

*Гинзбург Н.С., Зотова И.В.,  
Розенталь Р.М., Сергеев А.С.  
Институт прикладной физики РАН*

## **Генерация хаотических сигналов на основе широкополосных гиро-усилителей миллиметрового диапазона с винтовым гофрированным волноводом**

*Показана возможность генерации шумоподобного излучения в широкополосной гири-ЛБВ с винтовым гофрированным волноводом при введении запаздывающей обратной связи. Найдены условия перехода к режимам более развитого хаоса. Сделаны оценки для экспериментально реализованной гири-ЛБВ диапазона 35 ГГц, согласно которым возможно получение хаотического излучения со средней мощностью до 70 кВт при КПД порядка 10% и шириной спектра 3-4 ГГц.*

**Ключевые слова:** гири-ЛБВ, хаотические сигналы, миллиметровое излучение.

Разработанные в ИПФ РАН гири-ЛБВ с рабочим пространством в виде волновода с многозаходной гофрировкой, на которой осуществляется связь бегущей и квазикритической волн [1], обладают рядом уникальных характеристик, включая мощность, эффективность, рабочий диапазон и ширину полосы усиления. Наряду со многими другими приложениями привлекательно использование таких усилителей для генерации хаотических сигналов, что может быть достигнуто при введении дополнительной запаздывающей обратной связи.

Практическим достоинством использования гири-ЛБВ является то, что в отличие от черенковских ЛБВ типа «О», естественным диапазоном их работы является миллиметровый, а в перспективе субмиллиметровый диапазоны [2,3]. С другой стороны, для этих устройств развиты динамические модели [4], которые позволяют описать усиление многочастотных сигналов с учетом реальной дисперсии электродинамической системы, конечности полосы усиления, эффектов нелинейного насыщения усиления и т.д. Настоящая работа посвящена демонстрации возможности получения хаотических сигналов на основе широкополосных гири-усилителей с запаздывающей обратной связью.

В исследуемом классе гири-ЛБВ приосевой винтовой электронный пучок движется в волноводе с винтовой гофрировкой поверхности  $r(\varphi, z) = r_0 + \tilde{r} \cos(\bar{m}\varphi - \bar{h}z)$ , где  $r_0$  – средний радиус волновода,  $\tilde{r}$  – амплитуда и  $\bar{m}$  – число заходов гофрировки,  $\bar{h} = 2\pi/d$ ,  $d$  – период гофра. Следуя [1], будем предполагать, что гофрировка обеспечивает связь и взаимное рассеяние двух противоположно вращающихся ТЕ мод цилиндрического волновода, первая из которых является квазикритической (А), а вторая – бегущей (В). Для осуществления такой связи необходимо выполнение условия брегговского резонанса  $\bar{m} = m_A + m_B$ ,  $\bar{h} \approx h_B$ , где  $m_{A,B}$  – азимутальные индексы мод,  $h_B$  – продольное волновое число моды В ( $h_A \rightarrow 0$ ). Соответственно, электрические поля парциальных волн могут быть представлены в виде:

$$\vec{E}_A = \text{Re}\left(A(z, t)\vec{E}_\perp^A(r)e^{i(\omega_A t - m_A \varphi)}\right), \vec{E}_B = \text{Re}\left(B(z, t)\vec{E}_\perp^B(r)e^{i(\omega_A t - h_B z + m_B \varphi)}\right) \quad (1)$$

где  $A, B(z, t)$  – медленно меняющиеся амплитуды, функции  $\vec{E}_{\perp}^{A,B}(r)$  описывают радиальную структуру волн, соответствующую модам гладкого волновода.

Для селективного возбуждения связки мод (1) необходимо использование приосевого электронного пучка, частицы которого движутся в однородном магнитном поле по винтовым траекториям вокруг общей оси, совпадающей с осью электродинамической системы. Такие пучки резонансно взаимодействуют только с попутно вращающимися модами круглого волновода с азимутальным индексом  $m$ , совпадающим с номером циклотронной гармоники  $s$ . Процесс усиления нестационарных сигналов можно описать на основе следующей самосогласованной системы уравнений [4]

$$\begin{aligned} i \frac{g^2}{4} \frac{\partial^2 a}{\partial Z^2} + \frac{\partial a}{\partial \tau} + i \hat{\alpha} b &= \frac{G}{2\pi} \int_0^{2\pi} p^s d\theta_0 \\ \left( \frac{h_0}{\beta_{\perp 0} \kappa_A} \frac{\partial}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial \tau} \right) b - i \hat{\Delta}_g b + i \hat{\alpha} a &= 0 \\ \left( \frac{\partial}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial \tau} \right) p + i \frac{p}{s} (\Delta - 1 + |p|^2) &= i a (p^*)^{s-1} \end{aligned} \quad (2)$$

