

УДК 621.372.542.2

# Оптимізація мікросмужкових фільтрів нижніх частот з тривимірними шлейфами

Нелін Є. А., Зінгер Я. Л., Попсуй В. І., Непочатих Ю. В.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

E-mail: nepochatikh@kivra.kpi.ua

Фільтри нижніх частот (ФНЧ) застосовують для подавлення небажаних гармонік та паразитних сигналів. У різноманітних радіоелектронних системах широке використання знайшли мікросмужкові ФНЧ. Нові, більш жорсткі вимоги до систем вимагають підвищення вибіркової ФНЧ. У статті розглянуто особливості конструкції мікросмужкового ФНЧ п'ятого порядку з тривимірними (3D) шлейфами: з'єднання шлейфа з сигнальним провідником малим контактним майданчиком та розміщення шлейфів по різні боки сигнального провідника. Вибір глибини отворів 3D шлейфів та розмірів контактних майданчиків дозволяє оптимізувати крутість та ширину смуги подавлення амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) фільтра. Виконано оптимізацію ФНЧ з 3D шлейфами, наведено результати експериментальних досліджень 3D шлейфа та ФНЧ. Експериментальні АЧХ добре узгоджуються з розрахунковими. Оптимізований ФНЧ має більш круту АЧХ, ніж ФНЧ на основі зосереджених елементів. Розглянуто пояснення такого співвідношення. Розрахунки виконано в програмному пакеті 3D моделювання CST Microwave Studio. Матеріал основи ФНЧ – Rogers RO3010.

*Ключові слова:* фільтр нижніх частот; емнісний шлейф; тривимірні мікросмужкові неоднорідності; шлейфне Т-з'єднання

DOI: [10.20535/RADAP.2020.82.61-66](https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.82.61-66)

## Вступ

Для подавлення небажаних гармонік та паразитних сигналів застосовують фільтри нижніх частот (ФНЧ). У різноманітних радіоелектронних системах широке використання знайшли мікросмужкові ФНЧ. Нові, більш жорсткі вимоги до систем вимагають підвищення вибіркової ФНЧ [1–3]. В традиційних конструкціях фільтрів використовують двовимірні (2D) квазізосереджені елементи на основі відрізків мікросмужкової лінії. Один з напрямів покращення параметрів мікросмужкових елементів – використання електромагнітних кристалів та окремих електромагнітнокристалічних неоднорідностей [1, 4]. Традиційно – це 2D неоднорідності у вигляді отворів у заземленій поверхні або сигнальному провіднику. Нами запропоновані значно ефективніші тривимірні (3D) неоднорідності, що включають не лише поверхні мікросмужкової лінії, але і її основу.

Квазізосереджену індуктивність мікросмужкового ФНЧ реалізують високоімпедансною секцією мікросмужкової лінії, а квазізосереджену ємність – низькоімпедансною секцією або розімкнутим шлейфом. Шлейф на основі 3D неоднорідності має суттєво кращі параметри, ніж 2D шлейф. Залежно від третього розміру (глибини неоднорідності) 3D шлейфа його площа менша у 1,6... 4,1 рази [5].

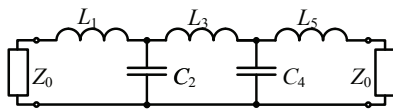
У попередній роботі (Fifth-Order Lowpass Filters on Electromagnetic-Crystal Inhomogeneities, UkrMiCo 2018) нами представлені розрахунки ФНЧ п'ятого порядку з 3D шлейфами. За результатами 3D моделювання амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) ФНЧ має крутість близьку (але дещо гіршу) до крутості АЧХ ФНЧ на основі зосереджених елементів.

Мета цієї роботи – оптимізація конструкції ФНЧ з 3D шлейфами і експериментальні дослідження шлейфа та ФНЧ. Крутість АЧХ оптимізованого ФНЧ більша за крутість АЧХ ФНЧ на основі зосереджених елементів.

