

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-32>

УДК 621.392, 519.22

БАЛАНЮК Юрій

Національний авіаційний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3036-5804>

e-mail: y.balanyuk@nqa.gov.ua

ПРОЕКТУВАННЯ МІКРОСМУЖКОВИХ СЕЛЕКТИВНИХ ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ НЕРЕГУЛЯРНИХ СТРУКТУР ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ ВИТОКУ ІНФОРМАЦІЇ В ЛІНІЯХ ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ

У статті розроблено мікросмужковий фільтр із високими внесеними втратами, який можна застосовувати до ліній передачі високої потужності. Відповідно до структури традиційних смужково-загороджувальних фільтрів реалізація фільтра, який може передавати великий струм і мати високі внесені втрати здійснюється за рахунок збільшення порядку фільтра. Запропоновано структуру п'ятиступінчатого фільтра, що може реалізувати внесені втрати понад 40 дБ. Показано вимоги до ширини зовнішньої мікросмужкової лінії, з заданими характеристиками у діапазоні частот 2,40–2,49 ГГц. Розроблений МСФ може бути використаний для запобігання витоку електромагнітної інформації високочастотної провідності на лініях передачі високої потужності. Мікросмужковий фільтр має хороші характеристики в діапазоні мікрохвильових частот, і завдяки своїй унікальній структурі зручний для з'єднання з лінією електропередачі та має унікальні переваги у запобіганні витоку електромагнітної інформації провідності лінії електропередачі.

Ключові слова: НВЧ фільтр, матриця передачі, хвильовий опір, провідність

BALANYUK Yuriy

National Aviation University

PROJECTION OF MICROSTRIP SELECTIVE DEVICES BASED ON IRREGULAR STRUCTURES TO PREVENT INFORMATION LEAKAGE IN HIGH POWER LINES

The paper develops a microstrip filter for high insertion loss lines that can be applied to high power transmission lines. According to the structure of traditional band-stop filters, the implementation of a filter that can transmit a large current and have high introduced losses is achieved by increasing the order of the filter. A five-stage filter structure is proposed, which can realize input losses of more than 40 dB. The requirements for the width of an external microstrip line are shown, with specified characteristics in the frequency range of 2.40–2.49 GHz. The developed MSBSF has a number of advantages compared to traditional selective devices, it allows to prevent information loss in high-frequency telecommunication communication networks for high-power transmission lines. It is shown that the microstrip filter has satisfactory parameters in the microwave frequency range, and a simple and convenient structure and has properties of protection against the leakage of electromagnetic information of the conductivity of the power transmission line. The proposed filter does not require additional inclusion of a harmonic filter. As a result of better selectivity of the developed structure, the number of resonators can be reduced, which will lead to a reduction in losses, mass, dimensions and manufacturing costs. Although the operating frequency range of the filter is quite narrow (2.41-2.49 GHz), it can be expanded, which requires further modeling and testing. Bandpass filters with high selectivity and delay band filtering are important for suppressing broadband noise or interference in advanced modern communication systems. An analysis of the state of research in this direction shows that improving filtering technologies is the only way to prevent leakage of electromagnetic information, especially caused by conduction. The importance of research is due to the rapid development of high-speed communications in the high and ultra-high frequency bands.

Key words: microwave filter, transmission matrix, wave resistance, conductivity

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Зі швидким розвитком інформаційно-комунікаційних технологій явища електромагнітного витоку інформації, пов'язані з телекомунікаційними пристроями, такими як лінії передачі, все сильніше впливають на інформаційну безпеку. Наявність перехідного електромагнітного імпульсного випромінювання спонукає до активного дослідження технологій моніторингу телекомунікаційних процесів передачі, що включає розробку технологій запобігання потенційних загроз безпеці інформаційного обладнання [1-3]. Насьогодні запропоновано ряд методів моніторингу і захисту, наприклад, розробка обладнання з низьким рівнем випромінювання [4–7], шумові перешкоди [8], електромагнітне екранування [9-10], спеціальні технології фільтрації [11]. Смужові фільтри з високою селективністю та фільтрацією смуги затримки важливі для придушення широкосмужового шуму або перешкод у передових сучасних системах зв'язку. Аналіз стану досліджень в цьому напрямку показує, що удосконалення технологій фільтрації є єдиним способом запобігти витоку електромагнітної інформації, особливо, спричиненому провідністю. Важливість досліджень зумовлюється стрибкоподібним розвитком швидкісного зв'язку в смугах високих та надвисоких частот.

