

# Features of a double-resonance phenomenon: coherent self-mode locking in a symmetric heterolaser of C class

- By means of numerical modeling of the Maxwell-Bloch equations, we show that there is a new parametric coherent mechanism of self-mode-locking in a **CW superradiant laser with a low-Q distributed-feedback Fabry-Perot cavity** and an active medium in which the active-center polarization (optical dipole) lifetime exceeds the photon lifetime in the cavity (a class C laser).
- According to this mechanism, the intracavity soliton formation and, hence, a periodic lasing is possible without using any mode-locking technique (passive or active) if there is a **parametric resonance**, i.e., two non-stationary, broadband superradiant modes have the frequency spacing approximately two time greater than that of the quasi-equidistant quasi-stationary modes.
- Simultaneously (under specified parameters of the cavity, active medium and pumping) a lasing of more rarified periodic train of coherent superradiant pulses is possible which makes the self-mode-locking quite stable under the condition of a **timing resonance** when the ratio of periods in the superradiant-pulse and soliton-pulse trains is an integer.
- Thus, we predict superradiant lasing of two frequency combs with integer-fold spacings under the condition of the **double resonance** when (i) the quasi-monochromatic modes have an intermode spacing two times less than a frequency spacing between some discrete components of the two superradiant modes and (ii) the pulse-repetition interval in the oscillogram of each superradiant mode is a multiple of the pulse-repetition cycle of the self-mode-locked solitons, i.e., the cavity round-trip period.

- **References**

1. VI.V. Kocharovskiy, V.V. Zheleznyakov, E.R. Kocharovskaya, and V.V. Kocharovskiy, "Superradiance: the principles of generation and implementation in lasers", *Physics Uspekhi* **60**, 345-384 (2017).
2. V.V. Kocharovskiy, A.V. Mishin, A.F. Seleznev, E.R. Kocharovskaya, and VI.V. Kocharovskiy, "Parametric effect in a superradiant laser with mode self-synchronization", *Theor. Math. Phys.* **203**, 483-500 (2020).
3. E.R. Kocharovskaya, A.V. Mishin, A.F. Seleznev, V.V. Kocharovskiy, and VI.V. Kocharovskiy, "Coexistence of coherent pulses formed by the superradiant and quasistationary modes in a laser with a low-Q cavity", *Radiophysics and Quantum Electronics* **63**, 887-907 (2020).
4. E.R. Kocharovskaya, V.A. Kukushkin, A.V. Mishin, VI.V. Kocharovskiy, and V.V. Kocharovskiy, "Dependence of lasing spectrum and self-mode-locking on a width of the photonic bandgap in a class C heterolaser with distributed feedback of waves in a Fabry-Perot cavity", *Semiconductors* **55**, n. 9 758-765 (2021).

# ОСОБЕННОСТИ ЯВЛЕНИЯ ДВОЙНОГО РЕЗОНАНСА ПРИ КОГЕРЕНТНОЙ САМОСИНХРОНИЗАЦИИ МОД В СИММЕТРИЧНОМ ГЕТЕРОЛАЗЕРЕ КЛАССА С

Е.Р. Кочаровская, А.В. Мишин, А.Ф. Селезнёв

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

katya@appl.sci-nnov.ru

В сверхизлучающих гетеролазерах класса С с низкодобротным комбинированным резонатором Фабри-Перо с распределенной обратной связью встречных волн возможен **уникальный режим одновременной генерации** квазипериодических последовательностей когерентных импульсов разного типа, имеющих сравнимые средние мощности:

а) **импульсов сверхизлучения** и б) **солитоноподобных импульсов**, образованных группами самосинхронизованных квазистационарных мод. Нами исследован случай симметричного резонатора с двумя сверхизлучательными модами, когда 1) их разность частот вдвое превышает межмодовый интервал на крыльях спектра (*параметрический резонанс*) и возникает когерентная синхронизация части мод, 2) период следования импульсов сверхизлучения кратен времени обхода резонатора светом (*временной резонанс*) и синхронизируется наибольшее число квазиэквидистантных мод обеих крыльев спектра.