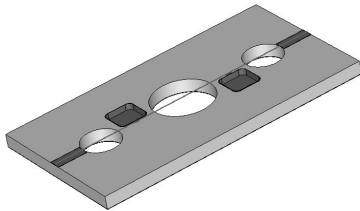
Наведені в статті розрахункові АЧХ отримано 3D-моделюванням в програмному пакеті CST Microwave Studio.

## 1 Особливості конструкції ФНЧ п'ятого порядку з 3D шлейфами

На рис. 1 наведено схему ФНЧ та його зовнішній вигляд. Параметри фільтра: частота зрізу – 2 ГГц, рівень пульсацій в смузі пропускання – 0,1 дБ, характеристика Чебишова,  $Z_0 = 50$  Ом. Значення індуктивностей та ємностей розраховано згідно з [1].



(a)



(b)

Рис. 1. Схема ФНЧ (a) та його зовнішній вигляд (b)

Квазісереджену індуктивність виконано наскрізним отвором у діелектрику з навісним провідником над ним, а квазісереджену ємність — глухим металізованим отвором з боку сигнального провідника. Ємнісний отвір шлейфа квадратний із заокругленими кутами. За такої форми отвору, як порівняти з круглим отвором, краще використовується площа, а заокруглення обумовлені технологією виготовлення.

Конструктивні параметри індуктивностей: діаметри отворів індуктивностей  $L_1$  та  $L_5$  — 3,8 мм, індуктивності  $L_3$  — 6,0 нГн, діаметр навісного провідника — 0,1 мм. Конструктивні параметри ємностей: довжина сторони отвору — 2,9 мм, радіус заокруглень — 0,5 мм, глибина отворів — 0,52 мм. Відстань між краями індуктивного та ємнісного елементів — 0,5 мм. Матеріал основи фільтра — Rogers RO3010 (товщина основи — 1,27 мм; товщина металізації — 35 мкм; відносна діелектрична проникність — 10,2); довжина фільтра дорівнює 27,4 мм з урахуванням зовнішніх відрізків мікросмужкового провідника завдовжки 3 мм.

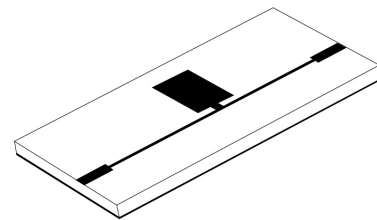
Окрім використання 3D реактивних елементів, ФНЧ має такі відмінності від традиційних рішень: 1) шлейф з'єднано з сигнальним провідником малим контактним майданчиком; 2) шлейфи розміщено по різні боки сигнального провідника.

Розглянемо вплив цих особливостей на АЧХ ФНЧ.

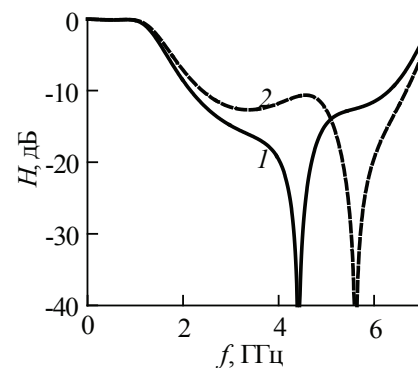
Амплітудно-частотна характеристика шлейфа має режекцію, частота  $f_p$  якої без урахування паразитних параметрів визначається чвертьхвильовою умовою для довжини шлейфа. На значення частоти  $f_p$  впливає паразитна індуктивність  $L_n$  шлейфного Т-з'єднання, що включена послідовно шлейфу [5]. Традиційно з'єднання шлейфа з сигнальним провідником виконують вздовж всієї ширини шлейфа

[1,6]. У цьому випадку значення  $L_n$  від'ємне і велике за модулем [5]. Це призводить до значного збільшення частоти  $f_p$  і, як наслідок, до погіршення крутості АЧХ шлейфа та ФНЧ. У разі приєднання шлейфа за допомогою малого контактної майданчика значення  $L_n$  зменшується за модулем і, навіть, може стати додатним [5].

