

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗОНАТОРА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ РАДИОИМПУЛЬСОВ

Представлены результаты анализа преобразователя длительности радиоимпульсов на основе резонатора бегущей волны (РБВ). Рассмотрены временные зависимости изменения мощности волны в переходной период. Определены зависимости, описывающие время нарастания и время спада мощности волны на выходе устройства до заданного уровня.

СВЧ радиоимпульсы широко используются в радиолокации, радиосвязи, радиозондировании, телеметрии, промышленной электронике, при исследованиях в области физики твёрдого тела и плазмы, химии. Уменьшение длительности СВЧ радиоимпульсов позволяет улучшить параметры радиотехнических систем и является важной задачей. Получение радиоимпульсов длительностью десятков и единиц наносекунд на практике связано с рядом трудностей

Подход основанный на использовании импульсной модуляции генераторов СВЧ [1], не позволяет получить высокую когерентность сигнала на выходе устройства. Радиошум в широкой полосе частот ограничивает применение таких устройств. Сложность технической реализации, вызванная применением накопителей энергии на линиях с распределёнными параметрами и коммутаторов возрастает с уменьшением длительности модулирующих видеоимпульсов и увеличением мощности.

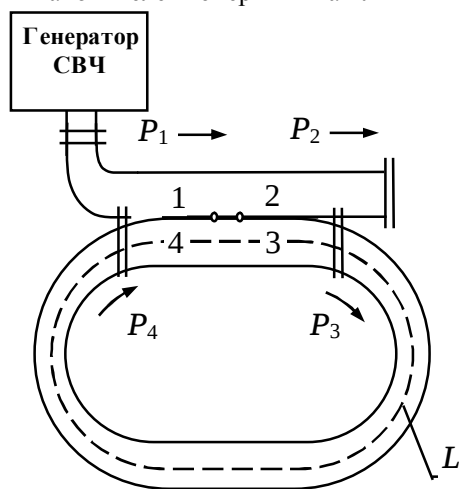


Рисунок 1 – Схема резонатора бегущей волны

Устройства основанные на выводе накопленной энергии из резонаторов [1], обеспечивают хорошую степень фазовой когерентности между выходным и исходным сигналами. Для накачки резонаторов используются электровакуумные или полупроводниковые приборы, работающие в непрерывном режиме или в режиме «длинных» импульсов. При выводе СВЧ-энергии из резонатора появляется проблема коммутации и безынерционного управления. От параметров коммутирующего устройства значительно зависят амплитуда и форма сформированных импульсов. Применение в качестве коммутирующих элементов полупроводниковых приборов позволяет осуществлять коммутацию с большой частотой повторения, но при этом создаются большие потери энергии во время её накопления. Газоразрядные коммутаторы переключаются при больших уровнях мощности, но не могут работать с большой частотой повторения и для их поджига требуются высоковольтные источники напряжения.

Целью данной статьи является рассмотрение возможности применения РБВ для преобразования длительности радиоимпульсов. Для этого определим зависимости, описывающие переходные процессы в резонаторе бегущей волны [2]. В частности, рассмотрим временную зависимость изменения мощности в переходной период.

Объемный резонатор бегущей волны представляет собой направляющую систему, свёрнутую в кольцо. Возбуждение кольцевого резонатора осуществляется с помощью направленного ответвителя (НО).

РБВ находят применение при построении направленных фильтров; испытании волноводных элементов на больших мощностях волны в кольце; создании разделительных фильтров, состоящих из нескольких последовательно включённых кольцевых резонаторов.

На рисунке 1 показано схематическое изображение РБВ. Плечо 1 направленного ответвителя подключается к генератору СВЧ, плечо 2 – к нагрузке. Плечи 3 и 4 НО замкнуты в кольцо длиной L по средней линии. Значение мощности в резонансном кольце при различных режимах работы РБВ можно определить графоаналитическим методом [3].