На основе численного решения уравнений Максвелла-Блоха в условиях указанного *двойного резонанса* проанализированы динамические спектры и формы импульсов двух последовательностей, а также их разложение по эмпирическим ортогональным функциям. Установлено, что имеет место взаимное фазирование и синхронизация импульсов обеих последовательностей и наличие двух кратных частично когерентных гребёнок спектра генерации лазера (время когерентности достигает сотен периодов обхода резонатора).

# Одномерные уравнения Максвелла-Блоха для эволюции поля, поляризации и инверсии населенностей уровней активной среды

*приближение двух встречных волн*

$$\left[ \frac{\partial}{\partial \tau} \pm \frac{\partial}{\partial \zeta} \right] a_{\pm} = i\beta a_{\mp} + i \int_{-2\Delta_0}^{2\Delta_0} p_{\pm}(\Delta) f(\Delta) d\Delta / \sqrt{I},$$

$$\left[ \frac{\partial}{\partial \tau} + \Gamma_2 + i\Delta \right] p_{\pm}(\Delta) = -\sqrt{I} \left( in(\Delta) a_{\pm} \pm \frac{n_z^{1,*}(\Delta)}{2} a_{\mp} \right),$$

$$\left[ \frac{\partial}{\partial \tau} + \Gamma_1 \right] (n(\Delta) - n_p) = -\sqrt{I} \text{Im} \left( a_+ p_+^*(\Delta) + a_- p_-^*(\Delta) \right),$$

$$\left[ \frac{\partial}{\partial \tau} + \Gamma_1 \right] n_z(\Delta) = \sqrt{I} \left( a_- p_+(\Delta) - a_+ p_-(\Delta) \right).$$

**граничные условия:**

$$\begin{aligned} a_+(\tau, -L/2) &= R_1 a_-(\tau, -L/2) \\ a_-(\tau, L/2) &= R_2 a_+(\tau, L/2) \end{aligned}$$

**начальные условия:**

$$\begin{aligned} n|_{\tau=0} &= 1, \quad p_{\pm}|_{\tau=0} = p_0 \\ n_z|_{\tau=0} &= 0, \quad a_{\pm}|_{\tau=0} = a_0 \end{aligned}$$

$\Delta$  - отстройка частоты внутри полосы неоднородного уширения, описываемой функцией Лоренца

$$f(\Delta) = \frac{\Delta_0}{\pi(\Delta^2 + \Delta_0^2)}$$

$$\begin{aligned} E &= \text{Re} \left[ x_0 \left( A_+(z,t) e^{ik_0 z} + A_-(z,t) e^{-ik_0 z} \right) e^{-i\omega_0 t} \right], \\ P &= \text{Re} \left[ x_0 \left( P_+(z,t,\Delta) e^{ik_0 z} + P_-(z,t,\Delta) e^{-ik_0 z} \right) e^{-i\omega_0 t} \right], \\ N/(N_0 f(\Delta)) &= n(\Delta) + \text{Im} \left[ n_z(\Delta) e^{2ik_0 z} \right] \end{aligned}$$

Нелинейная неоднородная квазипериодическая (с периодом  $\lambda/2$ ) модуляция инверсии населенности обусловлена биениями встречных волн, зависящими от периодической модуляции **диэлектрической проницаемости структуры.**

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon} \text{Re} [1 + 4\bar{\beta} \exp(2i\kappa_0 \zeta)]$$

$\beta = \bar{\beta} / \sqrt{I}$  - коэффициент связи встречных волн (ширина запрещенной зоны частот)

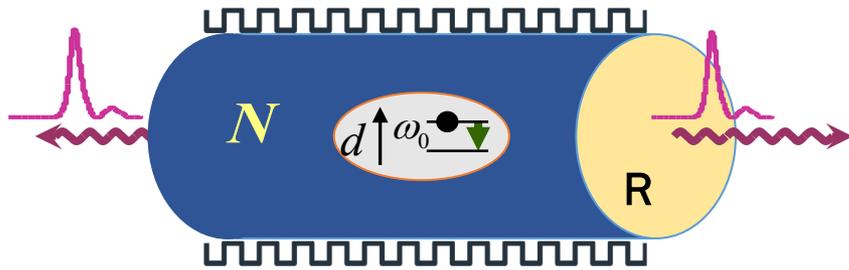
$$\tau = t\omega_c, \quad \zeta = z\omega_c \sqrt{\bar{\varepsilon}} / c, \quad L = B\omega_c \sqrt{\bar{\varepsilon}} / c$$

$$p_{\pm} = P_{\pm} / (dN_0 f(\Delta)), \quad a_{\pm} = A_{\pm} \bar{\varepsilon} / 2\pi dN_0$$

$$N/(N_0 f(\Delta)) = n + \text{Im} [n_z \exp(2i\kappa_0 \zeta)]$$

$$\Gamma_{1,2} = (T_{1,2} \omega_c)^{-1}, \quad \kappa_0 = 2\pi c / \omega_c \lambda \bar{\varepsilon}$$