где введены следующие обозначения:  $Z = \kappa_A z \beta_{\perp 0}^2 / 2\beta_{\perp 0}$ ,  $\tau = \omega_A t \beta_{\perp 0}^2 / 2$ ,  $a, b = (e/mc^2) (s^s / 2^{s-1} s!) (\beta_{\perp 0}^{s-4} / \gamma_0) \hat{A}, \hat{B}$ ,  $\hat{A} = eA/mc^2 \kappa_A$ ,  $\hat{B} = \sqrt{N_B/N_A} eB/mc^2 \kappa_B$ ,  $\hat{\Delta}_g = \Delta_g 2h_0 / \kappa_A \beta_{\perp 0}^2$ ,  $\hat{\alpha} = (\tilde{r} / \beta_{\perp 0}^2 r_0) (v_B^2 - m_A m_B) / \sqrt{(v_A^2 - m_A^2)(v_B^2 - m_B^2)}$  – коэффициент связи парциальных волн на гофрированной поверхности,  $N_{A,B} = (v_{A,B}^2 - m_{A,B}^2) J_{m_{A,B}}^2(v_{A,B})$  – безразмерные нормы волн,  $\kappa_{A,B} = v_{A,B} / r_0$  – поперечные волновые числа парциальных волн,  $v_{A,B}$  – корни производных функций Бесселя  $J'_{m_A}(v_A) = J'_{m_B}(v_B) = 0$ ,  $\Delta_g = (\bar{h} - h_0) / \kappa_A$  – геометрическая расстройка,  $h_0 = h_B(\omega_A)$ ,  $V_{gr} = \beta_{gr} c = h_0 c / \kappa_A$  – групповая скорость бегущей волны В на частоте отсечки  $\omega_A$  моды А,  $G = 16(eI_b / mc^3 N_A) (\beta_{\perp 0}^{2s-6} / \beta_{\perp 0} \gamma_0) (s^s / 2^s s!)^2$  – параметр тока,  $\Delta = 2(\omega_A - s\omega_H^0) / \omega_A \beta_{\perp 0}^2$  – расстройка циклотронного резонанса.

При записи граничных условий считалось, что в сечении  $Z=0$  электроны равномерно распределены по фазам циклотронного вращения и не имеют начального разброса по поперечным скоростям  $p(Z=0) = \exp(i\theta_0)$ ,  $\theta_0 \in [0, 2\pi)$ . Для квазикритической волны А на границах пространства взаимодействия ставятся условия излучения

$$\left( a \mp \sqrt{\frac{2\beta_{\perp 0}^2}{i\pi\beta_{\perp 0}^2}} \int_0^{\tau} \frac{e^{-\hat{\alpha}(\tau-\tau')}}{\sqrt{\tau-\tau'}} \frac{\partial a(Z, \tau')}{\partial Z} d\tau' \right) \Bigg|_{Z=0,L} = 0 \quad (3)$$

где  $L = \kappa_A l \beta_{\perp 0}^2 / 2\beta_{\perp 0}$  – нормированная длина гофрированного волновода протяженностью  $l$ . Ввод сигнала в усилитель осуществляется через бегущую парциальную волну В, через эту же волну осуществляется вывод излучения. Таким образом, для учета запаздывающей обратной связи уравнения (2) следует дополнить граничным условием

$$b(Z=0, \tau) = R \cdot b(Z=L, \tau - T) \quad (4)$$

где  $R$  – коэффициент передачи,  $T$  – нормированное время задержки сигнала.

На основании самосогласованных уравнений (2) с граничными условиями (3),(4) была рассмотрена динамика системы при значениях параметров  $L=23$ ,  $G=0.04$ ,  $\hat{\alpha} = 2.1$ ,  $\hat{\Delta}_g = 1.15$  соответствующих экспериментально реализованной гиро-ЛБВ диапазона 35 ГГц, запитываемой приосевым винтовым электронным пучком с энергией 70 кэВ, током 10 А и

питч-фактором  $g=1.2$  [5]. При моделировании использовалось значение нормированного времени задержки  $T=20$ , что соответствует физическому времени прохождения сигнала по цепи обратной связи  $\sim 3.2$  ns.

На Рис.1а показана дисперсионная характеристика гофрированного волновода, использованного в данном усилителе, которая совмещена с частотной зависимостью коэффициента усиления при значении расстройки циклотронного резонанса  $\Delta=1.88$ , соответствующей максимально широкой полосе. При выбранной времени задержки в полосу усиления попадает более двух десятков "холодных" собственных мод системы (рис.1b), расстояние между которыми в первом приближении определяется выражением  $\Delta\Omega \approx 2\pi/(L+T)$ .

