

ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ В ГЕНЕРАТОРАХ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. Г. Курин

*Институт радиопрофики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*
E-mail: mirosh@ire.kharkov.ua

Рассмотрен физический механизм формирования многочастотных сигналов, реализующийся в случаях возбуждения в резонансной системе исследуемого генератора высших мод, образующих несколько вариаций (“пятен”) поля вдоль направления движения электронного потока. Движение электронного потока через такую цепочку пятен поля (“цепочку связанных резонаторов”) сопровождалось возбуждением множества автомодуляционных мод и соответственно переходом работы генератора в многочастотный режим. Структурой спектра выходного сигнала можно было эффективно управлять путем изменения анодного напряжения. Ил. 5. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: электронная перестройка, серии спектров, автомодуляционные моды, удвоение периода.

Одной из актуальных задач современной электроники является разработка и исследование генераторов, способных генерировать сложные многочастотные, в том числе и шумоподобные сигналы. Интерес к проблеме формирования таких сигналов возник из необходимости разработки современных систем передачи и обработки информации для СВЧ нагрева плазмы, а также для исследования явлений хаотической синхронизации. Из электронных приборов с длительным взаимодействием для целей формирования многочастотных и хаотических колебаний находят применение в основном многорезонаторные клистронные генераторы с запаздывающей обратной связью, цепочки последовательно включенных ламп бегущей волны и амплитроны, управляемые внешними ВЧ сигналами [1-4]. Генераторы дифракционного излучения разрабатывались как источники высокостабильных узкополосных сигналов средней мощности [5]. Однако в процессе их экспериментального исследования было обнаружено явление конкуренции мод и случаи реализации двухчастотных сигналов [6-8]. Причем двухчастотные колебания наблюдались без какого-либо внешнего воздействия на генератор ни в виде линии запаздывающей обратной связи, ни в виде ударного воздействия на электронный поток внешнего ВЧ сигнала. К числу исключений здесь следует отнести появление многочастотных колебаний в отражательных генераторах дифракционного излучения [5]. Но здесь все ясно: появление обратного (отраженного) потока электронов сопровождается периодической (или не периодической) перегруппировкой сгустков, что приводит к автомодуляции. Оказалось, что подобный механизм модуляции сгустков может реализовываться не только на встречных пучках электронов (прямой – отраженный), но и в случаях пролета монохроматического пучка через поля высших мод, образующих несколько

противофазных пятен поля вдоль направления движения электронного потока [9]. Такая цепочка пятен поля физически подобна цепочке связанных резонаторов. При пролете электронного потока через эту цепочку “резонаторов” часть электронов будет находиться в тормозящей фазе поля, теряя кинетическую энергию, в то время как другие электроны могут находиться в ускоряющей фазе, приобретая энергию поля открытого резонатора. В результате такой особенности преобразования энергии рабочая (ведущая) высшая мода такого типа будет источником сопутствующих (автомодуляционных) мод и их порождающим спектром колебаний пространственного заряда.

В этой работе экспериментально исследованы возможности формирования указанным выше способом многочастотных сигналов в генераторах дифракционного излучения и показано, что генераторы дифракционного излучения могут представлять интерес для создания генераторов многочастотных и хаотических сигналов.

1. Эксперимент. На рис. 1 приведена схема эксперимента. На рис. 2 приведена типичная зона электронной перестройки исследуемого генератора, полученная экспериментально. Здесь P_1, ψ_1 изменение уровня выходной мощности и частоты генератора для случая его работы на основной резонансной моде типа TEM_{00q} , имеющей единственное пятно поля в направлении движения электронного потока. В высоковольтной части основная мода срывается и генератор переключается на высшие моды. Их частотные характеристики ψ_2, ψ_3, ψ_4 приобретают вид выпуклой ψ_4 и вогнутой ψ_2, ψ_3 зон захвата частоты генератора. Наиболее вероятной причиной таких эффектов является возбуждение в резонансной системе высших мод, образующих два пятна поля в направлении движения электронного потока. Действительно, в этих случаях, наряду с рабочей

(ведущей) модой, могут возбуждаться и авто-модуляционные моды [2], взаимодействие между которыми и обуславливает явления стохастизации и синхронизации сигнала. Ниже при анализе спектров выходного сигнала исследуемого генератора мы увидим, что это действительно так.

