулятора,

$$C = \left(\frac{eI_0}{mc^3} \frac{\lambda^2 \mu K^2}{8\pi\gamma a_0} \right)^{1/3}$$

— параметр усиления (параметр Пирса), I_0 — погонный ток пучка, a_0 — расстояние между пластинами, α — коэффициент связи волн на двумерной брэгговской структуре, пропорциональный глубине гофрировки a_1 [1,2].

Граничные условия для электронного пучка и парциальных волн, распространяющихся вдоль пучка, т.е. параллельно оси z , могут быть представлены в виде

$$A_{+,n} \Big|_{z=0} = 0, \quad A_{-,n} \Big|_{z=L_z} = 0, \quad (4)$$

$$\theta_n \Big|_{z=0} = \theta_{0n} \in [0, 2\pi), \quad \left(\frac{\partial}{\partial Z} + \beta_{\parallel}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \theta_n \Big|_{z=0} = \Delta_n, \quad (5)$$

где L_z — длина модулей, $\Delta_n = (\bar{\omega} - h\nu_{\parallel} - h_w\nu_{\parallel})/\bar{\omega}C$ — начальная расстройка ондуляторного синхронизма на несущей частоте в n -й секции. Для парциальных волн, распространяющихся в поперечном направлении и осуществляющих связь различных модулей, граничные условия могут быть представлены в виде

$$\left[B_{+,n}(\tau) = \Gamma B_{-,n-1}(\tau - T) \right]_{x=0}, \quad \left[B_{-,n}(\tau) = \Gamma B_{+,n+1}(\tau - T) \right]_{x=L_x},$$

$$\left[B_{-,N}(\tau) = \Gamma^N B_{+,1}(\tau - NT) \right]_{x=L_x}, \quad \left[B_{-,1}(\tau) = \Gamma^N B_{+,N}(\tau - NT) \right]_{x=L_x}, \quad (6)$$

где L_x — ширина модулей, T — время запаздывания при распространении сигнала между соседними модулями, $\Gamma < 1$ — коэффициент омических потерь. При этом для связи между крайними модулями было естественно предположить, что время запаздывания равно NT , где N — полное число модулей. Таким образом, различные модули оказываются фактически связанными в кольцо (рис. 10), и процесс синхронизации автоколебаний в системе N отдельных модулей в значительной степени оказывается аналогичным процессу синхронизации в МСЭ-генераторе с двумерным брегговским резонатором коаксиальной геометрии [3]. Следует также отметить, что подобно МСЭ коаксиальной геометрии наличие омических потерь для волн B_{\pm} является необходимым условием установления стационарного режима автоколебаний.

3. Моделирование процесса синхронизации МСЭ-модулей проводилось при параметрах, близких к условиям эксперимента, планируемого на ускорителе ЭЛМИ. Осцилляторная скорость $\beta_{\perp} \approx 0.2 \div 0.25$ сообщалась частицам в активном планарном ондуляторе с периодом 4 см при поперечной составляющей ондуляторного поля до 0.2 Т и ведущем поле около 1 Т. Ширина отдельных пучков принималась равной 15 см при погонном токе ~ 200 А/см. Таким образом, при частоте