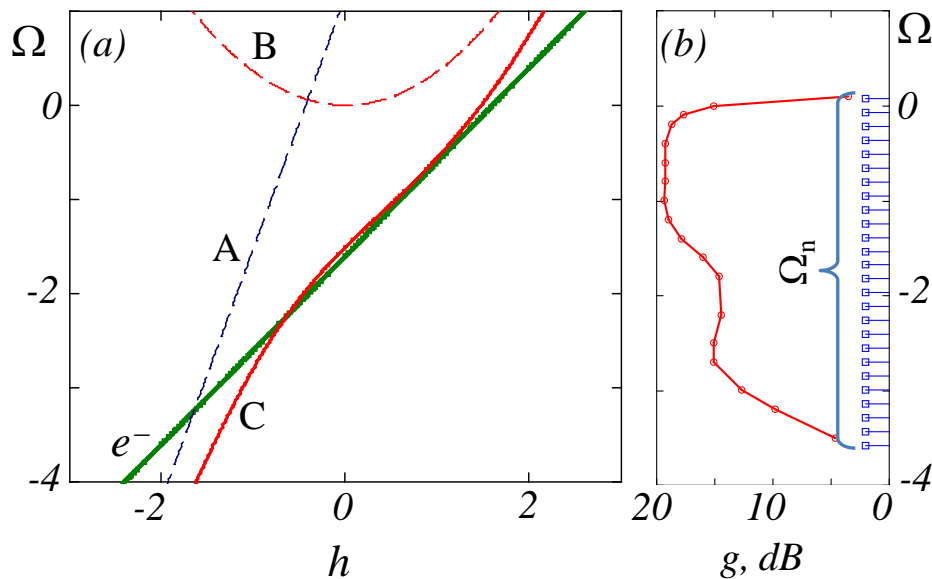


Рис.1. (a) - дисперсионная характеристика исследуемой gyro-ЛБВ ( $e^-$  - электронная волна, А,В - бегущая и квазикритическая парциальные волны, С - синхронная нормальная волна); (b) - полоса усиления gyro-ЛБВ в отсутствии обратной связи ( $\Delta=1.88$ ,  $b_{in}=0.01$ ),  $\Omega_n$  – частоты собственных мод gyro-ЛБВ с запаздывающей обратной связью при  $T=20$ .

Моделирование показывает, что оптимальным с точки зрения генерации хаотического излучения, является режим с максимальным спадом амплитудной характеристики усилителя после насыщения, который реализуется при расстройке  $\Delta=1.6$ .

В этом режиме самовозбуждение колебаний происходит при значениях  $R=0.04$ . При  $R=0.14$  возникает периодическая автомодуляция (рис.2а), хаотизация колебаний происходит при значениях  $R=0.24$  (рис.2b), а в интервалах значений коэффициента передачи  $R=0.45-0.65$  и  $R>0.81$  реализуются режимы "развитого" хаоса, когда на фазовом портрете отсутствуют какие-либо крупномасштабные структуры (рис.2е).

Максимальное значение электронного КПД в режимах хаотической генерации достигается при значениях  $\Delta \approx 1.6$ ,  $R \approx 0.62$  и составляет  $\eta \approx 0.1$ . Оценки показывают, что при использовании экспериментально реализованного в ИПФ РАН усилителя диапазона 35 ГГц, путем введения обратной связи с временем запаздывания  $\sim 3$  нс и уровнем сигнала 0.25-0.35 от уровня выходной мощности, возможно получение хаотического излучения со средней мощностью до 70 кВт и КПД порядка 10% и шириной спектра 3-4 ГГц.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-02-00745.

