

Исследование 3D модели сверхширокополосного фильтра на микрополосковых многомодовых резонаторах

Б.А. Беляев^{1,2}, С.А. Ходенков¹, Н.А. Шепета¹, Д.О. Малышев¹

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, проспект им. газеты Красноярский рабочий 31, Красноярск, Россия, 660037

²Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения РАН - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Академгородок 50 стр. 38, Красноярск, Россия, 660036

Аннотация. Приведены результаты теоретических исследований микрополосковых многомодовых резонаторов с закороченным на землю отрезком полоскового проводника и сверхширокополосного фильтра на пятимодовых резонаторах. Электрические характеристики СВЧ устройств были получены при помощи численного электродинамического анализа их 3D моделей. Синтезированный фильтр десятого порядка с относительной шириной полосы пропускания 100% обладает высокими частотно-селективными свойствами и может быть использован в узлах радиоаппаратуры тропосферной и космической связи с расширенными каналами передачи информации.

1. Введение

Стремительно развивающееся освоение космического и воздушного пространства невозможно без постоянного совершенствования устройств частотной селекции в системах передачи информации. При этом общеизвестно, что полосно-пропускающие фильтры сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона, традиционно используются в узлах радиоаппаратуры, в том числе применяемой в тропосферной и космической связи. Однако на сегодняшний день, требуется не только постоянное улучшение электрических характеристик фильтров и уменьшение их габаритов, но и значительное расширение рабочей полосы пропускания, обусловленное необходимостью расширения каналов передачи информации для существенного увеличения объема и/или скорости передачи данных. По совокупности основных параметров, таких как, миниатюрность, надежность, технологичность и себестоимость в настоящее время наиболее оптимальными являются фильтры на основе микрополосковых резонаторов [1-3], важным достоинством которых является тот факт, что результаты моделирования, полученные при помощи электродинамического численного анализа их 3D моделей, хорошо согласуются с результатами измерений экспериментальных образцов [4]. Это позволяет ограничиться в исследованиях конструкций только численными экспериментами.

Нередко полосно-пропускающие фильтры изготавливают с использованием сосредоточенных элементов [4, 5], однако такие частотно-селективные устройства имеют относительно низкие центральные частоты рабочей полосы пропускания (не более 2 ГГц), что не позволяет их применять в S, C, X, Ku, K и Ka поддиапазонах СВЧ. Аналогичный недостаток имеют и фильтры на поверхностных акустических волнах [6, 7], а кроме того, они не обладают высокими уровнями загораживания.

Фильтры на основе волноводов имеют низкие потери на частотах полосы пропускания [8, 9], но не выдерживают конкуренции с фильтрами на микрополосковых резонаторах по массогабаритным характеристикам и технологичности изготовления.

Использование каскадного соединения отрезков микрополосковых линий различной ширины позволяет создавать фильтры или отражающие покрытия со сверхширокими, до 100%, рабочими полосами [10]. Как известно, такие структуры представляют собой аналоги одномерных электромагнитных кристаллов, однако сверхширокополосные фильтры на их основе не обладают высокими частотно-селективными свойствами, так как при расширении рабочей полосы пропускания существенно сужаются полосы заграждения, за счет расширения паразитных полос пропускания.

Использование многомодовых (n модовых) резонаторов в устройствах частотной селекции является одним из способов уменьшения размеров этих СВЧ конструкций без ухудшения их фильтрующих свойств. В фильтрах на основе таких резонаторов, используя оригинальную топологию полосковых проводников, можно добиться сближения резонансных частот n нижайших мод колебаний, формирующих полосу пропускания [11]. Таким образом, n модовый резонатор в частотно-селективном устройстве заменяет n одномодовых резонаторов, тем самым уменьшая его размеры. Кроме того использование таких резонаторов в фильтрах позволяет расширять полосы пропускания, благодаря «расталкиванию» резонансов этих мод колебаний за счет их сильного взаимодействия.