# Модовое сверхизлучение в низкодобротном комбинированном резонаторе Фабри-Перо с распределенной обратной связью волн

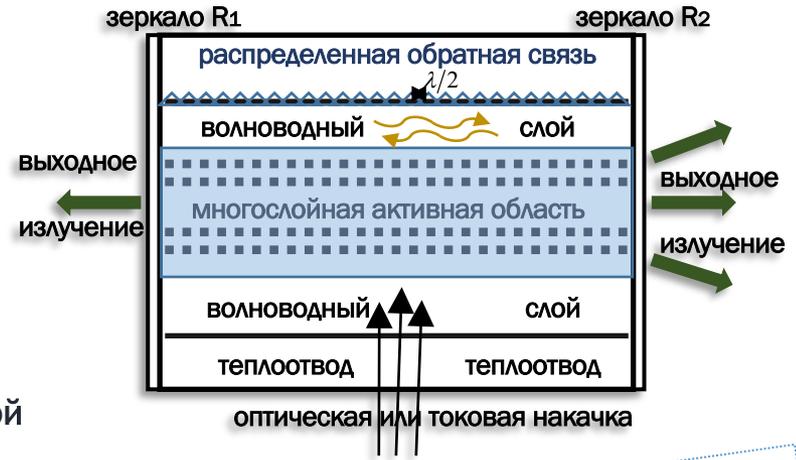


$$\omega_c = \left( 2\pi d^2 \omega_0 \Delta N / \bar{\epsilon} \hbar \right)^{1/2} \text{ кооперативная частота}$$

необходимые условия существования сверхизлучения в активной среде с неоднородным уширением спектральной линии

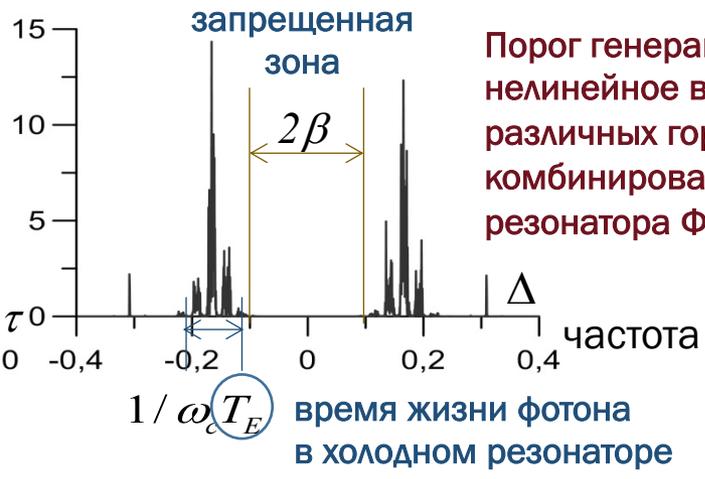
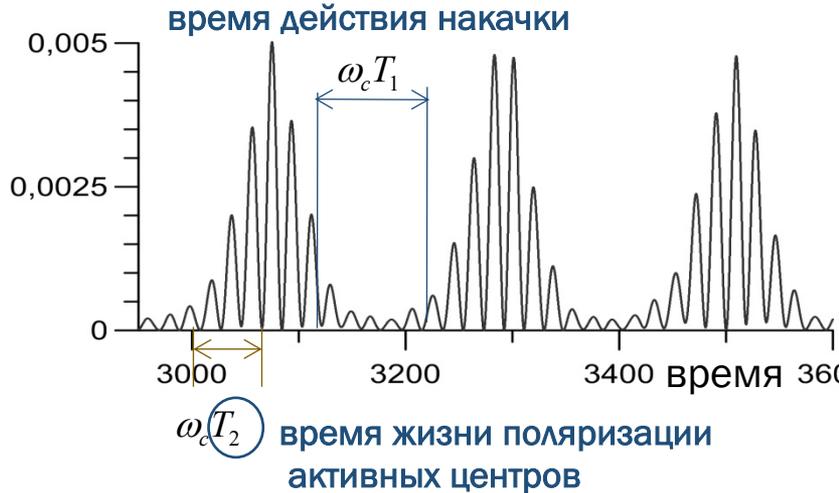
$$\omega_c^2 T_2^2, \omega_c^2 T_2 T_2^* \gg 1$$