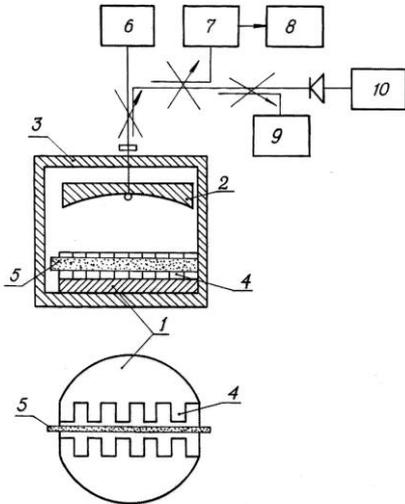


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – нижнее зеркало открытого резонатора; 2 – верхнее зеркало; 3 – корпус генератора; 4 – двойная периодическая структура; 5 – электронный поток; 6 – измеритель мощности; 7 – анализатор спектра; 8 – двухкоординатный самописец; 9 – частотомер; 10 – индикатор сигнала

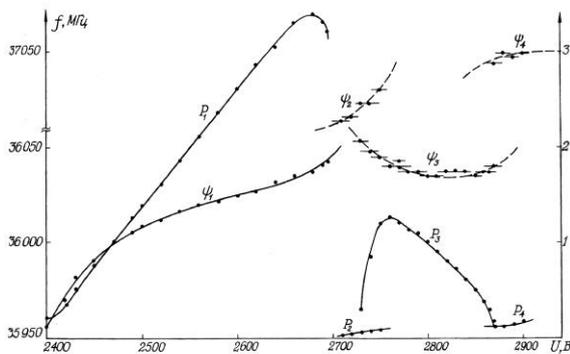


Рис. 2. Зона электронной перестройки исследуемого генератора: P_1, ψ_1 - изменение выходной мощности и частоты на основной моде; P_n, ψ_n ($n = 2, 3, 4$) изменение выходной мощности и частоты генератора на высших модах

На рис. 3 приведена одна из серий спектрограмм 1-10, где наблюдается эволюция спектра исследуемого генератора, работающего на высшей моде, от анодного напряжения. Спектрограмма 1 рис. 3 соответствует случаю работы генератора в одночастотном режиме. При этом в электронный поток внесено некоторое возмущение, что проявляется в виде слабо выраженной модуляции сигнала, что проявляется в появлении

спектральной линии, заметной в верхней боковой полосе. При повышении анодного напряжения этот эффект усиливается: реализуется ярко выраженная автомодуляция, характеризующаяся появлением ассиметричного спектра.

Спектрограмма 6 на рис. 3 соответствует случаю, когда электронный поток симметрично взаимодействует с обоими пятнами поля высшей моды. В этом случае спектр выходного сигнала имеет сходство со спектром бигармонического сигнала. Причем нелинейное взаимодействие между компонентами бигармонического сигнала посредством электронного потока сопровождается появлением в спектре линий излучения на разностной частоте $\Omega_0 = f_2 - f_1$. Дальнейшее повышение анодного напряжения сопровождается нарушением симметрии спектра. Спектрограмма 10 рис. 3 соответствует случаю (аналогично, как и 1 рис. 3) взаимодействия электронного потока с одним пятном. Как следует из рассмотрения этой серии спектрограмм, в ней боковые полосы ассиметричны и в них наблюдаются фрагменты хаотических компонент. Это может означать, что явление взаимодействия электронного потока с такой модой сопровождается не только амплитудной, но и фазовой автомодуляцией.

