

Эффективность последовательной резонансной компрессии радиоимпульсов

© С.Н. Артеменко

Научно-исследовательский институт ядерной физики при Томском политехническом университете, 634050 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 11 августа 1997 г. В окончательной редакции 21 апреля 1998 г.)

Рассмотрен вопрос об эффективности формирования мощных широкополосных и сверхширокополосных радиоимпульсов методом последовательной резонансной компрессии. Проанализирован процесс компрессии радиоимпульсов с прямоугольной огибающей в последовательностях, состоящих из двух или трех компрессоров, а также в последовательности с экспоненциальным спадом выходного сигнала первой ступени и прямоугольными огибающими остальных ступеней. Определена максимальная эффективность накопления энергии в резонаторе при его возбуждении сигналом с экспоненциальным спадом.

В [1] показана возможность получения мощных широкополосных и сверхширокополосных СВЧ импульсов методом последовательной резонансной компрессии, осуществляемой поочередным накоплением и быстрым выводом энергии импульсов в линейной цепочке резонаторов. Вместе с тем очевидно, что увеличение числа ступеней компрессии приводит к дополнительным потерям энергии. Поэтому энергетические характеристики подобных устройств могут оказаться невысокими и существенно зависящими от параметров каждой из ступеней. Так, в [1] при коэффициенте усиления ~ 28 дБ КПД устройства не превышал 7%. В этой связи естественен вопрос о возможности оптимизации таких систем с целью повышения коэффициента усиления и КПД.

В настоящей работе проанализирован вопрос о коэффициенте усиления и КПД при последовательной компрессии СВЧ импульсов с прямоугольной огибающей, а также при компрессии импульсов с экспоненциальным спадом.

1. Сжатие импульсов с огибающей, близкой к прямоугольной, реализуется в последовательности компрессоров с одномодовыми резонаторами. При этом коэффициент усиления M^2 и эффективность передачи энергии в нагрузку (КПД) \varkappa для каждой из ступеней определяются выражениями [2]

$$M^2 = 4\beta(1 - \exp(-t_i(1 + \beta)/2\tau_p))^2 \times (\tau_p/\tau_B - \beta - 1)/(1 + \beta)^2, \quad \varkappa = \eta_H \eta_p, \quad (1)$$

где β — коэффициент связи резонатора с ВЧ трактом; t_i — длительность входного импульса; τ_p , τ_B — постоянные звучания резонатора и затухания выходного импульса; η_H — эффективность накопления энергии; η_p — КПД резонатора,

$$\eta_H = 4\beta\tau_p(1 - \exp(-t_i(1 + \beta)/2\tau_p))^2 / (t_i(1 + \beta)^2) [3],$$

$$\eta_p = 1 - Q_B/Q_H, \quad (2)$$

Q_H , Q_B — добротности резонатора в режиме накопления и вывода.

Из (1), (2) нетрудно получить связь между M^2 , η_H , η_p , t_i и \varkappa

$$M^2 = \eta_H \eta_p t_i / \tau_B = \varkappa t_i / \tau_B = \eta_H t_i (Q_0/Q_B - \beta - 1) / \tau_B,$$

$$Q_0 = Q_H(1 + \beta). \quad (3)$$

Для компрессоров с одномодовыми резонаторами справедливы соотношения $\tau_B \approx T$, $t_i > \tau_p$, $Q_B \ll Q_H$, поэтому (1)–(3) преобразуются к виду

$$M^2 = 4\beta(1 - \exp(-t_i(1 + \beta)/2\tau_p))^2 M_0^2 / (1 + \beta)^2,$$

$$\varkappa \approx \eta_H, \quad \eta_p \approx 1, \quad M^2 \approx \eta_H t_i / T, \quad (4)$$

где $M_0^2 = 1/2\alpha$ — коэффициент усиления резонатора, α — постоянная затухания волны при двойном его пробеге; T — время двойного пробега.

Отсюда для последовательности из N компрессоров находим

$$M_N^2 = t_1 \prod_{i=1}^N \eta_i / T_N = t_1 \varkappa_N / T_N, \quad \varkappa_N \approx \prod_{i=1}^N \eta_i, \quad (5)$$

где T_N — время двойного пробега вдоль резонатора последней ступени.