$$\omega_c^2 T_2^* T_E > 1$$



УФН, 187(4), 367 (2017)

## Сверхизлучательная генерация при постоянной накачке активной среды



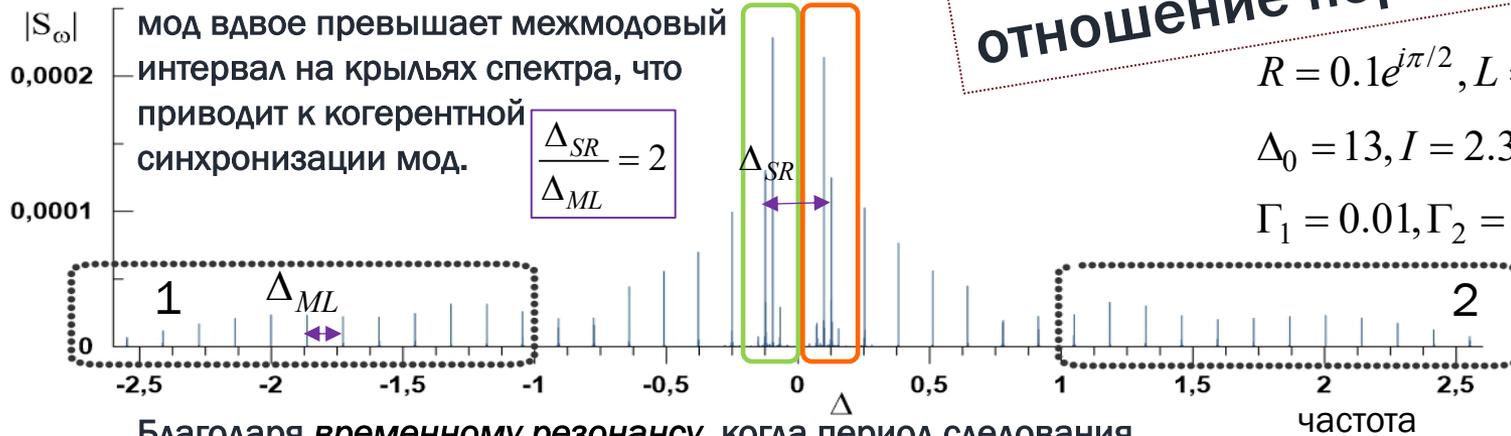
Порог генерации и нелинейное возбуждение различных горячих мод комбинированного резонатора ФП-РОС

# Дискретный спектр и осциллограммы последовательностей солитонов и цугов сверхизлучательных импульсов

**Параметрический резонанс:**

разность частот сверхизлучательных мод вдвое превышает межмодовый интервал на крыльях спектра, что приводит к когерентной синхронизации мод.