Рис. 2 ілюструє застосування контактної майданчика в ФНЧ третього порядку з 2D шлейфом. Без контактної майданчика (традиційне рішення, розглянуте в [1])  $L_n = -0,27$  нГн. Внаслідок впливу індуктивності  $L_n$  значення  $f_p$  збільшується з 4,54 до 5,62 ГГц. З контактним майданчиком розмірами  $0,1 \times 0,2$  мм (вздовж шлейфа та лінії відповідно)  $L_n = 0,04$  нГн і  $f_p = 4,42$  ГГц. У результаті крутість АЧХ ФНЧ зростає з 9,2 до 10,4 дБ/ГГц.



(a)



(b)

Рис. 2. Фільтр нижніх частот з 2D шлейфом з контактним майданчиком (a); АЧХ ФНЧ з контактним майданчиком (1) та без нього (2) (b)

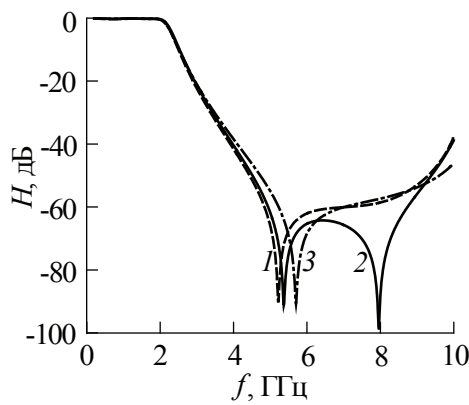
У ФНЧ, що зображений на рис. 1b, шлейфи мають контактні майданчики розмірами  $0,5 \times 0,2$  мм і  $L_n = -0,015$  нГн.

У разі традиційного розміщення шлейфів по один бік сигнального провідника в розрахунковій АЧХ ФНЧ п'ятого порядку з 3D шлейфами відсутня режекція, хоча в АЧХ ФНЧ з одним 2D шлейфом вона є (рис. 2b). Мінімальний рівень в смузї подавлення АЧХ ФНЧ п'ятого порядку складає -58 дБ. Відсутність режекції можна пояснити тим, що за настільки низького рівня сигналу в смузї подавлення помітним стає паразитний ємнісний зв'язок між шлейфами, зумовлений їх різними по-

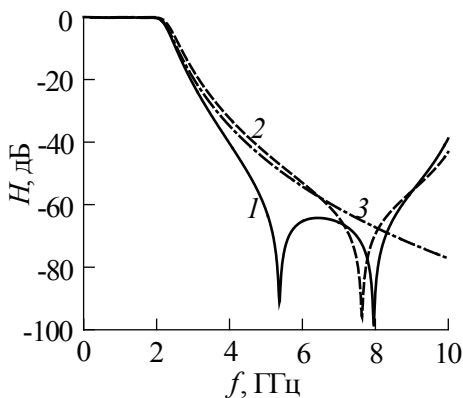
тенціалами. Розміщенням шлейфів по різні боки сигнального провідника цей зв'язок значно зменшено, оскільки більша відстань між шлейфами та менша ефективна діелектрична проникність простору між ними (завдяки отвору індуктивності). У результаті АЧХ має область режекції з мінімальним рівнем  $-96$  дБ.

## 2 Оптимізація конструкції фільтра

Значення індуктивності  $L_n$ , яке визначає частоту  $f_p$ , залежить від глибини отвору шлейфа та розмірів контактної майданчика [5]. Якщо контактні майданчики шлейфів ФНЧ різні за розмірами, різними будуть і їх частоти режекції. Це призведе до розширення смуги подавлення ФНЧ. Таким чином, вибором глибини отворів шлейфів та розмірів контактних майданчиків можна оптимізувати крутість і ширину смуги подавлення АЧХ.



(a)



(b)

Рис. 3. Розрахункові АЧХ за глибини шлейфів: 0,40, 0,45 та 0,52 мм (криві 1 – 3 відповідно) (а); АЧХ оптимізованого ФНЧ, неоптимізованого та ФНЧ на основі зосереджених елементів (криві 1 – 3 відповідно) (б)

На рис. 3а наведено АЧХ за різних глибин отворів шлейфів; розміри контактних майданчиків шлейфів:  $0,5 \times 0,1$  і  $0,2 \times 0,1$  мм. Як бачимо, найширшу смугу подавлення забезпечує варіант з глибиною отворів шлейфів 0,45 мм. Цей варіант реалізовано експериментально.

