
Антенны, распространение радиоволн и техника СВЧ

Научная статья
УДК 621.371
DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202210-18>

Аналитические модели резонанса Фано для частотно-селективных поверхностей СВЧ-диапазона

В.Б. Байбурин¹, В.В. Комаров², В.П. Мещанов³, М.И. Балакин⁴, В.А. Киркица⁵

^{1,2,4,5} Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (г. Саратов, Россия)

³ ООО «НПП «НИКА-СВЧ» (г. Саратов, Россия)

¹ baiburinvb@rambler.ru; ² vyacheslav.komarov@gmail.com; ³ nika373@bk.ru;

⁴ balakinmaxim@gmail.com; ⁵ SKrkts@mail.ru

Аннотация

Постановка проблемы. В настоящее время крестообразный несимметричный полосовой фильтр – один из наиболее перспективных и широко применяемых фильтров СВЧ-диапазона. Изменение геометрических параметров такого фильтра приводит к образованию в его частотной характеристике резонанса Фано. Этот резонанс может использоваться при проектировании сверхчувствительных датчиков, сверхкомпактных антенн и других устройств на основе частотно-селективных поверхностей, поскольку открывает возможности расширения рабочего диапазона частот СВЧ-излучения. В связи с этим изучение влияния параметров крестообразного несимметричного полосового фильтра на резонанс Фано является актуальной задачей.

Цель. Исследовать влияние параметров крестообразного несимметричного полосового фильтра на форму резонанса Фано путем моделирования его аналоговой схемы.

Результаты. Показано, что возникающий резонанс Фано обладает чувствительностью к поляризации излучения и геометрическим параметрам, в частности, к асимметрии апертуры. Выявлено, что на частоте 96 ГГц, превышающей резонансную частоту 90 ГГц, возникает резонанс Фано, заключающийся в существенных колебаниях коэффициента передачи. Проведено моделирование аналоговой схемы крестообразного полосового фильтра и амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) при различных значениях параметров схемы (емкость конденсатора, индуктивность и сопротивление катушек, сопротивление нагрузки, число контуров) и проанализировано влияние этих параметров на форму резонанса Фано. Построены частотные характеристики крестообразного несимметричного полосового фильтра при различных значениях параметров аналитической схемы фильтра.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы для разработки антенн со сверхчувствительным зондированием, проектирования сверхкомпактных антенн связи и других устройств на основе частотно-селективных поверхностей. Перспективным является возможность применения эффекта Фано (за счет СВЧ-излучения) в решении задач практической медицины, связанных с деконтаминацией (стерилизацией) медицинских инструментов.

Ключевые слова

Полосовой фильтр, резонанс Фано, аналитическая схема, частотная характеристика

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-19-00357, <https://rscf.ru/project/22-19-00357/>).

Для цитирования

Байбурин В.Б., Комаров В.В., Мещанов В.П., Балакин М.И., Киркица В.А. Аналитические модели резонанса Фано для частотно-селективных поверхностей СВЧ-диапазона // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 10. С. 155–164. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202210-18>

A brief version in English is given at the end of the article

Введение

Резонансы Фано, идентифицируемые по нелинейному искажению линии спектра пропускания в узком диапазоне частот, смещенном от центральной частоты, наблюдаются в огромном множестве явлений в различных физических системах, начиная от профиля поглощения в инертных газах и заканчивая сильной связью Ми- и брэгговского рассеяния в фотонных кристаллах и автоионизацией атомов [1–3].

Такие резонансы имеют место также в наносистемах, что открывает новые возможности взаимодействия с веществом [4]. Среди всех возможных наноструктур плазмонные наночастицы играют важную роль в нанофотонике из-за их способности усиливать напряженность электромагнитного (ЭМ) поля в небольших объемах. Это усиление и соответствующее ему распределение ЭМ-поля хорошо контролируются благодаря связи мод в целом и резонансам Фано в частности [5, 6].

