

Розенталь Р.М., Сергеев А.С.
Институт прикладной физики РАН

Генерация широкополосного шумоподобного излучения субтерагерцового диапазона в гиротроне с большой надкритичностью

Исследованы режимы генерации шумового излучения гиротрона субтерагерцового диапазона в рамках нестационарной модели с нефиксированной структурой поля с учетом эффекта "проскальзывания". Показано, что при увеличении надкритичности (отношения рабочего тока к стартовому) до уровня 100 и более раз происходит значительное развитие хаотических режимов генерации в смысле увеличения ширины спектра. Для параметров экспериментального гиротронного стенда ИПФ РАН выполнены расчеты, показывающие возможность получения шумовых СВЧ сигналов в диапазоне 130 ГГц со средней мощностью в сотни ватт при ширине спектра до 10 ГГц.

Ключевые слова: гиротроны, хаотическое излучение, широкополосные сигналы, субтерагерцовый диапазон.

Гиротроны являются наиболее мощными источниками излучения миллиметрового диапазона длин волн, которые находят все более широкое применение в различных областях науки и техники. В последнее время достигнут значительный прогресс в продвижении гиротронов в субмиллиметровый диапазон. Так, при работе на основной гармонике гирочастоты в традиционной схеме цилиндрического гиротрона, а также при работе на гармониках гирочастоты в так называемом гиротроне с большой орбитой получено терагерцовое излучение киловаттного уровня мощности [1,2]. В то же время, представляет интерес создание источников шумового излучения миллиметрового диапазона длин волн, которые могут представлять интерес для таких приложений как перспективные системы радиолокации [3]. Кроме того, в случае достижения ширины спектра 500 и более МГц, такие источники уже относятся к классу сверхширокополосных [4], что значительно расширяет потенциальный диапазон их применений.

Нестационарная динамика гиротронов активно исследуется, начиная с середины 1980-х годов. Однако до последнего времени гиротрон не имел серьезных преимуществ с точки зрения генерации широкополосного шумового излучения по сравнению с уже известными типами таких генераторов (ЛБВ с запаздывающей обратной связью, ЛОВ, виркаторы и др.). Несмотря на неоднократную экспериментальную регистрацию в гиротронах хаотических режимов генерации, ширина спектра последних не превышала величин в несколько десятков, в лучшем случае порядка 100 МГц [5-7].

Вместе с тем, результаты недавних исследований показали, что в гиротронах, в условиях большой надкритичности и при оптимальных значениях расстройек синхронизма, существуют гиперхаотические режимы генерации, характеризующиеся чрезвычайно высокой размерностью хаотических аттракторов, в 5-10 раз превышающей аналогичные величины для генераторов на базе ЛОВ и ЛБВ [8]. Эти результаты дали импульс для более детального исследования динамики гиротронов, применительно к возможности расширения спектра хаотической генерации.

Рассмотрим модель гиротрона, в предположении что винтовой электронный пучок возбуждает одну поперечную моду электродинамической системы, рабочее поле которой записывается в виде $\vec{E} = \text{Re}(A(z, t)\vec{E}_\perp(r)\exp(i\omega_c t - im\varphi))$, где $A(z, t)$ – медленно меняющаяся комплексная амплитуда поля, $\vec{E}_\perp(r)$ – радиальная структура рабочей моды $TE_{m,n}$ цилиндрического волновода с критической частотой ω_c , которая выбрана за несущую. Динамика генератора описывается системой уравнений

$$i \frac{\partial^2 a}{\partial Z^2} + \frac{\partial a}{\partial \tau} + (\sigma(Z) + i\delta(Z))a = \frac{I_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} p^s d\theta_0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial Z} + \frac{g^2}{4} \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{ip}{s} (\Delta - 1 + |p|^2) = -a_{1,2} (p^*)^{s-1}$$

где использованы следующие безразмерные переменные и параметры: $\tau = \frac{\omega_c t \beta_{\perp 0}^4}{8\beta_{\parallel 0}^2}$;

$$Z = \frac{\beta_{\perp 0}^2 \omega_c z}{2\beta_{\parallel 0} c}, \quad a = \frac{eAJ_{m-s}(R_0 \omega_c / c)}{mc\omega_c \gamma_0 \beta_{\perp 0}^3}; \quad p = \frac{p_x + ip_y}{p_{\perp 0}} e^{-i\omega_c t + i(m-s)\varphi}, \quad \Delta = 2(\omega_c - s\omega_H)/\omega_c \beta_{\perp 0}^2$$