$$\frac{\Delta_{SR}}{\Delta_{ML}} = 2$$



$$R = 0.1e^{i\pi/2}, L = 22.5, \beta = 0.04,$$

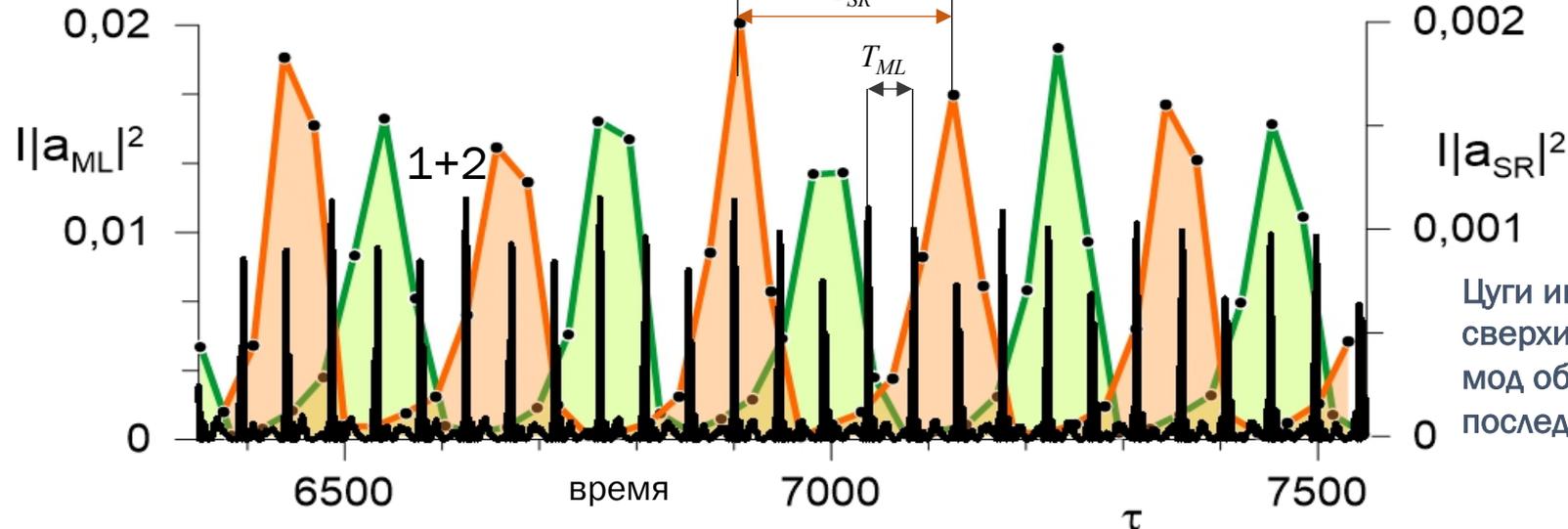
$$\Delta_0 = 13, I = 2.3 \cdot 10^{-6}, n_p = 1,$$

$$\Gamma_1 = 0.01, \Gamma_2 = 0.03$$

Благодаря *временному резонансу*, когда период следования цугов импульсов сверхизлучения кратен времени обхода резонатора светом, синхронизируется наибольшее число квазиэквидистантных мод.

Отношение периодов следования цугов импульсов сверхизлучения и солитонов

$$K = \frac{T_{SR}}{T_{ML}}$$



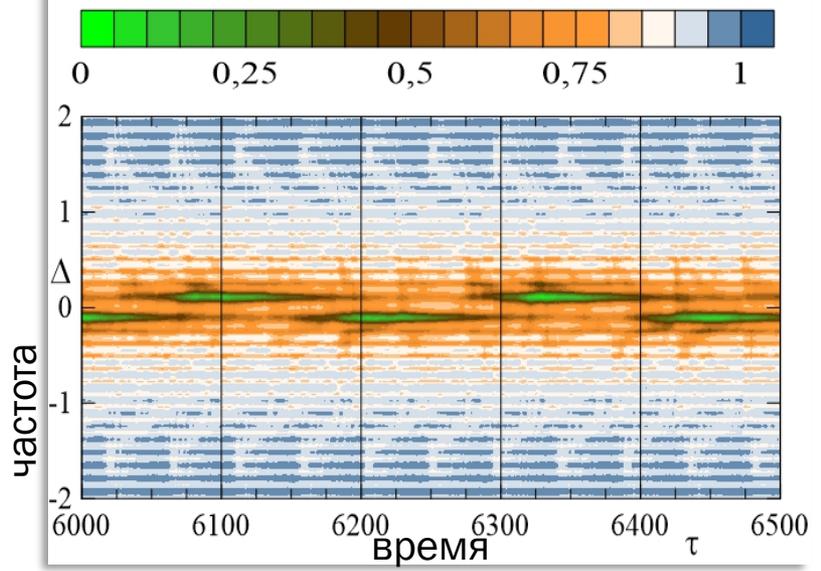
Цуги импульсов двух сверхизлучательных мод образуют единую последовательность.