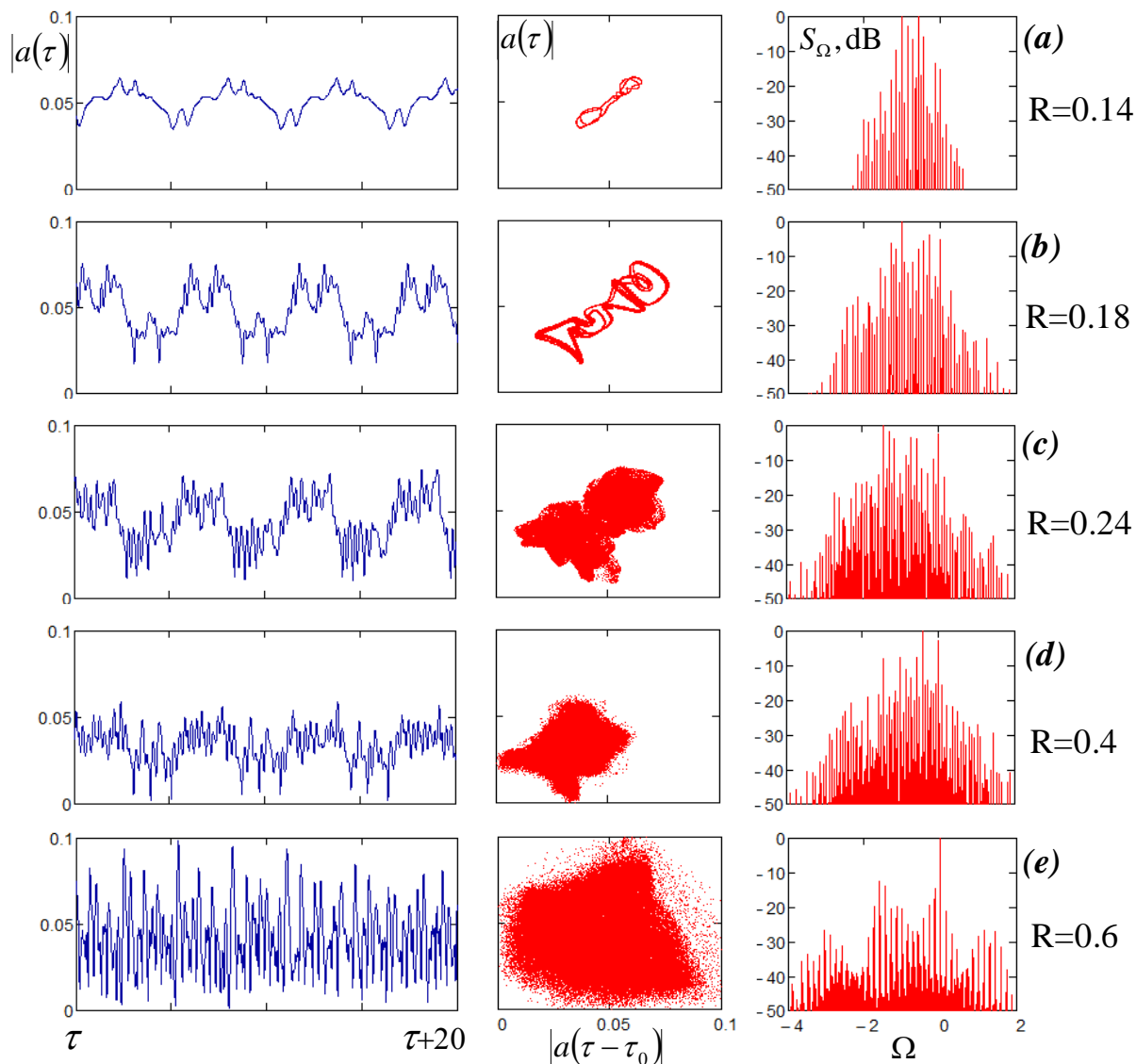


Рис.2. Временная реализация, фазовый портрет и спектр выходного излучения gyro-ЛТБВ с запаздывающей обратной связью при увеличении глубины обратной связи  $R$  ( $\Delta=1.6$ ,  $T=20$ ).

#### Библиографический список

1. G. G. Denisov, V. L. Bratman, A. D. R. Phelps, S. V. Samsonov. Gyro-TWT with a helical operating waveguide: New possibilities to enhance efficiency and frequency bandwidth // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1998. V. 26. No. 3. P. 508-518.
2. G.G. Denisov, S.V. Samsonov, S.V. Mishakin, A.A. Bogdashov. Microwave system for feeding and extracting power to and from a gyrotron traveling-wave tube through one window // IEEE Electron Device Letters. 2014. V. 35. No. 7. P. 789-791.
3. S.V. Mishakin, S.V. Samsonov, G.G. Denisov. A Helical-Waveguide Gyro-TWT at the Third Cyclotron Harmonic // IEEE Transactions on Electron Devices. 2015. V. 62. No. 10. P. 3387-3392.
4. N.S. Ginzburg, I.V. Zotova, A.S. Sergeev, V.Yu. Zaslavsky, I.V. Zheleznov, S.V. Samsonov, S.V. Mishakin. Mechanisms of amplification of ultrashort electromagnetic pulses in gyrotron traveling wave tube with helically corrugated waveguide // Phys.Plasmas. 2015. V. 22. P. 113111.
5. S.V. Samsonov, I.G. Gachev, G.G. Denisov, A.A. Bogdashov, S.V. Mishakin, A.S. Fiks, E.A. Soluyanov, E.M. Tai, Y.V. Dominyuk, B.A. Levitan, V.N. Murzin. Ka-band gyrotron traveling-wave tubes with the highest continuous-wave and average power // IEEE Transactions on Electron Devices. 2014. V. 61. No. 12. P. 4264-4267.