

## Формирование коротких и ультракоротких импульсов в ЛБВ-подавителе, работающем в режиме нелинейного срыва Компфнера

С.В. Гришин, В.Н. Скороходов

СГУ им. Н.Г. Чернышевского

**Аннотация:** в работе приводятся экспериментальные результаты по прохождению монохроматического и импульсно-модулированного СВЧ сигналов разного уровня мощности через «прозрачную» лампу бегущей волны (ЛБВ) с постоянным шагом спирали и «непрозрачную» ЛБВ с переменным шагом спирали, которые работают в режиме подавления. Установлено, что в обеих лампах полное подавление сигнала наблюдается как в линейном, так и в нелинейном режимах. В случае прозрачной ЛБВ, у которой отсутствует эффективная генерация высших гармоник тока, на фронте и срезе радиоимпульсов, прошедших через ЛБВ-подавитель, формируются короткие импульсы огибающей длительностью порядка десятка наносекунд. У непрозрачной ЛБВ эффективная генерация высших гармоник тока приводит к формированию периодической последовательности импульсов субнаносекундной длительности на частоте несущей монохроматического СВЧ сигнала. Такие ультракороткие импульсы наблюдаются, когда частота первой гармоники тока соответствует нелинейному срыву Компфнера.

**Ключевые слова:** лампа бегущей волны, срыв Компфнера, ультракороткие импульсы

### 1. Введение

В последние годы активно проводятся исследования по созданию в микроволновом диапазоне частот автономных источников импульсных сигналов ультракороткой длительности (УКИ) [1-4]. Такие источники представляют собой кольцевые автогенераторы, в цепи обратной связи которых содержатся нелинейные элементы в виде насыщающихся поглотителей [1-3] или насыщающихся усилителей [4] сигнала. В качестве насыщающихся поглотителей в микроволновом диапазоне было предложено использовать лампу бегущей волны (ЛБВ), работающую либо в режиме срыва Компфнера [1, 2], либо в режиме циклотронного резонанса [3]. Это дает возможность получать достаточно мощные ультракороткие импульсы огибающей субнаносекундной длительности в миллиметровом диапазоне [1, 3] и многосолитонные комплексы в сантиметровом диапазоне длин волн [2]. В последнем случае диссипативные структуры формируются при совместном использовании с быстрым насыщающимся поглотителем (время срабатывания такого нелинейного поглотителя гораздо меньше времени обхода сигнала по кольцевому резонатору) нелинейной спин-волновой линии передачи, осуществляющей медленную модуляцию добротности кольцевого резонатора параметрически возбуждаемыми спиновыми волнами [2].

ЛБВ, работающая в усилительном режиме, может использоваться как множитель частоты, например, для работы в терагерцовом диапазоне [5]. Параметры лампы в этом случае выбираются таким образом, чтобы первая (фундаментальная) и несколько высших гармоник тока были сильно подавленными, а рабочей была четвертая гармоника тока на частоте  $>300$  ГГц. В тоже самое время подавление первой гармоники тока и генерацию высших гармоник тока можно осуществлять и в ЛБВ-подавителе, работающем в режиме нелинейного срыва Компфнера. В этом случае изменение уровня мощности монохроматического СВЧ сигнала на входе ЛБВ-подавителя должно приводить

к управлению амплитудами и фазами гармоник тока, а при установлении между ними определенных соотношений и к формированию импульсной последовательности непосредственно на частоте сверхвысокочастотного сигнала.

В настоящей работе представлены результаты по формированию коротких и ультракоротких импульсов в ЛБВ-подавителе, работающем в режиме нелинейного срыва Компфнера в случае неэффективной и эффективной генерации высших гармоник тока.