Рис. 3б ілюструє порівняння АЧХ ФНЧ до та після оптимізації. У результаті оптимізації крутість АЧХ зростає з 20,0 до 22,9 дБ/ГГц та розширяється смуга подавлення (з 4,2 до 4,9 ГГц на рівні  $-50$  дБ та з 1,9 до 3,8 ГГц на рівні  $-60$  дБ). Крутість АЧХ оптимізованого ФНЧ вища за крутість АЧХ ФНЧ на основі зосереджених елементів, що дорівнює 21,5 дБ/ГГц. Розглянемо пояснення такого співвідношення.

Розрахований на характеристику Чебишова ФНЧ буде мати таку характеристику, якщо реактивні елементи зосереджені. Квазізосереджені елементи наближені до зосереджених, тому АЧХ ФНЧ на їхній основі лише наближена до характеристики Чебишова. Як видно з рис. 1а, зі збільшенням частоти внаслідок збільшення опорів індуктивностей і зменшення опорів ємностей зростають падіння напруги на індуктивностях і струм крізь ємності. У результаті зменшуються струм і напруга на навантазі і АЧХ спадає. Крутість АЧХ буде більшою, як порівняти з зосередженими елементами, у разі збільшення з частотою параметрів квазізосереджених елементів. Розглянемо частотні залежності еквівалентних параметрів квазізосереджених реактивних елементів згідно з моделлю відрізка довгої лінії (ДЛ) без втрат.

З формул для вхідного опору відрізка ДЛ, коефіцієнта відбиття від відрізка та закону збереження енергії в результаті перетворень для коефіцієнта проходження відрізка ДЛ – секції маємо:

$$T_c = \frac{1}{\sqrt{1 + [(Z_0^2 - Z^2)\sin\varphi/2Z_0Z]^2}}, \quad (1)$$

де  $Z_0$  та  $Z$  – хвильові опори ДЛ та відрізка ДЛ відповідно;  $\varphi = \beta l$ ,  $\beta$  – хвильове число,  $l$  – довжина відрізка ДЛ; для індуктивної секції  $Z \gg Z_0$ , а для ємнісної –  $Z \ll Z_0$ . Коефіцієнти передачі кіл, утворених зосередженою індуктивністю  $L$ , приєднаною послідовно навантазі, та зосередженою паралельною навантазі ємністю  $C$ , дорівнюють відповідно:

$$T_L = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega L/2Z_0)^2}}, \quad (2)$$

$$T_C = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega C Z_0/2)^2}},$$

де  $Z_0$  – опір навантаги. Прирівнюючи (1) та (2), знайдемо еквівалентні індуктивність  $L_c$  та ємність

$C_c$  секцій:

$$L_c = \frac{(Z^2 - Z_0^2) \sin \varphi}{\omega Z},$$

$$C_c = \frac{(Z_0^2 - Z^2) \sin \varphi}{\omega Z_0^2 Z},$$

де  $\omega = 2\pi f$ . Оскільки  $\varphi = \omega l/\nu$ ,  $\nu$  – фазова швидкість хвилі, та  $\sin x < x$ , еквівалентні індуктивність та ємність секцій зменшуються з частотою.

З рівності вхідного опору мікросмужкового шлейфа та опору зосередженої ємності отримаємо еквівалентну ємність шлейфа:

$$C_{ш} = \frac{1}{\omega Z / \operatorname{tg} \varphi - \omega^2 L_{п}}. \quad (3)$$

Оскільки  $\operatorname{tg} x > x$ , перша складова знаменника (3) зменшується з частотою, що призводить до збільшення ємності  $C_{ш}$ . Якщо  $L_{п} > 0$ , друга складова від'ємна і ємність  $C_{ш}$  зростає з частотою ще в більшій мірі і тим більшої, чим більша індуктивність  $L_{п}$ .