Оценки показывают, что реально можно использовать 2–3 ступени. Большее их количество приводит к неоправданному увеличению веса и размеров системы и значительному снижению КПД. При этом длительность выходного сигнала первой ступени не может превышать 30–40 нс, так как дальнейшее ее увеличение приводит к чрезмерно большой длине резонатора этой ступени и пропорциональному уменьшению коэффициента усиления ($M_1^2 \sim 1/T_1$). Поэтому для 2-й и 3-й ступеней справедливы неравенства $t_{2,3} \ll \tau_{p2,p3}$, ($t_2 = T_1$, $t_3 = T_2$), которые означают, что резонаторы этих ступеней должны работать при сильной пересвязи ($\beta_2, \beta_3 \gg 1$). В силу этого $\eta_{2,3} \approx 0.8$ [3] и для 2- и 3-ступенчатых систем выражения (5) принимают вид

$$M_{N=2}^2 \approx 0.8\eta_1 t_1 / T_2, \quad M_{N=3}^2 \approx 0.64\eta_1 t_1 / T_3,$$

$$\varkappa_{N=2} \approx 0.8\eta_1, \quad \varkappa_{N=3} \approx 0.64\eta_1. \quad (6)$$

Из (6) видно, что коэффициент усиления системы при компрессии импульсов с прямоугольной огибающей является функцией эффективности накопления первой ступени и отношения длительностей входного и выходного импульсов, а КПД — функцией только эффективности накопления первой ступени. Так как в первой ступени необходимо применение достаточно длинных резонаторов, имеющих практически неизменную величину постоянной τ_{p1} , а следовательно при заданном t_1 и неизменное оптимальное значение β_1 , то при фиксированных длительностях входного и выходного импульсов практически независимо от индивидуальных параметров первой ступени коэффициент усиления и КПД последовательности будут постоянными. Поэтому в рассматриваемом случае выбор первой ступени должен определяться только соображениями приемлемости ее массогабаритных характеристик и электрической прочности для заданного уровня входной мощности.

2. Одномодовые резонаторы позволяют получать импульсы с прямоугольной огибающей и имеют высокий коэффициент усиления (до 20 dB). Вместе с тем из-за низкой добротности и малого объема в них невозможно накопление достаточно большого количества энергии, что не позволяет использовать их для получения импульсов с большим запасом энергии. Для этой цели более подходящими являются относительно высокодобротные многомодовые резонаторы, которые при небольших габаритных размерах имеют большой объем и способны формировать достаточно длинные и энергоемкие наносекундные СВЧ импульсы (~ 100 ns). Однако, обладая высокой эффективностью накопления ($\eta_1 \approx 0.6$), компрессоры с многомодовыми резонаторами имеют относительно низкий коэффициент усиления (~ 10 dB) и выходной сигнал с экспоненциальным спадом. Это делает неочевидной перспективность их использования в первой ступени. Бесперспективность их применения во 2-й и 3-й представляется несомненной. Поэтому рассмотрим только последовательность с многомодовым резонатором в первой ступени и одномодовыми в последующих. Огибающая выходного импульса компрессора с многомодовым резонатором определяется выражением [2]

$$b_1^2(t) = 8\beta_1\beta_B(1 - \exp(-t_1(1 + \beta_1)/2\tau_p))^2 \times P_g \exp(-t/\tau_B)/(1 + \beta_1)^2, \quad (7)$$

где β_B — коэффициент выходной связи резонатора, $\beta_B = \tau_p/\tau_B - \beta_1 - 1$, P_g — мощность генератора.

Можно показать, что процесс накопления в резонаторе 2-й ступени в этом случае описывается дифференциальным уравнением

$$db_2/dt + b_2/2\tau_{p2} \approx j\sqrt{\beta_2}b_1(t)/M_{01}T_2, \quad (8)$$

где M_{02} — коэффициент усиления резонатора 2-й ступени.

Из (7), (8) находим

$$b_2(t) = -4\sqrt{\beta_2}(\exp(-t/\tau_H) - \exp(-t/2\tau_B)) \times \tau_H\tau_B b_1(0)/(T_2 M_{02}(2\tau_B - \tau_H)), \quad (9)$$

где $\tau_H = 2\tau_{p2}/(1 + \beta_2)$.