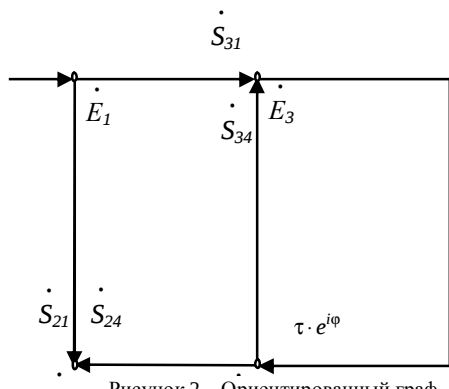


Рисунок 2 – Ориентированный граф

На рисунке 2 изображён ориентированный граф РБВ с идеализированными параметрами. Введём следующие обозначения: E_1, E_2, E_3, E_4 – комплексные нормированные амплитуды волн в плечах направленного ответвителя; $S_{21}, S_{31}, S_{34}, S_{24}$ – комплексные коэффициенты передачи между соответствующими плечами НО; $\tau \cdot e^{i\varphi}$ – комплексный

коэффициент передачи (ККП) кольца; τ – модуль коэффициента передачи по напряженности поля, φ фаза.

В плечо 1 поступает излучение генератора, представляющее собой СВЧ сигнал, модулированный меандром. В положительный полупериод амплитуда волны генератора равна $\dot{E}_1$. Во время отрицательного полупериода на вход устройства сигнал не поступает.

Коэффициенты передачи по напряженности поля между основным каналом НО и кольцом определяются как $\dot{S}_{24} = \dot{S}_{31} = ik$, где i – указывает на то, что сигнал получает дополнительный фазовый сдвиг 90° . Тогда коэффициенты передачи по мощности равны k^2 , а следовательно $|\dot{S}_{21}| = |\dot{S}_{34}| = \sqrt{1 - k^2}$.

Определим установившиеся значения комплексных амплитуд волн в плечах НО. В соответствии с формулой Мезона для ориентированного графа (рисунок 2), выражения для амплитуд волн во втором (1), третьем (2) и четвертом (3) плечах приобретают вид:

$$\dot{E}_2 = \dot{E}_1 \sqrt{1 - k^2} - \dot{E}_1 \frac{k^2 \tau e^{i\varphi}}{1 - \sqrt{1 - k^2} \tau e^{i\varphi}}, \quad (1)$$

$$\dot{E}_3 = \frac{ik}{1 - \sqrt{1 - k^2} \tau e^{i\varphi}} \dot{E}_1, \quad (2)$$

$$\dot{E}_4 = \frac{ik \tau e^{i\varphi}}{1 - \sqrt{1 - k^2} \tau e^{i\varphi}} \dot{E}_1. \quad (3)$$

При резонансе длина средней линии резонансного кольца кратна длине волны в волноводе, т.е.

$$L = n \cdot \lambda_g,$$

где λ_g – длина волны в волноводе

Фаза ККП волноводного кольца определяется формулой

$$\varphi = 2\pi L / \lambda_g,$$

или при условии резонанса:

$$\varphi = 2\pi n. \quad (4)$$

В случае критической связи переходное ослабление НО и модуль ККП кольца связаны соотношением

$$k = k_{кр} = \sqrt{1 - \tau^2}. \quad (5)$$

После преобразования выражений (1) - (3) с учётом (4) и (5) получены соотношения

$$\begin{aligned} \dot{E}_2 &= 0, \\ \dot{E}_3 &= \dot{E}_1 \frac{i}{k_{кр}}, \\ \dot{E}_4 &= \dot{E}_1 \frac{i\tau}{k_{кр}}. \end{aligned}$$

Мощности волн определяются квадратами модулей комплексных амплитуд в соответствующих плечах НО:

$$P_2 = 0, \quad (6)$$

$$P_3 = \frac{P_1}{k_{кр}^2}, \quad (7)$$

$$P_4 = \frac{\tau^2 P_1}{k_{кр}^2}. \quad (8)$$

Полученный результат (6) объясняется суперпозицией двух волн: от генератора и из четвертого плеча НО. При резонансе и критической связи каналов НО описываемые волны противофазны и их амплитуды равны. Результирующая напряженность электрического поля во втором плече НО равна нулю. Установившаяся мощность бегущей волны в третьем плече максимальна и превышает подводимую мощность (7). Вследствие потерь при распространении по кольцу это значение в четвертом плече уменьшается (8). Амплитуда бегущей волны, циркулирующая в кольце, складывается с амплитудой волны $ik\dot{E}_1$. В случае критической связи $ik\dot{E}_1$ компенсирует потери в кольце.