Резонансы Фано присутствуют и в различных плазмонных наноструктурах [7–18]. Для понимания их свойств разработали несколько теоретических методов [19–21]. В [22–26] приведены примеры работы генераторов на основе плазмонных наноструктур и метаматериалов с асимметричной передачей типа Фано на оптических частотах. В [27, 28] предложены усовершенствованные плазмонные сенсоры, использующие либо возможность наблюдения мультиполярных поверхностных плазмонных резонансов, либо асимметрию нелинейного излучения.

Большинство исследований резонанса Фано проводятся в терагерцевом и оптических диапазонах. Работ, посвященных исследованию резонанса Фано в микроволновом диапазоне, немного [29, 30]. Так, в [31] проведено численное и экспериментальное исследование асимметричной модификации крестообразного несимметричного полосового фильтра, использующего свойства частотно-селективных поверхностей с ЭМ-свойствами [32–34].

Ц е л ь р а б о т ы – исследовать влияние параметров крестообразного несимметричного полосового фильтра на форму резонанса Фано путем моделирования его аналоговой схемы.

В рамках данной работы была разработана аналитическая схема крестообразного несимметричного полосового фильтра.

Моделирование резонанса Фано в схеме без сопротивления

Одним из условий существования резонанса Фано в характеристике цепи является наличие нескольких реактивных элементов одного типа. Для этого была разработана схема несимметричного полосового фильтра без сопротивления на двух катушках индуктивности.

Коэффициент передачи рассчитывался как

$$T = \sqrt{1 - \left(\frac{\left| \frac{Z_1 R}{Z_1 + R} - R \right|}{\left| \frac{Z_2 R}{Z_2 + R} + R \right|} \right)^2}, \quad (1)$$

где Z_1 и Z_2 – входное и выходное сопротивления соответственно:

$$Z_1 = \frac{(R_1 + j\omega L_1) \frac{1}{j\omega C}}{R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C}\right)} N, \quad (2)$$

$$Z_2 = \frac{(R_2 + j\omega L_2) \frac{1}{j\omega C}}{R_2 + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C}\right)} N; \quad (3)$$

R – сопротивление нагрузки; L_1 и L_2 – индуктивности катушек; R_1 и R_2 – сопротивления катушек; C – емкость конденсатора; N – число контуров в схеме; ω – частота.

Построение частотных характеристик проводилось в программе MATLAB в частотном диапазоне 20...160 ГГц.

Эквивалентная схема крестообразного несимметричного полосового фильтра без сопротивления на двух катушках индуктивности представлена на рис. 1.

Зависимость частотной характеристики фильтра от числа контуров в схеме в графическом виде представлена на рис. 2, на котором виден двойной всплеск коэффициента передачи T . В данном случае при отсутствии сопротивления форма резонанса Фано практически аналогична форме обычного резонанса и достигает максимума коэффициента передачи $T \approx -1$ дБ. Частота обычного резонанса $f_0 \approx 91,685$ ГГц, а частота резонанса Фано $f_F \approx 100,72$ ГГц. При малом числе контуров $N=2$ наблюдается достаточно резкая крутизна характеристики. При увеличении параметра N крутизна характеристики уменьшается и при $N=2000$ происходит слияние максимумов.

Влияние емкости конденсатора на частотную характеристику фильтра представлено в виде графиков на рис. 3, откуда следует, что увеличение параметра C закономерно приводит к пропорциональному

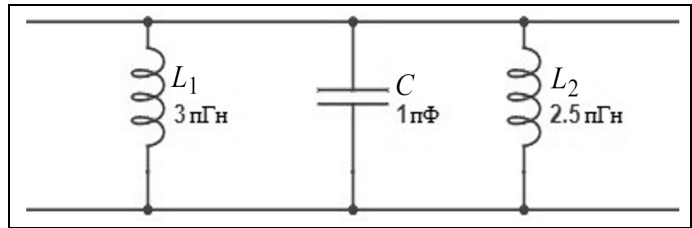


Рис. 1. Эквивалентная схема крестообразного несимметричного полосового фильтра без сопротивления на двух катушках индуктивности