# Сверхизлучательная генерация и самосинхронизация мод

отношение периодов  $K=5$

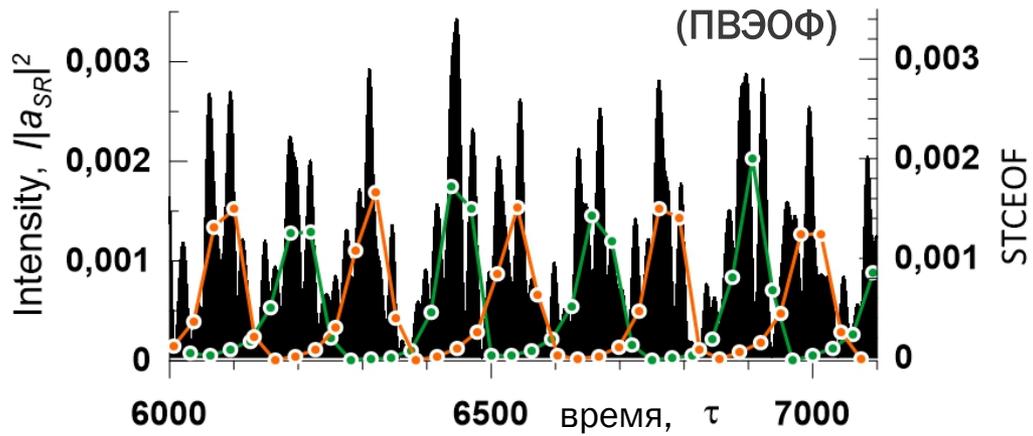
Динамический спектр инверсии

$n(\Delta, \tau)$  активных центров



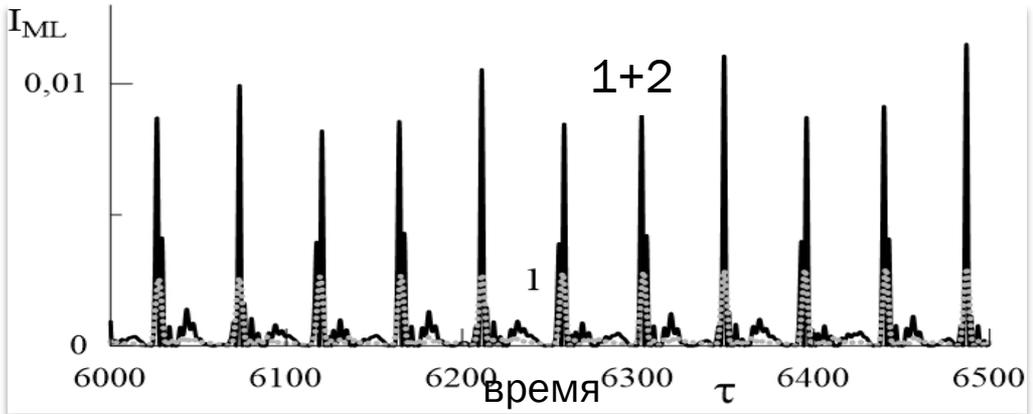
Короткие импульсы сверхизлучения, имея широкий спектр и когерентно взаимодействуя, синхронизируют квазистационарные чирпированные моды на крыльях спектра, которые в свою очередь стимулируют высвечивание цугов сверхизлучения в противофазе.

Интенсивность поля сверхизлучательных мод (ПВЭОФ)



Самосинхронизованные моды

(1) спектрального крыла  $\Delta > 1$  и (1+2) объединенных крыльев спектра  $|\Delta| > 1$



Солитоны из спектральных интервалов 1 и 2 одинаковы. Высвечиваясь когерентно, они создают общие солитоны с интенсивностью в 3-4 раза большей, чем собственная. Это говорит о хорошей фазовой синхронизации модами с противоположных крыльев спектра.