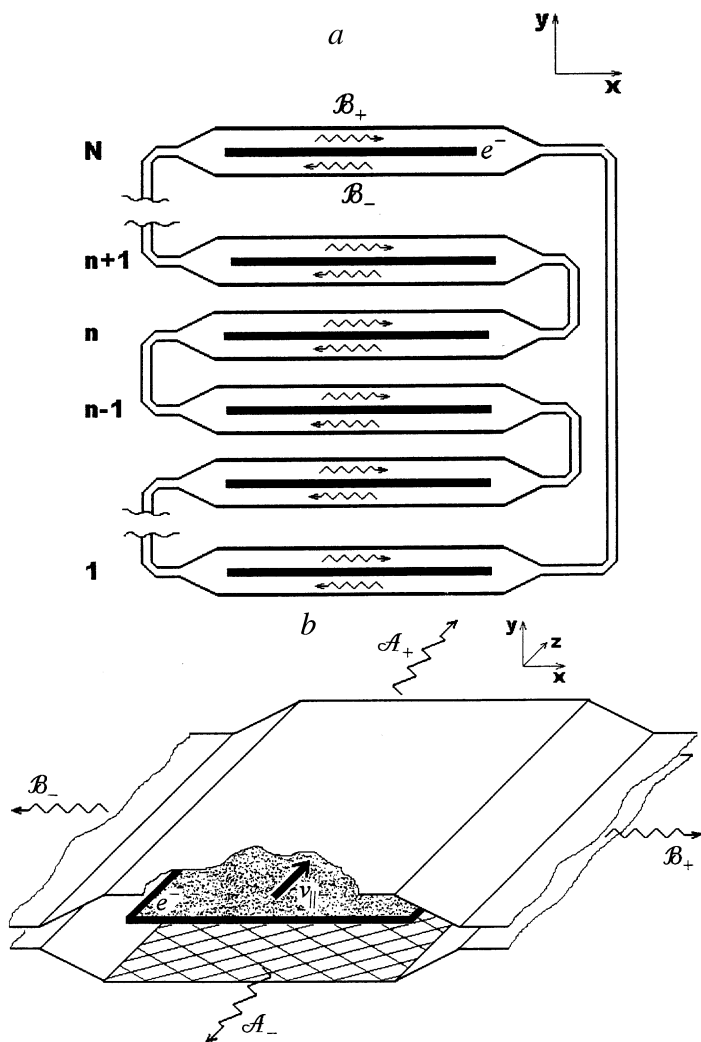


Рис. 1. *a* — общая схема многопучкового МСЭ, состоящего из N планарных модулей (в каждом модуле показано поперечное сечение ленточного РЭП и направление поперечных потоков электромагнитной энергии). *b* — схема отдельного МСЭ-модуля, использующего двумерный брэгговский резонатор и запитываемого ленточным РЭП.

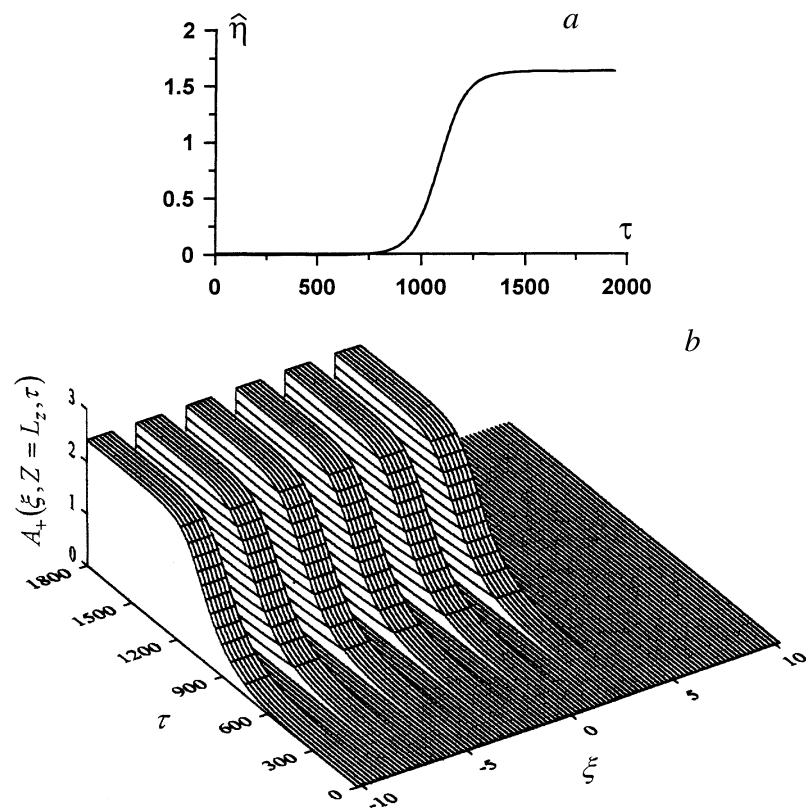


Рис. 2. Моделирование процесса установления автоколебаний в 6-модульном ($N = 6$) МСЭ-генераторе. Зависимости от времени (а) нормированного электронного КПД и (б) амплитуды поля на выходе системы $Z = L_z$ ($L_z = 6.8$, $L_x = 1.2$, $T = 1.2$, $\alpha = 0.1$, $\Delta = -0.2$, $\Gamma = 0.95$).

