

УДК 621.372.543

## МИКРОПОЛОСКОВЫЙ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЙ ФИЛЬТР С ЛЕВОСТОРОННИМ НУЛЕМ ПЕРЕДАЧИ, РЕГУЛИРУЕМЫМ ПАРАЗИТНОЙ ПЕРЕКРЕСТНОЙ СВЯЗЬЮ

А. В. ЗАХАРОВ, С. А. РОЗЕНКО, Л. С. ПИНЧУК

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

Аннотация. Предложен и изучен микрополосковый фильтр третьего порядка, который характеризуется левосторонним нулем передачи  $f_z$ , обусловленным паразитной перекрестной связью между несмежными резонаторами. Фильтр содержит полуволновый средний резонатор, возле разомкнутых концов которого, но с разных сторон, расположены два четвертьволновых резонатора. Все связи между резонаторами, основные и перекрестная, носят магнитный характер, а нуль передачи фильтра  $f_z$  располагается слева от центральной частоты полосы пропускания  $f_0$ . Такой фильтр описывается модифицированной матрицей связей, у которой одному из основных коэффициентов связи искусственно приписан знак минус. В предложенной конструкции фильтра при заданном значении основных коэффициентов связи возможно обеспечить различные значения коэффициента перекрестной связи путем соответствующего выбора конструктивных параметров. Это позволяет при заданной ширине полосы пропускания фильтра регулировать расположение нуля передачи  $f_z$ , изменяя этим крутизну левого ската АЧХ. Предложена последовательность построения такого фильтра. Приведены измеренные и промоделированные частотные характеристики экспериментального фильтра.

**Ключевые слова:** полосно-пропускающий фильтр; микрополосковая конструкция; перекрестная связь; нуль передачи; матрица связей

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Микрополосковые полосно-пропускающие фильтры (ППФ) находят широкое применение в микроволновой технике [1]. Для многих технических приложений требуется разработка микрополосковых ППФ с небольшим количеством резонаторов, равным двум или трем. При проектировании таких фильтров предъявляются различные требования к их амплитудно-частотным характеристикам (АЧХ). Трехрезонаторным фильтрам посвящены многочисленные публикации.

Для практического применения часто необходимы трехрезонаторные фильтры с повы-

шенной правосторонней или левосторонней избирательностью [2–4], с симметричными АЧХ [5–9], с постоянным временем задержки [10–12].

В микрополосковых конструкциях ППФ, в отличие от других конструкций, например, полосковых [13–15], существует достаточно сильное магнитное взаимодействие между несмежными резонаторами. Это взаимодействие называют паразитным. Оно тем сильнее, чем толще диэлектрическая подложка и чем ближе друг к другу расположены несмежные резонаторы. Из-за перекрестных связей такие филь-

DOI: [10.20535/S0021347018060067](https://doi.org/10.20535/S0021347018060067)

© А. В. Захаров, С. А. Розенко, Л. С. Пинчук, 2018

на подложках с высокой диэлектрической проницаемостью,” *Радиотехника и электроника*, Т. 57, № 3, С. 372-382, 2012. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17647462>.

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

6. Xu, Z. Q.; Wang, P.; Liao, J. X.; Shi, Y. “Substrate integrated waveguide filter with mixed coupled modified trisections,” *Electron. Lett.*, Vol. 49, No. 7, P. 482-483, 2013. DOI: [10.1049/el.2012.3826](https://doi.org/10.1049/el.2012.3826).

7. Захаров, А. В.; Ильченко, М. Е.; Трубаров, И. В. “Планарные трехрезонаторные полосно-пропускающие фильтры с перекрестной связью,” *Радиотехника и электроника*, Т. 62, № 2, С. 187-195, 2017. DOI: [10.7868/S0033849417020139](https://doi.org/10.7868/S0033849417020139).

8. Shen, W.; Wu, L.-S.; Sun, X.-W.; Yin, W.-Y.; Mao, J.-F. “Novel substrate integrated waveguide filters with mixed cross coupling (MCC),” *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, Vol. 19, No. 11, P. 701-703, Nov. 2009. DOI: [10.1109/LMWC.2009.2032007](https://doi.org/10.1109/LMWC.2009.2032007).

