

*В.Ф. КОМАРОВ, Ю.В. РАССОХІНА, канд. фіз.-мат. наук,
В.Г. КРИЖАНОВСЬКИЙ, д-р техн. наук*

СИНТЕЗ КОМПАКТНОГО ФІЛЬТРА НИЖНІХ ЧАСТОТ НА ГАНТЕЛЕПОДІБНИХ ЩІЛИННИХ РЕЗОНАТОРАХ

Вступ

Поширення компактних бездротових систем та потреба у збільшенні пропускної здатності каналів зв'язку висуває нові вимоги до архітектури трансиверів, які мають бути невеликого розміру, підвищеної щільності інтеграції та мати високу енергоефективність. Вимоги стосуються у тому числі фільтрів нижніх частот, що є складовою активних НВЧ-пристроїв. У [1 – 3] розглянуто різні варіанти фільтрів, що виконані з використанням щілинних резонаторів, розташованих у заземлюючій площині мікросмужкової лінії передачі (Defected Ground Structure – DGS). Такий тип фільтра має чітко відокремлену смугу пропускання в характеристиці коефіцієнту передачі, а також широку смугу запирання. Це забезпечує відсічення небажаних частот гармонік [1, 2, 4] і зменшення фізичного розміру [1, 5] у порівнянні з традиційними фільтрами.

Щодо реалізації частотних характеристик, серед відомих конфігурацій DGS можна відзначити відносно прості так звані гантелеподібні щілини, запропоновані, наприклад, у [6]. У разі серії послідовно розташованих щілин, фільтр характеризується широкою смугою загородження, яка може охоплювати діапазон від другої до четвертої або п'ятої гармоніки робочої частоти [2, 4].

Результати застосування окремих зразків подібних структур для побудови підсилювачів потужності у НВЧ-діапазоні представлені у [4, 7 – 12].

Метою дослідження є вивчення придатності таких структур для побудови компактних узгоджувачів та фільтруючих ланок для підсилювачів НВЧ з високим ККД.

Вибір конструкції та опис методу розрахунку фільтра

Топологія фільтра нижніх частот показана на рис. 1. Структура симетрична, містить низькоімпедансне розширення мікросмужкової лінії із симетрично розташованими у заземлюючому шарі прорізами у формі двох однакових «гантелей». Цифрами позначені: 1 – підкладка, 2 – мікросмужкова лінія, 3 – щілинний резонатор у шарі заземлення.

Для побудови просторової структури в якості підкладки обрано матеріал товщиною $H = 0.64$ мм з діелектричною проникністю $\epsilon_r = 10.2$ та $\tan \delta = 0.0022$. Ширина мікросмужкової лінії $w = 0.58$ мм відповідає імпедансу $Z_0 = 50$ Ом. Для аналізу було обрано робочу частоту $f_0 = 2.15$ ГГц що відповідає смузі частот стандарту W-CDMA для базових станцій.

Щоб отримати топологію, що добре відтворюється, зі зручним параметричним описом геометрії, має сенс прив'язати геометричні параметри структури до характерного розміру x_0 . Моделювання таких структур показує, що обраний таким чином характерний розмір відповідає у матеріалі підкладки довжині хвилі, де f_0 – робоча частота. Для фільтра з обраною частотою $f_0 = 2.155$ ГГц характерний розмір становить $x_0 = 20.4$ мм.

Згідно з обраним характерним розміром низькоімпедансний відрізок мікросмужкової лінії має довжину $l = x_0/2$ і ширину $w_1 = x_0/6$, імпеданс якої дорівнює $Z = 16.5$ Ом. Пара гантелеподібних щілин у заземлюючому шарі має однакові розміри:

$$g = w = 0.58 \text{ мм}, \quad d = \frac{x_0}{2}, \quad a = b = \frac{d - w_1}{2}, \quad (1)$$

а міжвісна відстань

$$a < s = \frac{x_0}{4} < l. \quad (2)$$

Відомо принаймні чотири підходи до побудови еквівалентних схем розглянутих структур [1, 8, 13]: LC та RLC, П-подібна, квазістатична еквівалентні схеми та схема з ідеальним трансформатором. Але компактні пласкі структури складної топології вже не відповідають умовам застосовності зосереджених елементів [14, 15] для побудови формальних схем та відповідних розрахунків. У таких структурах елементи топології та просторові проміжки між ними мають розміри порядку $\lambda_g/4$, взаємодіють один з одним і діють як єдина структура із складною закономірністю характеристики розсіювання. У разі нетривіальної топології кращим наближенням до поведінки системи є моделі, що використовують комп'ютерну повнохвильову симуляцію.