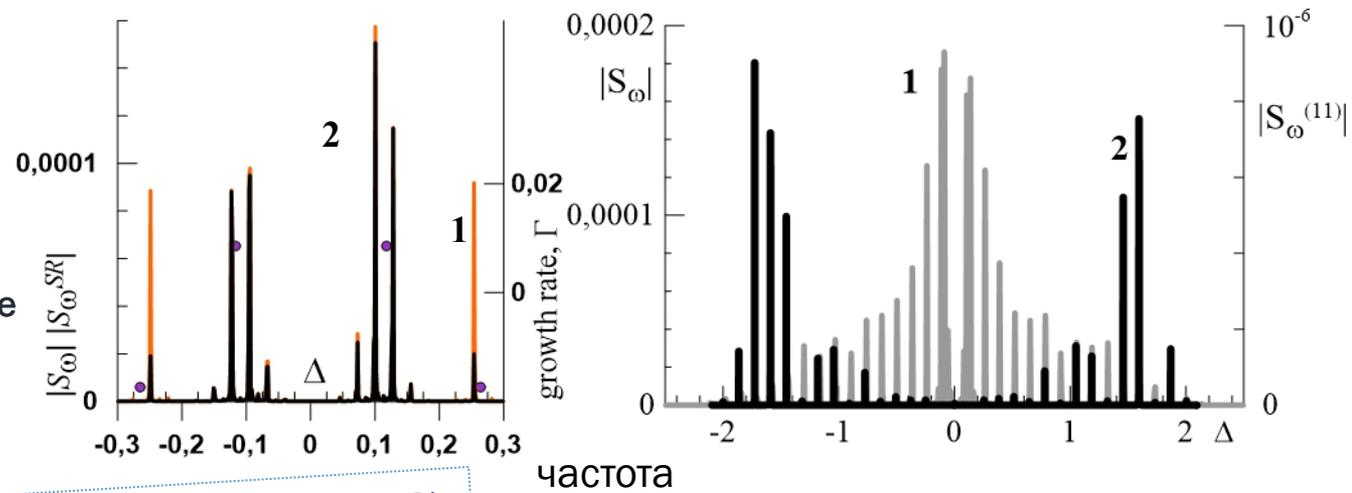
$$(R = 0.1e^{j\pi/2}, L = 22.5, \beta = 0.04, \Delta_0 = 13, I = 2.3 \cdot 10^{-6}, n_p = 1, \Gamma_1 = 0.01, \Gamma_2 = 0.03)$$

ТМФ, т. 203, 56 (2020)

# Эмпирические ортогональные функции пространственно-временной эволюции поля и частотно-временного распределения поляризации активной среды

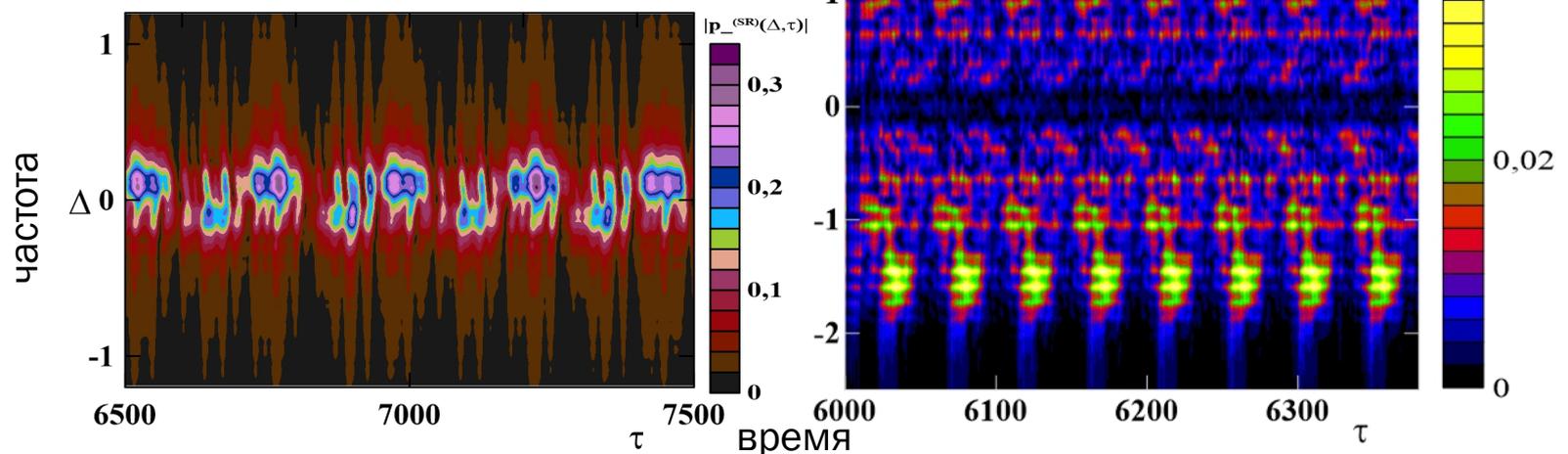
Спектры полного поля в режиме установившейся генерации (1) и 1-й и 11-й пространственно-временных эмпирических функций поля (ПВЭОФ) (2)