Формулювання цілей статті

Метою цієї роботи є проектування мікросмужкових фільтруючих структур пристроїв для запобігання витоку інформації в лініях великої потужності.

Аналіз досліджень та публікацій

Традиційні фільтри електромагнітних перешкод (ФЕП) при їх роботі не можуть уповні задовільнити увесь спектр вимог щодо зниження втрат у смузі пропускання, зменшення габаритних розмірів, збільшення області та рівня загородження для виконання вимог встановлених норм. Спроби виконання зазначених норм за допомогою фільтрів поки що не призвели до бажаних результатів. Причини цих труднощів полягають у тому, що в більшості випадків необхідна амплітудно-частотна характеристика не може бути реалізована одним фільтром і не може запобігти витоку інформації обладнання у високочастотному діапазоні (~GHz). Потрібен каскад фільтрів, що обумовлює неприйнятно великі втрати та габаритні розміри фільтруючих систем. На рис. 1 зображені варіанти фільтруючих систем, що використовуються в даний час, у вигляді каскадного з'єднання різних фільтрів [12, 13], де СПФ і СЗФ - відповідно смуго-пропускаючий і смуго-загороджувальний фільтр (як СЗФ часто використовують фільтр нижніх частот (ФНЧ)), ФГ - фільтр гармонік.

