

УДК 621.396.6

**МЕТОДИ ПОЛІПШЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК
МІКРОСМУЖКОВИХ ФІЛЬТРІВ. Частина 1: опис методів**

Степан САВЕНКО, Ірина ЗВЯГІНА

e-mail: stepan.savenko@nure.ua, iryna.zviahina@nure.ua

Науковий керівник – к.т.н., доц. Дмитро ГАВВА

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. КРiСТЗi
м. Харків, Україна

The work aims to study methods for improving the characteristics of microstrip filters. The work consists of two parts. The first part collects and describes the features of the most effective strategies. In the second part, numerical studies and a comparative analysis of these methods use the HFSS program.

Сьогодні майже усі телекомунікаційні системи, системи навігації, безпеки тощо, які працюють в НВЧ діапазоні частот у своєму складі мають фільтруючі пристрої, які побудовані на мікросмужковій технології. При цьому важливим та актуальним завданням сучасної радіотехніки є пошук нових підходів та принципів побудови таких фільтруючих елементів, які мають покращені маса-габаритні та електричні характеристики. Тому в роботі була поставлена задача описати та дослідити відомі з існуючих методів поліпшення характеристик мікросмужкових фільтрів (МФ), оцінити та порівняти їх ефективність.

З практичної точки зору всі методи покращення характеристик фільтрів можна розділити на дві групи: методи придушення і методи частотного зсуву паразитних смуг пропускання (СП). У свою чергу методи придушення можуть бути розділені за механізмом придушення на: ємнісну компенсацію; додавання ежекторних (РФ) або НЧ (ФНЧ) фільтрів; застосування плавної або стрибкоподібної зміни хвильового опору. Методи частотного зсуву поділяються на часткове видалення шару екрану та використання комбінації ліній з позитивною та негативною дисперсією.

Ємнісна компенсація – один із найпопулярніших методів придушення паразитної СП в МФ. Метод заснований на наступній властивості пов'язаних мікросмужкових ліній (МСЛ): фазова швидкість парної моди менше, ніж непарної, а отже компенсація полягає у вирівнюванні фазових швидкостей мод за допомогою введення додаткових ємностей між пов'язаними резонаторами. Для придушення кратної паразитної СП необхідно суттєво зменшити коефіцієнт зв'язку між резонаторами на другій паразитній СП.

Оскільки для парної та непарної мод розподіл електромагнітного поля різний, введення ємності між резонаторами змінює електричну довжину лише непарної моди. Так, у разі парної моди, обидві МСЛ мають деякий рівний потенціал однакової полярності, відповідно, електрична довжина парної моди при введенні ємності не змінюється. У разі непарної моди між

провідниками МСЛ існує різниця потенціалів, і електрична довжина непарної моди при введенні ємності збільшуватиметься, а резонансна частота зменшуватиметься. Введення ємності призводить до зменшення коефіцієнта зв'язку між резонаторами, при цьому резонансні частоти парної та непарної моди вирівнюються.

Ввести додаткову ємність можна у різний спосіб, а отже звідси велика різноманітність методів ємнісної компенсації:

а) введення додаткової ємності безпосередньо між пов'язаними резонаторами. Переваги – не призводить до збільшення необхідного розміру підкладки та не вносить додаткових втрат у характеристику фільтра;

б) використання додаткового діелектричного шару. Його введення вносить додаткову ємність, для розрахунку якої потрібно визначити товщину та діелектричну проникність покриття.

В методі плавної або стрибкоподібної зміни хвильового опору є декілька підходів. При проектуванні резонатора зі стрибком хвильового опору, основне завдання полягає у визначенні такого співвідношення хвильових опорів, при якому досягається максимально можлива відстань між основним і паразитним резонансами. Отже виділяють наступні підходи:

а) використання резонаторів зі стрибкоподібною зміною хвильового опору. Приклад такого підходу зображено на рис. 1 (верхній), де зображено фільтр-дробинка, у якого з обох сторін пов'язаних МСЛ робляться періодичні квадратні вирізи. Причому ліпше подавлення паразитних смуг досягається при більшій кількості вирізів. Переваги методу – не збільшуються розміри фільтра та не вносяться додаткові втрати;