Для дальнейшего анализа необходимо рассмотреть динамику изменения комплексных амплитуд напряженности электрического поля $\dot{E}_2$, $\dot{E}_3$, $\dot{E}_4$. Временные изменения этих величин рассчитываются дискретно. В качестве интервала дискретизации выбрана длительность пробега волны по резонансному кольцу $t_0 = L/V_{ЭН}$, где $V_{ЭН}$ – энергетическая (групповая) скорость волны.

Рассматривая работу устройства в положительный полупериод модулирующего меандра сигнала генератора, проанализируем ориентированный граф устройства и определим амплитуды волн $\dot{E}_{2(m)}$, $\dot{E}_{3(m)}$,

$\dot{E}_{4(m)}$ после m пробегов волны по кольцу. В момент времени после первого пробега ($m=1$) волны по резонансному кольцу $\dot{E}_{2(1)}$ равно:

$$\dot{E}_{2(1)} = \dot{E}_1 \sqrt{1-k^2} - k^2 \tau \cdot E_{41} .$$

После второго пробега ($m=2$) волны по кольцу получаем

$$\dot{E}_{2(2)} = \dot{E}_1 \sqrt{1-k^2} - k^2 \tau \dot{E}_1 - k^2 \tau^2 \sqrt{1-k^2} \dot{E}_1 .$$

При очередном пробеге происходит дальнейшее изменение амплитуды, т. е.

$$\dot{E}_{2(3)} = \dot{E}_1 \sqrt{1-k^2} - k^2 \tau \dot{E}_1 - k^2 \tau^2 \sqrt{1-k^2} \dot{E}_1 - k^2 \tau^3 (\sqrt{1-k^2})^2 \dot{E}_1 .$$

Последовательность слагаемых в правой части, кроме первого члена, представляет собой геометрическую прогрессию со знаменателем, равным $q = \tau \sqrt{1-k^2}$. Полученная геометрическая прогрессия является убывающей ($q < 1$). В неустойчивом режиме, после m пробегов, значение напряженности электрического поля во втором плече НО определяется из соотношения

$$\dot{E}_{2(m)} = \dot{E}_1 \frac{\sqrt{1-k^2} \left(1 - \tau \sqrt{1-k^2} \right) - \tau k^2 \left(1 - \left(\tau \sqrt{1-k^2} \right)^m \right)}{1 - \tau \sqrt{1-k^2}} . \quad (9)$$

Установившееся значение напряженности электрического поля во втором плече НО определяется как сумма бесконечного количества членов убывающей геометрической прогрессии определяем из соотношения

$$\dot{E}_{2(\infty)} = \dot{E}_1 \frac{\sqrt{1-k^2} - t}{1 - t \sqrt{1-k^2}} .$$

Данное выражение соответствует полученному ранее (1) при $\phi = 2\pi n$.

Проведя аналогичные преобразования, получаем выражения для напряженности электрического поля в третьем и четвертом плечах НО в неустойчивом режиме работы РБВ:

$$\dot{E}_{3(m)} = \frac{ik \dot{E}_1 \left(1 - \left(\tau \sqrt{1-k^2} \right)^m \right)}{1 - \tau \sqrt{1-k^2}} , \quad (10)$$

$$\dot{E}_{4(m)} = \frac{ikt \dot{E}_1 \left(1 - \left(\tau \sqrt{1-k^2} \right)^m \right)}{1 - \tau \sqrt{1-k^2}} , \quad (11)$$

и в установившемся

$$\dot{E}_{3(\infty)} = \frac{ik \dot{E}_1}{1 - \tau \sqrt{1-k^2}} ,$$

$$\dot{E}_{4(\infty)} = \frac{ikt \dot{E}_1}{1 - \tau \sqrt{1-k^2}} .$$

С учётом выражений (5) и (9) – (11) определяем значения мощностей волн во втором, третьем и четвертом плечах НО при критической связи:

$$P_{2(m) \text{ кр}} = \left(1 - k_{\text{кр}}^2 \right)^{2m+1} \cdot P_1 , \quad (12)$$

$$P_{3(m) \text{ кр}} = \frac{\left(1 - \left(1 - k_{\text{кр}}^2 \right)^m \right)^2}{k_{\text{кр}}^2} \cdot P_1 ,$$

$$P_{4(m) \text{ кр}} = \frac{\left(1 - k_{\text{кр}}^2 \right) \left(1 - \left(1 - k_{\text{кр}}^2 \right)^m \right)^2}{k_{\text{кр}}^2} \cdot P_1 .$$