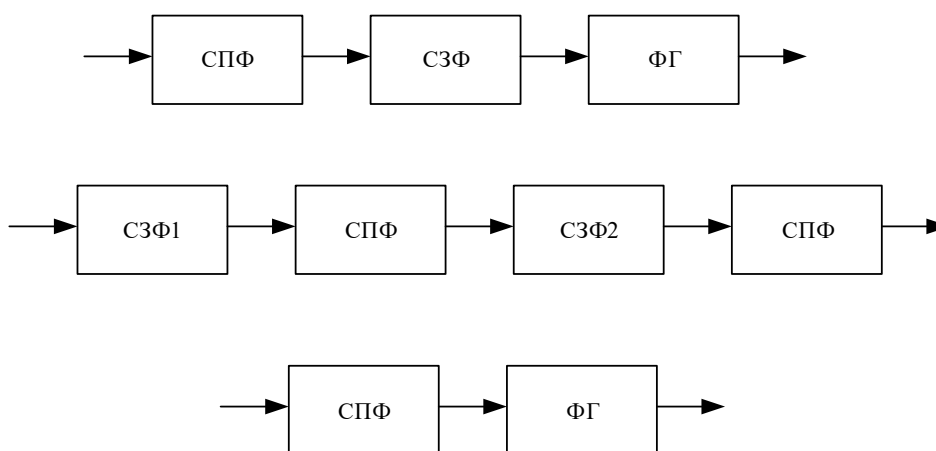


Рис. 1. Типові схеми побудови фільтрів телекомунікаційних засобів зв'язку

Мікросмужкові фільтри на основі друкованої плати мають переваги невеликої ваги і малого об'єму, і привертають увагу багатьох дослідників. Широкосмужковий синфазний фільтр із внесеними втратами 10 дБ був розроблений для усунення електромагнітних перешкод у високошвидкісних диференціальних цифрових системах [14]. Phudpong P. і Hunter I. С. [15] спроектували прототип обмежувача смуги частот з одним резонатором із внесеними втратами 32 дБ, резонансною частотою 2 ГГц і граничною смугою пропускання приблизно 200 МГц. Двохширокосмужкові смужкові фільтри, які використовуються в багатощирокосмужкових бездротових системах, були продемонстровані Feng W. J. та ін. [16]. Планарний смужковий фільтр із високими втратами на передачі в діапазоні частот від 2,79 до 3,21 ГГц був розроблений Wu С.-Н. та ін. [17]. Фільтруючі системи для придушення побічних випромінювань повинні також задовольняти вимоги малості втрат у смузі пропускання, високого затухання в області загородження, прийнятних габаритних розмірів та високої електричної міцності. Спроби виконання зазначених норм за допомогою фільтрів поки що не призвели до бажаних результатів. Причини цих труднощів полягають у тому, що в більшості випадків необхідна амплітудно-частотна характеристика не може бути реалізована одним фільтром. Потрібен каскад фільтрів, що обумовлює неприйнятно великі втрати та габаритні розміри фільтруючих систем. Аналіз досліджень показує, що пропонувані мікросмужкові фільтри використовуються в малопотужних комунікаційних схемах і пристроях. Наскільки відомо, мікросмужкові фільтри для запобігання витоку електромагнітної інформації про провідність ліній високої потужності повідомляються рідко.

Виклад основного матеріалу

Як показано на рис. 2, при передачі електромагнітного сигналу або енергії на велику відстань лінія передачі інформаційного пристрою може передавати електромагнітну інформацію, а витік інформації буде спричинений процесом зондування та спектрального аналізу. Щоб запобігти витоку інформації, фільтр слід підключати до підключення інформаційного пристрою до лінії передачі. Тут лінії передачі інформаційних пристроїв можна розглядати як два паралельні провідники, оскільки довжина лінії передачі дуже велика. У ситуації передачі електромагнітних хвиль високої частоти модель лінії передачі можна представити у вигляді множини відрізків дуже коротких ліній передачі, довжина кожного сегмента коротша за довжину

хвилі високочастотних електромагнітних хвиль, і для кожного сегмента лінії передачі можна використовувати закон Кірхгофа. Отже, використовуємо один із поширених методів побудови еквівалентної схеми об'єднаних інтегральних схем, а саме представлення простору ОІС у вигляді сукупності невеликих об'ємів із постійними параметрами. Сучасні системи автоматизованого проектування НВЧ пристроїв реалізують комплексний підхід і дозволяють здійснити наскрізний цикл проектування від розрахунку електричної схеми до компонування пристрою, що складається з багатьох компонентів. Крім власне модуля електродинамічного моделювання такі програмні продукти включають засоби візуалізації та контролю топології, методи багатопараметричної оптимізації, аналізу розкиду параметрів і статистичної обробки результатів. Обов'язковими складовими є бібліотеки стандартних базових елементів, модулі прийому зовнішніх даних від вимірювальної апаратури та конвертори топології.

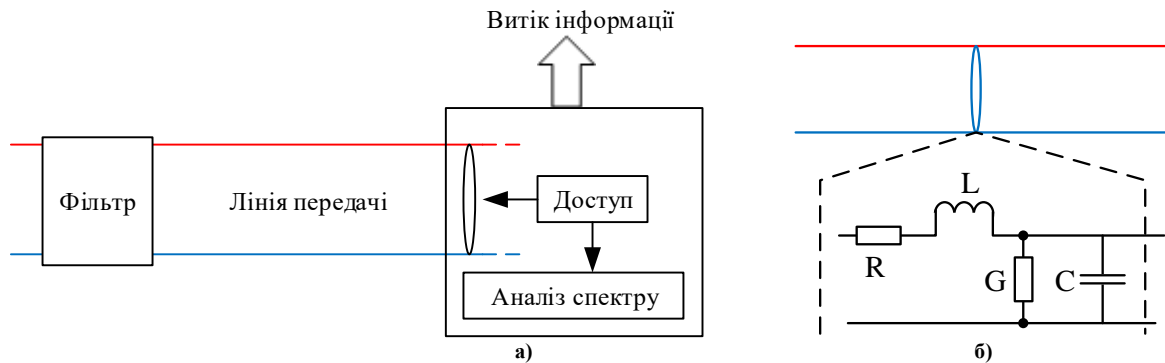


Рис.2. а) схематична діаграма лінії передачі; б) еквівалентне коло ділянки лінії передачі

