

01;09

Пассивная компрессия безотражательным резонатором микроволновых импульсов с ограниченным спектром

© Ю.Ю. Данилов

Институт прикладной физики РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия
email: danilov@appl.sci-nnov.ru

(Поступило в Редакцию 1 ноября 2011 г.)

Рассмотрено влияние ширины спектра микроволнового импульса на эффективность его компрессии безотражательным резонатором в приложении к линейным ускорителям. На примере гауссова импульса показано, что оптимальная временная зависимость фазы по мере сужения спектра приближается к квадратичной.

Простейшая теория компрессора в виде безотражательного резонатора ограничивается рассмотрением сжатия импульса с прямоугольной огибающей и мгновенным скачком фазы на 180° (компрессор SLED) [1,2]. В работах [3,4] такой компрессор рассматривался для частных случаев с конечным временем переключения фазы. В настоящей работе обсуждался вопрос о влиянии на эффективность компрессора в виде безотражательного резонатора ширины спектра сжимаемого импульса, и амплитуда, и фаза которого не имеют крутых фронтов.

Ограничимся рассмотрением компрессии гауссова импульса $E(t) = \exp(-t^2/2b^2)$, закон фазовой модуляции которого задан в виде

$$\varphi_{in}(t) = \Delta\varphi \cdot \{ \text{th} [\xi(t - t_1)] + \text{th} [\xi t_1] \},$$

частным случаем которого ($\Delta\varphi = \pi$, $\xi \rightarrow \infty$) является скачок фазы в компрессоре SLED. За длительность гауссова импульса примем величину $T = 2.8b$, при которой максимально значение его свертки по мощности с прямоугольным импульсом.

Деформация микроволнового импульса $E = \text{Re} \{ E(t) \exp(i\omega_g t) \}$ консервативным безотражательным резонатором описывается уравнением [5]

$$\begin{aligned} \frac{dE_{out}(t)}{dt} - i \left\{ \omega'_0 \left[1 + \frac{i}{2Q_{ext}} \right] - \omega_g \right\} E_{out}(t) \\ = \frac{dE_{in}(t)}{dt} - i \left\{ \omega'_0 \left[1 - \frac{i}{2Q_{ext}} \right] - \omega_g \right\} E_{in}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где ω_g — несущая частота исходного импульса, ω'_0 и Q_{ext} — действительная часть собственной частоты и внешняя добротность резонатора, E_{in} и E_{out} — комплексные амплитуды исходного и деформированного импульсов.

Работу любого компрессора принято характеризовать степенью сжатия s , эффективностью (кпд) компрессии η и коэффициентом усиления мощности $P_g = s\eta$ — произведением степени сжатия на КПД. В приложении к линейным ускорителям, следуя [1,2], в качестве длительности рабочей части выходного импульса примем величину

T/s , а под КПД будем подразумевать отношение энергии, содержащейся в интервале T/s , к энергии исходного импульса.

Для сформулированной задачи КПД компрессии η и коэффициент повышения мощности P_g представляют собой функции безразмерных параметров s , $\Delta\varphi$, ξ_0 , ξ_1 , β , γ и ξ_k :

$$\xi_0 = \xi T, \quad \xi_1 = \frac{t_1}{T}, \quad \beta = (\omega'_0 - \omega_g) T,$$

$$\gamma = \frac{\omega'_0 T}{2Q_{ext}}, \quad \xi_k = \frac{t_k}{T},$$

где t_k — момент времени, с которого „начинается“ рабочая часть выходного импульса. Параметры t_1 и t_k отсчитываются от центра гауссова импульса.

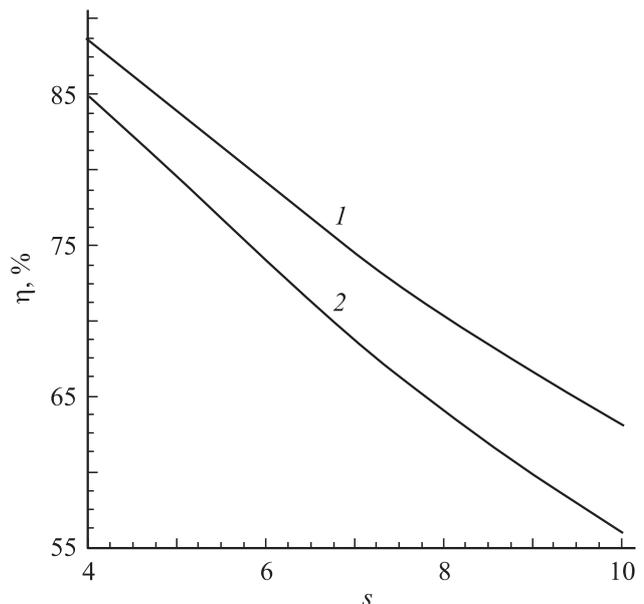


Рис. 1. КПД оптимизированного компрессора в виде безотражательного резонатора как функция степени компрессии s при неограниченной ширине спектра исходного импульса: гауссова (1) и прямоугольного (2).

