

П.Ф. РОБУЛЕЦЬ, Д.А. ВОВЧУК, С.Д. ГАЛЮК, Л.Ф. ПОЛІТАНСЬКИЙ
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

ПРИСТРІЙ МОДУЛЯЦІЇ АНАЛОГОВИХ ГАРМОНІЧНИХ СИГНАЛІВ ШЛЯХОМ НЕПЕРЕРВНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КІЛЬЦЕВИХ РЕЗОНАТОРІВ

У роботі запропоновано та досліджено пристрій амплітудної модуляції з використанням розрізного кільцевого резонатора (РКР), навантаженого варакторним діодом. Процес модуляції відбувається шляхом неперервної зміни ємності варакторного діоду через зміну напруги зміщення на варакторному діоді. У якості напруги зміщення використовується модулюючий сигнал. Джерелом носійного сигналу є додаткова магнітна антена, що взаємодіє через близьке магнітне поле із РКР. Експериментальні дослідження проведено для гармонічного модулюючого сигналу. Показано, що при використанні варакторного діоду SMV1231 значення частоти носійного коливання можна вибирати із діапазону 0.95...1.11 ГГц. Приведено часову діаграму модульованого сигналу та спектральну характеристику відновленого гармонічного сигналу частотою 5 МГц. Перевагами запропонованого способу модуляції є проста конструкція пристрою модуляції. Результати проведених досліджень можуть бути корисними під час виготовлення радіокомпонентів низької вартості.

Ключові слова: амплітудна модуляція, варакторний діод, розрізний кільцевий резонатор.

P.F. ROBULETS, D.A. VOVCHUK, S.D. HALIUK, L.F. POLITANSKYI
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

AMPLITUDE MODULATION DEVICE OF ANALOGUE HARMONIC SIGNALS BY CONTINUOUS TUNING OF SPLIT-RING RESONATOR PARAMETERS

The principle of amplitude modulation is proposed and studied in the paper based on a split ring resonator loaded by a varactor diode. It is one of the variants to tune the parameters of split ring resonator. A split ring resonator belongs to the class of metamaterials with negative value of permeability. The simplicity of construction and a number of possible variations of tuning of its parameters the split ring resonators are the topical thing of investigations. In our case the modulation is possible through the continuous tuning of reverse voltage of varactor diode by low frequency analogue signal. The voltage variation changes the capacitance of a varactor diode and at the same time the total value of capacitance of resonator. This analogue signal is the modulation signal that plays a role of an information signal. The carrier oscillation is generated by high frequency signal generator and it is transferred via magnetic loop antenna that interacts with split-ring resonator via strong near field. The value of carrier signal frequency (modulated signal) corresponds to the value of resonance frequency of the split-ring resonator. By utilizing of the varactor diode SMV1231 the value of carrier signal frequency can be picked up from the range of 0.95-1.11 GHz. It is defined experimentally by changing the varactor capacitance. The time diagram and the spectral characteristic of the demodulated signals are shown for the modulation signal of 5 MHz. However, we have experimentally established that there is the possibility to increase the value of frequency of the modulation signal up to approximately 20 MHz. It is restricted by physical properties of the used varactor diode series. The suggested approach for the frequency modulator realization is very simple, low-cost and allows elementary to control and tune the output characteristics.

Keywords: amplitude modulation, varactor diode, split-ring resonator.

Вступ

Діелектрична та магнітна проникність природних матеріалів приймає строго додатні та більші за одиницю (окрім вакууму) значення. До метаматеріалів відносять штучні структури, які реалізуються поєднанням природних матеріалів та елементів на їх основі з метою отримання нових фізичних властивостей, зокрема метаматеріалам притаманне від'ємне значення діелектричної і/або магнітної проникності [1]. РКР є одним із видів метаматеріалів, що характеризується від'ємним значенням магнітної проникності [2, 3].