Fig. 1. Equivalent network of filter without coil resistance

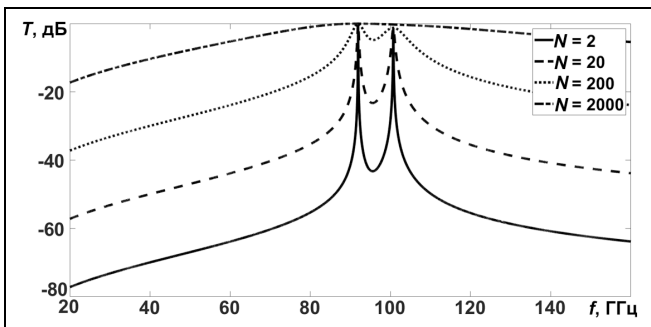


Рис. 2. Графики зависимости частотной характеристики крестообразного несимметричного полосового фильтра без сопротивления на двух катушках индуктивности от числа контуров в схеме при $C = 1$ пФ, $L_1 = 3$ пГн, $L_2 = 2,5$ пГн

Fig. 2. Frequency response of the filter at $C = 1$ pF, $L_1 = 3$ pH, $L_2 = 2,5$ pH

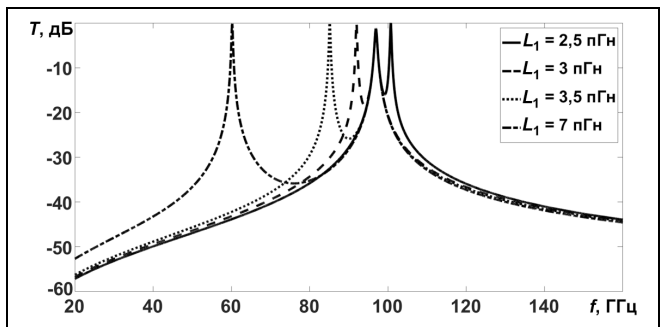


Рис. 4. Графики зависимости частотной характеристики крестообразного несимметричного полосового фильтра без сопротивления на двух катушках индуктивности от индуктивности первой катушки при $N = 20$, $C = 1$ пФ, $L_2 = 2,7$ пГн

Fig. 4. Frequency response of the filter at $N = 20$, $C = 1$ pF, $L_2 = 2,7$ pH

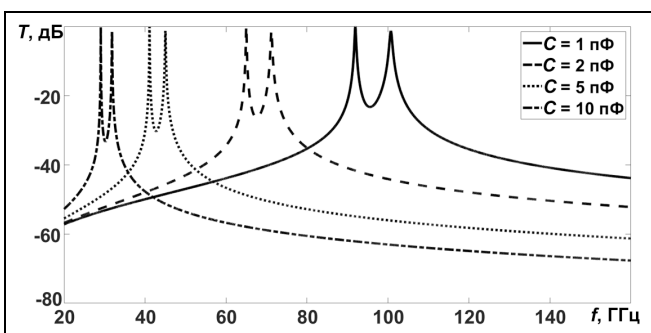


Рис. 3. Графики зависимости частотной характеристики крестообразного несимметричного полосового фильтра без сопротивления на двух катушках индуктивности от емкости конденсатора при $N = 20$, $L_1 = 3$ пГн, $L_2 = 2,5$ пГн

Fig. 3. Frequency response of the filter at $N = 20$, $L_1 = 3$ pH, $L_2 = 2,5$ pH