2. Микрополосковые трехмодовый и пятимодовый резонаторы

На рисунке 1а представлен микрополосковый резонатор, исследованный при помощи численного электродинамического анализа его 3D модели. В таком СВЧ устройстве на подложке (1) с высокой относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 80$ расположены отрезки (3-5), составляющие полосковый проводник. При этом узкие протяженные параллельные отрезки (3) соединены друг с другом через широкий отрезок (4), который состыкован с ортогонально расположенным узким протяженным отрезком (5), свободный конец которого соединен с основанием (2) при помощи круглого отверстия (6) с медным заполнением, диаметром $d \sim 0.45$ мм и глубиной, равной толщине подложке $h = 1.00$ мм. Входной и выходной 50-Ω порты, подключены к резонатору на отрезках (3). Рассчитанная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) резонатора показана на рисунке 1б.

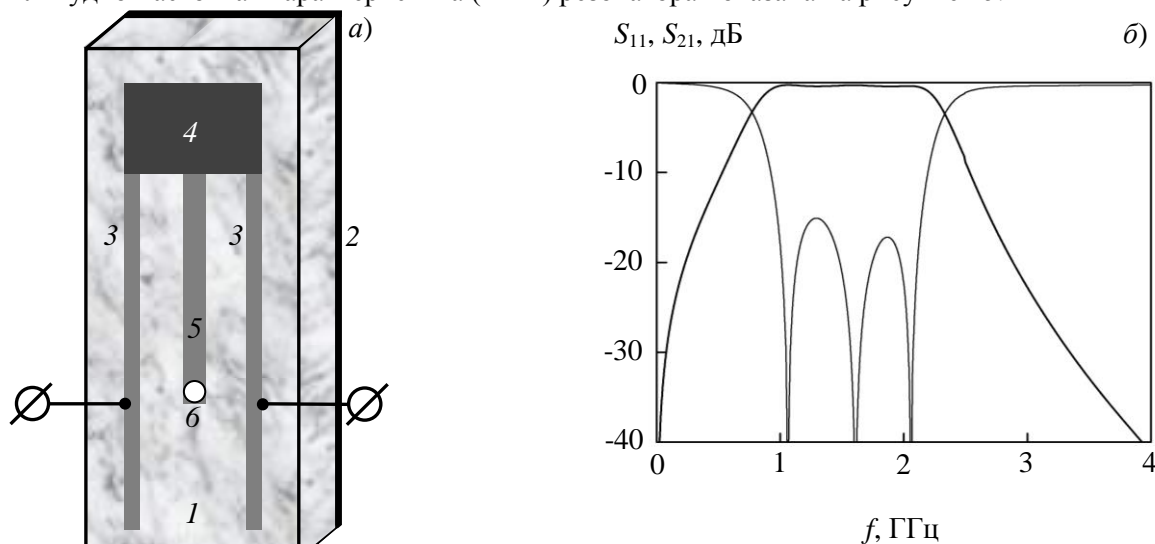


Рисунок 1. 3D модель микрополоскового резонатора (а) и его рассчитанная АЧХ (б).

Видно, что полосу пропускания Δf резонатора формируют три его нижайших резонанса. Для определенности центральная частота полосы пропускания всех СВЧ устройств, представленных в настоящей работе, была зафиксирована $f_0 = 1.55$ ГГц, при этом, измеренная

по уровню -3 дБ, относительная ширина $\Delta f/f_0 = 100\%$ также была зафиксирована. По сути, такой микрополосковый резонатор уже представляет собой сверхширокополосный СВЧ фильтр.

