

01;09

Компрессия микроволновых импульсов цепочкой резонаторов кольцевого типа

© Ю.Ю. Данилов,¹ М.Л. Тай²

¹ Институт прикладной физики РАН, 603600 Нижний Новгород, Россия

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, E-mail: danilov@appl.sci-nnov.ru

(Поступило в Редакцию 22 мая 2000 г.)

Теоретически исследована компрессия фазомодулированного импульса с прямоугольной огибающей цепочкой консервативных резонаторов кольцевого типа. Показано, что цепочка из 3 резонаторов может осуществить 8-кратную компрессию микроволнового импульса с коэффициентом полезного действия около 80%.

Введение

В однорезонаторных компрессорах микроволновых импульсов коэффициент полезного действия (КПД) с ростом степени компрессии убывает [1–3]. Например, при 5-кратной компрессии КПД составляет около 80%. Для повышения степени компрессии в [4] предлагалось использовать комбинации резонаторов. В данной работе исследуются компрессоры в виде цепочки резонаторов кольцевого типа, один из вариантов которой показан на рис. 1.

Уравнение и характеристики компрессора

Преобразование микроволнового импульса

$$E = \text{Re} \{ E_n(t) \exp(i\omega_g t) \}$$

цепочкой из N консервативных резонаторов описывается системой уравнений [4]

$$\frac{dE_n}{dt} - i\Omega_n E_n = \frac{dE_{n-1}}{dt} - i\Omega_n^* E_{n-1} \quad (1 \leq n \leq N), \quad (1)$$

где $\Omega_n = \omega_n'(1 + i/2Q_n) - \omega_g$ — расстройка между комплексной собственной частотой n -го резонатора

и опорной частотой входного импульса ω_g , Q_n — радиационная добротность n -го резонатора, E_n — комплексная амплитуда импульса на выходе n -го резонатора, E_0 и E_N — комплексные амплитуды импульса на входе и выходе компрессора.

В приведенных ниже расчетах входной импульс имел прямоугольную огибающую длительностью T , а фазовая модуляция задавалась трехпараметрической функцией

$$E_0(t) = \exp \left\{ i \left[\frac{\mu t^2}{2} + \Delta\varphi H(t - t_p) \right] \right\},$$

где H — единичная функция Хевисайда, μ — скорость изменения частоты импульса во времени, t_p и $\Delta\varphi$ — момент и величина скачка фазы импульса.

С ориентацией на применение к линейным ускорителям частиц будем характеризовать работу компрессора степенью компрессии импульса

$$s = \frac{T}{\tau}, \quad (2)$$

коэффициентом полезного действия

$$\eta = \frac{\int_{T-\tau}^T |E_N|^2 dt}{\int_0^T |E_0|^2 dt} \quad (3)$$

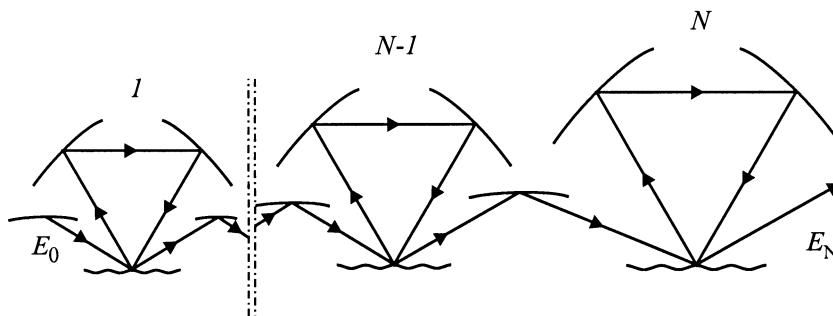


Рис. 1. Компрессор микроволновых импульсов в виде цепочки резонаторов кольцевого типа.

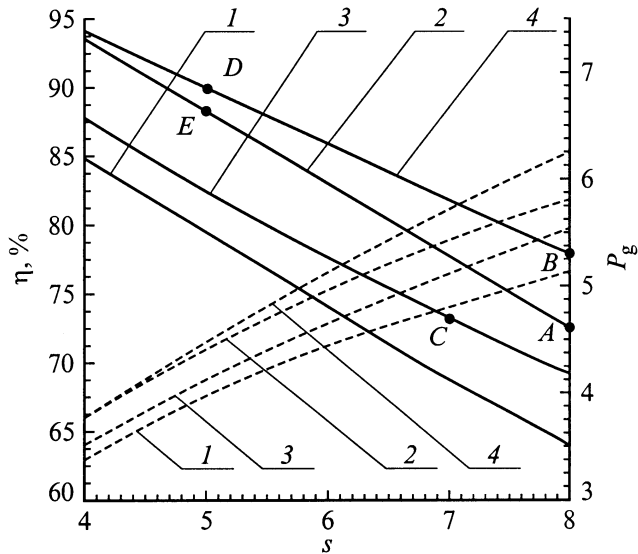


Рис. 2. Характеристики оптимизированных компрессоров. КПД η (сплошные кривые) и коэффициент усиления мощности P_g (штриховые кривые) как функции степени компрессии s .