## 2. Экспериментальная установка

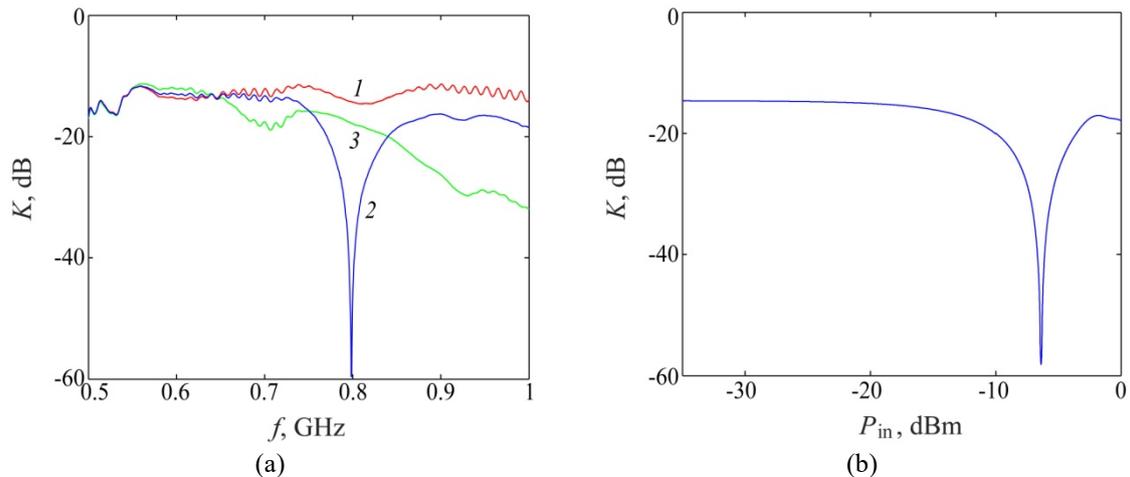
Эксперименты проводились с прозрачной и непрозрачной ЛБВ. Прозрачная ЛБВ выполнена на основе регулярной спиральной замедляющей системы (ЗС) без поглотителя. Лампа работает в дециметровом диапазоне на частотах от 600 МГц до 1130 МГц. Коэффициент усиления лампы достигает значения  $\sim 20$  дБ на частоте 800 МГц при токе пучка  $I_{01}=60$  мкА и ускоряющем напряжении  $U_{01}=117$  В. Длина однородного участка спирали ЗС – 186 мм, шаг спирали – 0.27 мм, диаметр витка спирали – 3.6 мм, диаметр провода спирали – 0.2 мм, материал спирали – молибден. Непрозрачная ЛБВ выполнена на основе нерегулярной спиральной ЗС с переменным шагом и поглотителями. Лампа работает в сантиметровом диапазоне на частотах от 1.5 ГГц до 6.7 ГГц. Коэффициент усиления лампы достигает значения  $\sim 47$  дБ на частоте 3.52 ГГц при токе пучка  $I_{02}=100$  мА и ускоряющем напряжении  $U_{02}=3$  кВ. Длина одного однородного участка спирали с шагом 1.5 мм – 170 мм, длина другого однородного участка спирали с шагом 1.3 мм – 128 мм. Длина всей ЗС – 323 мм. Диаметр витка спирали – 3.3 мм, диаметр провода спирали – 0.5 мм. Для измерения S-параметров ЛБВ использовался анализатор цепей PNAE8362 (10 МГц–20 ГГц), обеспечивающий изменение уровня мощности монохроматического СВЧ сигнала на входе ЛБВ в диапазоне от -30 дБмВт до 0 дБмВт. Измерения модуля коэффициента передачи  $K$  проводились в режиме свипирования частоты  $f$  при фиксированном значении входной мощности  $P_{in}$ , так и в режиме свипирования входной мощности на фиксированной частоте. Для измерения спектральных составляющих СВЧ сигнала на входе и выходе ЛБВ использовался анализатор спектра ESA-LE4408B, работающий в диапазоне частот 9 кГц–26.5 ГГц и генератор PSGE8257D, работающий в диапазоне частот 10 МГц–20 ГГц. Для измерения формы сигнала во временной области использовался осциллограф реального времени DSO 81004Bc полосой частот 10 ГГц.

## 3. Результаты экспериментальных исследований

### 3.1 Прозрачная ЛБВ с постоянным шагом спирали

На рисунке 1 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и мощностная характеристика ЛБВ, работающей в режиме подавления СВЧ сигнала. Результаты получены при условии, что центральная частота полосы подавления  $f_0=800$  МГц находится в центральной части рабочей полосы частот лампы. Как следует из результатов, представленных на рисунке 1а, при малых уровнях  $P_{in}$  на АЧХ лампы не наблюдается полного подавления монохроматического СВЧ сигнала. Практически полное подавление сигнала достигается на частоте  $f_0$  только в нелинейном режиме при значении входной мощности  $P_{in} = -6.4$  дБмВт. Однако при уровнях мощности  $P_{in} > -6.4$  дБмВт оно опять уменьшается. Таким образом, при  $P_{in} = -6.4$  дБмВт наблюдается режим практически полного подавления монохроматического сигнала, аналогичный классическому срыву Компфнера, с той лишь разницей, что наибольшее подавление наблюдается на частоте  $f_0$  не только за счет выбора соответствующих значений тока пучка и напряжения, но и за счет выбора амплитуды бегущей электромагнитной волны. Как следует из результатов, представленных на рисунке 1б, на зависимости  $K(P_{in})$ , измеренной на частоте  $f_{01}$ , присутствуют два участка (линейный и