Для отримання розподілу електромагнітного поля в потрібному обмеженому перетині Ω просторово-неоднорідної області з досліджуваною структурою, що показано на рис. 2 (1 – підкладка; 2 – повітряний шар; 3 – мікросмузка; 4 – заземлюючий шар), та аналізу власних частот можна використати систему рівнянь Максвелла для гармонійних коливань. Дисипативні ефекти враховуються з використанням комплексного значення $\varepsilon_\sigma = \varepsilon - j\frac{\sigma}{\omega}$. Розв'язання системи з граничними умовами виконується за допомогою апроксимації методом скінченних елементів на комерційному програмному забезпеченні.

Використання періодичної структури з кількох аналогічних елементів призводить до зменшення частоти відсічення в режимі відбиття і до появи властивостей ФНЧ. Вплив геометричних параметрів l_0, x_0, w_1, l, s (див. рис. 1) на смугу пропускання та параметри фільтрації було досліджено при наступних обмеженнях:

$$s > a, \quad s + a < l. \quad (3)$$

Обране значення x_0 дозволяє забезпечити вузьку смугу пропускання на основній частоті, що розташована в діапазоні від ≈ 1.5 до ≈ 3 ГГц. Відсічення 3 дБ припадає на ділянку між основною частотою і її другою гармонікою, на рис. 3 це відповідає співвідношенню $f_0/f_c \approx 0,78$, де f_c – частота зрізу. Поблизу другої гармоніки робочої частоти коефіцієнт відбиття максимальний.

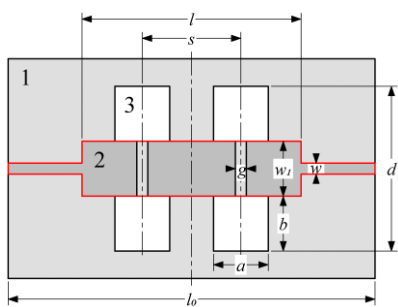


Рис. 1

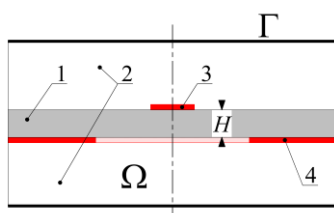


Рис. 2

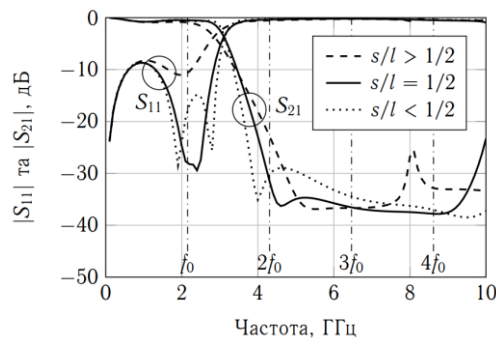


Рис. 3

Смуга пропускання залежить від відносного розташування щілин щодо стрибків ширини мікросмузкової лінії, а також довжини і ширини мікросмузкового сегменту з низьким імпедансом. Як видно з рис. 3, коли досягнуто співвідношення $s/l = 1/2$, смуга пропускання розпадається на дві, що дозволяє обрати необхідні властивості поведінки коефіцієнту передачі в досить широкій смузі частот навколо резонансної частоти. Проте слід зазначити, що умови, при яких відбуваються вказані на рис. 3 зміни характеристик передачі, мають функціональний зв'язок із іншими геометричними параметрами топології.