Конструктивные размеры отрезков, образующих трехмодовый резонатор в мм: (3) – 6.00×0.25 , (4) – 2.30×1.50 , (5) – 3.90×0.40 . Улучшить частотно-селективные свойства рассмотренного резонатора можно увеличивая число «сворачиваний» его полоскового проводника, т.е. добавляя в устройство дополнительные отрезки полоскового проводника, обозначенные (3) и (4) на рисунке 2а. Для объективности сравнения результатов моделирования в расчетах была использована такая же подложка (1) с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 80$ и толщиной $h = 1.00$ мм. Размеры отрезков проводника подбирались таким образом, чтобы пять нижайших мод колебаний модифицированного резонатора сформировали его полосу пропускания с относительной шириной $\Delta f/f_0 = 100\%$ (рисунок 2б). В этом резонаторе в результате синтеза отрезки (3) получаются узкими и протяженными, а отрезки (4) – широкими. Видно, что на амплитудно-частотной характеристике такого резонатора наблюдается пара полюсов затухания, которые увеличивают крутизну высокочастотного склона полосы пропускания и уровень подавления мощности в высокочастотной полосе заграждения.

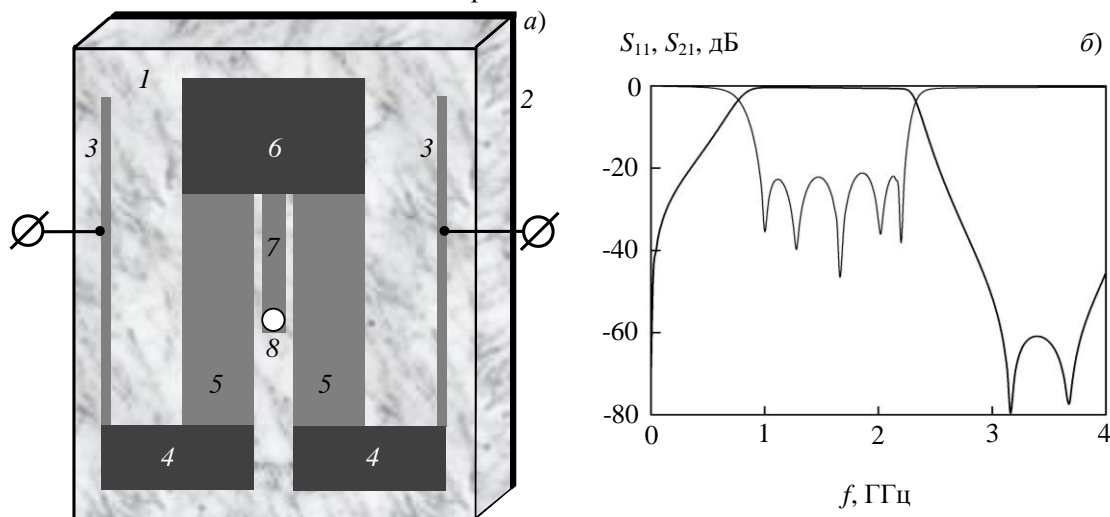


Рисунок 2. 3D модель модифицированного микрополоскового резонатора (а) и его рассчитанная АЧХ (б).

Конструктивные размеры пятимодового резонатора в мм: (3) – 5.60×0.10 , (4) – 2.60×1.10 , (5) – 4.00×1.20 , (6) – 3.10×2.00 , (7) – 2.40×0.40 . Сквозное отверстие (8) диаметром $d \sim 0.45$ мм заземлено на основание (2).

3. Микрополосковый сверхширокополосный фильтр на пятимодовых резонаторах

Каскадируя представленные микрополосковые резонаторы несложно разработать сверхширокополосные полосно-пропускающие фильтры с высокими электрическими характеристиками. Так, используя в конструкциях всего два резонатора можно реализовать полосно-пропускающие фильтры высокого порядка – шестого или десятого. Очевидно, что фильтр десятого порядка (рисунок 3) представляет наибольший интерес, поэтому ограничимся описанием результатов исследования только этой конструкции.

При расчетах электрических характеристик такого фильтра были использованы параметры подложки ϵ и h , а также диаметр d отверстий в ней с такими же значениями, что и в 3D моделях рассмотренных выше резонаторов. Расположение пятимодовых резонаторов на подложке было выбрано встречно-направленное.