Згідно рис.2, кожен сегмент лінії передачі може бути описаний в термінах еквівалентний опір втрат, розподілена індуктивність, провідність і розподілена ємність за рахунок наявності електромагнітного зв'язку:

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{2}{\pi d} \sqrt{\frac{\omega \mu_1}{2 \sigma_1}}, \\
 L &= \frac{\mu}{\pi} \ln \frac{D + \sqrt{D^2 - d^2}}{d}, \\
 C &= \frac{\pi \varepsilon_1}{\ln D + \sqrt{D^2 + d^2/d}}, \\
 G &= \frac{\pi \sigma}{\ln D + \sqrt{D^2 + d^2/d}},
 \end{aligned} \quad (1)$$

де μ_1 – магнітна проникність двох провідників, σ_1 – провідність двох провідників, ε_1 – діелектрична проникність середовища між двома провідниками, μ – проникність середовища між двома провідниками, σ – провідність середовища між двома провідниками, D – відстань між двома провідниками, d – діаметр двох провідників.

Тоді рівняння сегменту лінії виражається як

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + L \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + Ri(x,t) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + Gu(x,t) = 0, \quad (3)$$

де $u(x, t)$, $i(x, t)$ — напруга і струм в момент часу t , що відповідає координаті x лінії передачі. Похідна рівнянь (2) і (3) відносно x , відповідно, дає нам наступне:

$$\frac{\partial^2 u(x)}{\partial x^2} = (j\omega L + R)(j\omega C + G)u(x) = \gamma^2 u(x), \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 i(x)}{\partial x^2} = (j\omega L + R)(j\omega C + G)i(x) = \gamma^2 i(x), \quad (5)$$

де γ – коефіцієнт поширення напруги та струму на лінії електропередачі. Розв'язуючи (4) і (5), можна отримати загальні розв'язки:

$$u(x) = A_1 e^{-\gamma x} + A_2 e^{\gamma x}, \quad (6)$$

$$i(x) = \sqrt{\frac{G+j\omega L}{R+j\omega C}} (A_1 e^{-\gamma x} + A_2 e^{\gamma x}). \quad (7)$$

Коли відомі напруга і струм при $x = 0$ на лінії передачі, тоді можна отримати значення напруги і струму в будь-якій частині лінії.

$$u(x) = \frac{1}{2} \left(u(0) + \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} i(0) \right) e^{-\gamma x} + \frac{1}{2} \left(u(0) - \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} i(0) \right) e^{\gamma x}, \quad (8)$$

$$i(x) = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{G+j\omega C}{R+j\omega L}} u(0) + i(0) \right) e^{-\gamma x} - \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{G+j\omega C}{R+j\omega L}} u(0) - i(0) \right) e^{\gamma x}. \quad (9)$$

При детектуванні напруги або струму на лінії передач зондом, відбудеться витік інформації. Тоді для фільтра, напруга та струм входу якого дорівнюють u_1 та i_1 , а вихідна напруга та струм u_2 та i_2 відповідно, маємо:

$$S_{21} = \frac{u_2 - i_2 Z_0}{u_1 + i_1 Z_0}. \quad (10)$$

При використанні смугових фільтрів можна запобігти витіку інформації до того, як інформаційний пристрій буде підключено до лінії передачі. Структурна схема традиційного смугового фільтра показана на рис. 3(а). Він складається із з'єднаних і відкритих шлейфів. Фільтр із закритими та відкритими шлейфами може досягти високих внесених втрат, але фізична ширина підключених шлейфів є надто вузькою, щоб переносити великий струм. Відповідно до [23], структура традиційного смугового фільтра може бути перетворена у структуру, зображену на малюнку 3(б). Використовуючи структуру, наведену на малюнку 3(б), і неоднакову ширину пов'язаної структури, отримуємо можливість з'єднаним шлейфам пропускати великий струм. Таким чином, рисунок 3(в) показує структуру запропонованого мікросмугового фільтра для запобігання електромагнітного витіку інформації лінії високої потужності.