У разі використання даної топології у якості ланки навантаження підсилювача потужності важливо враховувати комплексний коефіцієнт відбиття на основній частоті та вищих гармоніках.

Досліджувана навантажувальна ланка дозволяє легко отримати значення імпедансу, необхідні на робочій частоті підсилювача потужності та її другій гармоніці $2f_0$. Для більш високих гармонік потрібна додаткова оптимізація геометрії.

Грунтуючись на топології навантажувальної ланки запропонуємо наступну стратегію покрової оптимізації геометрії фільтра:

а) обрати за можливості мінімальну загальну довжину смужки $l_0 < \lambda_g$;

б) знайти характерний розмір x_0 для співвідношень, які відповідають (3), забезпечуючи смугу пропускання відносно f_0 ;

в) створити задовільні S-параметри за допомогою $w_1, l, s, l/s$ в якості початкового наближення характеристик розсіювання навантажувального фільтру;

г) збільшуючи (або зменшуючи) значення l_0 обертали годограф імпедансу для розташування точок $2f_0$ і $3f_0$ близько до полярних точок на діаграмі Сміта;

д) повторювати пункти в) та г) з урахуванням $4f_0$ і $5f_0$ (має сенс розраховувати коефіцієнти відбиття та передачі лише в точках гармонік).

Результати оптимізації фільтра

На рис. 4 показано два варіанти топології ФНЧ для подальшого аналізу: оптимізований за запропонованим алгоритмом (а) та варіант з мінімумом коефіцієнту відбиття на робочій частоті (б). Відповідні залежності S-параметрів і форма годографа імпедансу після оптимізації топології (для варіанта а) показані на рис. 5. В цьому випадку ми наблизили значення фактичного імпедансу гармонік до теоретичних умов для навантажувальної ланки ідеалізованого підсилювача класу F^{-1} [7, 12].