нелинейный) и два характерных уровня мощности, один из которых  $P_{th1} = -16.7$  дБмВт соответствует началу нелинейного режима работы лампы, а другой  $P_{th2} = -6.4$  дБмВт соответствует максимальному уровню подавления сигнала в нелинейном режиме. В интервале значений входной мощности  $P_{th1} < P_{in} < P_{th2}$ , нарастание амплитуды бегущей волны приводит к ускорению электронов, которые при взаимодействии с бегущей волной приобретают большую энергию. Это обуславливает ограничение мощности СВЧ сигнала на выходе ЛБВ-подавителя. При  $P_{in} = P_{th2}$ , сформированный электронный сгусток находится долгое время в области максимального ускоряющего поля, забирая практически всю энергию от электромагнитной волны. При  $P_{in} > P_{th2}$  мощность СВЧ сигнала на выходе ЛБВ-подавителя начинает возрастать из-за того, что электронный сгусток находится теперь долгое время в области тормозящего поля, отдавая свою энергию электромагнитной волне.



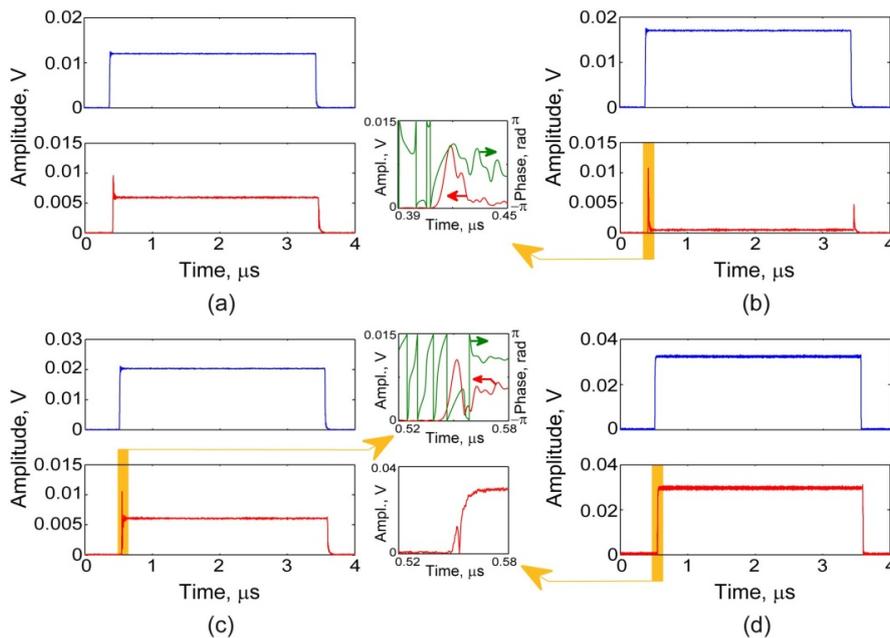
**Рисунок 1.** (а) АЧХ и (б) зависимость модуля коэффициента передачи  $K$  от мощности сигнала на выходе ЛБВ-подавителя  $P_{in}$ , измеренные при  $I_{01}=10$  мкА,  $U_{01}=107$  В. На (а) АЧХ получены при разных уровнях входной мощности  $P_{in}$ : -30 дБмВт (кривая 1), -6.4 дБмВт (кривая 2) и 0 дБмВт (кривая 3). На (б) результаты получены на частоте  $f_0$ .

Были проведены экспериментальные исследования по наблюдению генерации высших гармоник тока ЛБВ. Эксперименты показали, что помимо первой гармоники в спектре мощности монохроматического СВЧ сигнала, прошедшего через ЛБВ-подавитель, наблюдается третья гармоника, мощность которой на 10 дБ меньше мощности первой гармоники. При этом СВЧ сигнал был близок по форме к гармоническому сигналу и не испытывал нелинейных искажений. Это указывает на неэффективную генерацию высших гармоник тока в ЛБВ данного типа.