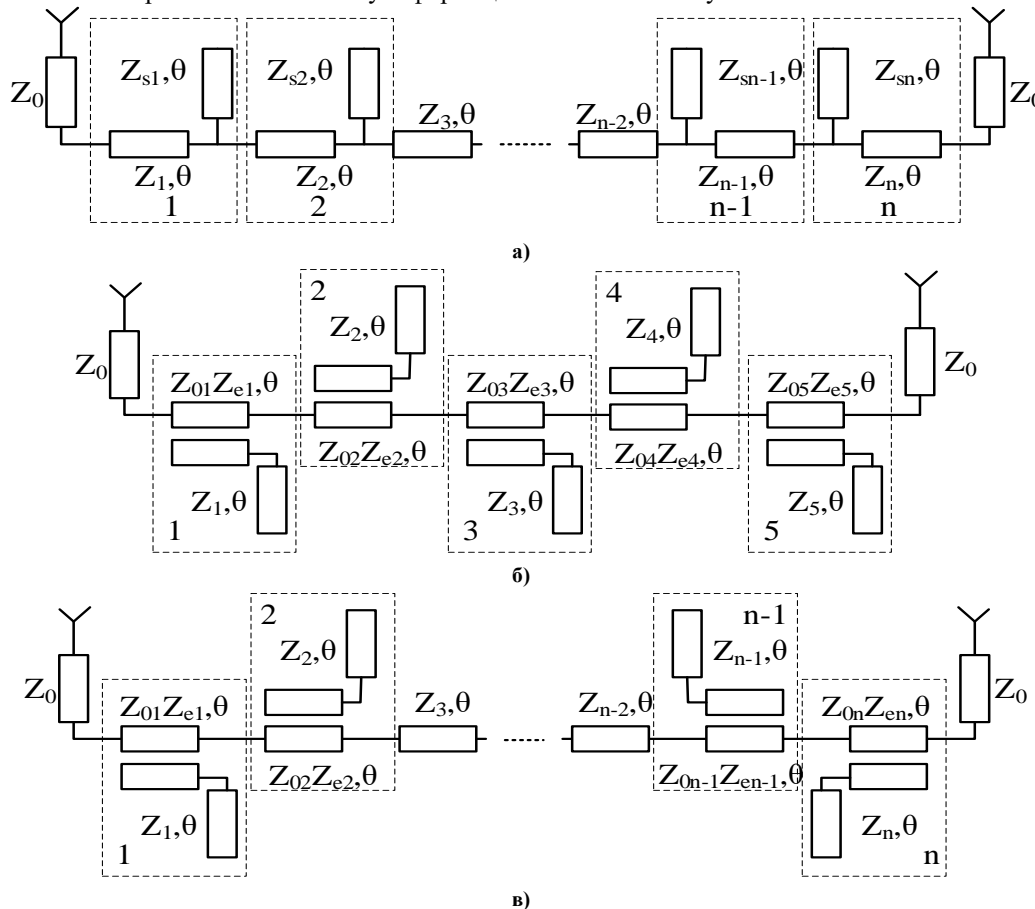


Рис. 3. Структурна схема: (а) традиційний смуговий фільтр із кількома частинами; (б) еквівалентна ступенева структура; (в) запропонований смуговий п'ятиступінчатий фільтр

Як показано на рисунку 3(б), запропонований МСФ складається з n частин, і кожна частина складається з паралельної лінії сполучення з відкритим шлейфом. Для реалізації високих внесених втрат (>40 дБ) і простоти структури, каскад складається лише з п'яти сегментів (рис.3 (в)). Реалізація каскаду різного числа ступенів показано на рисунку, де характеристичні опори непарної та парної моди паралельних ліній зв'язку дорівнюють Z_{o1} та Z_{e1} , Z_{o2} та Z_{e2} , Z_{o3} та Z_{e3} , Z_{o4} та Z_{e4} , Z_{o5} та Z_{e5} відповідно, а характеристичні опори відкритих шлейфів Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 , Z_5 відповідно.

