

УДК 621.372.543

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТУПЕНЧАТО-ИМПЕДАНСНЫХ ПОЛОСКОВЫХ РЕЗОНАТОРОВ В ГРЕБЕНЧАТЫХ ФИЛЬТРАХ**А. В. ЗАХАРОВ, М. Е. ИЛЬЧЕНКО, Л. С. ПИНЧУК**

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»,
Украина, Киев, 03056, пр-т Победы 37*

Аннотация. Исследованы смешанные коэффициенты связи между близко расположенными ступенчато-импедансными резонаторами в гребенчатых фильтрах полосковой конструкции. Смешанным коэффициентам связи k_i соответствуют нули передачи на частотах f_{zi} , которые можно перемещать относительно центральной частоты полосы пропускания фильтра f_0 путем изменения формы резонаторов. Доказано, что уменьшение зазора между резонаторами позволяет расположить частоты f_z и f_0 ближе друг к другу. Существующие ограничения минимальной величины зазора между резонаторами ограничивают степень сближения f_z и f_0 . У N -резонаторных полосковых гребенчатых фильтров со смешанными связями может быть $N - 1$ нулей передачи. Отсутствие перекрестных связей в фильтрах полосковой конструкции упрощает их построение. Установлено влияние толщины центральных проводников полосковых резонаторов на положительные и отрицательные смешанные коэффициенты связи. Приведены данные измерения миниатюрного трехрезонаторного гребенчатого фильтра полосковой конструкции, который имеет повышенную избирательность за счет двух нулей передачи. Центральная частота фильтра $f_0 = 1850$ МГц, ширина полосы пропускания $BW = 100$ МГц, фильтр размерами $5,8 \times 4,2 \times 2$ мм реализован соединением двух керамических подложек с $\epsilon_r = 92$, на которые нанесены металлизированные рисунки.

Ключевые слова: гребенчатый фильтр; смешанный коэффициент связи; нуль передачи; частотная характеристика; полосковая конструкция; ступенчато-импедансный резонатор

ВВЕДЕНИЕ

Используемые в современных телекоммуникационных системах полосно-пропускающие фильтры должны иметь малые габариты и высокую избирательность. Наиболее компактные размеры имеют гребенчатые полосно-пропускающие фильтры [1, 2], у которых резонаторы ориентированы в одном направлении, расположены один возле другого и без взаимного смещения. Резонаторы представляют собой отрезки передающих линий, один конец которых короткозамкнут, а другой — разомкнут. К разомкнутому концу может быть под-

ключена переменная емкость для осуществления частотной перестройки [3, 4].

Гребенчатая структура используется в различных конструкциях фильтров, в моноблочных керамических фильтрах, в многослойных фильтрах, выполненных по технологии LTCC, в микрополосковых и полосковых фильтрах. В гребенчатых фильтрах используются также ступенчато-импедансные резонаторы четвертьволнового типа, что дает некоторые преимущества. Такие фильтры могут иметь различные конструкции — коаксиальную [5], многослойную [6], микрополосковую [7], полосковую [8].

DOI: [10.20535/S002134701801003X](https://doi.org/10.20535/S002134701801003X)

© А. В. Захаров, М. Е. Ильченко, Л. С. Пинчук, 2018

5. Makimoto, M.; Yamashita, S. *Microwave resonators and filters for wireless communication*. Springer Science & Business Media, 2001.

6. Yeung, L. K.; Wu, K.-L.; Wang, Y. E. Low-temperature cofired ceramic LC filters for RF applications. *IEEE Microwave Mag.*, Vol. 9, No. 5, P. 118–128, Oct. 2008. DOI: [10.1109/MMM.2008.927634](https://doi.org/10.1109/MMM.2008.927634).

7. Zhu, F.; Hong, W.; Chen, J.-X.; Wu, K. Quarter-wavelength stepped-impedance resonator filter with mixed electric and magnetic coupling. *IEEE Microwave Wireless Components Lett.*, Vol. 24, No. 2, P. 90–92, Feb. 2014. DOI: [10.1109/LMWC.2013.2290225](https://doi.org/10.1109/LMWC.2013.2290225).

8. Захаров, А.В.; Ильченко, М.Е.; Корпач, В.Н. Особенности коэффициентов связи планарных ступенчато-импедансных резонаторов на высших резонансных частотах и их использование для подавления паразитных полос пропускания. *Радиотехника и электроника*, Т. 59, № 6, С. 602–608, 2014. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0033849414060229>.

