

01;09

К теории компрессора микроволновых импульсов на основе бочкообразного резонатора с винтовым гофром

© Ю.Ю. Данилов, С.В. Кузиков, М.И. Петелин

Институт прикладной физики РАН,
603600 Нижний Новгород, Россия

(Поступило в Редакцию 19 августа 1998 г.)

Для пассивного компрессора микроволновых импульсов на основе резонатора, образованного отрезком сверхразмерного волновода с винтовой гофрировкой внутренней поверхности, рассчитаны радиационный декремент затухания и коэффициент передачи проходящей волны.

Введение

Для пассивной компрессии микроволновых импульсов [1] в работе [2] была предложена разновидность кольцевого резонатора на основе осесимметричной металлической структуры (см. рисунок), состоящей из секций разного диаметра, соединенных плавными переходами. Собственно резонатор представляет собой слегка расширенную среднюю часть трубы. Связь между проходящей сквозь систему волной и рабочей модой резонатора обеспечивается нанесенной на его поверхность винтовой гофрировкой [3,4]. Работа посвящена построению приближенной аналитической теории такого компрессора.

Структура рабочих мод резонатора и волновода

Рассмотрим случай, когда рабочими выбраны H -мода в волноводе

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_w &= \text{Re}\{C_j(z)\mathbf{E}_j \exp(i\omega t)\}, \\ \mathbf{H}_w &= \text{Re}\{C_j(z)\mathbf{H}_j \exp(i\omega t)\}, \\ \mathbf{E}_{\perp j} &= -ik \left(\frac{R}{\mu_{mn}}\right)^2 [\nabla_{\perp} H_{zj}, \mathbf{z}^0], \\ \mathbf{H}_{\perp j} &= -ih_j \left(\frac{R}{\mu_{mn}}\right)^2 \nabla_{\perp} H_{zj}, \\ H_{zj} &= J_{mj} \left(\frac{\mu_{mn}r}{R}\right) \exp(-im_j\varphi - ih_jz), \end{aligned} \quad (1)$$

где $k = \omega/c$, $h_j = \sqrt{k^2 - (\mu_{mn}/R)^2}$, μ_{mn} — n -й корень производной бесселевой функции m -го порядка, $R(z)$ — радиус невозмущенной поверхности резонатора,

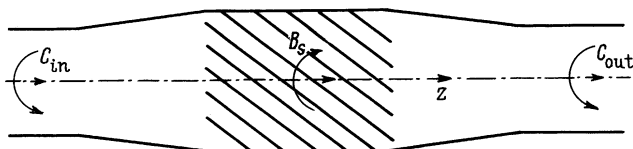


Схема резонатора.

и E -мода в резонаторе (оптимальная с точки зрения электропрочности)

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_r &= \text{Re}\{B_s \mathbf{E}_s \exp(i\omega t)\}, \quad \mathbf{H}_r = \text{Re}\{B_s \mathbf{H}_s \exp(i\omega t)\}, \\ \mathbf{H}_{\perp s} &= ik \left(\frac{R}{\nu_{mn}}\right)^2 [\nabla_{\perp} E_{zs}, \mathbf{z}^0], \\ E_{zs} &= J_{ms} \left(\frac{\nu_{mn}r}{R}\right) \exp(im_s\varphi) F(z), \end{aligned} \quad (2)$$

где $h_s(z) = \sqrt{k^2 - (\nu_{mn}/R)^2}$, ν_{mn} — n -й корень бесселевой функции m -го порядка.

Длина резонатора предполагается намного превышающей длину волны $\lambda = 2\pi c/\omega$, что позволяет пренебречь радиальной и азимутальной компонентами электрического поля рабочей "одногогорбой" квазикритической моды по сравнению с продольной компонентой, зависимость которой от координаты z описывается медленно меняющейся действительной функцией $F(z)$, удовлетворяющей уравнению неоднородной струны [5,6]

$$\frac{d^2F(z)}{dz^2} + h_s^2(z)F(z) = 0$$

и экспоненциально спадающей за пределами резонатора.