9. Kuo, J.-T.; Hsu, C.-L.; Shih, E. “Compact planar quasi-elliptic function filter with inline stepped-impedance resonators,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 55, No. 8, P. 1747-1755, 2007. DOI: [10.1109/TMTT.2007.901604](https://doi.org/10.1109/TMTT.2007.901604).

10. Zakharov, A.; Ilchenko, M. “Trisection microstrip delay line filter with mixed cross-coupling,” *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, Vol. 27, No. 12, P. 1083-1085, 2017. DOI: [10.1109/LMWC.2017.2759724](https://doi.org/10.1109/LMWC.2017.2759724).

11. Захаров, А. В.; Ильченко, М. Е.; Трубаров, И. В.; Пинчук, Л. С. “Полосковые фильтры задержки,” *Известия вузов. Радиоэлектроника*. Т. 59, № 4, С. 34-43, 2016. DOI: [10.20535/S002134701604004X](https://doi.org/10.20535/S002134701604004X).

12. Hsu, C.-L.; Yu, C.-H.; Kuo, J.-T. “Microstrip trisection filters with quasi-elliptic and flat group delay responses,” *Proc. of 4th Int. High Speed Intelligent Communication Forum*, 10-11 May 2012, Nanjing, China. IEEE, 2012, pp. 1-2. DOI: [10.1109/HSIC.2012.6212988](https://doi.org/10.1109/HSIC.2012.6212988).

13. Makimoto, M.; Yamashita, S. *Microwave Resonators and Filters for Wireless Communication*. Springer Science & Business Media, 2001.

14. Захаров, А. В. “Полосковые гребенчатые фильтры на керамических материалах с высокой диэлектрической проницаемостью,” *Радиотехника и электроника*, Т. 58, № 3, С. 300-308, 2013. DOI: [10.7868/S0033849413030145](https://doi.org/10.7868/S0033849413030145).

15. 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: [10.3103/S0735272715060060](https://doi.org/10.3103/S0735272715060060).

16. Atia, A.; Williams, A.; Newcomb, R. “Narrow-band multi-coupled cavity synthesis,” *IEEE*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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

2. Hong, J.-S.; Lancaster, M. J. “Microstrip cross-coupled trisection bandpass filter with asymmetric frequency characteristics,” *IEE Proc. Microwaves Antennas Propag.*, Vol. 146, No. 1, P. 84-90, 1999. DOI: [10.1049/ip-map:19990146](https://doi.org/10.1049/ip-map:19990146).

3. Захаров, А. В.; Розенко, С. А. “Дуплексер на основе микрополосковых фильтров, использующих подложки с высокой диэлектрической проницаемостью,” *Радиотехника и электроника*, Т. 57, № 6, С. 713-720, 2012. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17726257>.

4. Захаров, А. В.; Розенко, С. А.; Захарова, Н. А. “Микрополосковые полосно-пропускающие фильтры

*Trans. Circuits Systems*, Vol. 21, No. 5, P. 649-655, 1974.  
DOI: [10.1109/TCS.1974.1083913](https://doi.org/10.1109/TCS.1974.1083913).

17. Cameron, R. J.; Kudsia, C. M.; Mansour, R. R. *Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design, and Applications*. John Wiley & Sons, Inc., 2007.

18. Магтей, Г.Л.; Янг, Л.; Джонс, Е.М.Т. *Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи*. М.: Связь, 1971.

19. Kurzrok, R. M. "General three-resonator filters in waveguide," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.

14, No. 1, P. 46-47, 1966. DOI: [10.1109/TMTT.1966.1126154](https://doi.org/10.1109/TMTT.1966.1126154).

20. Richards, P. I. "Resistor-transmission-line circuits," *Proc. IRE*, Vol. 36, No. 2, P. 217-220, 1948. DOI: [10.1109/JRPROC.1948.233274](https://doi.org/10.1109/JRPROC.1948.233274).

21. *Современная теория фильтров и их проектирование*. Под ред. Т.Темеша, и С.Митра. М.: Мир, 1977. 560 с.

Поступила в редакцию 07.11.2017

После переработки 20.04.2018