

УДК 621.372.828

ГОФРИРОВАННО-ЩЕЛЕВЫЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ СВЧ ДИАПАЗОНА

В. А. Неганов, Е. И. Нефедов, В. В. Порубов

Рассматриваются линии передачи, образованные щелью в металлической плоскости над гофрированными поверхностями. Получено достаточно простое дисперсионное уравнение для таких структур. Гофрированная поверхность описывается с помощью эквивалентных граничных условий для периодических структур. Проведен электродинамический анализ щелевых структур с гофрированными поверхностями с продольными и поперечными канавками. Показано, что в структуре с гофрой с поперечными канавками возможно распространение поверхностных волн с достаточно большим коэффициентом замедления. Рассмотренные структуры обладают повышенной стабильностью электродинамических характеристик к механическим и тепловым воздействиям, большой прочностью.

К настоящему времени предложено, исследовано и практически используется большое число типов регулярных и нерегулярных линий передачи (ЛП): волноводные, коаксиальные, щелевые и многие другие (см., например, [1]). В данной работе в импедансном приближении рассматриваются направляющие структуры, образованные щелью в металлической плоскости над гофрированными поверхностями (некоторые возможные структуры показаны на рис. 1). Такие ЛП в общем случае будут проявлять как свойства щелевой линии, так и свойства гофрированной плоскости. Если щель достаточно далеко удалена от гофры, то волны в линии будут распространяться, как в щелевой структуре. При достаточно больших размерах щели направленное распространение волн будет поддерживать импедансная плоскость. Конечно, большой интерес представляет случай, когда одновременно проявляются свойства щелевой линии и гофрированной плоскости. Такие ЛП могут быть использованы для построения излучающих устройств и приборов на высокий уровень мощности, когда введение дополнительных диэлектрических слоев является нецелесообразным.

1. Дисперсионное уравнение для экранированной щелевой структуры. Так как электродинамический анализ структур, показанных на рис. 1, затруднителен, перейдем к рассмотрению их экранированных моделей (рис. 2). Очевидно, что свойства собственных волн экранированных линий передачи при достаточно больших размерах экрана будут близки к свойствам неизлучающих типов собственных волн открытых структур. Для электродинамического анализа экранированных щелевых структур будем использовать дисперсионное уравнение (щель расположена симметрично относительно плоскости $x=a/2$) [2, 3]:

$$2iY_{022} - it_3 \ln s + (1 - s^2)^2 [\Delta_{222} - s^4 (\Delta_{222} p_1 + \Delta_{221} p_2)] = 0, \quad (1)$$

где

$$p_1 = i[\Delta_{222}(s^4 \Delta_{211} - it_1) - \Delta_{212}(s^4 \Delta_{221} + t_2)] \Delta^{-1},$$

$$p_2 = (it_3 \Delta_{221} - t_2 \Delta_{222}) \Delta^{-1}, \quad \Delta_{m11} = -i(Y_{m11}/m - t_1),$$

$$\Delta = (s^4 \Delta_{211} - it_1)(s^4 \Delta_{222} + it_3) - (s^4 \Delta_{221} + t_2^2),$$

$$\Delta_{m21} = Y_{m21} - t_2, \quad \Delta_{m22} = i(mY_{m22} - t_3),$$

$$t_1 = \lim_{m \rightarrow \infty} \{m^{-1} Y_{m11}\}, \quad t_2 = \lim_{m \rightarrow \infty} \{Y_{m21}\},$$

$$t_3 = \lim_{m \rightarrow \infty} \{m Y_{m22}\}, \quad s = \sin(\pi \Delta \omega / 2a),$$

$$Y_{mij} = Y_{mij}^+ + Y_{mij}^-,$$

Y_{mij}^+ , Y_{mij}^- — соответственно элементы тензоров поверхностных адмитансов областей $y > y_1$ и $y < y_1$ для m -фурье-компоненты поля в структуре; $\Delta \omega$ — ширина щели. Получим выражения для элементов матрицы адмитансов областей под щелью [Y_{mij}^-]. Для этой цели будем описывать гофрированную плоскость при $y=0$ с помощью эквивалентных граничных условий для периодических структур. Для случая мелкой гофры они имеют следующий вид [4, 5]:

$$E_z = i\gamma H_x, \quad E_x = 0 \quad (3)$$

— для гофры с поперечными канавками и

$$E_z = 0, \quad E_x = i\gamma H_z \quad (4)$$

— для гофры с продольными канавками. В граничных условиях (3), (4) коэффициент γ определяется параметрами гофры:

$$\gamma = (2g/L) \operatorname{tg} kc, \quad (5)$$

где k — волновой вектор, g , L , c — геометрические параметры гофры (см. рис. 2а). В этом приближении выражения для элементов [Y_{mij}^-] для гофры с поперечными канавками (рис. 2) записываются следующим образом:

$$Y_{m11}^- = \xi \alpha (1 - i\gamma \xi \operatorname{tg} r_m^{(1)} y_1),$$

$$Y_{m12}^- = Y_{m21}^- = h\beta_m \alpha (1 - i\gamma \xi \operatorname{tg} r_m^{(1)} y_1) / k\mu^{(1)} r_m^{(1)}, \quad (6)$$

$$Y_{m22}^- = \alpha \left\{ i\gamma \left[(\varepsilon^{(1)} / \mu^{(1)}) \operatorname{ctg} r_m^{(1)} y_1 - \left(\frac{h\beta_m}{r_m^{(1)} k\mu^{(1)}} \right)^2 \operatorname{tg} r_m^{(1)} y_1 \right] - \frac{i[k_c^{(1)}]^2}{r_m^{(1)} k\mu^{(1)}} \right\},$$

где

$$\xi = i(k^2 \varepsilon^{(1)} \mu^{(1)} - \beta_m^2) / r_m^{(1)} k\mu^{(1)},$$

$$\alpha = (i\xi\gamma + \operatorname{tg} r_m^{(1)} y_1)^{-1}, \quad \beta_m = m\pi/a,$$

$$[k_c^{(1)}]^2 = k^2 \varepsilon^{(1)} \mu^{(1)} - h^2, \quad r_m^{(1)} = \sqrt{[k_c^{(1)}]^2 - \beta_m^2}.$$

Если гофра имеет продольные канавки (рис. 2б), то выражения для элементов [Y_{mij}^-] имеют вид

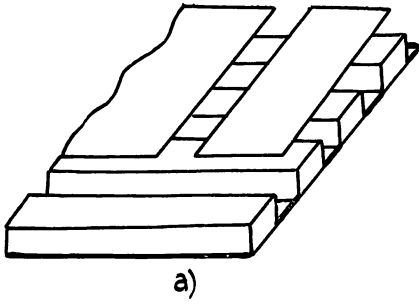
$$Y_{m11}^- = \xi \operatorname{ctg} r_m^{(1)} y_1 - i\gamma \left(\frac{h\beta_m}{r_m^{(1)} k\mu^{(1)}} \right)^2 (\Delta \sin^2 r_m^{(1)} y_1)^{-1},$$

$$Y_{m12}^- = Y_{m21}^- = h\beta_m \operatorname{ctg} r_m^{(1)} y_1 \left[1 - \gamma \frac{[k_c^{(1)}]^2}{r_m^{(1)} k\mu^{(1)}} \operatorname{tg} r_m^{(1)} y_1 \right] (\Delta k\mu^{(1)} r_m^{(1)})^{-1}, \quad (7)$$

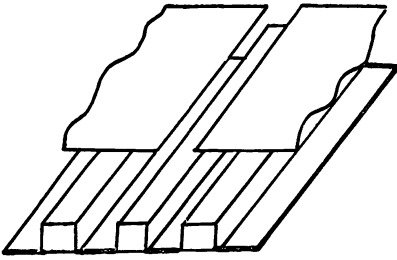
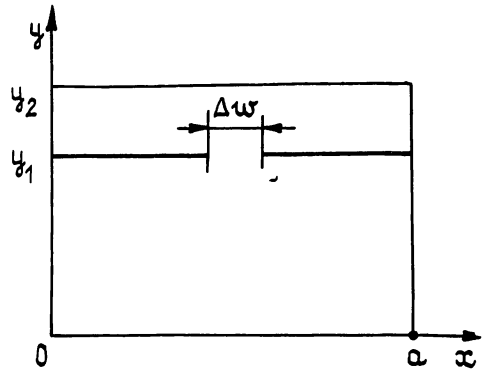
$$Y_{m22}^- = -i[k_c^{(1)}]^2 \operatorname{ctg} r_m^{(1)} y_1 \left[1 - \gamma \frac{[k_c^{(1)}]^2}{r_m^{(1)} k\mu^{(1)}} \operatorname{tg} r_m^{(1)} y_1 \right] (k\mu^{(1)} r_m^{(1)} \Delta)^{-1},$$