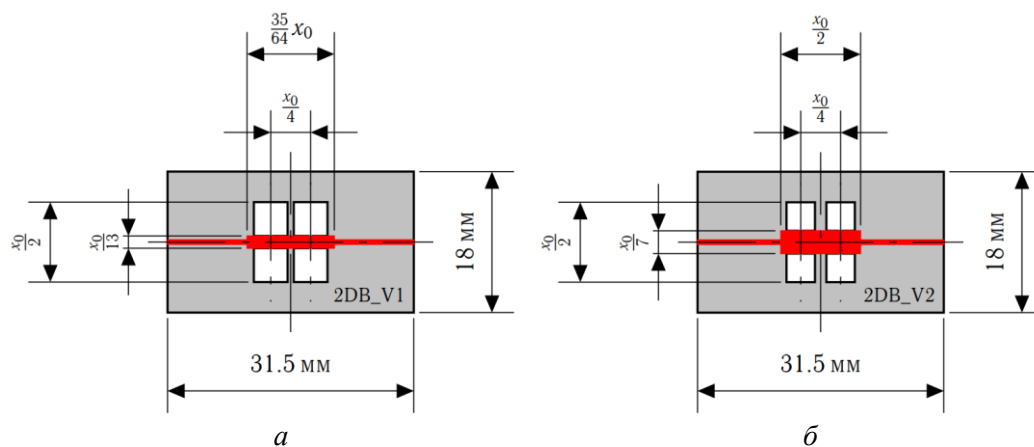


Рис. 4

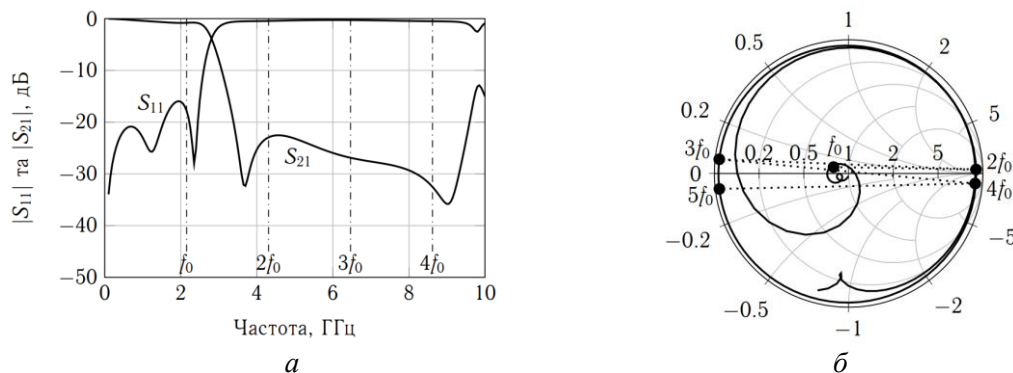


Рис. 5

Можна відмітити майже повну відсутність петель поблизу вищих гармонік, що спричинено широкою смугою загородження з відносно плоскою формою кривої S_{21} . Малий коефіцієнт

ент відбиття навантажувального фільтра у широкому діапазоні частот поблизу основної частоти може дати перевагу при проектуванні підсилювачів з переналаштовуваною робочою частотою.

Опис експериментальних макетів і результати експерименту

На рис. 6 зображено виготовлені для проведення експериментальних вимірювань зразки фільтрів з планарними DGS-структурами на доступному ламінаці Rogers 3010 [16].

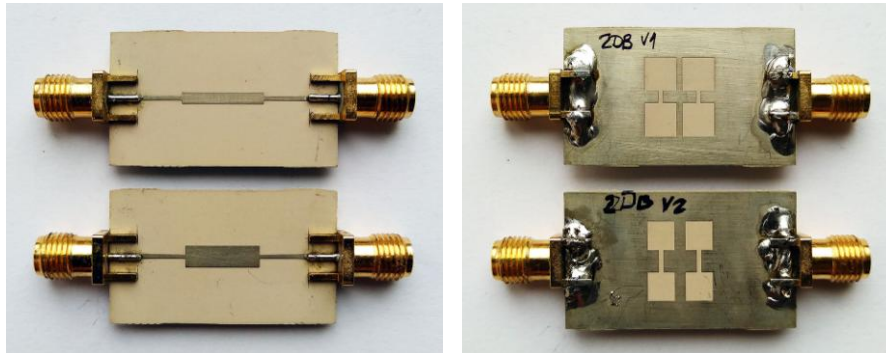


Рис. 6

На рис. 7 та 8 наведено результати моделювання та експериментального вимірювання макетів пристроїв для оптимізованої топології та контрольної зразку фільтра. На рис. 7, а та рис. 8, а показано характеристики коефіцієнтів передачі та відбиття фільтрів (— — симуляція; --- — експеримент). На діаграмах, що позначені літерами б та в, показано вхідний імпеданс на гармоніках, отриманий за результатами симуляції та вимірювання відповідно. Вимірювання виконано за допомогою векторного аналізатора кіл Rohde & Schwarz © ZND Vector Network Analyzer.

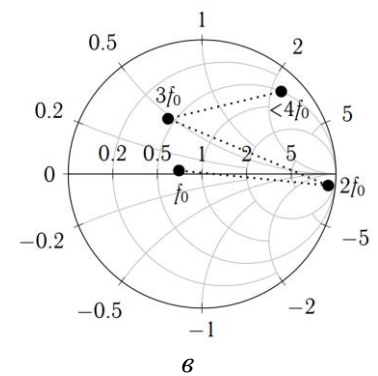
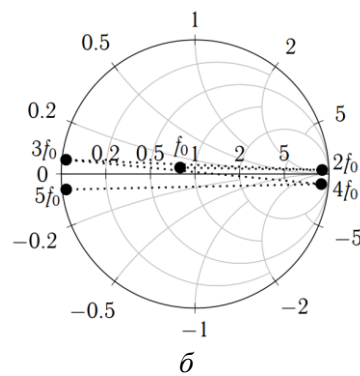
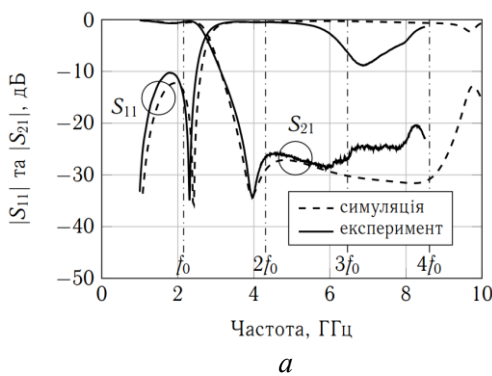