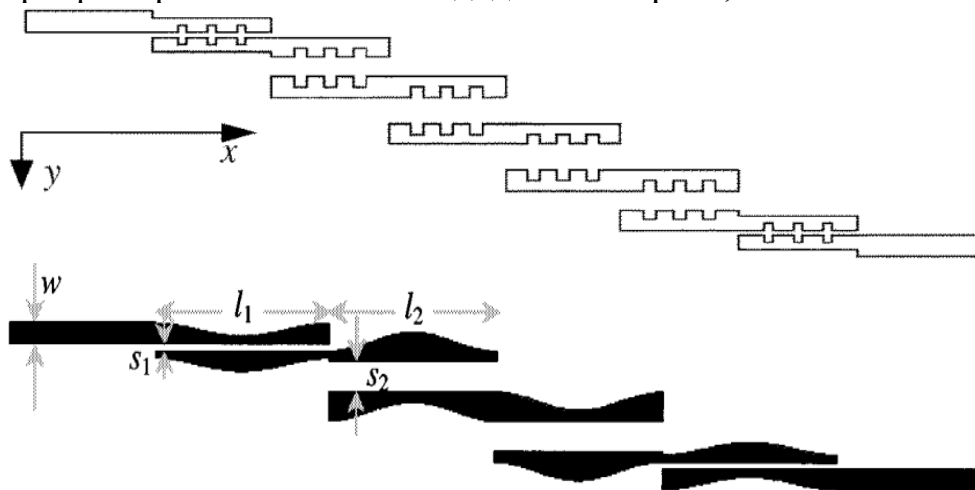


Рис. 1

б) зміна ширини мікросмужкових зв'язаних ліній за синусоїдальним законом. Приклад надано на рис. 1 (нижній). Ширини МСЛ (амплітуда хвилі) підбирається таким чином, щоб фазові швидкості парної та непарної мод вирівнювалися. Переваги такі ж, як і в попередньому підході. Недоліки – складність виготовлення.

Суть методу додавання РФ або ФНЧ полягає в тому, що на підкладниці окрім основного смугастого фільтра також розміщують РФ. Він налаштовується таким чином, щоб смуга замикання потрапляла на паразитну смугу смугастого фільтра. На рис. 2 (ліворуч) представлено приклад такої топології, де смугастий та режекторний фільтри послідовно поєднані відрізком МСЛ. Для того щоб придушити паразитну смугу пропускання смугастого фільтра, в РФ співвідношення між двома шлейфами підбирається таким чином, щоб його два нулі передачі потрапляли на другу і третю паразитні смуги передачі смугастого фільтра. В іншому прикладі (рис. 2 (праворуч)) використовувалися два РФ які представляють собою набір напівхвильових резонаторів у вигляді кілець зі щілиною. Один з фільтрів встановлюється на вході, а інший на виході смугового фільтра.

Переваги методу – простота виготовлення. Недоліки – значно збільшуються габарити пристрою та підвищуються втрати у смузі пропускання.

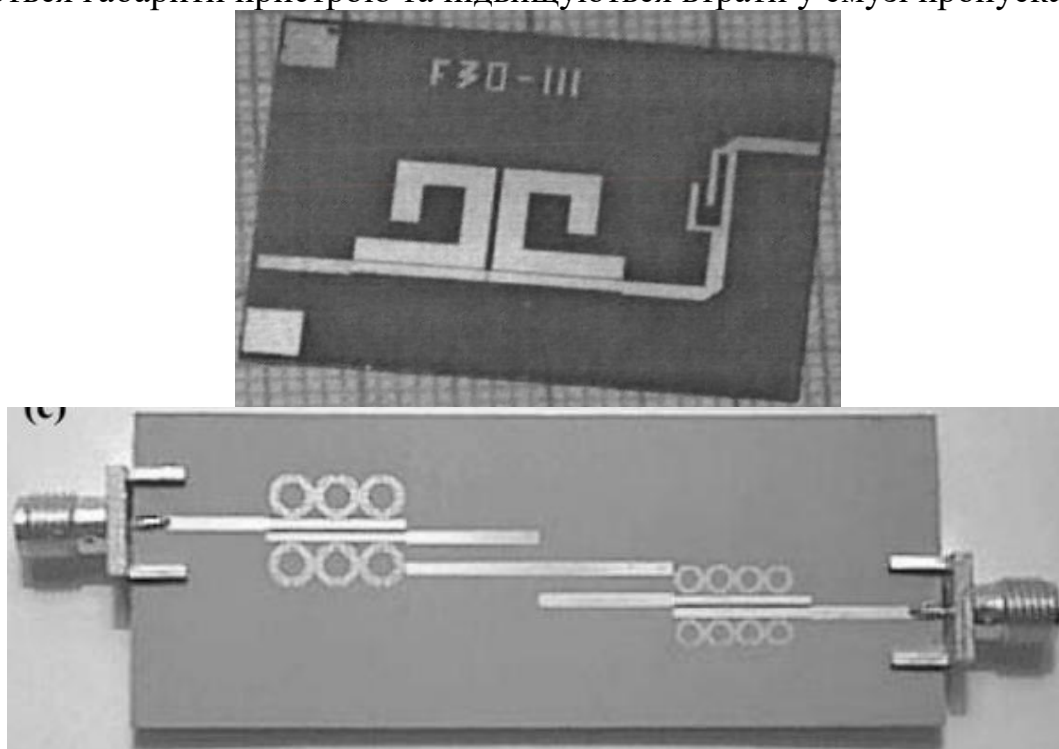


Рис. 2

Цікавим методом поліпшення характеристик фільтрів є використання комбінації ліній з позитивною та негативною дисперсією. Лінії з негативною дисперсією – це штучні лінії з негативною електричною довжиною, або протилежно спрямованими фазовою та груповою швидкостями. Класичним прикладом електричного ланцюжка з негативною дисперсією є ла-

нцюжок у вигляді фільтра верхніх частот. Завдяки різним дисперсійним характеристикам ліній вдається на їхній основі проектувати планарні фільтри зі зсувом паразитних смуг вгору по частоті.