излучения 75 GHz параметр Пирса был равен $C \approx 4 \times 10^{-3}$. На рис. 2,3 представлены результаты моделирования процесса синхронизации шести генераторных модулей с приведенной нормализованной шириной пространства взаимодействия $L_x = 1.2$ (что в условиях эксперимента на ЭЛМИ соответствует $l_x = 20$ см), длиной модулей $L_z = 6.8$ ($l_z = 110$ см), нормализованным временем запаздывания

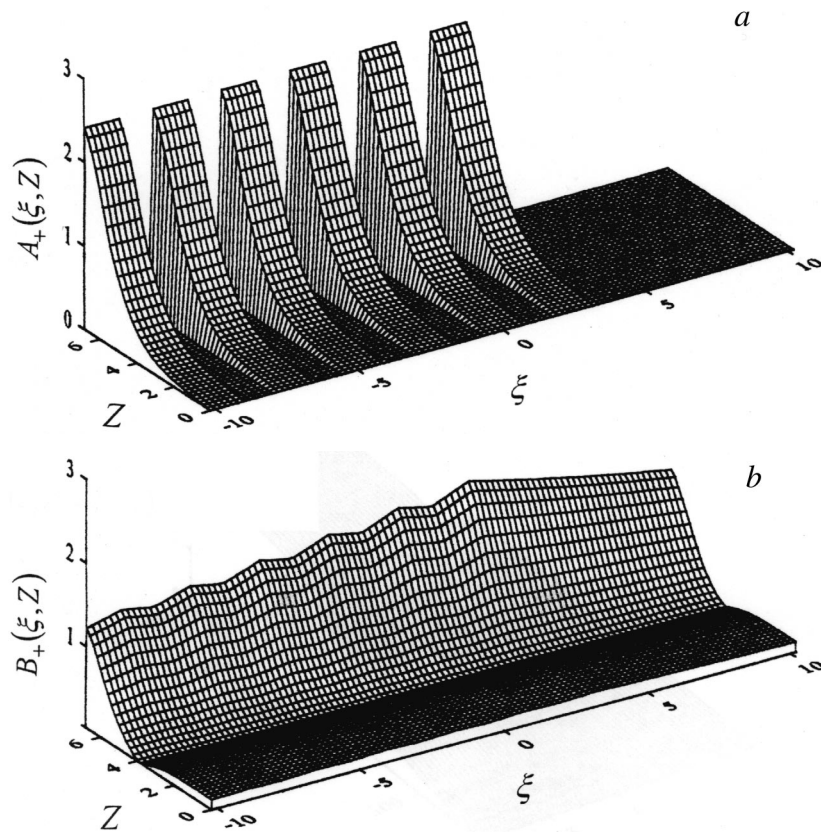


Рис. 3. Пространственное распределение амплитуд полей парциальных волн (а) \mathcal{A}_+ и (б) \mathcal{B}_+ в стационарном режиме генерации для параметров МСЭ, соответствующих рис. 2.

$T = 1.2$ (0.67 ns) и коэффициентом омических потерь $\Gamma \approx 0.95$. Рис. 2 иллюстрирует процесс установления стационарного режима генерации. Частота генерации в установившемся режиме близка к частоте точного брегговского резонанса. На рис. 2, а показана зависимость от времени интегрального по все модулям КПД, на рис. 2, б представлена временная зависимость распределения поля A_+ в выходном сечении $Z = L_z$. При