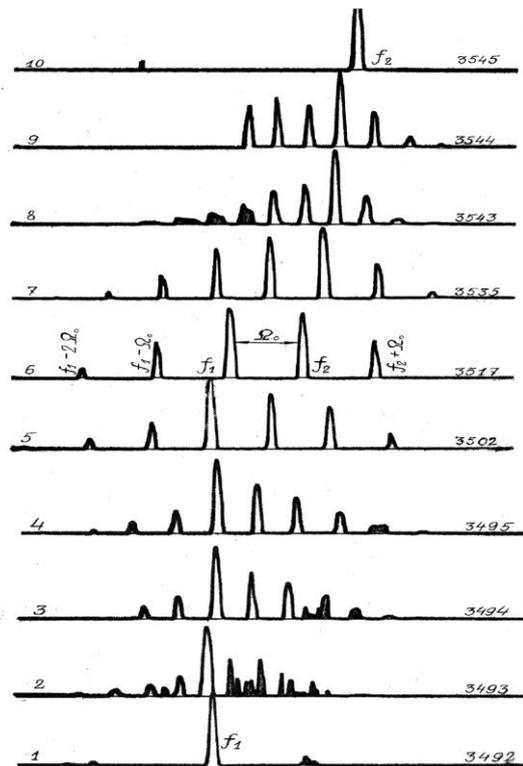


Рис. 3. Эволюция спектра выходного сигнала генератора при изменении анодного напряжения (дискретно). Значения анодного напряжения в вольтах указаны на соответствующих им спектрограммах. Полоса обзора анализатора спектра $\Delta F = 50 \text{ МГц}$; $I_p = \text{const}$; $L_1 = \text{const}$

На рис. 4 приведена серия спектрограмм 1-4 с более сложной структурой спектров. На спектрограмме 1 рис. 4 наблюдается случай сгущения спектра за счет того, что на спектр ведущей моды (вида 6 рис. 3) накладывается спектр автомодуляционной моды. Причем спектр автомодуляционной моды оказывается смещенным на величину $\Delta\Omega = \Omega_0 / 2 = \Omega'_0 / 2 = 9,5$ МГц относительно ведущей. Дальнейшее повышение анодного напряжения спектрограммы 1→2 рис. 4 приводит к удвоению периода автомодуляции. Действительно, $\Omega_1 = \Omega_0 / 2$ или $T_1 = 2T_0$. Нетрудно видеть, что такой же эффект наблюдается при переходе от спектра вида 6 рис. 3 к спектру вида 1 рис. 4.

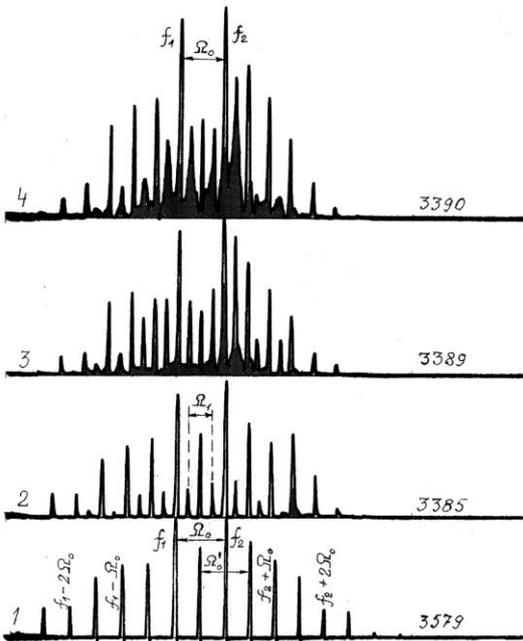


Рис. 4. Эволюция спектра выходного сигнала генератора при изменении анодного напряжения (дискретно). Полоса обзора $\Delta F = 200$ МГц; $I_p = \text{const}$; $L_1 = \text{const}$. Цифрами справа обозначены величины напряжения в вольтах