Размеры отрезков полосковых проводников резонаторов и их раздвижка относительно друг друга, а также зазор между парой отрезков (9) были выбраны таким образом, чтобы

относительная ширина полосы пропускания фильтра, сформированного десятью резонансами, имела значение $\Delta f/f_0 = 100\%$ (рисунок 4).

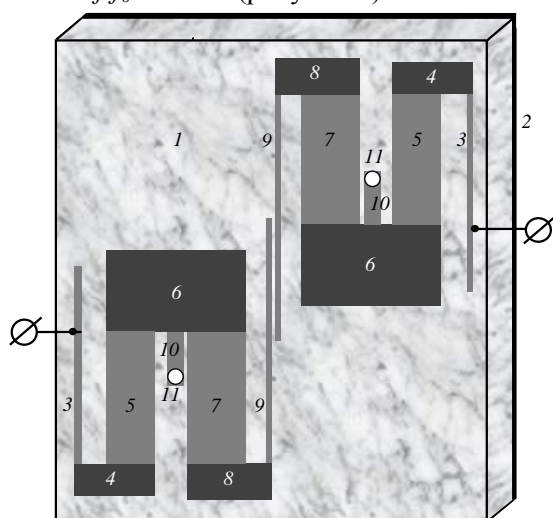


Рисунок 3. 3D модель микрополоскового сверхширокополосного фильтра десятого порядка.

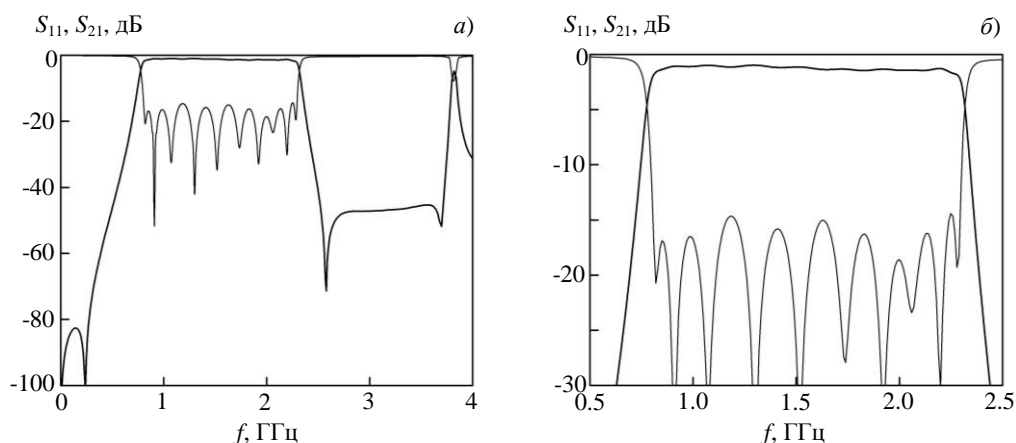


Рисунок 4. АЧХ микрополоскового сверхширокополосного фильтра десятого порядка в широком (а) и узком (б) диапазоне частот.

При этом высокие частотно-селективные свойства сверхширокополосного фильтра обусловлены крутыми склонами полосы пропускания и значительным подавлением мощности в низкочастотной полосе заграждения (более 80 дБ).

Конструктивные размеры фильтра в мм: (3) – 5.90×0.20 , (4) – 2.40×0.90 , (5) – 3.90×1.40 , (6) – 4.15×2.45 , (7) – 3.85×1.75 , (8) – 2.50×1.10 , (9) – 7.25×0.05 . Зазоры между отрезками (9) – 0.05 мм. Габариты фильтра с учетом отступа 1 мм от проводников до края подложки: $13.85 \times 15.15 \times 1.00$ мм³.