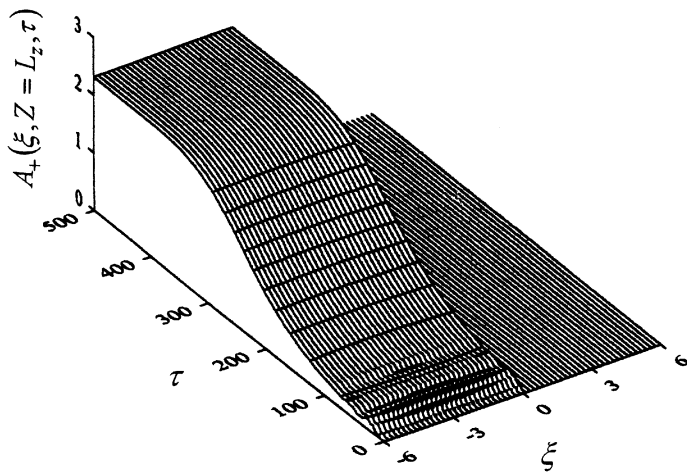


Рис. 4. Моделирование процесса установления автоколебаний в односекционном ($N = 1$) планарном МСЭ-генераторе при замыкании в кольцо поперечных электромагнитных потоков. Зависимость от времени амплитуды поля на выходе системы $Z = L_z$ ($L_z = 6.8$, $L_x = 6$, $T = 6$, $\alpha = 0.1$, $\Delta = 0$, $\Gamma = 0.95$).

этом введена координата ξ , описывающая распределение поля по общему контуру системы, включая все модули и волноводы связи. На рис. 3 показано пространственное распределение поля синхронной волны A_+ и одной из поперечно распространяющихся волн B_+ , осуществляющих синхронизацию различных модулей.

Важно подчеркнуть, что синхронизация имеет место даже в условиях, когда различные модули запитываются электронными потоками с несколько различающимися энергиями и соответственно имеющими разные значения расстройк синхронизма Δ_n . При рассматриваемых геометрических параметрах самовозбуждение и синхронизация различных модулей имела место, пока относительный разброс расстроек составлял до 50% ширины полосы самовозбуждения. Далее автоколебания срывались. Ситуаций, в которых режим синхронизации нарушался и отдельные модули генерировали на разных частотах в проведенном моделировании, не наблюдалось.

4. Отметим в заключение, что поперечная синхронизация излучения в генераторе путем замыкания правого и левого конца пространства взаимодействия может быть эффективна и в случае одного модуля. Как показано в [1–3], использование двумерной РОС позволяет практически неограниченно увеличивать ширину пространства взаимодействия в случае открытых в поперечном направлении систем. Вместе с тем для экспериментальной реализации значительные преимущества имеют закрытые в поперечном направлении системы. В [4] показано, что использование в МСЭ комбинированных резонаторов, составленных из одномерного и двумерного планарных брэгговских зеркал, позволяет отчасти решить эту проблему. Использование дополнительного волновода, замыкающего в кольцо поперечные потоки энергии с правого и левого концов, может рассматриваться в качестве альтернативного решения, достоинством которого является более высокая селективность по поперечному индексу. На рис. 4 показан процесс формирования поперечного распределения амплитуды выходного излучения, при котором устанавливается стационарный режим генерации с частотой, совпадающей с брэгговской частотой.

Список литературы

- [1] Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю., Сергеев А.С. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 9. С. 23.
- [2] Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S., Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L., Phelps A.D.R., Konoplev I.V., Robb G.R.M., Cross A.W. // Phys. Rev. E. 1999. V. 60. P. 935.
- [3] Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S. // Opt. Comm. 1994. V. 112. P. 151.
- [4] Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю., Сергеев А.С., Аржанников А.В., Синицкий С.Л. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 16. С. 8.
- [5] Agarin N.V., Arzhannikov A.V., Bobylev V.B., Ivanenko V.G. et al. // Proc. of the IV Int. Workshop "Strong Microwaves in Plasmas". Nizhny Novgorod, Russia, 1999. P. S24.
- [6] Agarin N.V., Arzhannikov A.V., Bobylev V.B., Ivanenko V.G. et al. // Abstracts of the 21st Int. FEL Conf. Hamburg, Germany, 1999. P. Mo-O-04.
- [7] Phelps A.D.R., Cross A.W., Robb G.R.M., Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S., Konoplev I.V. // Proc. of 19th Int. FEL Conf. Beijing, China, 1997. P. II-122.