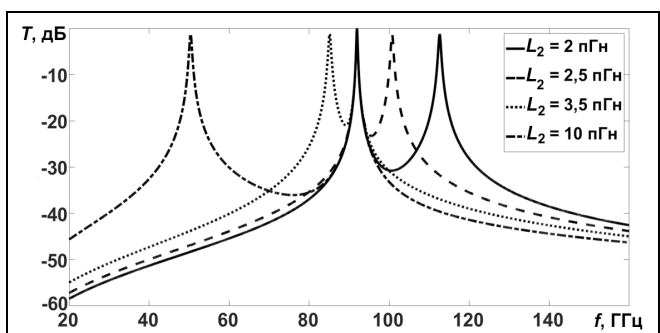


Рис. 5. Графики зависимости частотной характеристики крестообразного несимметричного полосового фильтра без сопротивления на двух катушках индуктивности от индуктивности второй катушки при $N = 20$, $C = 1$ пФ, $L_1 = 3$ пГн

Fig. 5. Frequency response of the filter at $N = 20$, $C = 1$ pF, $L_1 = 3$ pH

уменьшению значений резонансных частот, т.е. к сдвигу максимумов частотной характеристики влево. С увеличением емкости также наблюдается рост крутизны характеристики.

На рис. 4 приведены графики зависимости частотной характеристики фильтра от индуктивности первой катушки L_1 . Из рисунка видно, что рост этого параметра приводит к уменьшению значения резонансной частоты, т.е. к ее сдвигу влево. В то же время частота резонанса Фано и его максимум сохраняют прежние значения.

Влияние индуктивности второй катушки на частотную характеристику фильтра иллюстрируют графики на рис. 5, из которых следует, что увеличение параметра L_2 приводит к уменьшению частоты резонанса Фано, в то же время частота обычного резонанса и его максимум остаются прежними.

Таким образом, при отсутствии сопротивления в схеме форма резонанса Фано почти идентична форме обычного резонанса. При изменении числа контуров в схеме происходит изменение крутизны частотной характеристики фильтра. При варировании емкости конденсатора наблюдается изменение частоты обоих резонансов. Изменение индуктивности первой катушки приводит к изменению частоты основного резонанса, а изменение индуктивности второй катушки – к изменению частоты резонанса Фано.

Моделирование резонанса Фано в схеме с сопротивлением

Проведем моделирование частотной характеристики несимметричного полосового фильтра при наличии сопротивления первой катушки R_1 (рис. 6).

На рис. 7 приведены графики зависимости частотной характеристики фильтра от сопротивления первой катушки, откуда видно, что с ростом сопротивления R_1 происходит уменьшение коэффициента

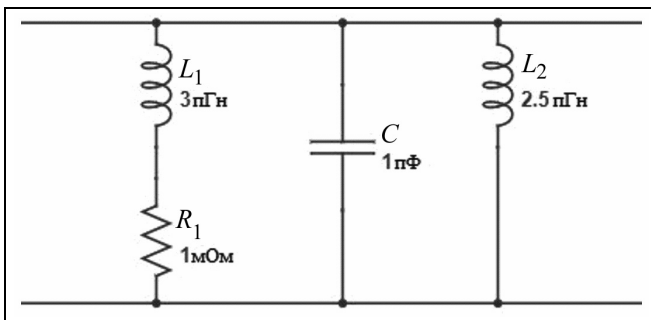


Рис. 6. Эквивалентная схема несимметричного полосового фильтра при наличии сопротивления первой катушки
Fig. 6. Equivalent network of the filter with the first coil resistance

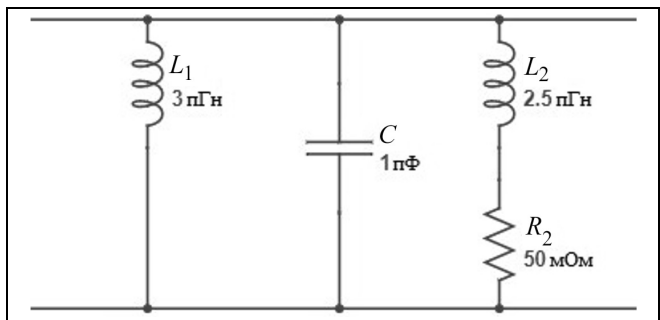


Рис. 8. Эквивалентная схема несимметричного полосового фильтра при наличии сопротивления второй катушки
Fig. 8. Equivalent network of the filter with the second coil resistance