Рис. 7

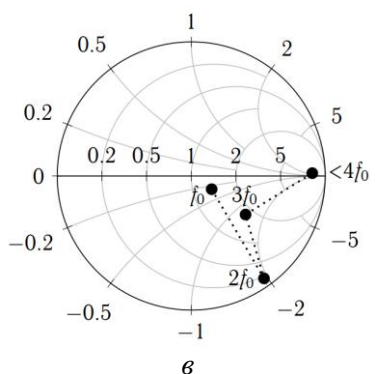
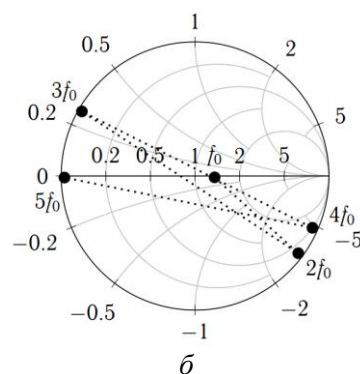
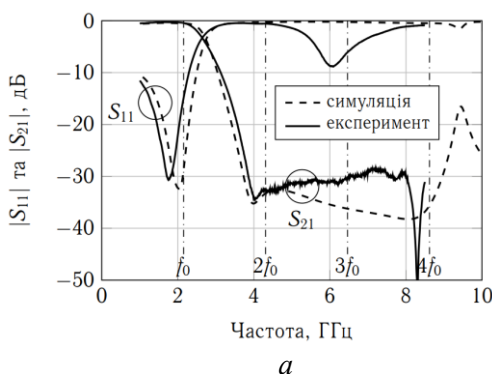


Рис. 8

Обговорення результатів

Різниця між промодельованими та експериментально отриманими характеристиками спричинена неточностями виготовлення зразків, втратами на роз'ємах та ймовірними відхиленнями поведінки спрощеної моделі. Вимірюваний вхідний імпеданс зразків був скорегований для урахування SMA роз'ємів ($l = 7.6$ мм, $\varepsilon_r = 2.1$) та додаткової ділянки лінії ($l = 1$ мм, $\varepsilon_r = 10.2$), що була додана при виготовленні плат через необхідність монтажу роз'ємів на відстані від неоднорідності.

З діаграм видно, що на робочій частоті та другій гармоніці досліджені зразки поведуться очікувано, але є суттєве відхилення для третьої гармоніки. Імовірною причиною такої поведінки може бути вплив роз'ємів та відсутність зовнішнього екранування під час вимірювання характеристик, що, враховуючи фізичний розмір щілин могло призвести до роботи структури у якості антени та розсіювання енергії хвилі у навколишнє середовище.

Висновки

Розглянуто фільтри з гантелеподібними щілинними резонаторами у заземлюючому шарі мікросмужкової лінії з розширеним відрізком лінії у місті розташування резонаторів. Запропоновано стратегію оптимізації геометрії структури, що дозволяє знайти компактну топологію для задоволення вимог до навантажувальної ланки підсилювача НВЧ діапазону. Виготовлені експериментальні макети досліджених ФНЧ. В експерименті отримано придушення на частотах з другої по четверту гармоніки на рівні більше 20 і 30 дБ для різних зразків. Розглянуті фільтри характеризуються компактними розмірами, широкосмуговим загородженням на частотах вищих гармонік та потрібною частотною залежністю годографа імпедансу, що є необхідною умовою для побудови високоефективного підсилювача потужності мікрохвильового діапазону частот.