– начальная расстройка циклотронного резонанса; $g = V_{\perp 0}/V_{\parallel 0}$ – питч-фактор; $V_{\perp 0} = \beta_{\perp 0} c$ и $V_{\parallel 0} = \beta_{\parallel 0} c$ – поперечная и продольная скорость электронов на входе в пространство

взаимодействия, $I_0 = 64 \frac{eI_b}{mc^3} \frac{\beta_{\parallel 0} \beta_{\perp 0}^{2(s-4)}}{\gamma_0} \left(\frac{s^s}{2^s s!} \right)^2 \frac{J_{m-s}^2(R_0 \omega_c / c)}{(v_n^2 - m^2) J_m^2(v)}$ – фактор возбуждения,

записанный в предположении, что электронные пучки гиротронов имеют трубчатую конфигурацию с радиусом инжекции R_0 , I_b – ток пучка, v_n – n -й корень уравнения $dJ_m(x)/dx = 0$, где $J_m(x)$ – функция Бесселя.

Функция $\delta(Z) = 8\beta_{\parallel 0}^2 (\omega_c - \omega_c(Z))/\beta_{\perp 0}^4 \omega_c$ определяет профиль электродинамической системы, $\omega_c(Z) = c v_n / R(Z)$, где $R(Z)$ – зависимость радиуса резонатора от продольной координаты. Функция $\sigma(Z)$ описывает профиль омических потерь вследствие конечной проводимости стенок электродинамической системы.

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 $p(Z=0) = \exp(i\theta_0)$, $\theta_0 \in [0, 2\pi)$. На концах рабочего пространства в автономной режиме использовались излучательные граничные условия:

$$a(0, \tau) - \frac{1}{\sqrt{\pi i}} \int_0^\tau \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau'}} \frac{\partial a(0, \tau')}{\partial Z} d\tau' = 0, \quad a(L, \tau) + \frac{1}{\sqrt{\pi i}} \int_0^\tau \frac{e^{-i\delta(L)(\tau - \tau')}}{\sqrt{\tau - \tau'}} \frac{\partial a(L, \tau')}{\partial Z} d\tau' = 0 \quad (2)$$

На основании самосогласованных уравнений (1) с граничными условиями (2) была рассмотрена динамика гиротрона, запитываемого приосевым электронным пучком с энергией 30 кэВ, током 0.7 А, питч-фактором 0.7 и длиной однородного участка магнитного поля 5 см [9]. Для создания большой надкритичности была выбрана достаточно низкая рабочая мода TE_{12} с рабочей частотой 127.3 ГГц. Значения нормированных параметров при этом составили: $I_0 = 0.059$, $L = 27.9$, $\sigma(Z) = 0.0032$.

Известно, что оптимальной для получения автомодуляционных и стохастических режимов генерации является область отрицательных расстройек $\Delta < 0$, где электронный пучок находится в основном в синхронизме с распространяющейся навстречу компонентой электромагнитного поля резонатора, обеспечивающей внутреннюю распределенную обратную связь [10]. Моделирование показывает, что при расстройке $\Delta = -4.1$,

соответствующей магнитному полю $H=4.87$ Т, самовозбуждение колебаний происходит при значениях тока $I_b \approx 0.005$ А (рис.1а). При $I_b \approx 0.024$ А возникает периодическая автомодуляция (рис.1б), хаотизация колебаний происходит при значениях $I_b \approx 0.12$ А (рис.2д).