Існує велика кількість підходів до реалізації кільцевих резонаторів, з подальшим їх використанням у діапазоні частот довжиною хвилі від см-розмірів у радіо- і до нм-розмірів у оптичному діапазоні частот [4–6]. Для виготовлення РКР з робочими параметрами у мікрохвильовому діапазоні частот використовується метод хімічного травлення на діелектричній підкладці. Такі РКР-структури характеризуються високим рівнем чутливості, що уможливорює їх використання як сенсорних елементів у різних пристроях, зокрема для детектування рідин [7], моніторингу стану органічних тканин [8], елементів вимірювання діелектричної проникності матеріалів [9] та ін. Такі пристрої можуть містити масиви РКР, так звані метаповерхні [6, 7], або одиночні РКР, якими модифікуються мікросмужкові лінії передавання [5].

Всі приведені застосування РКР можливі завдяки зміні їх форми, а саме кількості кілець, ширини мікросмужок, величини зазорів та впаяних у зазори додаткових конденсаторів [10]. Маніпуляція вищезазначеними параметрами дозволяє змінювати значення параметрів РКР в цілому, тобто уможливорює зміну амплітудно-частотних характеристик метаструктури.

Принцип зміни амплітудно-частотних характеристик коливального контуру можуть використовуватись для забезпечення амплітудної чи частотної модуляції. Фізичні розміри елементів метаматеріалу задаються наперед, тому їх зміну в часі досить важко реалізувати. Наприклад, у [11] запропоновано метаматеріал, що складається із асиметричних кільцевих резонаторів, що забезпечують керування резонансними частотами завдяки механічній зміні своєї форми під впливом термічних процесів у інфрачервоному діапазоні частот; у [12] показано залежність зміни резонансних станів при механічному

розтягування кільцевих резонаторів. У оптичному діапазоні частот досить перспективним та надійним, хоча і більш вартісним є виготовлення гібридних систем модуляції з використанням РКР модифікованих нанесенням додаткового шару графену, де вихідний сигнал безпосередньо залежить від магніто-оптичного відгуку структури [13]. Такі способи впливу на матеріал є досить незручними та характеризуються низьким рівнем надійності при їх реалізації у діапазоні радіочастот.

Найбільш зручним способом керування параметрами структури на основі РКР є зміна значення їх ємності в часі шляхом перемикавання конденсаторів між двома станами за допомогою транзисторів чи фотоелементів, які працюють у ключовому режимі, що забезпечує так звану on/off-модуляцію [14, 15]. Проте, актуальним та досить практичним на сьогоднішній день є використання варакторних діодів, що здатні змінювати ємність під впливом прикладеної до них зовнішньої напруги у заданому неперервному діапазоні значень [16]. Такий підхід застосовується для виготовлення фільтрів [17], on/off-метаповерхонь [18, 19] тощо. **Метою даної роботи** є реалізація амплітудної модуляції аналогових сигналів шляхом неперервного регулювання ємнісних характеристик РКР під впливом гармонічного НЧ коливання.

Опис основних параметрів кільцевих резонаторів

Типові РКР складаються із двох відокремлених кілець радіусом $R_{out} = (R_{out1} - R_{in1})/2$ and $R_{in} = (R_{out2} - R_{in2})/2$, де R_{out1} та R_{in1} – це зовнішній та внутрішній радіуси більшого кільця, а також R_{out2} та R_{in2} – зовнішній та внутрішній радіуси меншого кільця; $w_1 = R_{out1} - R_{in1}$ та $w_2 = R_{out2} - R_{in2}$ – ширина зовнішнього та внутрішнього кілець РКР, відповідно (рис. 1а). Відстань між зовнішнім та внутрішнім кільцями РКР $s = R_{out2} - R_{in1}$. Зазори g кожного з кілець розташовані один навпроти одного та повернуті на 180° . Звичайні низькопрофільні кільцеві резонатори виготовляються на діелектричній підкладці висотою h та діелектричною проникністю ϵ як показано на рис. 1а.