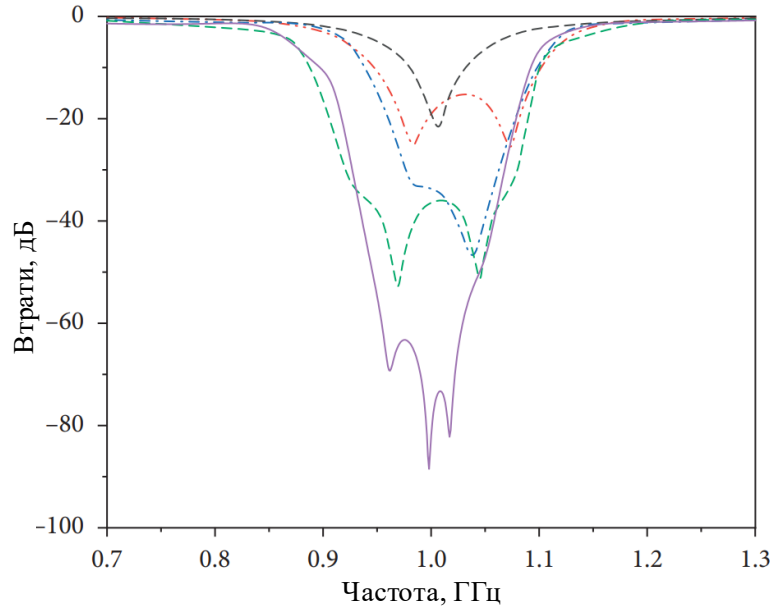


Рис. 4. Характеристики багатоступеневих каскадів з різним числом ступенів

Характеристичні опори $Z_0 = 50$ Ом. Електричні довжини паралельних ліній сполучення та відкритих шлейфів дорівнюють θ . $\theta = \pi/2$ на центральній частоті смуги загородження. Фільтр є симетричним відносно 3 ступені для зручності проектування та аналізу. Тоді:

$$Z_1 = Z_5, Z_2 = Z_4, Z_{o1} = Z_{o5}, Z_{e1} = Z_{e5}, Z_{o2} = Z_{o4} \text{ і } Z_{e2} = Z_{e4}. \quad (11)$$

Матриця ABCD параметрів визначається як:

$$\begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos\theta}{k_i} + \frac{k_i(Z_{ei}+Z_{oi})\cos\theta - (Z_{ei}-Z_{oi})}{2Z_i} & j \frac{(Z_{ei}-Z_{oi}) - k_i(Z_{ei}+Z_{oi})\cos^2\theta}{2\sin\theta} \\ j \frac{2\sin\theta}{(Z_{ei}-Z_{oi})} + j \frac{\sin\theta}{k_i Z_i} & \frac{\cos\theta}{k_i} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_4 & B_4 \\ C_4 & D_4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_5 & B_5 \\ C_5 & D_5 \end{bmatrix} \quad (13)$$

де $k_i = \frac{Z_{ei}-Z_{oi}}{Z_{ei}+Z_{oi}}$, $i = 1,2,3,4,5$.

Тоді нулі фільтра можна обчислити за формулою:

$$S_{21} = \frac{2}{A+BY_n+CZ_n+D}. \quad (14)$$

Аналізуючи характеристики зовнішньої мікросмужкової лінії, можна зазначити, що зі збільшенням діелектричної проникності підкладки ширина зовнішньої мікросмужкової лінії зменшується. Коли діелектрична проникність підкладки менше 3,1, ширина зовнішньої мікросмужкової лінії перевищує 3,58 мм, а струм перевищує 10 А. Отже, у випадку, коли характеристичний опір зовнішньої мікросмужкової лінії становить 50 Ом і зовнішня мікросмужкова лінія може переносити струм 10 А, для виготовлення друкованої плати з товщиною підкладки 1,5 мм можна використовувати підкладки з діелектричною проникністю менше 3,1 або використовувати друковану плату з діелектричною проникністю 2,65 і товщиною підкладки більше 1,35 мм.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У цій статті запропоновано мікросмушковий фільтр із високими внесеними втратами (MSBSF), який можна застосовувати до ліній передачі високої потужності. Відповідно до структури традиційних смугово-загороджувальних фільтрів реалізація фільтра, який може передавати великий струм і мати високі внесені втрати здійснюється за рахунок збільшення порядку фільтра. Запропоновано структуру п'ятиступінчатого фільтра, що може реалізувати внесені втрати понад 40 дБ.