Связь между рабочими модами резонатора и волновода

Возмущение, вносимое гофрировкой стенки резонатора, учтем введением поверхностного магнитного тока \mathbf{i}^m [3,5]

$$\mathbf{i}^m = \frac{1}{4\pi} [\mathbf{n}, i\omega l [\mathbf{n}, \mathbf{H}] + c\nabla(E_n l)], \quad (3)$$

где \mathbf{n} — единичный вектор нормали, направленной внутрь металла; $l(z) = b(z) \cos(\bar{m}\varphi + \bar{h}z)$ — профиль гофра; b — его глубина.

Согласно (3), магнитный ток, порожденный на гофрированной поверхности рабочей модой резонатора (2), обладает гармоникой, соответствующей синхронной волноводной моде (1), при условии (ср. с [3])

$$m_j - m_s = \bar{m}, \quad h_j \approx \bar{h} = \frac{2\pi}{d}, \quad (4)$$

где \bar{m} и d — число заходов и шаг гофра.

Подавление переизлучения в паразитные волны достигается использованием в резонаторе и волноводе мод с противоположным направлением вращения (противоположными знаками m_j и m_s).

Свободные колебания в резонаторе при излучении в волновод: энергетический подход

Комплексную амплитуду волноводной моды, возбуждаемой полем собственной моды резонатора (2), найдем из [7]

$$\frac{dC_j(z)}{dz} = -\frac{1}{N_j} \oint \mathbf{i}^m \mathbf{H}_j^* d\sigma, \quad (5)$$

где $d\sigma = R d\varphi$, $N_j = -c \operatorname{Re} \int [\mathbf{E}_j, \mathbf{H}_j^*] \mathbf{z}^0 dS_{\perp} / 2\pi$ — норма рабочей моды волновода, $dS_{\perp} = r dr d\varphi$.

Подставив (1) и (2) в (3), а затем (3) в (5) и пренебрегая производными медленно меняющихся функций $\partial C_j(z)/\partial z$, $\partial R/\partial z$, $\partial b/\partial z$, а также быстро осциллирующими членами, при условии (4) получаем из (5) при $C_{in} = C_j(-\infty) = 0$ амплитуду излучаемой из резонатора волны $C_{out} = C_j(\infty)$

$$C_{out} = K_1 I_1 B_s,$$

где $K_1 = km_j \mu_{mn}^2 J'_{ms}(\nu_{mn}) / 2(\mu_{mn}^2 - m_j^2) \nu_{mn} R J_{mj}(\mu_{mn})$, $I_1 = \int_{-\infty}^{\infty} b(z) F(z) dz$, и мощность, излучаемую из резонатора в волновод,

$$P_j = \frac{|C_{out}|^2 |N_j|}{4}. \quad (6)$$

На основании (6) найдем декремент радиационного затухания $\omega_s'' = P_j / 2W_s$ ($W_s = |B_s|^2 N_s / 2$ — средняя энергия, запасенная в резонаторе, определяемая на основе (2), $N_s = \int |\mathbf{E}_s|^2 dV / 4\pi = \int |\mathbf{H}_s|^2 dV / 4\pi$ — норма рабочей моды резонатора)

$$\omega_s'' = \frac{\omega M}{(\mu_{mn}/m_j)^2 - 1}, \quad (7)$$

где $M = h_j I_1^2 / 8R^2 I_r$, $I_r = \int_{-\infty}^{\infty} F^2(z) dz$.

Соответственно для радиационной добротности резонатора имеем

$$Q_s = \frac{(\mu_{mn}/m_j)^2 - 1}{2M}.$$

Аналогичные формулы получаются и для случая, когда рабочей модой волновода является E -мода,

$$\omega_s'' = \frac{\omega k^2 M}{h_j^2}, \quad Q_s = \frac{1}{2M}.$$

Коэффициент передачи резонатора

На основании [8] коэффициент передачи кольцевого резонатора в пренебрежении потерями описывается универсальной формулой

$$T(\omega) = \frac{C_{out}}{C_{in}} = \frac{\omega - \omega_{s0} + i\omega_s''}{\omega - \omega_{s0} - i\omega_s''}, \quad (8)$$

где ω_{s0} — невозмущенная собственная частота резонатора; ω_s'' — радиационный декремент, для которого в данном случае можно воспользоваться формулой (7).