Еквівалентна схема РКР представляє собою звичайний коливний контур з індуктивністю L та двома однаковими (за умови, якщо два розрізи g є однаковими) послідовно ввімкненими ємнісними елементами $C_0/2$, як наведено на рис. 1б.

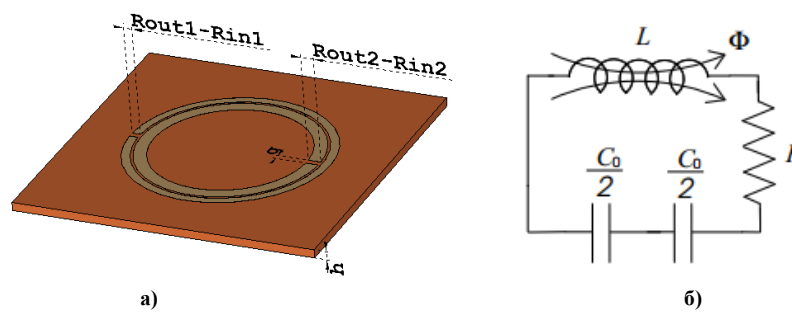


Рис. 1. Звичайний РКР на діелектричній підкладці (а) та його еквівалентна схема, що включає реактивні компоненти – індуктивність L і дві послідовно ввімкнені ємності $C_0/2$ (б)

Експериментальні дослідження

Запропонований пристрій модуляції сигналів приведений на рис. 2а. Коливальний контур, що складається із компонентів $C1-L1-VD$, відповідає еквівалентній схемі РКР (рис. 1б), де один із конденсаторів замінений варакторним діодом VD . Джерелом модулюючого сигналу $m(t) = \cos(2\pi f_m t)$, де f_m – частота модулюючого сигналу, який може розглядатись як аналоговий інформаційний сигнал, є генератор MS . Цей генератор задає змінні в часі значення напруги на варакторному діоді, змінюючи загальне значення ємності РКР в часі. Джерелом носійного сигналу $M(t) = \cos(2\pi f_n t)$, де f_n – частота носійного сигналу, є генератор ВЧ коливань CS . Вихідний сигнал генератора CS подається на порт 1 циркулятора та через порт 2 подається на котушку індуктивності $L2$, а далі через магнітну взаємодію котушок індуктивності $L1$ та $L2$ вводиться в коливальний контур РКР. Модульований сигнал радіочастотного діапазону $S(t)$ знімається котушкою індуктивності $L2$ та через порт 3 поступає на вихід модулятора та подається у канал зв'язку.

Експериментальна установка пристрою модуляції приведена на рис. 2б та складається із РКР, під'єданого до генератора НЧ сигналів та взаємодіє із магнітною рамковою антеною. Генератор НЧ сигналів, що може розглядатись як джерело інформації, використано для задання напруги на варакторному діоді, що припаяний у відповідний зазор РКР. Розміщення магнітної антени у зоні близько-польової взаємодії із РКР дає змогу детектувати електричний струм, що протікає у РКР. Циркулятор використовувався для передавання носійного ВЧ-сигналу на магнітну рамкову антену та далі в канал зв'язку, принцип підключення яких наведений на рис. 2в.

На першому етапі експериментальних досліджень було визначено діапазон значень напруги зміщення, в якому можна використовувати вибраний варакторний діод. Дослідження проводились через оцінку S_{11} -параметрів. Для цього магнітну рамкову антену було з'єднано із одним із портів PNA Network Analyzer. Шляхом лінійного збільшення напруги зміщення, що задавалась із генератора MS , встановлено, що робочий діапазон значень напруги зміщення становить $\Delta U = -4,0 \dots 3,0$ В призводить до зміни значення ємності варакторного діоду $\Delta C = C_{Umin} \dots C_{Umax} = 2,35 \dots 0,534$ пФ та забезпечує робочу смугу частот $\Delta f = 0,95 \dots 1,11$ ГГц (рис. 3). Для експериментальних досліджень вибрано $f_n = 1$ ГГц.