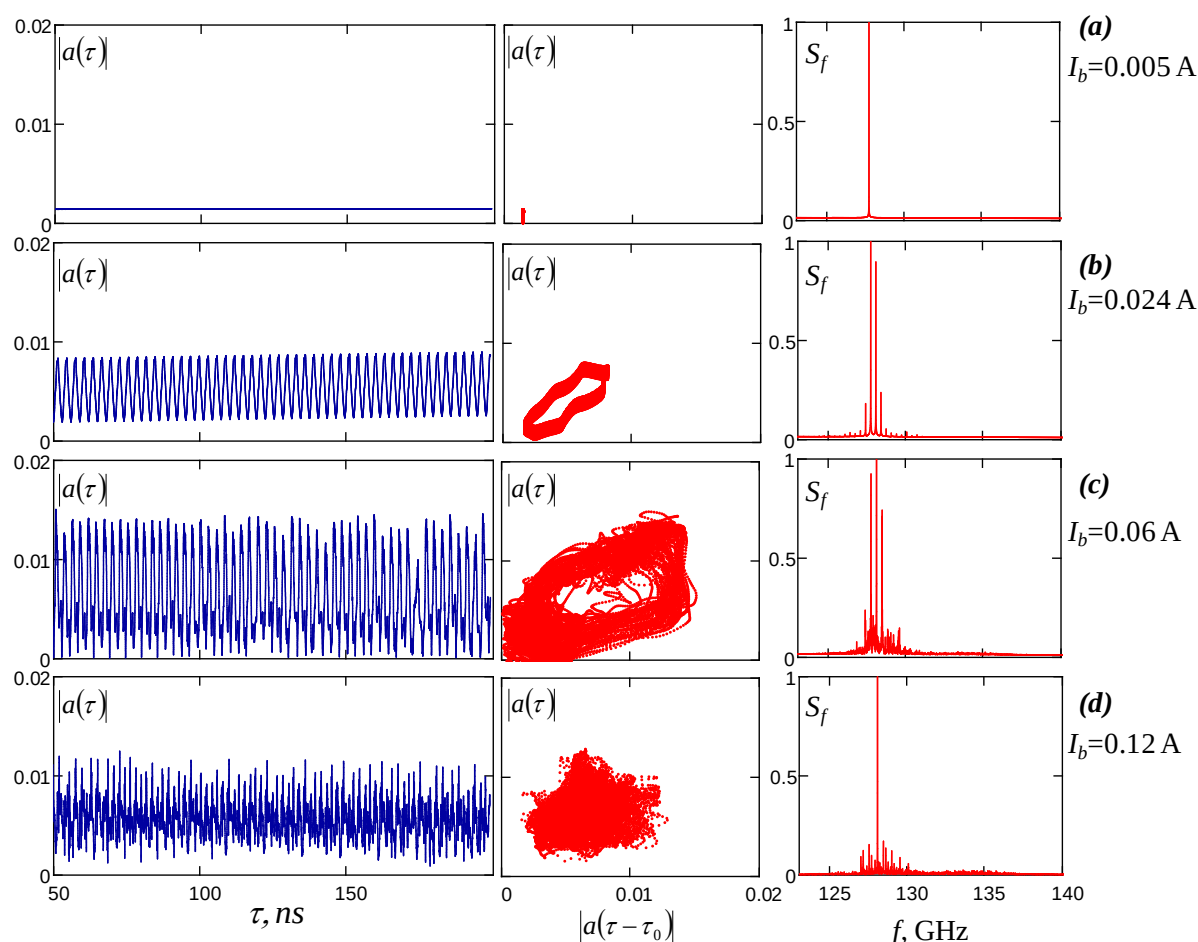


Рис.1. Временная реализация, фазовый портрет и спектр выходного излучения субтерагерцового гиротрона при переходе к хаотическому режиму генерации ($H=4.87$ Т).

Вместе с тем, при дальнейшем увеличении рабочего тока происходит существенное развитие режимов хаотических колебаний, с точки зрения ширины спектра генерации (рис.2). Если при значения $I_b < 0.2$ А в спектре выделяются отдельные компоненты с относительно низким шумовым пьедесталом, то при $I_b > 0.3$ А пьедестал существенно возрастает и спектральные компоненты практически перестают выделяться. Одновременно существенно возрастает ширина спектра.

В результате, при увеличении тока до значений 0.7 А ширина спектра хаотической генерации на уровне -10 дБ достигает 10 ГГц. Средний КПД генерации при этом составляет 1.7%, что соответствует выходной мощности около 350 Вт.