Отсюда для коэффициента усиления M_2^2 и эффективности накопления η_2 второй ступени получаем

$$M_2(t)^2 = 4M_{02}^2(\exp(-t/\tau_H) - \exp(-t/2\tau_B))^2/((1 + \beta_2) \times (1 - \tau_{p2}/\tau_B(1 + \beta_2))^2), \quad (10)$$

$$\eta_2(t) = M_2(t)^2 T_2/\tau_B. \quad (11)$$

Далее можно показать, что $M_2(t)^2$ и $\eta_2(t)$ достигают максимума при $t = t_m$, определяемом равенством $t_m = 2z\tau_B \ln(z)/(z - 1)$, где $z = \tau_{p2}/(\tau_B(1 + \beta_2))$. При этом $M_2(t)^2$ и $\eta_2(t)$ принимают значения

$$M_{2m}^2 = 4\beta_2\tau_B z(z^{1/(1-z)} - z^{z/(1-z)})^2/((1 + \beta_2)(z - 1)^2 T_2), \quad (12)$$

$$\eta_{2m} = M_{2m}^2 T_2/\tau_B.$$

Из последних выражений следует уравнение для определения оптимальной величины входной связи β_2 резонатора второй ступени

$$(1 - \beta_2 - \tau_{p2}/\tau_B)/2\beta_2 - z \ln z/(1 - z). \quad (13)$$

Решение (13) в общем случае ищется численно. Однако в предельном случае, когда $\tau_{p2} \gg \tau_B$, легко установить, что $\beta_2 \approx \tau_{p2}/\tau_B - 1$. При этом η_{2m} асимптотически стремится к значению, определяемому выражением

$$\eta_{2m} = 4(1 - \tau_B/\tau_{p2})/e^2 \approx 4/e^2 \rightarrow 0.54, \quad (14)$$

а коэффициент усиления монотонно убывает по закону

$$M_{2m}^2 \approx 4M_{02}^2\tau_B/(e^2\tau_{p2}) \approx 4M_{02}^2/(e^2(\beta_2 + 1)) \rightarrow 4\tau_B/(e^2T_2). \quad (15)$$

Таким образом, согласно последним выражениям, при возбуждении резонатора сигналом с экспоненциальным спадом эффективность накопления не может превышать 0.54, а коэффициент усиления по мере укорочения возбуждающего импульса монотонно падает и при $\tau_B \approx 2T_2$ стремится к единице. Однако, поскольку, как правило, сверхразмерные резонаторы обеспечивают $\tau_B > 10T_2 \approx 0.1\tau_{p2}$, то в любом случае коэффициент усиления второй степени будет не менее 5–10. Для последовательности из двух или трех компрессоров из (1), (10), (11) нетрудно получить выражения для M_N^2 и \varkappa_N

$$M_{N=2}^2 = \varkappa_1\eta_2 t_1/T_2, \quad M_{N=3}^2 = 0.8\varkappa_1\eta_2 t_1/T_3, \quad (16)$$

$$\varkappa_{N=2} = \varkappa_1\eta_2, \quad \varkappa_{N=3} = 0.8\varkappa_1\eta_2,$$

где \varkappa_1 определяется соотношением (1), а η_2 — формулами (12), (13).

Как следует из (16), в отличие от последовательности компрессоров с прямоугольными импульсами в последовательности с сигналом с экспоненциальным спадом после первой ступени коэффициент усиления и КПД определяются эффективностью передачи энергии не только 1-й, но и 2-й ступени. Так как обычно $\kappa_1 \approx 0.6$ [2], а η_2 , согласно (12), равна 0.3–0.5, то КПД первых двух ступеней и в этом случае будет практически таким же, как и в последовательности одномодовых резонаторов. В равной степени это утверждение относится и к коэффициенту усиления. Это обеспечивает несомненную перспективность использования в 1-й ступени многомодового накопительного резонатора.

3. Таким образом, анализ показал, что последовательной компрессии импульсов с прямоугольной огибающей после каждой из ступеней компрессии и с экспоненциальным спадом после первой ступени и прямоугольной огибающей в последующих коэффициент усиления и КПД системы для фиксированных длительностей входного и выходного импульсов и заданного числа ступеней являются величинами практически постоянными. Это означает определенную свободу в выборе размеров резонаторов первых ступеней.

Установлено, что эффективность накопления энергии СВЧ импульсов с экспоненциальным спадом не превышает 0.54.

Автор благодарит Ю.Г. Юшкова за поддержку при выполнении работы.

Список литературы

- [1] Новиков С.А., Разин С.В., Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 20. С. 46–48.
- [2] Артеменко С.Н. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 10. С. 163–171.
- [3] Бараев С.В., Коровин О.П. // ЖТФ. 1980. Т. 50. Вып. 11. С. 2465–2467.