К тому же результату можно прийти, решая самосогласованную систему уравнений возбуждения волновода (5) и резонатора,

$$B_s = -\frac{i}{2(\omega - \omega_{s0}) N_s} \oint \mathbf{i}^m \mathbf{H}_s^* d\sigma. \quad (9)$$

Подставив (1) и (2) в (3), а затем (3) в (5) и (9) и пренебрегая производными медленно меняющихся функций $\partial C_j(z)/\partial z$, $\partial R/\partial z$, $\partial b/\partial z$, а также быстро осциллирующими членами, при условии (4) получаем систему уравнений относительно амплитуды проходящей сквозь резонатор волны $C_j(z)$ и амплитуды собственной моды резонатора B_s

$$C_j(z) = C_{in} + K_1 I_1 B_s, \quad (10a)$$

$$B_s = \frac{iK_2 I_2 C_j(z)}{\omega - \omega_{s0}}, \quad (10b)$$

где $C_{in} = C_j(-\infty)$ — амплитуда волны, возбуждающей резонатор; $K_2 = \omega m_j h_j \nu_{mn} J_{mj}(\mu_{mn}) / 4k \mu_{mn}^2 R J'_{ms}(\nu_{mn}) I_r$, $I_1 = \int_{-\infty}^z b(z') F(z') dz'$, $I_2 = \int_{-\infty}^{\infty} b(z) C_j(z) F(z) dz$.

Перейдя к (10a) к амплитуде, прошедшей сквозь резонатор волны $C_{out} = C_j(\infty)$, а также подставив (10a) в (10b) и взяв интеграл по частям, получаем систему уравнений относительно C_{out} и амплитуды собственной моды резонатора B_s

$$C_{out} = C_{in} + K_1 I_1 B_s, \quad (11a)$$

$$(\omega - \omega_{s0}) B_s = iK_2 I_1 \left(C_{in} + \frac{1}{2} K_1 I_1 B_s \right). \quad (11b)$$

Из системы (11) получаем универсальный коэффициент передачи кольцевого резонатора $T = C_{out}/C_{in}$ в форме (8).

Заключение

Поскольку коэффициент передачи устройства, показанного на рисунке, описывается соотношением (8), универсальным для любых резонаторов кольцевого типа, то использование этого устройства для компрессии микроволновых импульсов может быть осуществлено стандартным методом, описанным в [1,8].

Работа выполнена при поддержке Международного научного фонда (№ NOT 000 и № NOT 300) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 1.8 МНТП России "Физика микроволн" за 1997 г.).

Список литературы

- [1] *Wilson P.B.* // Application of High-Power Microwaves / Ed. A. Gaponov-Grekhov, V. Granatstein. Boston; London: Artech House, 1994. P. 229–317.
- [2] *Danilov Yu.Yu., Kuzikov S.V., Paveleyev V.G.* et al. // On CD-ROM Proc. of 7th Intern. Workshop on Linear Colliders. Zvenigorod, 1997.
- [3] *Ковалев Н.Ф., Орлова И.М., Петелин М.И.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1968. Т. 11. № 5. С. 783–786.
- [4] *Гольденберг А.Л., Нусинович Г.С., Павельев А.Б.* // Гиротроны / Под ред. В.А. Флягина. Горький: ИПФ АН СССР, 1980. С. 91–97.
- [5] *Каценеленбаум Б.З.* Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 216 с.
- [6] *Власов С.Н., Жислин Г.М., Орлова И.М.* и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1969. Т. 12. № 8. С. 1236–1244.
- [7] *Вайнштейн Л.А.* Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988. 440 с.
- [8] *Petelin M.I., Tai M.L.* // AIP Conf. Proc. 1995. N 337. P. 303–310.