Помимо этого, были проведены исследования прохождения импульсно-модулированного (ИМ) СВЧ сигнала через ЛБВ-подавитель. Частота несущей ИМ СВЧ сигнала соответствовала частоте  $f_0$ , на которой наблюдалось практически полное подавление монохроматического СВЧ сигнала в нелинейном режиме (нелинейный срыв Компфнера). ИМ СВЧ сигнал, поступавший на вход ЛБВ-подавителя, представлял собой периодическую последовательность радиоимпульсов с несущей частотой  $f_0$ , длительностью 3 мкс и скважностью  $q=2$ . Длительность радиоимпульсов выбиралась, исходя из того, чтобы спектр ИМ СВЧ сигнала был относительно узкополосным и находился в полосе частот срыва Компфнера.

На рисунке 2 приведены огибающие радиоимпульсов, измеренные как на входе, так и на выходе ЛБВ-подавителя. Из представленных результатов следует, что, когда подавление монохроматического СВЧ сигнала является максимальным, основная часть радиоимпульса практически полностью подавляется (см. рисунок 2б). Однако на фронте и срезе огибающей радиоимпульса остаются «выплески» в виде относительно

коротких импульсов огибающей, длительность которых является намного меньше длительности исходного радиоимпульса. Так, при пиковой мощности  $P_p = P_{th2}$  (см. рисунок 2b), длительность короткого импульса огибающей имеет величину  $\sim 11$  нс, а с увеличением пиковой мощности длительность короткого импульса огибающей уменьшается, т.е. короткие импульсы огибающей испытывают своего рода компрессию при  $P_p > P_{th2}$ . Так, при превышении пиковой мощности входного радиоимпульса порога  $P_{th2}$  в 1.4 раза (см. рисунок 2c) длительность короткого импульса огибающей уменьшается до 6.2 нс, а при превышении пиковой мощности порога  $P_{th2}$  в 4 раза (см. рисунок 2d) длительность короткого импульса огибающей уменьшается до 2.7 нс. Отсюда следует, что длительность коротких импульсов огибающей практически линейно зависит от уровня пиковой мощности входного радиоимпульса.



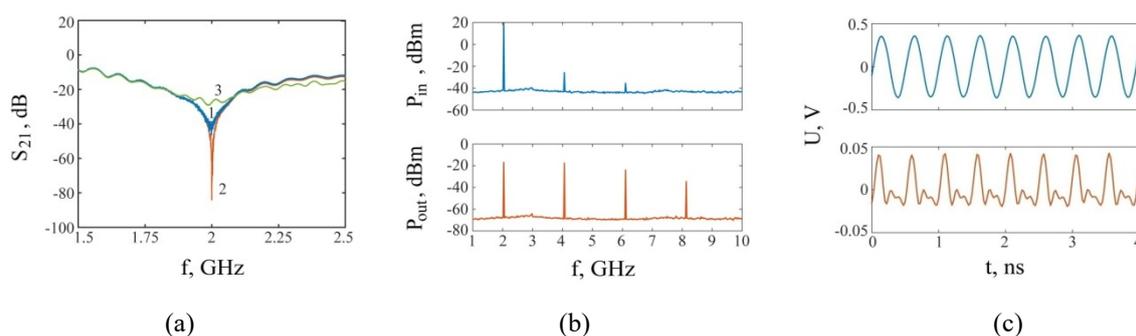
**Рисунок 2.** Огибающие радиоимпульса на входе (верхняя панель) и выходе (нижняя панель) ЛБВ-подавителя, полученные при различных значениях пиковой мощности  $P_p$ : -9.4 дБмВт (а), -6.4 дБмВт (б), -4.9 дБмВт (с) и -0.4 дБмВт (д). На вставках к рисункам (б, с) показаны увеличенные фрагменты амплитудных и фазовых профилей коротких импульсов огибающей. Измерения проведены при значениях  $U_{01}=107$  В и  $I_{01}=10$  мкА.