и коэффициентом усиления мощности

$$P_g = s\eta,$$

где $\tau = L/v_{gr}$, L — длина ускоряющей структуры, v_{gr} — групповая скорость волны в структуре.

В рамках сформулированной выше задачи КПД представляет собой функцию $\eta(\alpha, \delta, \Delta\varphi, \beta_n, \gamma_n)$ безразмерных параметров

$$\alpha = \frac{\mu T^2}{2}, \quad \delta = \frac{t_p}{T},$$

$$\beta_n = (\omega'_n - \omega_g)T, \quad \gamma_n = \frac{\omega'_n T}{2Q_n} \quad (1 \leq n \leq N).$$

Метод численного анализа

Уравнения (1) интегрировались методом Рунге–Кутты. Для поиска максимума КПД (3) при фиксированной степени компрессии (2) использовался модифицированный метод Хука–Дживса [5], который хорошо зарекомендовал себя при расчетах различных микроволновых устройств [6,7].

Для рассматривавшихся в данной работе компрессоров время оптимизации на Pentium/166 MHz не превышало 1.5 min и заканчивалось после перебора 15 000 вариантов. Основная трудность расчета была обусловлена обнаруженной в процессе численного моделирования многоэкстремальностью КПД (3), что может оказаться существенным и при практической реализации компрессора.

Результаты численного моделирования

На рис. 2 приведены КПД и коэффициент усиления мощности как функции степени компрессии для следующих оптимизированных систем: 1 — однорезонаторный компрессор с импульсом с переворотом фазы; 2 — трехрезонаторный компрессор с ЛЧМ (линейно-частотно-

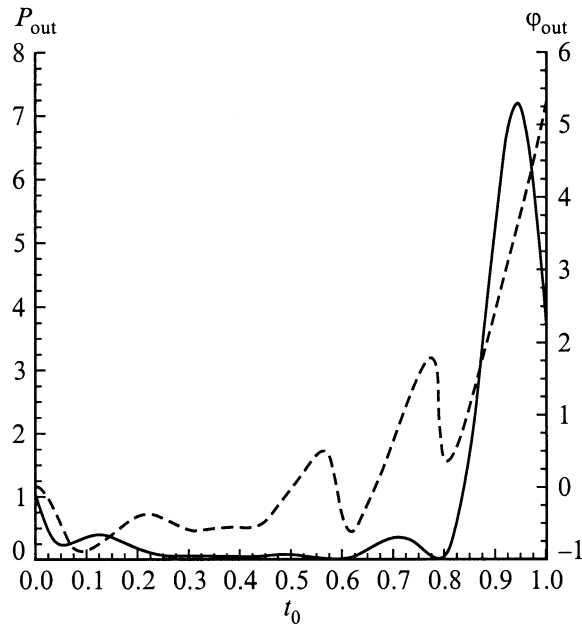


Рис. 3. Зависимости мощности (сплошные кривые) и фазы (штриховые кривые) выходного импульса от безразмерного времени для варианта А на рис. 2.

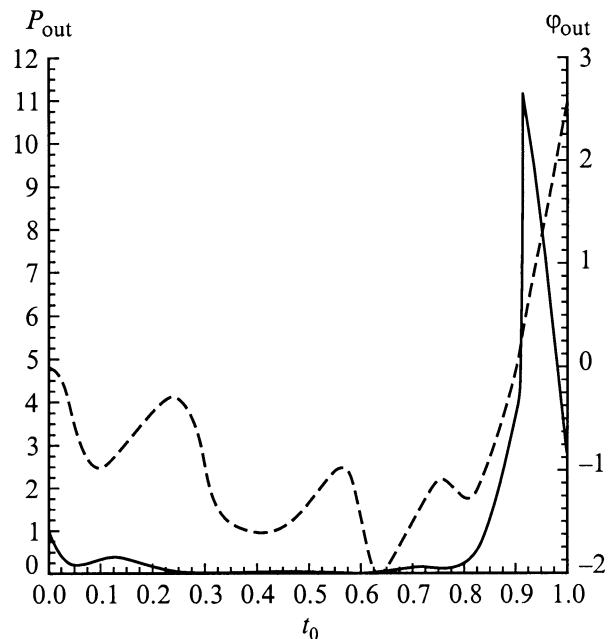


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для варианта В на рис. 2.