Список літератури:

1. Khandelwal Mukesh Kumar, Kanaujia Binod Kumar, Kumar Sachin. Defected Ground Structure: Fundamentals, Analysis, and Applications in Modern Wireless Trends // *Int. J. of Antennas and Propagation*. 2017. Vol. 2017. P. 1–22.
2. Ahmed Boutejdar, Abbas Omar, Edmund P. Burte, Reinhard Mikuta. An improvement of defected ground structure lowpass/bandpass filters using H-slot resonators and coupling matrix method // *J. of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*. 2011. Vol. 10, no. 2. P. 295–307.
3. Rassokhina Y., Krizhanovski V. Comparison of characteristics of discontinuities in the form of high-impedance section of microstrip line and a section with slot resonator in grounding plane // *2016 Int. Conf. Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*. Kiev, Ukraine : IEEE, 2016. P. 288–292.
4. Jong-Sik Lim, Young-Taek Lee, Chul-Soo Kim et al. A vertically periodic defected ground structure and its application in reducing the size of microwave circuits // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2002. Vol. 12, no. 12. P. 479–481.
5. Maloratsky G. Microstrip Circuits with a Modified Ground Plane // *High Frequency Electronics*. 2009. no. 12. P. 38–47. Access mode: http://highfrequencyelectronics.com/Archives/Dec09/HFE1209_Maloratsky.pdf.
6. D. Ahn, J. S. Park, C. S. Kim et al. A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure // *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*. 2001. Vol. 49, no. 1. P. 86–93.
7. Raab F.H. Class-E, Class-C, and Class-F power amplifiers based upon a finite number of harmonics // *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*. 2001. Vol. 49, no. 8. P. 1462–1468.
8. Li Hong Weng, Yu-Chun Guo, Xiao-Wei Shi, Xiao-Qun Chen. An overview on defected ground structure // *Progress In Electromagnetics Research B*. 2008. Vol. 7. P. 173–189. Access mode: <http://www.jpier.org/PIERB/pierb07/11.08031401.pdf>.
9. H. Choi, S. Shim, Y. Jeong et al. A compact DGS load-network for highly efficient class-E power amplifier // *2009 European Microwave Conference (EuMC)*. 2009. P. 492–495.
10. Hayati Mohsen, Sheikhi Akram, Grebennikov Andrei. Class-F Power Amplifier with High Power Added Efficiency Using Bowtie-Shaped Harmonic Control Circuit // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2015. Vol. 25, no. 2. P. 133–135.
11. Xiao-Qun Chen, Li Hong Weng, Yu-Chun Guo, Xiao-Wei Shi. RF circuit design integrated with microstrip DGS // *Progress In Electromagnetics Research M*. 2008. Vol. 3. P. 141–152.

12. Yu. V. Rassokhina, Vladimir G. Krizhanovski, Paolo Colantonio, Rocco Giofre. Inverse Class-F Power Amplifier Using Slot Resonators as a Harmonic Filter // Int. J. of Microwave and Optical Technology. 2014. Vol. 9, no. 1. P. 49–53. Access mode: <http://www.ijmot.com/ijmot/uploaded/1453519017.pdf>.
13. Roy Sushim Mukul, Karmakar Nemaï C., Balbin Isaac. Dumbbell-shaped defected ground structure // Int. J. of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2007. Vol. 17, no. 2. P. 210–224.
14. Huang Shao Ying, Lee Yee Hui. Fast and accurate calculation of transmission coefficients for an EBG microstrip structure // Microwave and Optical Technology Letters. 2010. Vol. 52, no. 4. P. 793–797.
15. Rassokhina Yu. V., Krizhanovskii V. G. A method for analyzing irregularities in stripline-slot structures. Part 2: Analysis of complex irregularities in three-layer planar structures // Telecommunications and Radio Engineering. 2017. Vol. 76, no. 12. P. 1049–1056.
16. RO3000 Series Circuit Materials (Data Sheet). Rogers Corporation. 2017. Access mode: <https://www.rogerscorp.com/documents/722/acs/RO3000-Laminate-Data-Sheet-RO3003-RO3006-RO3010.pdf>.

*Донецький національний університет
імені Василя Стуса, Вінниця*

Надійшла до редколегії 07.05.2019