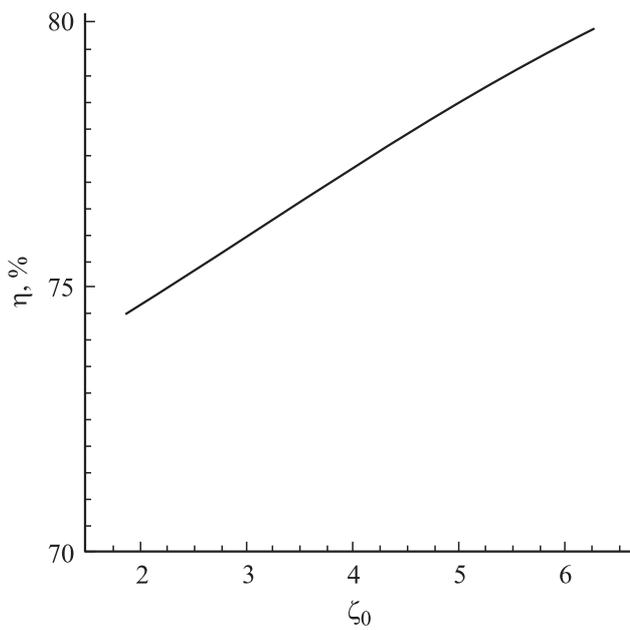


Рис. 2. Кпд оптимизированного компрессора в виде безотражательного резонатора как функция параметра ζ_0 при степени компрессии $s = 4$.

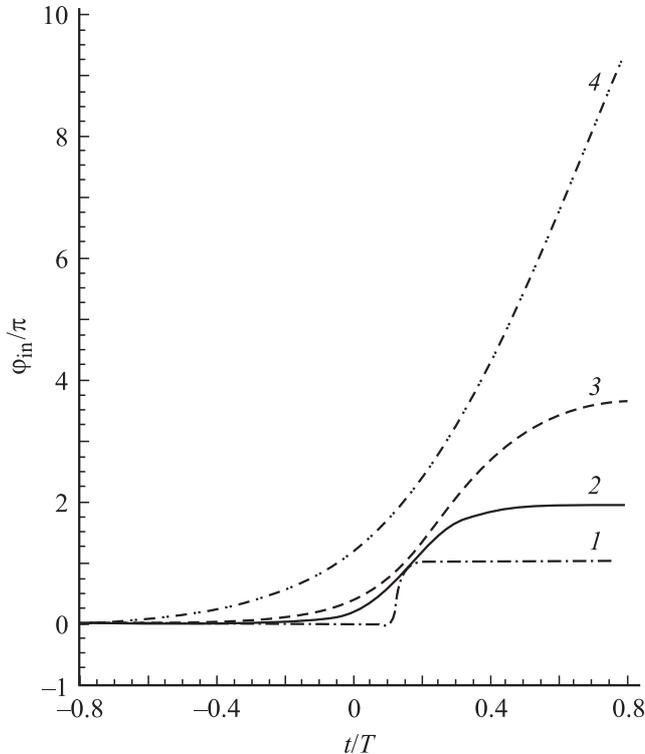


Рис. 3. Временные зависимости фазы исходного импульса φ_{in} , соответствующие его максимально эффективной компрессии безотражательным резонатором при степени компрессии $s = 4$: 1 — $\zeta_0 = 62.6$; 2 — $\zeta_0 = 6.26$; 3 — $\zeta_0 = 3.76$; 4 — $\zeta_0 = 1.88$.

Для поиска максимума кпд при фиксированной степени компрессии использовался модифицированный метод Хука–Дживса [6], который хорошо зарекомендовал себя при расчетах различных микроволновых устройств [7,8]. Уравнение (1) интегрировалось по методу Рунге–Кутты четвертого порядка с переменным шагом.