При помощи современного корреляционного анализа на основе базиса эмпирических ортогональных функций выделены спектры и пространственные структуры поля отдельных мод или групп мод, установлены динамические спектры поляризации активных центров в сверхизлучающих и самосинхронизованных модах.

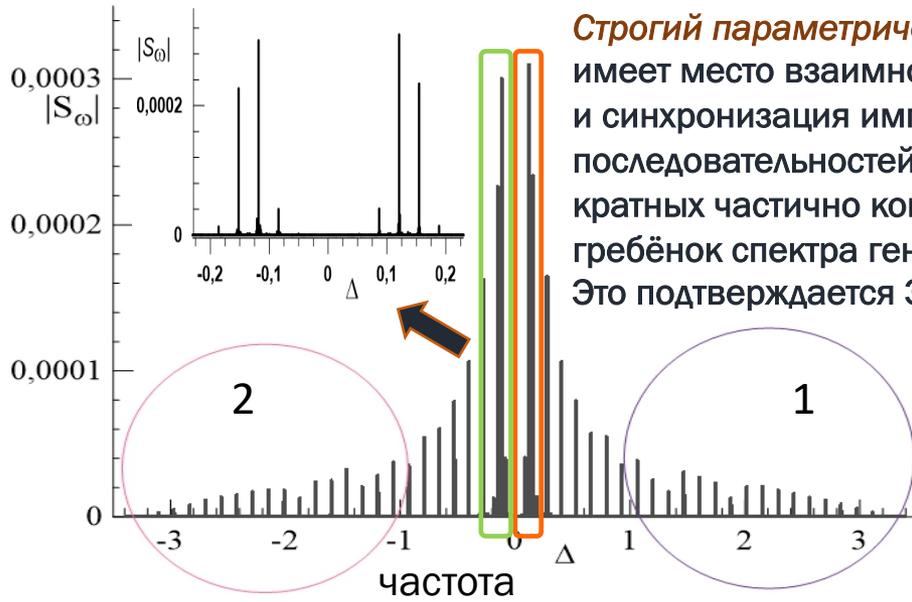


Изв.вузов. Радиофизика, Т. 51(11), 906 (2018)

Динамические спектры 1-й и 12-й частотно-временных эмпирической функции (ЧВЭОФ) поляризации активных центров



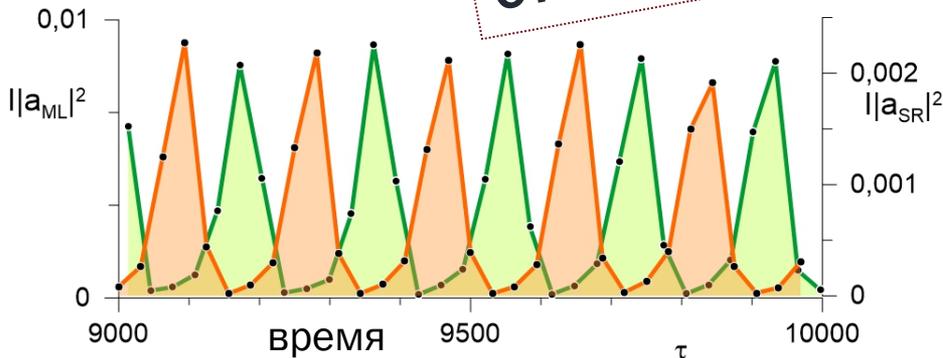
# Дискретный спектр и осциллограммы последовательностей солитонов и цугов сверхизлучательных импульсов



$$R = 0.1e^{i\pi/2}, L = 22.5, \beta = 0.07,$$

$$\Delta_0 = 13, I = 2.3 \cdot 10^{-6}, n_p = 1,$$

$$\Gamma_1 = 0.0088, \Gamma_2 = 0.03$$



отношение периодов  $K=4$

## Последовательности солитонов различных групп мод