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

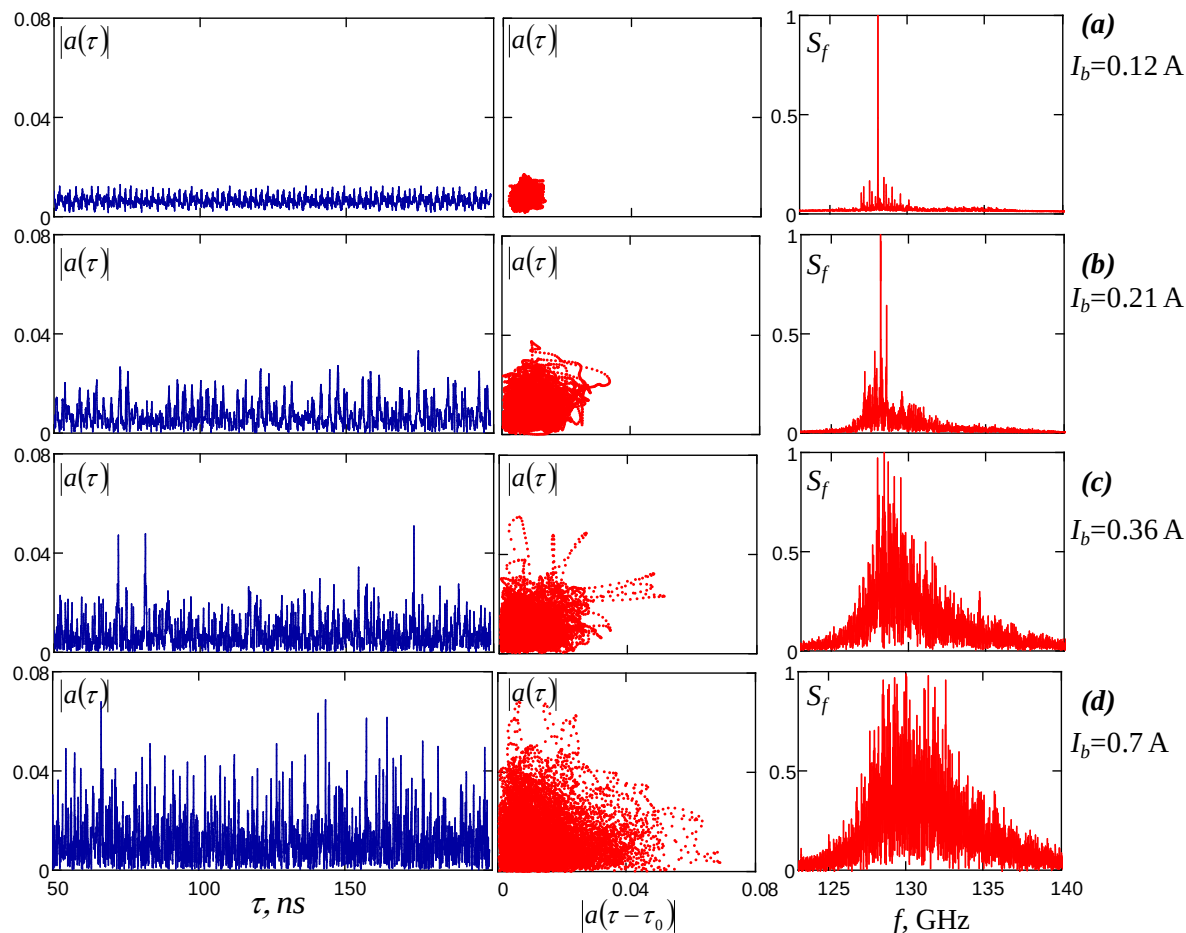


Рис.2. Временная реализация, фазовый портрет и спектр выходного излучения субтерагерцового гиротрона при переходе к развитым хаотическим режимам ($H=4.87$ T).

Библиографический список

1. Глявин М.Ю., Лучинин А.Г. Терагерцовый гиротрон с импульсным магнитным полем // Изв. ВУЗов Радиофизика, 2007, т.50, № 10-11, с.831-838.
2. Bratman V.L., Kalynov Yu.K., Manuilov V.N. Large-Orbit Gyrotron Operation in the Terahertz Frequency Range // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. No. 24. P. 245101.
3. Залогин Н. Н., Калинин В. И., Скарня А.В. Активная локация с использованием широкополосных хаотических сигналов // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2011. Т.3. №1, С.3.
4. IEEE Std 1672-2006 - IEEE Standard for Ultrawideband Radar Definitions.
5. R.M. Rozental, N.I. Zaitsev, I.S. Kulagin, E.V. Ilyakov, N.S. Ginzburg. Nonstationary Processes in an X-Band Relativistic Gyrotron With Delayed Feedback // IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, v.32, no.2, p.418-421.
6. R.M. Rozental, N.S. Ginzburg, M.Y. Glyavin, and A.S. Sergeev. Novel Source of the Chaotic Microwave Radiation Based on the Gyro-Backward-Wave Oscillator // IEEE Transactions on Microwave Theory And Techniques, Vol. 54, No. 6, June 2006, p.2741-2744.
7. S. Alberti et al. Experimental study from linear to chaotic regimes on a terahertz-frequency gyrotron oscillator // Physics of Plasmas 19, 123102 (2012).
8. Е.В. Блохина, А.Г. Рожнев. Хаос и гиперхаос в гиротроне // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2006, т.49, №10, с.887-899.
9. V. L. Bratman, T. Idehara, Yu. K. Kalynov, V. N. Manuilov, S. V. Samsonov, N. A. Zavolsky. Design of a Powerful and Compact THz Oscillator // International Journal of Infrared and Millimeter Waves, August 2006, Volume 27, Issue 8, pp 1063-1071.
10. Гинзбург Н.С., Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запечалов В.Е., Моисеев М.А., Новожилова Ю.В. Использование отражения с запаздыванием для получения автомодуляционных и стохастических режимов генерации в гиротронах миллиметрового диапазона // ЖТФ. 1998. Т.24. №11. С.53-39.