### 3.2 Непрозрачная ЛБВ с переменным шагом спирали

На рисунке 3а приведена АЧХ непрозрачной ЛБВ, измеренная в режиме нелинейного подавления СВЧ сигнала. Значения тока пучка и напряжения здесь подобраны таким образом, чтобы наибольший уровень ослабления СВЧ сигнала  $\sim 84$  дБ наблюдался в нелинейном режиме работы ЛБВ-подавителя на частоте  $f_{01}=2$  ГГц, находящейся на низкочастотном краю полосы частот ЛБВ. Видно, что уменьшение или увеличение уровня мощности СВЧ сигнала относительно значения  $P_{th} = +10$  дБмВт приводит к уменьшению ослабления сигнала на частоте  $f_{01}$ .

Об эффективной генерации высших гармоник тока в режиме нелинейного срыва Компфнера, когда  $P_{in} > P_{th}$  (ЛБВ-подавитель работает как насыщающийся поглотитель), свидетельствуют спектры мощности СВЧ сигнала, полученные на входе и выходе ЛБВ-подавителя (см. рисунок 3б). Из представленных результатов следует, что СВЧ сигнал, подаваемый на вход ЛБВ-подавителя, не является строго гармоническим. В спектре мощности СВЧ сигнала присутствуют высшие гармоники, уровень которых значительно меньше уровня фундаментальной гармоники (перепад по мощности между первой и второй гармониками СВЧ сигнала составляет величину  $\sim 45$  дБ). Это

позволяет рассматривать СВЧ сигнал как монохроматическое излучение. На выходе ЛБВ-подавителя уровень мощности второй гармоники увеличивается на 8 дБ, а уровень мощности третьей и четвертой гармоник на 12 дБ и 8 дБ по сравнению со входом. Хотя уровень мощности первой гармоники уменьшается на 36 дБ по сравнению со входом, она остается больше второй гармоники на 1 дБ, третьей гармоники на 7 дБ и четвертой гармоники на 18 дБ. Это приводит к нелинейному искажению формы сигнала. Как следует из результатов, представленных на рисунке 3с, отрицательные значения напряжения уменьшаются практически до нулевых значений, а из сигнала с положительными значениями амплитуды формируется периодическая последовательность УКИ, период следования которых определяется фундаментальной частотой, а их длительность – шириной спектра СВЧ сигнала на выходе ЛБВ.



**Рисунок 3.**(а) АЧХ ЛБВ-подавителя, (b) спектры мощности и (с) временные ряды СВЧ сигнала, измеренные на входе (верхние рисунки) и выходе (нижние рисунки) ЛБВ-подавителя. На (а) АЧХ получены при разных уровнях входной мощности  $P_{in}$ : +2 дБмВт (кривая 1), +10 дБмВт (кривая 2) и +17 дБмВт (кривая 3). На (b, с) результаты получены для  $f_{01}=2$  GHz и  $P_{in}=+20$  дБмВт. Измерения выполнены при  $I_{02}=8.9$  мА и  $U_{02}=2150$  В.

#### 4. Заключение

В заключение отметим, что предложенный в работе способ получения УКИ из монохроматического сигнала может быть распространен на ЛБВ, работающие в более высокочастотном (и даже терагерцовом) диапазоне частот.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00274, <https://rscf.ru/project/23-22-00274/>

#### Список литературы

1. Ginzburg N. S. et al. Generation of trains of ultrashort microwave pulses by two coupled helical gyro-TWTs operating in regimes of amplification and nonlinear absorption// Phys. Plasm. – 2017 – V. 24. – No 2 – P. 023103.
2. Grishin S.V.et al.Self-generation of chaotic dissipative multisoliton complexes supported by competing nonlinear spin-wave interactions//Phys. Rev. E. – 2018. - V. 98. – No 2. - P. 022209.
3. Ginzburg N. S. et al.Nonlinear cyclotron resonance absorber for a microwave subnanosecond pulse generator powered by a helical-waveguide gyrotron traveling-wave tube// Phys. Rev. Appl. – 2020. – V. 13. – No 4. – P. 044033.
4. Bir A.S. et al. Experimental observation of ultrashort hyperchaotic dark multisoliton complexes in a magnonic active ring resonator// Phys. Rev. Lett. - 2020. - V. 125. - No 8. - P. 083903.
5. Zhang R. et al.Novel dual beam cascaded schemes for 346 GHz harmonic-enhanced TWTs// Electronics. – 2021. - V. 10. – No 2. – P. 195.