9. Cameron, R. J. General coupling matrix synthesis methods for Chebyshev filtering functions. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 47, No. 4, P. 433–442, Apr. 1999. DOI: <https://doi.org/10.1109/22.754877>.

10. Thomas, J. B. Cross-coupling in coaxial cavity filters – a tutorial overview. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 51, No. 4, P. 1368–1376, Apr. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2003.809180>.

11. Zhang, S.; Zhu, L.; Li, R. Compact quadruplet bandpass filter based on alternative J/K inverters and $\lambda/4$ resonators. *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, Vol. 22, No. 5, P. 224–226, May 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2012.2193124>.

12. Wang, H.; Chu, Q.-X. An inline coaxial quasi-elliptic filter with controllable mixed electric and magnetic coupling. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 57, No. 3, P. 667–673, Mar 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2009.2013290>.

13. Tang, C.-W.; You, S.-F. Design methodologies of LTCC bandpass filters, diplexer, and triplexer with transmission zeros. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 54, No. 2, P. 717–723, Feb. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.862638>.

14. Ma, K.; Ma, J.-G.; Yeo, K. S.; Do, M. A. A compact size coupling controllable filter with separate electric and magnetic coupling paths. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 54, No. 3, P. 1113–1119, Mar. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.864118>.

15. Chu, Q.-X.; Wang, H. A compact open-loop filter with mixed electric and magnetic coupling. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 56, No. 2, P. 431–439, Feb. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2007.914642>.

16. Zhang, S.; Zhu, L.; Weerasekera, R. Synthesis of inline mixed coupled quasi-elliptic bandpass filters based on $\lambda/4$ resonators. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 63, No. 10, P. 3487–3493, Oct. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2467380>.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Matthaei, G.L.; Young, L.; Jones, E. M. T. *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*. Artech House, 1980.

2. Hong, J.-S. *Microstrip Filters for RF/Microwave Application*, 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2011.

3. Захаров, А.В.; Ильченко, М.Е.; Карнаух, В.Я.; Пинчук, Л.С. Перестраиваемые микрополосковые резонаторы с сегнетоэлектрическими конденсаторами. *Известия вузов. Радиотехника и электроника*, Т. 53, № 8, С. 30–35, 2010. DOI: [10.20535/S0021347010080042](https://doi.org/10.20535/S0021347010080042).

4. Захаров, А.В.; Ильченко, М.Е.; Карнаух, В.Я.; Пинчук, Л.С. Добротность сегнетоэлектрических конденсаторов, используемых в перестраиваемых фильтрах сверхвысоких частот. *Радиотехника и электроника*, Т. 56, № 8, С. 1017–1022, 2011. URI: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16552921>.

17. Захаров, А.В. Полосковые гребенчатые фильтры на керамических материалах с высокой диэлектрической проницаемостью. *Радиотехника и электроника*, Т. 58, № 3, С. 300–308, 2013. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0033849413030145>.

18. Захаров, А.В.; Ильченко, М.Е.; Пинчук, Л.С. Зависимость коэффициента связи между четвертьволновыми резонаторами от параметров гребенчатых полосковых фильтров. *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 58, № 6, С. 52–60, 2015. DOI: <https://doi.org/10.20535/S0021347015060060>.

19. Захаров, А.В.; Ильченко, М.Е. Полосно-пропускающие фильтры решетчатого типа на основе полуволновых резонаторов из отрезков симметричных

полосковых линий передачи. *Радиотехника и электроника*, Т. 60, № 7, С. 759–765, 2015. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0033849415060182>.

20. Захаров, А.В.; Ильченко, М.Е.; Пинчук, Л.С. Коэффициенты связи между ступенчато-импедансными резонаторами в полосковых полосно-пропускающих фильтрах решетчатого типа. *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 57, № 5, С. 35–43, 2014. DOI: <https://doi.org/10.20535/S0021347014050045>.

21. *Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств*. Под ред. В.И. Вольмана. М.: Радио и связь, 1982.

22. *Справочник по элементам полосковой техники*. Под ред. А.Л. Фельдштейна. М.: Связь, 1979.

Поступила в редакцию 28.03.2017

После переработки 19.12.2017