где

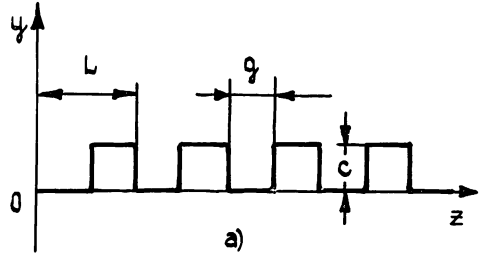
$$\Delta = 1 + \gamma [k_c^{(1)}]^2 / r_m^{(1)} k\mu^{(1)}.$$



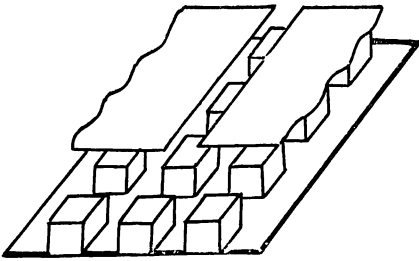
а)



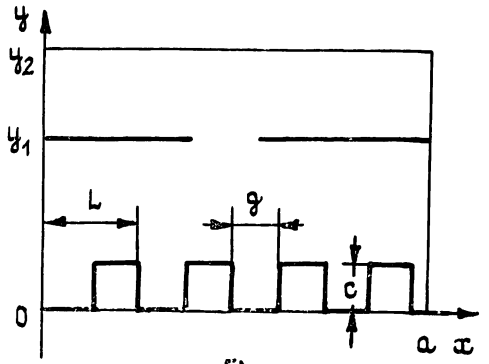
б)



а)



в)



б)

Рис. 1.

Рис. 1. Периодические направляющие структуры:

а) щель над гофрированной плоскостью с поперечными канавками; б) щель над гофрированной плоскостью с продольными канавками; в) щель над гофрированной плоскостью с поперечными и продольными канавками.

Рис. 2.

Рис. 2. Геометрия экранированных ЛП с гофрированными поверхностями:

а) гофра с поперечными канавками; б) гофра с продольными канавками.

При $\gamma=0$ соотношения (6), (7) совпадают с формулами для элементов тензора входного адмитанса для изотропного слоя, лежащего на идеально проводящей металлической плоскости при $y=0$. Элементы матрицы адмитансов области над щелью $[Y_{mj}^+]$ равны:

$$Y_{m11}^+ = i \frac{(k^2 \epsilon^{(2)} \mu^{(2)} - \beta_m^2)}{k \mu^{(2)} r_m^{(2)}} \operatorname{ctg} r_m^{(2)} (y_2 - y_1),$$

$$Y_{m12}^+ = Y_{m21}^+ = \frac{h \beta_m}{k \mu^{(2)} r_m^{(2)}} \operatorname{ctg} r_m^{(2)} (y_2 - y_1), \quad (8)$$

$$Y_{m22}^+ = - \frac{i [k_c^{(2)}]^3}{k \mu^{(2)} r_m^{(2)}} \operatorname{ctg} r_m^{(2)} (y_2 - y_1),$$

где

$$[k_c^{(2)}] = k^2 \epsilon^{(2)} \mu^{(2)} - k^2, \quad r_m^{(2)} = \sqrt{[k_c^{(2)}]^2 - \beta_m^2}.$$

2. Численные результаты. Дисперсионные свойства направляющих щелей над гофрированными плоскостями определяются из дисперсионного уравнения (1). На рис. 3 дан сравнительный анализ дисперсионных свойств волноводных собственных волн щелевых структур с различными гофрами. Из этого рисунка можно сделать вывод, что гофра с поперечными канавками оказывает более сильное влияние на распространение основной волны вдали от отсечки. И, наоборот, гофра с продольными канавками заметно изменяет свойства волны вблизи отсечки. Более слабое влияние гофры с поперечными канавками вблизи отсечки на распространение волноводных типов просто объясняется, если учесть, что ее свойства при $h=0$ в основном определяются коэффициентом Y_{022} (импеданс плоскости $y=0$ для нулевой фурье-компоненты), который не зависит от геометрии поперечных канавок.