Сначала при оптимизации фиксировались степень компрессии s и безразмерная „крутизна“ скачка фазы ζ_0 , которая определяет ширину спектра исходного импульса, а остальные безразмерные параметры оптимизировались с целью получения максимального кпд. Затем оптимизация последовательно проводилась при фиксированной степени компрессии s для других значений параметра ζ_0 . На следующем этапе вся процедура повторялась для других степеней компрессии s . Оптимизированной функции каждый раз ставился в соответствие спектр исходного импульса; он сужается при уменьшении параметра ζ_0 .

При отсутствии ограничений на ширину спектра исходного импульса оптимальным законом фазовой модуляции, как и для компрессора SLED [1,2], является мгновенный скачок фазы на 180° . Замена прямоугольной огибающей импульса на гауссову повышает эффективность компрессии (рис. 1).

При сужении ширины спектра кпд компрессии монотонно снижается (рис. 2), но остается приемлемым в приложении к линейным ускорителям [2,4], а оптимальная зависимость фазы исходного импульса приближается к квадратичной (рис. 3, кривая 4). Ей соответствуют следующие оптимальные параметры компрессора (см. таблицу) и зависимость мощности импульса на выходе компрессора (рис. 4).

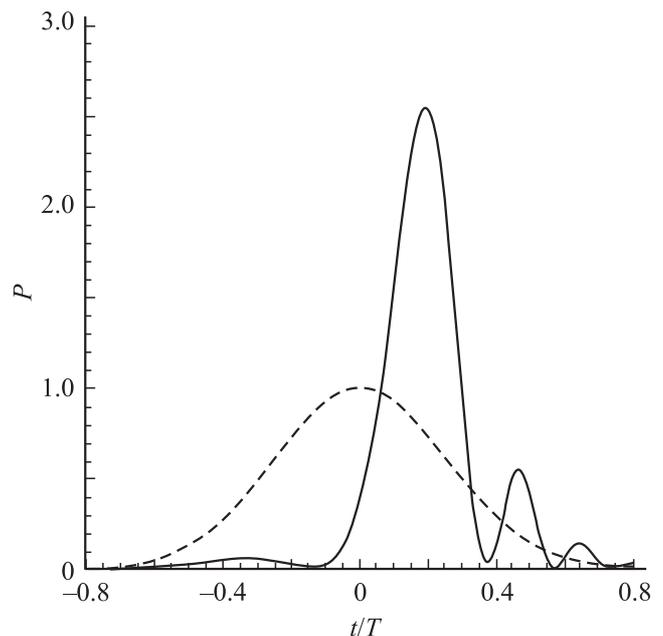


Рис. 4. Временные зависимости мощностей сжатого P_{out} и исходного P_{in} импульсов для варианта (4) в таблице.

Оптимальные параметры компрессора, соответствующие законам фазовой модуляции 2, 3 и 4 на рис. 3.

Зависимость на рис. 3	$\Delta\varphi$	ξ_0	ξ_1	β	γ	ξ_k
2	3.11	6.26	0.174	1.5	3.04	0.072
3	5.92	3.76	0.283	2.54	3.24	0.064
4	22.97	1.88	0.632	6.47	3.29	0.056

Квадратичный закон фазовой модуляции является легко реализуемым [9,10], поэтому представленные результаты (они допускают обобщение и на другие законы амплитудной модуляции исходного импульса) могут найти применение при разработке систем питания линейных ускорителей, а также для тестирования различных электродинамических компонентов на высоком уровне мощности.

Список литературы

- [1] *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.
- [2] *Wilson P.B.* // Application of High-Power Microwaves / Ed. A.V. Gaponov-Grekhov, V. Granatshein. Boston & London: Artech House, 1994. P. 229–317.
- [3] *Лавров Б.П., Лебедюк И.И., Левин В.И.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30. № 3. С. 444–447.
- [4] *Сырачев И.В.* // Канд. дисс. физ.-мат. наук. Протвино. 1997. 103 с.
- [5] *Данилов Ю.Ю., Тай М.Л.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 4. С. 99–101.
- [6] *Банди Б.* Методы оптимизации. Вводный курс. М.: Радио и связь, 1988. 128 с.
- [7] *Гупта К., Гардж Р., Чадха Р.* Машинное проектирование СВЧ-устройств. М.: Радио и связь, 1987. 432 с.
- [8] *Мануилов М.Б.* // РЭ. 2000. Т. 45. № 1. С. 55–61.
- [9] *Кочемасов В.Н., Белов Л.А., Оконешников В.С.* Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией. М.: Радио и связь, 1983. 192 с.
- [10] *Данилов Ю.Ю., Кузиков С.В., Павельев В.Г. и др.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 4. С. 131–133.