У випадку  $L_{п} < 0$  друга складова додатна, збільшується з частотою, що призводить до зменшення ємності  $C_{ш}$ . Характер частотної залежності ємності  $C_{ш}$  визначатиме співвідношення складових знаменника (3). Знайдемо умову збільшення ємності  $C_{ш}$  з частотою для цього випадку. На початку спаду АЧХ  $\varphi \ll 1$ , тому скористаємося наближенням  $\operatorname{tg} \varphi \approx \varphi + \varphi^3/3$ . У результаті з (3) отримаємо умову збільшення ємності  $C_{ш}$  з частотою:

$$L_{п} > -\frac{Z\varphi^2}{3\omega}. \quad (4)$$

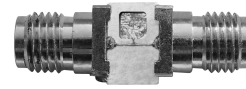
Ця умова загальна, оскільки включає і випадок  $L_{п} \geq 0$ . Для оптимізованого ФНЧ на частоті зрізу маємо  $L_{п} > -0,09$  нГн.

Крутість АЧХ оптимізованого ФНЧ вища проти ФНЧ на основі зосереджених елементів, оскільки значення індуктивностей  $L_{п}$  шлейфів задовольняють умові (4) та збільшення з частотою еквівалентних ємностей шлейфів переважає зменшення еквівалентних індуктивностей секцій.

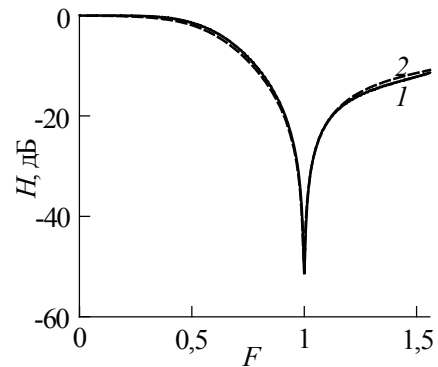
### 3 Результати експериментальних досліджень

На рис. 4а наведено фотографію експериментального зразка 3D шлейфа з розмірами контактного майданчика  $0,5 \times 0,1$  мм. Експериментальні та розрахункові значення  $f_p$  і рівня режекції дорівнюють 6,41 та 5,72 ГГц і -51,5 та -49,4 дБ відповідно. Відносна похибка розрахункових значень  $f_p$  і рівня режекції: 11% і 4% відповідно. В одиницях нормованої частоти експериментальна та розрахункова характеристики практично збігаються.

Рис. 5 ілюструє експериментальний зразок ФНЧ та його АЧХ. Як бачимо, експериментальна АЧХ добре узгоджується з розрахунковою.

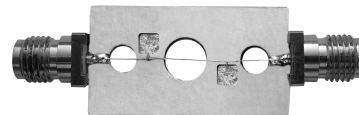


(a)

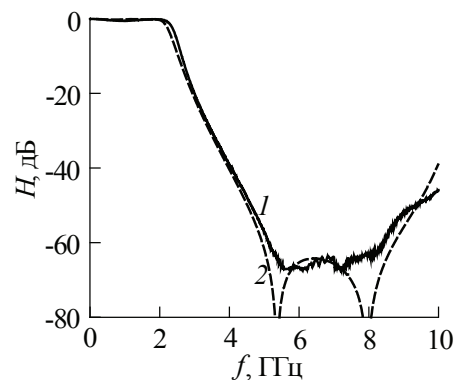


(b)

Рис. 4. Фотографія експериментального зразка 3D шлейфа (а) та експериментальна (1) і розрахункова (2) АЧХ шлейфа (b);  $F = f/f_p$



(a)



(b)

Рис. 5. Фотографія експериментального зразка фільтра (а), експериментальна (1) та розрахункова (2) АЧХ фільтра (b)

Вимірювання виконано без корпусування зразків. Паразитний ємнісний зв'язок між входом і виходом зменшений екрануванням мідною фольгою.

## 4 Обговорення отриманих результатів

У разі з'єднання шлейфа з сигнальним провідником малим контактним майданчиком суттєво зменшується вплив паразитної індуктивності мікросмужкового шлейфного Т-з'єднання; за рахунок цього підвищується крутість АЧХ ФНЧ. Різним за розмірами контактним майданчиком шлейфів ФНЧ відповідають і різні частоти режекції. У результаті розширюється смуга подавлення ФНЧ. Розміщення шлейфів по різні боки сигнального провідника дозволило зменшити паразитний ємнісний зв'язок між шлейфами і, як наслідок, мінімальний рівень у смузі подавлення зменшився з  $-58$  до  $-96$  дБ.