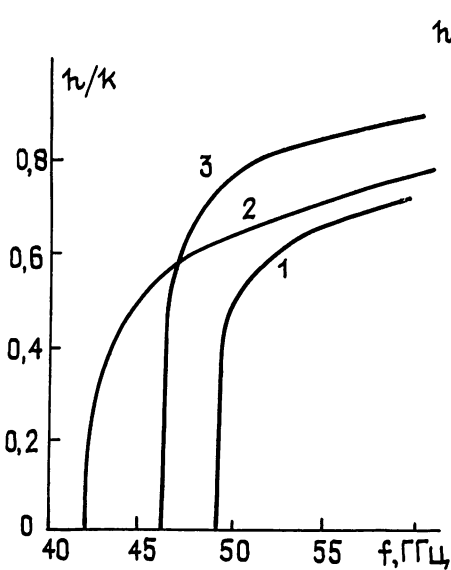


Рис. 3.

Рис. 3 1 — экранированная щелевая линия с $\gamma = 0$; 2 — щель над гофрированной плоскостью с продольными канавками; 3 — щель над гофрированной плоскостью с поперечными канавками ($a=3,5$ мм; $y_1=0,1$ мм, $y_2=2$ мм, $\Delta w=1$ мм, $\gamma=0,5$).

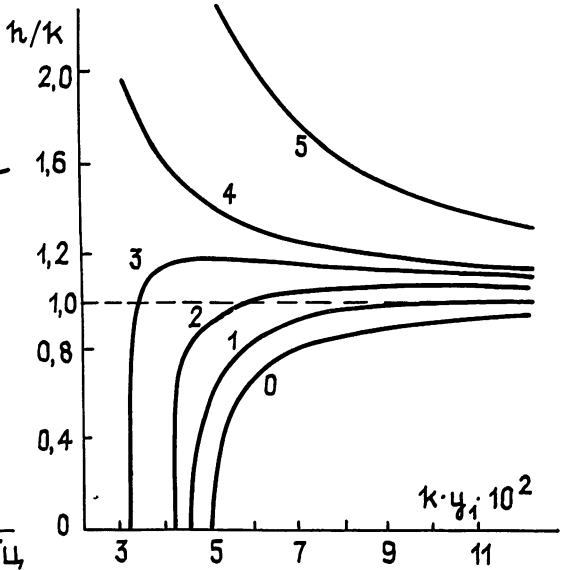


Рис. 4.

Рис. 4. Дисперсионные зависимости поверхностной волны щелевой структуры с гофрированной плоскостью с поперечными канавками ($y_1=0,1$ мм, $y_2=2$ мм, $\Delta w=1$ мм, $a=7$ мм, 0 — $\gamma=0$; 1 — $\gamma=0,05$; 2 — $\gamma=0,1$; 3 — $\gamma=0,15$; 4 — $\gamma=0,2$; 5 — $\gamma=0,5$).

Наибольший практический интерес представляет структура с поперечными канавками. В такой структуре возможно распространение поверхностных волн с коэффициентом замедления $h/k > 1$. На рис. 4 представлены дисперсионные зависимости замедления основной волны структуры при различных значениях параметра γ . Видно, что при значениях $\gamma \geq 0,2$ в структуре могут распространяться поверхностные волны с достаточно большим коэффициентом замедления, а при значениях $\gamma < 0,2$ — объемные (волноводные) волны. Следовательно, гофрированная поверхность эквивалентна введению диэлектрика в направляющую структуру. Причем чем глубже гофра, тем больше замедление собственных волн. Важно отметить и тот факт, что представленные на рис. 4 результаты не зависят от размеров экрана. Действительно, как показал численный эксперимент (рис. 5, 6), дальнейшее увеличение геометрических размеров экрана не изменяет дисперсионных свойств волноведущей структуры. Поэтому результаты, представленные на рис. 4, могут быть использованы и для моделирования открытой структуры (рис. 1а).