Дальнейшее повышение анодного напряжения не приводит к удвоению периода автомодуляции, однако спектр сжимается вплоть до образования пьедестала из сплошного спектра. При этом расстояние между частотными компонентами ведущей моды $\Omega_0 = f_2 - f_1$ уменьшается от $\Omega_0 = 19$ МГц до $\Omega_0 = 18$ МГц. Такое сжатие компонент спектра можно назвать дисперсионным. Действительно, оно возможно в случаях, когда общая крутизна изменения частоты от анодного напряжения, например, левой компоненты положительна $S_1 = \frac{\partial f_1}{\partial U_a} > 0$, а

правой – отрицательна $S_2 = \frac{\partial f_2}{\partial U_a} < 0$. На рис. 5 приведена серия спектрограмм 1-8, на которых наблюдается еще одна разновидность спектра выходного сигнала исследуемого генератора, работающего на высших модах, образующих несколько пятен поля в направлении движения электронного потока.

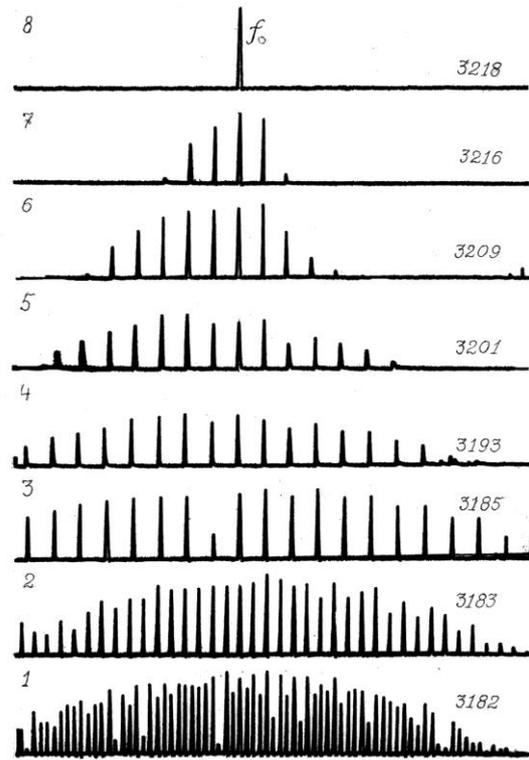


Рис. 5. Эволюция спектра выходного сигнала генератора при изменении анодного напряжения (дискретно). Полоса обзора $\Delta F = 200$ МГц; $I_p = \text{const}$; $L_1 = \text{const}$. Цифры справа означают величины анодного напряжения в вольтах

Спектрограмма 1 рис. 5 обогащена множеством колебаний пространственного заряда. С увеличением анодного напряжения (рис. 5 спектрограммы 1-8) множество автомодуляционных мод разреживается и выходной сигнал генератора становится монохроматическим, рис. 5 спектрограмма 8. При этом центральная частота f_0 спектра стабилизируется, т. е. в данном случае имеет место явление самосинхронизации в процессе взаимодействия автомодуляционных мод. Аналогичное явление в генераторах дифракционного излучения было обнаружено и теоретически, но в случаях взаимодействия не автомодуляционных, а заданных мод типа TEM_{20q} и TEM_{21q} [10].

Выводы. Таким образом, приведенные результаты экспериментальных исследований

показывают, что в генераторах дифракционного излучения можно реализовывать режимы многочастотной и хаотической генерации. Важным преимуществом исследуемого генератора является то, что в нем для стохастизации сигналов используются особенности энергообмена между полем резонатора и электронным потоком, пролетающим цепочку пятен поля высшей собственной моды резонатора. Показано также, что в исследуемых генераторах уплотнение спектра (переход к хаотизации) происходит не только через удвоение периода автомодуляции, но и в результате дисперсионного сжатия спектра. Проведенные эксперименты указывают на целесообразность проведения дальнейших как экспериментальных, так и теоретических исследований для выяснения возможностей создания на базе генераторов дифракционного излучения шумотронов миллиметрового диапазона волн.