Наявність третього розміру у елементів мікросмужкової лінії забезпечує не лише суттєве підвищення їхньої ефективності, але і додаткові можливості конструювання. Оскільки значення паразитної індуктивності, яке визначає частоту режекції, залежить від глибини отвору 3D шлейфа, цей параметр, а також розміри контактних майданчиків шлейфів є параметрами для оптимізації крутості та ширини смуги подавлення АЧХ.

## Висновки

Використання у якості квазісосереджених ємностей 3D шлейфів, з'єднаних з сигнальним провідником малим контактним майданчиком, дозволяє оптимізувати АЧХ ФНЧ вибором глибини отворів шлейфів та розмірів контактних майданчиків.

За результатами оптимізації ФНЧ з 3D шлейфами крутість АЧХ зросла з 20,0 до 22,9 дБ/ГГц та розширилася смуга подавлення (з 1,9 до 3,8 ГГц на рівні  $-60$  дБ). Крутість оптимізованої АЧХ вища проти АЧХ ФНЧ на основі зосереджених елементів, що дорівнює 21,5 дБ/ГГц.

Експериментальні АЧХ 3D шлейфа та ФНЧ з 3D шлейфами добре узгоджуються з розрахунковими.

## Подяки

Вимірювання експериментальних характеристик виконано векторним аналізатором кіл Anritsu MS46122A ShockLine.

Автори висловлюють щире вдячність професору кафедри теоретичних основ радіотехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського Найденку В. І. та співробітникам його групи за надану можливість експериментальних досліджень.

## References

- [1] Hong J.-S. (2011) *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, 2nd ed., Wiley, pp. 261-333. DOI: 10.1002/9780470937297
- [2] Gupta K. and Sahayam N. (2018) *A Review on Microstrip Filters for the Application in Communication Systems*. IRJET, Vol. 5, No 12, pp. 709-717.
- [3] Chuma E. L., Iano Y., Cardoso P. E. R., Loschi H. J. and Pajuelo D. (2018) Design of Stepped Impedance Microstrip LowPass Filter for Coexistence of TV Broadcasting and LTE Mobile System Close to 700 MHz. *SET INTERNATIONAL JOURNAL OF BROADCAST ENGINEERING*, Vol. 4, pp. 53-57. DOI: 10.18580/setijbe.2018.7
- [4] Rekha T.K., Abdulla P., Jasmine P.M. and Anu A.R. (2020) Compact microstrip lowpass filter with high harmonics suppression using defected structures. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 115. DOI: 10.1016/j.aeue.2019.153032
- [5] Pervak S.H., Zinher Y.L., Adamenko Y.F., Adamenko V.O. and Nelin E.A. (2019) Microwave Three-Dimensional Capacitive Stubs. *Visnyk NTUU KPI Seriya - Radioelekhnika Radioaparato buduvannya*, Iss. 77, pp. 30-35. DOI: 10.20535/radap.2019.77.30-35
- [6] Jubril A. and Nyitamen D.S. (2018) *2GHz Microstrip Low Pass Filter Design with Open-Circuited Stub*. IOSR-Journal of Electronics and Communication Engineering, Vol. 13, Iss. 2, pp. 1-9. DOI: 10.9790/2834-1302020109

## Оптимизация микрополосковых фильтров нижних частот на основе трехмерных шлейфов

Нелин Е. А., Зингер Я. Л., Попсуй В. И., Непочатых Ю. В.