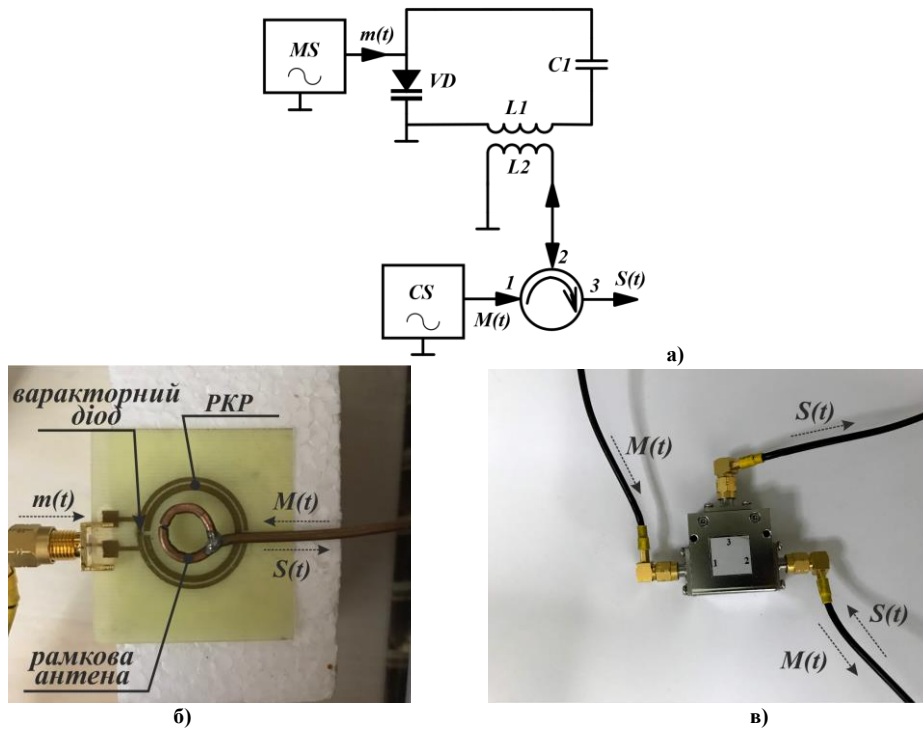


Рис. 2. Електрична принципова схема запропонованого пристрою модуляції (а), експериментальний зразок пристрою введення модулюючого (інформаційного) сигналу, що задає напругу зміщення на варакторний діод РКР та носійного магнітну рамкову антену сигналів (б), а також принцип підключення циркулятора (в). На рисунку MS – генератор модулюючого сигналу (джерело інформаційного сигналу $m(t)$), CS – генератор носійного сигналу ($M(t)$), VD – варакторний діод, C1 і L1 – еквівалентна ємність та індуктивність РКР, а також L2 – еквівалентна індуктивність магнітної рамкової антени; $S(t)$ – вихідний модульований сигнал радіочастотного діапазону

Виходячи із отриманих співвідношень діапазону значень напруги та робочого діапазону частот, для експериментальних досліджень модуляції гармонічних сигналів, верхнє та нижнє значення амплітуди синусоїдального колювання генератора MS становили 3В і -4В відповідно. Часову діаграму модульованого сигналу при частоті модулюючого сигналу 5 МГц наведено на рис. 4а. Максимальне значення частоти модуляції сигналу може досягати приблизно 20 МГц, та обмежується верхньою частотою перемикання варакторних діодів, що підтверджено експериментальним шляхом.

Часові діаграми демодульованих $I(t)$ та $Q(t)$ сигналів зі значенням частоти модулюючого сигналу 5 МГц, а також спектральна характеристика демодульованого сигналу наведені на рис. 4б у вигляді зображення із монітору осцилографа. У спектральній характеристиці демодульованого сигналу міститься основна гармоніка на частоті модулюючого сигналу f_m , а також гармоніка на частоті $2f_m$. Друга складова може відсікатись шляхом використання НЧ фільтрів у вихідному каскаді пристрою демодуляції.