4. Выводы

Таким образом, предложена оригинальная топология полосковых проводников трехмодового и пятимодового микрополосковых резонаторов. На основе пятимодового резонатора разработан сверхширокополосный фильтр десятого порядка, показавший высокие частотно-селективные свойства, обладающий относительной шириной полосы пропускания $\Delta f/f_0 = 100\%$. Теоретические исследования СВЧ устройств проведены при помощи численного электродинамического анализа их 3D моделей.

5. Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

6. Литература

- [1] Belyaev, B.A. Implementation of cross couplings in microwave bandpass filters / B.A. Belyaev, A.M. Serzhantov, V.V. Tyurnev, Y.F. Bal'va, A.A. Leksikov, R.G. Galeev // *Microwave and optical technology letters*. – 2014. – Vol. 56(9). – P. 2021-2025.
- [2] Hong, J.-S. Design of highly selective microstrip bandpass filters with a single pair of attenuation poles at finite frequencies / J.-S. Hong, M.J. Lancaster // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2000. – Vol. 48(7). – P. 1098-1107.
- [3] Aristarkhov, G.M. High-selectivity single- and dual-resonator microstrip filters / G.M.Aristarkhov, N.V. Zvezdinov // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2017. – Vol. 62(8). – P 916-920.
- [4] Hao, S. A fourth order tunable capacitor coupled microstrip resonator band pass filter / S. Hao, Q.J. Gu // *IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, 2015. – P. 150-152.
- [5] Xiang, Q. Electrical tunable microstrip LC bandpass filters with constant bandwidth / Q. Xiang, Q. Feng, X. Huang, D. Jia // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2013. – Vol. 61(3). – P. 1124-1130.
- [6] Weigel, R. Microwave acoustic materials, devices, and applications / R. Weigel, D.P. Morgan, J.M. Owens, A. Ballato, K.M. Lakin, K. Hashimoto, C.C.W. Ruppel // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2002. –Vol. 50(3). – P. 738-749.
- [7] Psychogiou, D. Hybrid acoustic-wave-lumped-element resonators (AWLRs) for high-Qbandpass filters with quasi-elliptic frequency response / D. Psychogiou, R. Gomez-Garcia, R. Loeches-Sanchez, D. Peroulis // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2015. – Vol. 63(7). – P. 2233-2244.
- [8] Szydlowski, L. Design of microwave lossy filter based on substrate integrated waveguide (SIW) / L. Szydlowski, A. Lamecki, M. Mrozowski // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – 2011. – Vol. 21(5). – P. 249-251.
- [9] Ruiz-Cruz, J.A. Canonical ridge waveguide filters in LTCC or metallic resonators / J.A. Ruiz-Cruz, M.A.E. Sabbagh, K.A. Zaki, J.M. Rebollar, Y. Zhang // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2005. – Vol. 53(1). – P. 174-182.
- [10] Belyaev, B.A. Study of microstrip models of bandpass filters based on 1D photonic crystals / B.A. Belyaev, A.S. Voloshin, V.F. Shabanov // *Doklady Physics*. – 2005. – Vol. 50(1). – P. 7-11.
- [11] Nosrati, M. Compact wideband microstrip bandpass filter using quasi-spiral loaded multiple-mode resonator / M. Nosrati, M. Mirzaee // – *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – 2010. – Vol. 20(11). – P. 607-609.

The investigation of ultra-wideband filter 3D model based on microstrip multimode resonators

B.A. Belyaev^{1,2}, S.A. Khodenkov¹, N.A. Shepeta¹, D.O. Malyshev¹

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsky Rabochy Av. 31, Krasnoyarsk, Russia, 660037

²Kirensky Institute of Physics, Akademgorodok 50, bld. 38, Krasnoyarsk, Russia, 660036

Abstract. Here are the results of theoretical studies of microstrip multimode resonators with a short-circuited section of a strip conductor and ultra-wideband filter based on five-mode resonators. Electrical characteristics of microwave devices were obtained by means of numerical electrodynamic analysis of their 3D models. A synthesized filter with a 100% bandwidth has high frequency-selective properties and can be used in radio equipment of tropospheric and space communication with the advanced information transfer.