Показано вимоги до ширини зовнішньої мікросмушкової лінії, з заданими характеристиками у діапазоні частот 2,40–2,49 ГГц. Отже, розроблений МСФ може бути використаний для запобігання витоків електромагнітної інформації високочастотної провідності на лініях передачі високої потужності.

Запропонований фільтр не вимагає додаткового увімкнення фільтра гармонік. Внаслідок кращої вибірковості розробленої структури можна знизити кількість резонаторів, що призведе до зменшення втрат, маси, габаритів та вартості виготовлення.

Хоча діапазон робочих частот фільтра є досить вузький (2,41–2,49 ГГц), проте має можливість розширення, що вимагає подальшого моделювання та перевірки.

Література

1. Rooney S., van der Merwe J. E., Crosby S. A., Leslie I. M., The Tempest: a framework for safe, resource assured, programmable networks. *IEEE Communications Magazine*. Vol. 36, no. 10, pp. 42–53, 1998.
2. Sekiguchi H., Seto S. Study on maximum receivable distance for radiated emission of information technology equipment causing information leakage. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. Vol. 55, no. 3, pp. 547–554, 2013.
3. Kasmi C., Helier M., Darces M., Prouff E. Modeling 'extreme values resulting from compromising electromagnetic emanations generated by an information system. *Comptes Rendus Physique*, vol. 15, no. 5, pp. 415–420, 2014.
4. Yli-Mayry V., Miyata D., Homma N., Aoki T., Hayashi Y. On the evaluation of electromagnetic information leakage from mobile device screens. *Proceeding of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and the IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1050–1052, Singapore, May 2018.
5. Kubiak I. Influence of the method of colors on levels of electromagnetic emissions from video standards. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 61, no. 4, pp. 1129–1137, 2019.
6. Kubiak I., Boitan A., Halunga S. Assessing the security of TEMPEST fonts against electromagnetic eavesdropping by using different specialized receivers. *Applied Sciences*, vol. 10, no. 8, p. 2828, 2020.
7. Kubiak I. Impact of IT devices production quality on the level of protection of processed information against the electromagnetic infiltration process. *Electronics*, vol. 8, no. 9, p. 1054, 2019.
8. Song T. L., Jeong Y. R., Jo H. S., Yook J. G. Noise jamming effect as a countermeasure against TEMPEST during high-speed signaling. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 57, pp. 1491–1500, 2005.
9. Yoneda S., Shiraki Y., Sasaki Y., Miyazaki C. A gasket free electromagnetic shielding structure for 2.4-GHz and 5-GHz bands using cascaded dual-behavior SIW resonators. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, no. 2, pp. 377–385, 2020.
10. Hayashi Y.-I., Homma N., Mizuki T. Analysis of electromagnetic information leakage from cryptographic devices with different physical structures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 3, pp. 571–580, 2013.
11. Jeong S., Shin D., Kim J. A transformer-isolated common-mode active EMI filter without additional components on power lines. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 3, pp. 2244–2257, 2019.
12. Hoffmann K., Skvor Z. First results of microwave measurement of broadband radio interference filters. *Proceeding of the 64th ARFTG Microwave Measurements Conference*, pp. 139–142, Orlando, FL, USA, December 2004.
13. Song K., Zhang F., Fan M., Zhu Y., Fan Y. Compact broadband bandstop filter based on composite right/left handed transmission line. *Electromagnetics*, vol. 37, no. 4, pp. 196–202, 2017.
14. Chan C.-K., Cheng C.-H., Wu T.-L. Design of a broadband common-mode filter with four transmission zeros. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 61, no. 4, pp. 1052–1060, 2019.
15. Phudpong P., Hunter I. C. Nonlinear matched reflection mode bandstop filters for frequency selective limiting applications. *Proceeding of the IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, pp. 1043–1046, Honolulu, USA, June 2007.
16. Feng W. J., Che W. Q., Shi S. Y., Xue Q. Compact dualwideband bandstop filters based on open-coupled lines and transversal signal-interaction concepts. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 7, no. 2, pp. 92–97, 2013.
17. Wu C.-H., Tang C.-C., Tang C.-W. Design of the microstrip bandstop filter with high insertion loss. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 122–128, 2019.