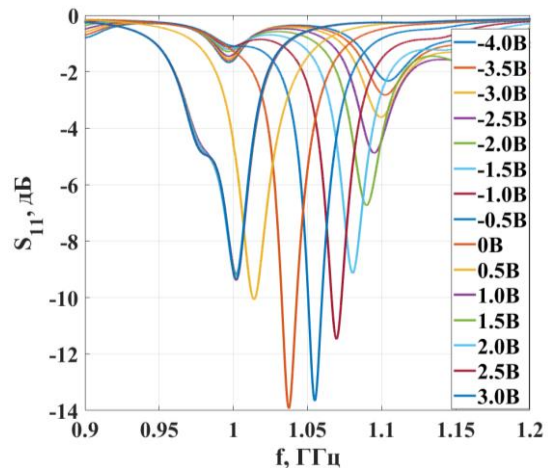


Рис. 3. Експериментально отримана залежність значень S_{11} -параметрів, що визначає робочий діапазон напруги зміщення та відповідний робочий діапазон частот отриманого модульованого сигналу

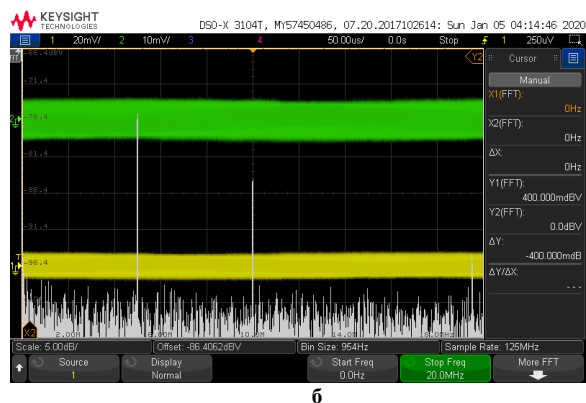
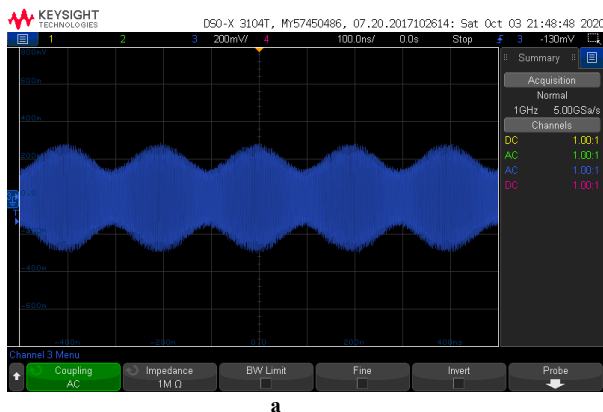


Рис. 4. Часова діаграма модульованого сигналу (а) та спектральна характеристика демодульованого сигналу (б) частотою 5 МГц

Висновки

У роботі запропоновано новий підхід до реалізації пристрою амплітудної модуляції на основі кільцевих резонаторів, навантажених варакторним діодом. Принцип роботи полягає в зміні значення напруги модулюючого НЧ сигналу, що зумовлює зміну значення ємності варакторного діоду і призводить до зміни амплітудно-частотних характеристик резонуючого контуру і, відповідно, модуляції носійного ВЧ сигналу.

Дослідження показали, що запропонований пристрій здатний здійснювати модуляцію гармонічних сигналів максимальним значенням верхньої частоти до 20 МГц. Значення частоти носійного сигналу згідно з отриманими частотними характеристиками S11-параметрів та відповідає частоті резонансу РКР.

Запропонований пристрій амплітудної модуляції є компактним та простим у реалізації, здатним до варіації та забезпечення необхідних характеристик та конструктивних параметрів.