На рис. 3 показано з'єднання секцій ліній з позитивною дисперсією (індуктивності – закорочені шлейфи ліній передач та їх паразитні ємності) та негативною дисперсією (зустрічно-штирьові ємності та паразитні індуктивності між ними). У структурі лінія з негативною дисперсією довжиною $\lambda/8$ одночасно грає роль резонатора та інвертора, що забезпечує ємнісний зв'язок між сусідніми секціями. Отже на основі таких секцій можна робити фільтри, а перевагою відповідного підходу є компактний розмір фільтру та можливість проектування багатосмужкових фільтрів з подавленням вищих гармонік.

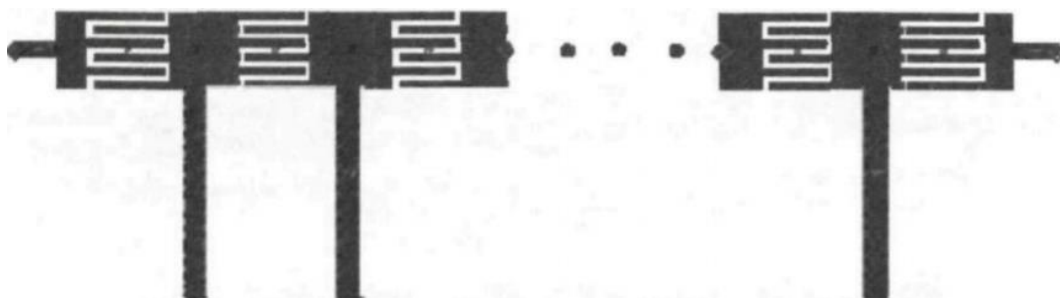


Рис. 3

Метод часткового видалення шару екрану особливо зручний для широкосмугових фільтрів, оскільки викликає збільшення смуги пропускання фільтра. Часткове видалення екрану призводить до зменшення ємності на землю та збільшення взаємної індуктивності резонаторів. Як наслідок відбувається збільшення коефіцієнта зв'язку між резонаторами і зсув робочих резонансів вниз по частоті. На рис. 4 представлено приклад топології фільтра 3-го порядку із застосуванням зазначеного методу. Переваги метода – зсув паразитних смуг. Недоліки – збільшення смуги та площі фільтру.

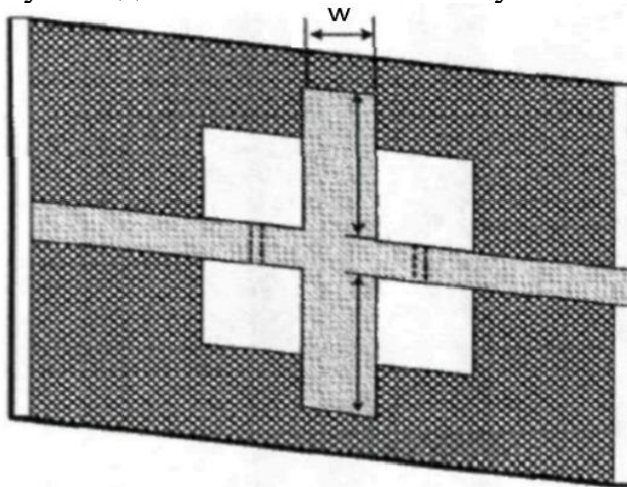


Рис. 4

Окрім описаних вище методів зміни та поліпшення характеристик фільтра існує ще «технологічний» підхід – застосування ВТНП (високотемпературні надпровідники) технології. Надпровідники – це матеріали, які демонструють власний нульовий опір потоку постійного струму при охолодженні нижче певної температури та збільшується зі збільшенням частоти. На типових мікрохвильових частотах опір надпровідника становить тисячні частки від опору кращого звичайного провідника. Це, безумовно, досить низьке значення, щоб значно покращити характеристики мікросмужкових фільтрів за рахунок зменшення втрат.

Оскільки добротність Q_c провідника обернено пропорційна поверхневому опору R_s ,

$$Q_c \approx \pi \left(\frac{h}{\lambda} \right) \left(\frac{\eta}{R_s} \right),$$

(тут h – товщина підкладки, λ і η (≈ 377) – довжина хвилі та хвильовий опір у вільному просторі) то відповідно для ВТНП резонатора можна отримати ще і значно більшу добротність в порівнянні з резонатором, який виконано зі звичайного провідника (мідь, срібло тощо). Це, в свою чергу, дозволяє реалізувати фільтр з високою селективністю та малими розмірами.

Однак для використання ВТНП технології потрібно пам'ятати, що мікрохвильові матеріали демонструють нелінійність, коли вони піддаються впливу екстремального електромагнітного поля, а саме такі властивості матеріалів, як провідність, діелектрична проникність та проникність стають залежними від рівня поля, рівня потужності сигналу, який існує у ВТНП пристрої.

На останок зауважмо, що незважаючи на різноманітність існуючих методів придушення паразитних смуг, проблема проектування фільтрів без паразитних відгуків із збереженням параметрів частотної характеристики та розмірів топології фільтра все ще залишається актуальною задачею.