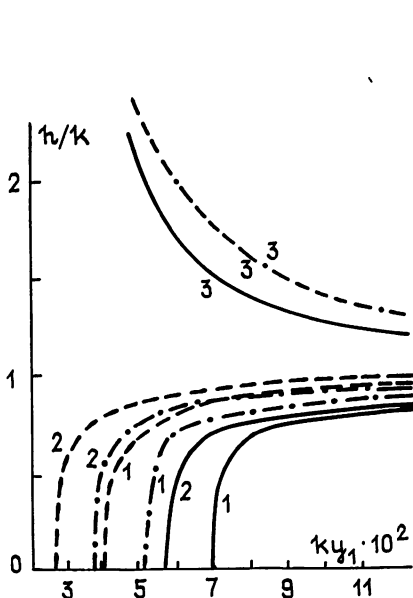


Рис. 5.

Рис. 5. Дисперсионные зависимости замедления основной волны структур при различных размерах a/y_1 (1 — $\gamma=0$; 2 — структура с гофрой с продольными канавками ($\gamma=0,5$); 3 — структура с гофрой с поперечными канавками ($\gamma=0,5$); сплошные кривые — $a/y_1=50$, штрихпунктирные кривые $a/y_1=70$, штриховые кривые — $a/y_1=90$, остальные данные на рис. 4).

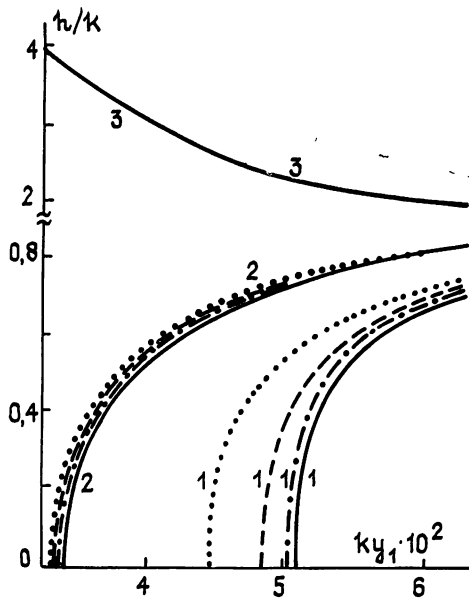


Рис. 6.

Рис. 6. Дисперсионные зависимости основной волны структур при различных значениях параметра y_2 (сплошные кривые — $y_2/y_1=40$, штрихпунктирные кривые — $y_2/y_1=50$, штриховые кривые — $y_2/y_1=60$, точечные кривые — $y_2/y_1=70$, остальные данные приведены на рис. 4).

Рассмотренные в работе структуры, образованные щелью в металлической плоскости над гофрированными поверхностями имеют целый ряд преимуществ перед обычными щелевыми структурами. К ним следует прежде всего отнести повышенную стабильность электродинамических характеристик ЛП к различного рода механическим и тепловым воздействиям, меньшие потери, большую прочность и т. д. Сильные зависимости замедления собственных волн рассмотренных выше структур от параметров гофры позволяют синтезировать ЛП с необходимыми дисперсионными свойствами. Такие ЛП могут стать основой для построения различных функциональных устройств СВЧ диапазона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гвоздев В. И., Нефедов Е. И. Объемные интегральные схемы СВЧ. — М.: Наука, 1985.
2. Неганов В. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28. № 2. С. 222.
3. Неганов В. А., Нефедов Е. И. // ДАН СССР. 1985. Т. 284. № 5. С. 1127.
4. Каценеленбаум Б. З. Высокочастотная электродинамика. — М.: Наука, 1986.
5. Нефедов Е. И., Сивов А. Н. Электродинамика периодических структур. — М.: Наука, 1977.

Куйбышевский электротехнический институт связи

Поступила в редакцию
6 апреля 1987 г.,
после переработки
10 октября 1988 г.

MICROWAVE CORRUGATED SLOT LINES

V. A. Neganov, E. I. Nephedov, V. V. Porubov

Authors analyse lines formed by a slot in the metal plane above a corrugated surface. Simple dispersive equations are obtained for these structures. Corrugated surface is described by equivalent level conditions for periodic structures. Electrodynamical analysis of the slot structures with longitudinal- and cross-grooves, the corrugated surfaces is carried out. It is shown that the surface waves exist in the cross-grooves structure with an efficient slow down coefficient. The considered structures have a high mechanical and thermoparameter stability and a big strength as well.