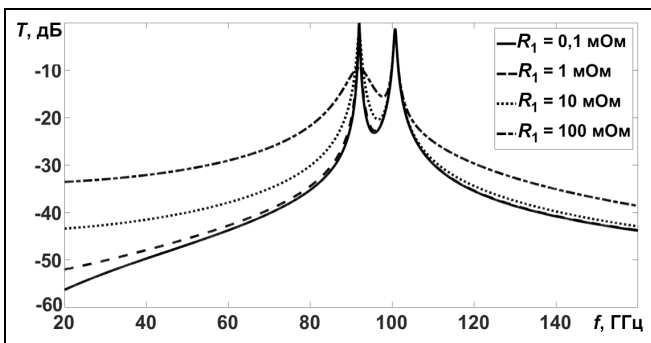


Рис. 7. Графики зависимости частотной характеристики крестообразного несимметричного полосового фильтра при наличии сопротивления первой катушки индуктивности при $N = 20$, $C = 1$ пФ, $L_1 = 3$ пГн, $L_2 = 2,5$ пГн

Fig. 7. Frequency response of the filter at $N = 20$, $C = 1$ pF, $L_1 = 3$ pH, $L_2 = 2,5$ pH

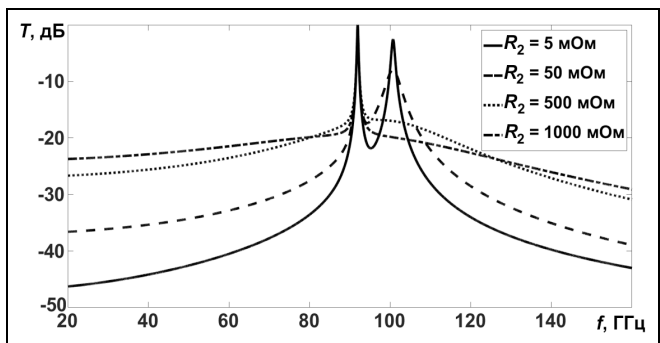


Рис. 9. Графики зависимости частотной характеристики крестообразного несимметричного полосового фильтра при наличии сопротивления второй катушки индуктивности при $N = 20$, $C = 1$ пФ, $L_1 = 3$ пГн, $L_2 = 2,5$ пГн

Fig. 9. Frequency response of the filter at $N = 20$, $C = 1$ pF, $L_1 = 3$ pH, $L_2 = 2,5$ pH

передачи на частоте резонанса, а значение коэффициента передачи на частоте резонанса Фано остается неизменным. Кроме того, при увеличении R_1 уменьшается крутизна частотной характеристики.

Теперь добавим в схему (см. рис. 1) сопротивление второй катушки R_2 (рис. 8). Из графиков частотных зависимостей, приведенных на рис. 9, следует, что с ростом сопротивления R_2 происходит уменьшение коэффициента передачи на частоте резонанса при неизменном значении коэффициента передачи на частоте основного резонанса. При сопротивлении $R_2 = 1$ Ом резонанс Фано практически исчезает. Как и при наличии сопротивления первой катушки, увеличение сопротивления второй катушки приводит к уменьшению крутизны характеристики.

Рассмотрим зависимость частотной характеристики фильтра от различных параметров схемы при наличии сопротивления на двух катушках индуктивности R_1 и R_2 согласно схеме, приведенной на рис. 10.

Графики зависимости частотной характеристики фильтра от числа контуров в данной схеме представлены на рис. 11, из которого следует, что при наличии сопротивления значения коэффициента передачи на частоте основного резонанса существенно выше его значений на частоте резонанса Фано. Однако при увеличении числа контуров N происходит рост максимума резонанса Фано до значения $T \approx 0$ дБ при $N = 2000$. Также при увеличении параметра N крутизна частотной характеристики уменьшается и уже при $N = 2000$ происходит слияние обоих максимумов в монотонную линию.