Фильтры нижних частот (ФНЧ) применяют для подавления нежелательных гармоник и паразитных сигналов. В различных радиоэлектронных системах широко используют микрополосковые ФНЧ. Новые, более высокие требования к системам предполагают повышение избирательности ФНЧ. В статье рассмотрены особенности конструкции микрополоскового ФНЧ пятого порядка на основе трехмерных (3D) шлейфов: соединение шлейфа с сигнальным проводником маленькой контактной площадкой и размещение шлейфов по разные стороны сигнального проводника. Показано, что выбор глубины отверстий 3D шлейфов и размеров контактных площадок позволяет оптимизировать крутизну и ширину полосы подавления амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра. Выполнена оптимизация ФНЧ на основе 3D шлейфов, приведены результаты экспериментальных исследований 3D шлейфа и ФНЧ. Экспериментальные АЧХ хорошо согласуются с расчетными. Оптимизированный ФНЧ имеет более крутую АЧХ по сравнению с ФНЧ на основе сосредоточенных элементов. Рассмотрено объяснение такого соотношения. Расчеты выполнены в программном пакете 3D моделирования CST Microwave Studio. Материал подложки ФНЧ — Rogers RO3010.

*Ключевые слова:* фильтр нижних частот; ёмкостный шлейф; трехмерные микрополосковые неоднородности; шлейфное Т-соединение

## Optimization of Microstrip Lowpass Filters with Three-Dimensional Stubs

*Nelin E. A., Zinher Ya. L., Popsui V. I., Nepochatykh Yu. V.*

**Introduction.** Lowpass filters (LPFs) are used to suppress unwanted harmonics and spurious signals. Microstrip LPFs are widely used in various electronic systems. New, more stringent system requirements demand increased LPF selectivity. In the previous work, we considered the calculation of the fifth-order microstrip LPF with three-dimensional (3D) stubs. According to the results of 3D modeling, the LPF frequency response (FR) has a steepness close (but slightly worse) to the steepness of the FR LPF based on lumped elements. In the presented paper the optimization of the LPF with 3D stubs is performed, the experiment results for 3D stub and LPF are given. Optimized LPF has a steeper FR than LPF based on lumped elements.

### 1 Features of the fifth-order LPF with 3D stubs.

The quasi-lumped inductance is made by a through hole in the dielectric with an overhead conductor above it, and the quasi-lumped capacitance is made by a blind metallized hole on the signal conductor side. In addition to the use of 3D reactive elements, the LPF has the following differences from traditional solutions: 1) the stub is connected to the signal conductor by a small contact pad; 2) the stubs are placed on different sides of signal conductor.

**2 Optimization of the LPF.** Value of the stub's rejection frequency is affected by the stub-line T-junction parasitic inductance connected in series with the stub. Parasitic inductance value depends on the depth of the stub hole and the contact pad sizes. If the LPF stubs contact

pads are different in sizes, their rejection frequencies will be different. This will widen the LPF suppression band. Thus, by choosing stub holes depth and contact pads sizes, you can optimize steepness and suppression band width the LPF FR. As a result of optimization, the LPF FR steepness increased from 20.0 to 22.9 dB/GHz and the suppression band widen from 1.9 to 3.8 GHz at the level of -60 dB. The optimized FR has a steepness higher than the FR LPF based on lumped elements equal to 21.5 dB/GHz.

**3 Experimental results.** Photos and experimental FRs of the 3D stub and LPF with 3D stubs are given. 3D stub experimental and calculated values of the rejection frequency, the rejection level and the relative error of the calculated values are 6.41 and 5.72 GHz, -51.5 and -49.4 dB, 11% and 4%, respectively. The experimental LPF FR is in a good agreement with calculated one.

**4 Results discussion.** The presence of the third size in the microstrip elements provides not only a significant increase in their efficiency, but also additional design possibilities. Since the value of the parasitic inductance, which determines the rejection frequency, depends on the 3D stub hole depth, this parameter, as well as the contact pads sizes are optimization parameters to the FR steepness and suppression bandwidth.

**Conclusion.** The use of 3D stubs as quasi-lumped capacitances allows to optimize the LPF FR by choosing the stubs hole depth and the stub contact pad sizes. As a result of LPF optimization, the FR steepness increased and the suppression band widen. The steepness of the optimized FR is higher than the FR LPF based on lumped elements.

*Key words:* low-pass filter; capacitive stub; three-dimensional model; three-dimensional microstrip inhomogeneity; stub's T-junction