Таблица 1. Параметры оптимизированных компрессоров для вариантов *A, B, C, D* и *E* на рис. 2.

Вариант	α	δ	$\Delta\varphi$	β_1	γ_1	β_2	γ_2	β_3	γ_3
<i>A</i>	24.2	—	—	8.65	1.86	16.	2.67	27.	4.15
<i>B</i>	20.3	0.909	1.46	5.51	1.54	13.1	2.27	24.3	5.11
<i>C</i>	9.15	0.858	1.89	0.63	1.24	8.71	2.86	—	—
<i>D</i>	17.1	0.921	1.02	1.35	1.82	8.69	2.98	16.8	5.67
<i>E</i>	18.2	—	—	1.26	1.93	8.37	2.88	16.6	4.24

Таблица 2. Области робастности параметров оптимизированных компрессоров для вариантов *A, B, C, D* и *E* на рис. 2.

Вариант	$\alpha, \%$	$\delta, \%$	$\Delta\varphi, \%$	$\beta_1, \%$	$\gamma_1, \%$	$\beta_2, \%$	$\gamma_2, \%$	$\beta_3, \%$	$\gamma_3, \%$
<i>A</i>	+2	—	—	+7	+38	+4	+24	+3	+19
	-2	—	—	-7	-29	-4	-21	-3	-17
<i>B</i>	+2	+3	+25	+11	+38	+4	+24	+4	+19
	-2	-3	-24	-11	-31	-4	-21	-4	-16
<i>C</i>	+4	+2	+15	+85	+36	+7	+19	—	—
	-4	-(< 1)	-15	-84	-30	-7	-17	—	—
<i>D</i>	+3	+4	+39	+50	+42	+7	+22	+6	+17
	-3	-4	-40	-55	-31	-7	-19	-6	-15
<i>E</i>	+3	—	—	+58	+45	+8	+23	+5	+17
	-3	—	—	-60	-33	-8	-20	-5	-15

модулированным) импульсом; 3 — двухрезонаторный компрессор с ЛЧМ импульсом со скачком фазы; 4 — трехрезонаторный компрессор с ЛЧМ импульсом со скачком фазы.

На рис. 3 и 4 показаны зависимости мощности P_{out} и фазы φ_{out} выходного импульса от безразмерного времени $t_0 = t/T$ для вариантов *A* и *B* на рис. 2.

В таблице 1 приведены параметры входного импульса и резонаторов для пяти вариантов *A, B, C, D* и *E* на рис. 2. В таблице 2 для тех же пяти вариантов приведены интервалы изменения параметров, внутри которых КПД снижается не более чем на 1%. Наиболее критичными являются скорость модуляции частоты и момент скачка фазы входного импульса.

Заключение

Поскольку с увеличением числа резонаторов в компрессоре робастность их оптимальных параметров уменьшается, при практической реализации компрессоров, по-видимому, следует ограничиться двумя или тремя резонаторами. Некоторого увеличения КПД вероятно можно достичь усложнением закона модуляции входного импульса.

Выражаем признательность М.И. Петелину за постоянный интерес к работе и стимулирующие обсуждения. Авторы благодарны А.М. Стерлину за предоставленную программу оптимизации, а также И.С. Гельфер и Д.А. Донских за помощь и консультации при программировании.

Работа выполнена при поддержке Международного научного фонда (№ NOT 000 и NOT 300) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 99-02-17781).

Список литературы

- [1] *Wilson P.B.* // Application of High-Power Microwaves / Ed. A.V. Gaponov-Grekhov & V. Granatstein. Boston; London: Artech House, 1994. P. 229–317.
- [2] *Farcas Z.D., Hogg H.A., Loew G.A., Wilson P.B.* // Proc. 9th Conf. on High Energy Accelerator. SLAC, Stanford, CA (USA), 1974. P. 576–582.
- [3] *Balakin V.E., Syrachev I.V.* // Proc. III European Particle Accelerator Conf. Berlin, 1992. P. 1173–1175.
- [4] *Petelin M.I., Tai M.L.* // AIP Conf. Proc. 1995. N 337. P. 303–310.
- [5] *Банди Б.* Методы оптимизации. Вводный курс. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1988. 128 с.
- [6] *Гунта К., Гардж Р., Чадха Р.* Машинное проектирование СВЧ устройств. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987. 432 с.
- [7] *Мануилов М.Б.* // РИЭ. 2000. Т. 45. № 1. С. 55–61.