1. Анисимова Ю. В., Воронцов Г. М., Залогин Н. Н. и др. // Радиотехника. - 2000. - №2. - С.19-25.
2. Дмитриев Б. С., Жарков Ю. Д., Рыскин Н. М., Шигаев А. М. Теоретическое и экспериментальное исследование хаотических колебаний клистронного автогенератора с запаздыванием // Радиотехника и электроника. - 2001. - 46, № 5. - С.604-610.
3. Воскресенский С. В., Соминский Г. Г. Получение широкополосных СВЧ излучений большой мощности с помощью управляемого ВЧ сигналами амплитрона // Радиотехника. - 2000. - №2. - С.26-29.
4. Ефимов Б. П., Лукин К. А., Ракитянский В. А., Шестопалов В. П. Стохастическое взаимодействие мод в электронно-волновой автоколебательной системе с двумя каналами обратной связи // Письма в журн. техн. физики. - 1989. - 15, №18. - С.9-12.
5. Генераторы дифракционного излучения / Под ред. В. П. Шестопалова. - Киев: Наук. думка, 1991. - 320 с.
6. Ермак Г. П., Лукин К. А., Шестопалов В. П. Взаимодействие мод в генераторе дифракционного излучения // Изв. вузов. Радиофизика. - 1986. - №5. - С.610-617.
7. Miroshnichenko V. S. Cooperative mode interaction during two-frequency oscillation in the diffraction radiation oscillator // MSMW'04 Symposium Proceedings. Kharkov, Ukraine (June 21-26) 2004. - 2. - P. 512-514.
8. Demchenko M. Yu., Korneenkov V. K. and Kurin V. G. Frequency Self-Stabilization of the Diffraction Radiation in a Bi-

harmonic Mode //Microwave and Optical Technoljgy Letters. - 2001. - 31, N2. - P.112-115.

9. Евдокименко Ю. И., Лукин К. А., Ревин И. Д. и др. Об одной особенности преобразования энергии в генераторах дифракционного излучения- лазерах на свободных электронах // Докл. АН СССР. - 1983. - 268, №4. - С.853-856.
10. Lukin K. A., Khutoryan E. M. and Tsvyk A. I. Mode Self-Synchronization in Diffraction Radiation Oscillator. Proceedings of IVEC 2008, Monterey, California.

RECEIVING OF MULTIFREQUENCY SIGNALS IN DIFFRACTION RADIATION OSCILLATORS

V. G. Kurin

The physical mechanism of the multifrequency signals formation, realized in cases of the excitation in resonant system of the investigated oscillator of the highest mode, which form of the some variations ("spots") of a field along a direction of the electron beam moving is considered. The electron beam moving through such chain of the field spot ("the connected resonators chain") was accompanied by excitation of the many automodulated mode and, accordingly, transition of the oscillator operation in the multifrequency mode. The output signal spectrum structure could be operated effectively by the anode voltage change.

Key words: electronic tuning, series of spectrum, automodulation mode, doubling of period.

ОДЕРЖАННЯ БАГАТОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ У ГЕНЕРАТОРАХ ДИФРАКЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

В. Г. Курін

Розглянуто фізичний механізм формування багаточастотних сигналів, що реалізуються у випадках збудження у резонансній системі досліджуваного генератора вищих мод, які утворюють декілька варіацій («плям») поля вздовж напрямку руху електронного потоку. Рух електронного потоку через таку низку плям поля («низку пов'язаних резонаторів») супроводжувався збудженням декількох автомодуляційних мод та відповідно переходом роботи генератора у багаточастотний режим. Структурою спектру вихідного сигналу можливо було ефективно керувати за рахунок зміни анодної напруги.

Ключові слова: електронне перестроювання, серії спектрів, автомодуляційні моди, подвоювання періоду.

Рукопись поступила 11 декабря 2007 г.