Література

1. Veselago V. G. The Electrodynamics of Substances with Simultaneously negative Values of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi*, 1967 vol. 10, iss. 4, pp. 509–514.
2. Marques R., Medina F., and Rafii-el-Idrissi R. Role of bianisotropy in negative permeability and left-handed metamaterials. *Physical Review B*, 2002, vol. 65, pp. 144440 (1–6).
3. Freire M. J., Marques R., Jelinek L. Experimental demonstration of a $\mu = -1$ metamaterial lens for magnetic resonance imaging. *Applied Physics Letters*, 2008, iss. 93, pp. 231108 (1–4).
4. Zheludev N.I., Kivshar Yu. S. From metamaterials to metadevices. *Nature Materials*, 2012, vol. 11, pp. 917–924.
5. Girich A.A. Left-Handed Metamaterial based on the Complementary Split-Ring Resonators Tuned with Varactor Diodes. *Ukrainian Journal of Physics*, 2017, vol. 62, iss. 10, pp. 903–907.
6. Imade Y., Ulbricht R., Tomoda M., Matsuda O., Seiutinas G., Juodkakis S., Wright O.B. Gigahertz Optomechanical Modulation by Split-Ring-Resonator Nanophotonic Meta-Atom Array. *Nano Letters*, 2017, vol. 17, iss. 11, pp. 1–10.
7. Salim A., Lim S. Complementary Split-Ring Resonator-Loaded Microfluidic Ethanol Chemical Sensor. *Sensors*, 2016, vol. 16, iss. 1802.
8. Puentes M., Schubler M., Jakoby R. 2D sensor array based on Split Ring Resonators for monitoring of organic tissue. *Sensors*, 2011, pp. 272–275.
9. Ebrahimi A., Withayachumnankul W., Al-Sarawi S., Abbott D. High-sensitivity metamaterial-inspired sensor for microfluidic dielectric characterization. *IEEE Sensors Journal*, 2014, vol. 14, iss. 5, pp. 1345–1351.
10. Aydin K., Bulu I., Guven K., Kafesaki M., Soukoulis C. M., Ozbay E. Investigation of magnetic resonances for different split-ring resonator parameters and design. *New Journal of Physics*, 2005, vol. 7, iss. 168, pp. 1–15.
11. Wang Q., Mao D., Dong L. Thermomechanically Tunable Infrared Metamaterials Using Asymmetric Split-Ring Resonators. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2017, vol. 26, no. 6, pp. 1186–1188.
12. Liu P. et al. Tunable meta-atom using liquid metal embedded in stretchable polymer. *Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 118, no. 1, p. 014504.
13. Ye-xin S., Jiu-sheng L., Le Z. Graphene-integrated split-ring resonator terahertz modulator. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, vol. 49, iss. 350, pp. 1–9.
14. Liang Y., Boon Ch., Li Ch. et. Design and Analysis of D-Band On-Chip Modulator and Signal Source Based on Split-Ring Resonator. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems*, 2019, vol. 27, iss. 7, pp. 1513–1526.
15. Liang Y., Yu H., Zhang W., Lin F. CMOS Sub-THz On-Chip Modulator by Stacked Split Ring Resonator with High-extinction Ratio. *IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology*, 2015, pp. 67–69.
16. Baraclarough M., Hooper I. R., Barnes W. L. Investigation of the coupling between tunable split-ring resonators. *Physical Review B*, 2018, vol. 98, 085146 (1–6).
17. Schuster Ch. Fast and Accurate Tuning of a Cross-Coupled Split-Ring Resonator Filter. *11th German Microwave Conference (GeMiC-2018)*, Freiburg, Germany, March 12–14, 2018, pp. 134–137.
18. Kitayama D., Yaita M., Song H.-J., Nosaka H. High-Speed and High-ON/OFF Ratio Split-Ring-Resonator-Based Active Metamaterial using Varactor Diodes. *41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)*, Copenhagen, 2016, pp. 1–2.
19. Silva S. R., Shields A. D., Zhou J. Tunable Optical Bistability and Optical Switching by Nonlinear Metamaterials. 2017. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1705/1705.07719.pdf>.

Рецензія/Peer review : 16.10.2020 р.

Надрукована/Printed : 05.11.2020 р.