References

1. Rooney S., van der Merwe J. E., Crosby S. A., Leslie I. M., The Tempest: a framework for safe, resource assured, programmable networks. *IEEE Communications Magazine*. Vol. 36, no. 10, pp. 42–53, 1998.
2. Sekiguchi H., Seto S. Study on maximum receivable distance for radiated emission of information technology equipment causing information leakage. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. Vol. 55, no. 3, pp. 547–554, 2013.
3. Kasmi C., Helier M., Darces M., Prouff E. Modeling 'extreme values resulting from compromising electromagnetic emanations generated by an information system. *Comptes Rendus Physique*, vol. 15, no. 5, pp. 415–420, 2014.
4. Yli-Mayry V., Miyata D., Homma N., Aoki T., Hayashi Y. On the evaluation of electromagnetic information leakage from mobile device screens. *Proceeding of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and the IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1050–1052, Singapore, May 2018.

5. Kubiak I. Influence of the method of colors on levels of electromagnetic emissions from video standards. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 61, no. 4, pp. 1129–1137, 2019.
6. Kubiak I., Boitan A., Halunga S. Assessing the security of TEMPEST fonts against electromagnetic eavesdropping by using different specialized receivers. *Applied Sciences*, vol. 10, no. 8, p. 2828, 2020.
7. Kubiak I. Impact of IT devices production quality on the level of protection of processed information against the electromagnetic infiltration process. *Electronics*, vol. 8, no. 9, p. 1054, 2019.
8. Song T. L., Jeong Y. R., Jo H. S., Yook J. G. Noise jamming effect as a countermeasure against TEMPEST during high-speed signaling. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 57, pp. 1491–1500, 2005.
9. Yoneda S., Shiraki Y., Sasaki Y., Miyazaki C. A gasket free electromagnetic shielding structure for 2.4-GHz and 5-GHz bands using cascaded dual-behavior SIW resonators. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, no. 2, pp. 377–385, 2020.
10. Hayashi Y.-I., Homma N., Mizuki T. Analysis of electromagnetic information leakage from cryptographic devices with different physical structures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 3, pp. 571–580, 2013.
11. Jeong S., Shin D., Kim J. A transformer-isolated common-mode active EMI filter without additional components on power lines. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 3, pp. 2244–2257, 2019.
12. Hoffmann K., Skvor Z. First results of microwave measurement of broadband radio interference filters. *Proceeding of the 64th ARFTG Microwave Measurements Conference*, pp. 139–142, Orlando, FL, USA, December 2004.
13. Song K., Zhang F., Fan M., Zhu Y., Fan Y. Compact broadband bandstop filter based on composite right/left handed transmission line. *Electromagnetics*, vol. 37, no. 4, pp. 196–202, 2017.
14. Chan C.-K., Cheng C.-H., Wu T.-L. Design of a broadband common-mode filter with four transmission zeros. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 61, no. 4, pp. 1052–1060, 2019.
15. Phudpong P., Hunter I. C. Nonlinear matched reflection mode bandstop filters for frequency selective limiting applications. *Proceeding of the IEEE/MTT-S International Microwave Symposium*, pp. 1043–1046, Honolulu, USA, June 2007.
16. Feng W. J., Che W. Q., Shi S. Y., Xue Q. Compact dualwideband bandstop filters based on open-coupled lines and transversal signal-interaction concepts. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 7, no. 2, pp. 92–97, 2013.
17. Wu C.-H., Tang C.-C., Tang C.-W. Design of the microstrip bandstop filter with high insertion loss. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 122–128, 2019.