Рассмотрим работу РБВ в неустойчивом режиме. В третьем плече НО амплитуда напряженности электрического поля возрастает за счёт поступления энергии из первого плеча. Амплитуда волны в четвертом плече меньше чем в третьем из-за затухания в стенках кольцевого волновода. Во втором плече амплитуда напряженности поля уменьшается вследствие поступления противофазной волны из четвертого плеча. В отрицательный полупериод модулирующего меандра амплитуда волны генератора на входе устройства равна нулю. Энергия, запасённая в резонансном объёме за положительный полупериод уменьшается за счёт затухания в кольце и ответвления части сигнала во второе плечо НО (процесс разряда

РБВ). Второе слагаемое в выражении (9) становится нескомпенсированным ($\dot{E}_1\sqrt{1-k^2} = 0$). Обозначим амплитуду волны во втором плече после m' пробегов по кольцу через $\dot{E}'_{2(m')}$. В начальный момент отрицательного полупериода меандра РБВ находится в установившемся режиме работы [2], следовательно справедливо равенство:

$$\dot{E}'_{2(0)} = -\frac{k^2\tau\dot{E}_1}{1-\tau\sqrt{1-k^2}}.$$

При критической связи получаем:

$$\dot{E}'_{2(0)_{кр}} = -\sqrt{1-k_{кр}^2} \cdot \dot{E}_1.$$

Определим амплитуду волны, ответвляемой во второе плечо из четвёртого. В начальный момент времени амплитуда волны в четвёртом плече равна значению, установившемуся за положительный полупериод

$$\dot{E}'_{4(0)} = \frac{ik\tau\dot{E}_1}{1-\tau\sqrt{1-k^2}}.$$

Из анализа ориентированного графа устройства следует, что после каждого пробега волны по кольцу её амплитуда уменьшается на величину $\tau\sqrt{1-k^2}$.

Через m' оборотов волны по резонансному кольцу напряжённость поля в четвёртом плече НО становится равной m' -члену убывающей геометрической прогрессии:

$$\dot{E}'_{4(m')} = \frac{ik\tau\dot{E}_1}{1-\tau\sqrt{1-k^2}} \cdot \left(\tau\sqrt{1-k^2}\right)^{m'}.$$

Напряжённость поля во втором плече НО после m' оборотов становится равной:

$$\begin{aligned}\dot{E}'_{2(m')} &= ik\dot{E}'_{4(m')}, \\ \dot{E}'_{2(m')} &= -\frac{k^2\tau\dot{E}_1}{1-\tau\sqrt{1-k^2}} \cdot \left(\tau\sqrt{1-k^2}\right)^{m'}.\end{aligned}$$

Мощность волны во втором плече НО после m' оборотов волны по резонансному кольцу при критической связи определяется квадратом модуля комплексной амплитуды напряжённости электрического поля, т.е.

$$P_{2(m')_{кр}} = (1-k_{кр}^2)^{2\cdot m'+1} \cdot P_1. \quad (13)$$

Выражение (13) полностью совпадает с полученным ранее (12) при $m' = m$.

Произведя замену переменной $m = t/\tau_0$, представим выражение для мощности волны во втором плече НО (13) в виде функции непрерывного времени:

$$P_{2_{кр}}(t) = P_1(1-k_{кр}^2)^{2\frac{t}{\tau_0}+1}. \quad (14)$$

Время спада импульса определяется при задании относительного уровня мощности δ (например 0,5) $\delta = P_{2_{кр}}(t)/P_1$. Время спада мощности импульса до уровня δ составляет:

$$t = \frac{\tau_0}{2} \cdot \left[\frac{\ln \delta}{\ln(1-k_{кр}^2)} - 1 \right].$$

Анализ работы устройства проведён без учета крутизны фронта и среза меандра, т.е. модулирующий меандр имеет фронт и срез с бесконечной крутизной. Ввиду малой длительности выходных импульсов (десятки наносекунд), необходимо учитывать влияние фронтов входных СВЧ радиопulses. Из выражений (12) и (13) определена временная зависимость переходной характеристики низкочастотного эквивалента РБВ [4]:

$$g_{НЧ}(t) = (1-k_{кр}^2)^{\frac{t}{\tau_0}+\frac{1}{2}}.$$

Аналитически комплексная огибающая экспоненциально нарастающего радиопulses задаётся как

$$\dot{E}_{ex}(t) = A_0 \cdot \left(1 - e^{\frac{-3t}{\tau_\phi}} \right),$$

где A_0 – масштабный коэффициент; τ_ϕ – длительность фронта импульса.

Используя интеграл Дюамеля и динамическое представление сигнала, определяем временную зависимость комплексной огибающей выходного сигнала:

$$\dot{E}_{\text{вых}}(t) = \dot{E}_{\text{ex}}(t) \cdot g_{\text{НЧ}}(t) + \int_0^t \frac{d\dot{E}_{\text{ex}}(\tau)}{d\tau} \cdot g_{\text{НЧ}}(t) d\tau. \quad (15)$$

На рисунке 3 изображены графики 1 и 2 описывающие (14) и (15) соответственно

Представленные зависимости рассчитаны для длины кольцевого резонатора $L = 15 \cdot \lambda_g$, коэффициенте затухания в кольце $t = 0,995$ и переходном ослаблении НО 20 дБ.

Длительность спада $t_{c0,5}$ относительного уровня мгновенной выходной мощности до значения $\delta = 0,5$ составляет 52 наносекунды для входных радиоимпульсов с идеально прямоугольной огибающей и 53 нс (35 пробегов волны в кольцевом резонаторе) для радиоимпульсов с длительностью фронтов 5 нс (паспортное значение для СВЧ-генератора Г5-40).

Удвоенная длительность спада $t_{c0,0001}$ относительного уровня выходной мощности до значения $\delta = 0,0001$, равная 690 нс (457 пробегов волны в кольце резонатора), определяет максимальную частоту следования входных радиоимпульсов (частоту модуляции) $F_{\text{mod}} < 1/(2 \cdot t_{c0,0001})$.

В приведённом примере частота модулирующего меандра должна быть не более 725 кГц.

Результаты теоретических исследований проверены экспериментально. Резонансное кольцо длиной $L = 15 \cdot \lambda_g = 0,451$ м реализовано на основе волновода с сечением 23×10 мм. Возбуждение кольцевого резонатора осуществлялось при помощи НО с крестообразными элементами связи. Переходное ослабление исследованного НО 18 дБ. Для накачки резонатора использовался генератор Г5-40, вырабатывающий СВЧ колебания частотой 10 ГГц, модулированные меандром частотой 1 кГц. Форма выходных радиоимпульсов совпадает с изображённой на рисунке 3 (кривая 2); длительность выходных СВЧ-радиоимпульсов по уровню половинной мощности составляет 35 нс.



Рисунок 3 – Графики временных зависимостей относительных уровней выходной мощности: 1 – пунктирная кривая; 2 – сплошная кривая

Проведённые теоретический анализ и экспериментальные исследования показывают достоинства и недостатки применения РБВ для преобразования длительности СВЧ радиоимпульсов. Основными достоинствами являются: простота конструкции формирователей импульсного СВЧ излучения длительностью десятков наносекунд; высокая частота следования выходных радиоимпульсов (сотни килогерц); высокая когерентность выходного сигнала и излучения генератора накачки. Кроме того, параметры выходного сигнала определяются только значением

переходного ослабления между каналами НО при критической связи и параметрами входного сигнала. Основной недостаток – средняя мощность выходного сигнала преобразователя меньше средней мощности входного при равенстве импульсных мощностей.

Перспективным направлением дальнейших исследований в данной области является разработка устройства быстрого вывода энергии, накопленной в резонансном объёме РБВ. Быстрый вывод энергии позволит увеличить импульсную мощность и уменьшить длительность выходного сигнала.

Библиографический список

1. Диденко А.Н. Мощные СВЧ-импульсы наносекундной длительности / А.Н. Диденко, Ю.Г. Юшков. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 112 с.
2. Саламатин В.В. Анализ переходного процесса в резонаторе бегущей волны / В.В. Саламатин, Г.А. Лукьянчук // Вестн. СевГТУ. Сер. Информатика, электроника, связь: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2003. — Вып. 47. — С. 145–154.
3. Силаев М.А. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств / М.А. Силаев, С.С. Брянцев. — М.: Сов. радио, 1970. — 248 с.
4. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. пособие для вузов / С.И. Баскаков. — М.: Высш. шк., 2000. — 462 с.

Поступила в редакцию 12.11.2004 г.