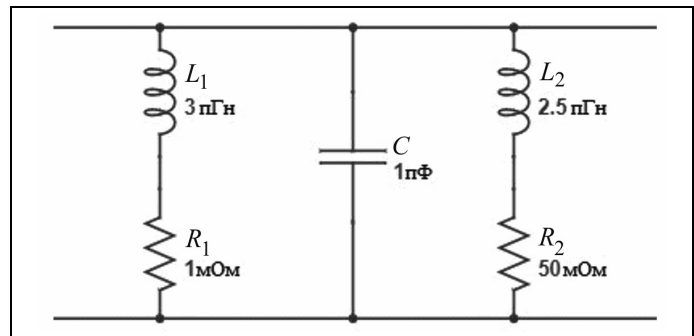


Рис. 10. Эквивалентная схема крестообразного несимметричного полосового фильтра с сопротивлением на обеих катушках индуктивности

Fig. 10. Equivalent network of the filter with resistance at both coils

Влияние емкости конденсатора на частотную характеристику фильтра проиллюстрировано графиками, представленными на рис. 12. В этом случае увеличение параметра C приводит к пропорциональному уменьшению значений резонансных частот. Кроме того, с увеличением емкости конденсатора наблюдается рост крутизны частотной характеристики и уменьшение значений коэффициентов передачи на резонансных частотах.

На рис. 13 приведены графики зависимости частотной характеристики фильтра от индуктивности первой катушки. Здесь при увеличении значения параметра L_1 значения резонансной частоты уменьшаются. В тоже время частота резонанса Фано и его максимум сохраняют прежние значения.

Влияние индуктивности второй катушки на частотную характеристику фильтра графически показано на рис. 14, из которого следует, что увеличение параметра L_2 приводит к уменьшению значения

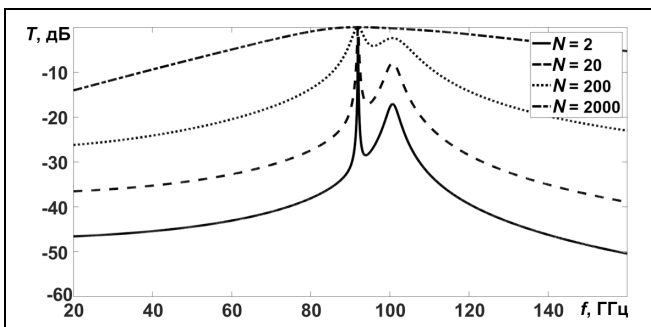


Рис. 11. Графики зависимости частотной характеристики крестообразного несимметричного полосового фильтра от числа контуров в схеме при $C = 1$ пФ, $L_1 = 3$ пГн, $L_2 = 2,5$ пГн, $R_1 = 1$ мОм, $R_2 = 50$ мОм

Fig. 11. Frequency response of the filter at $C = 1$ pF, $L_1 = 3$ pH, $L_2 = 2,5$ pH, $R_1 = 1$ mOhm, $R_2 = 50$ mOhm

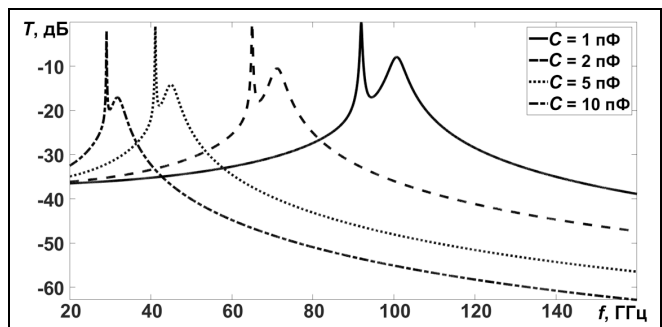


Рис. 12. Графики зависимости частотной характеристики крестообразного несимметричного полосового фильтра от емкости конденсатора при $N = 20$, $L_1 = 3$ пГн, $L_2 = 2,5$ пГн, $R_1 = 1$ мОм, $R_2 = 50$ мОм

Fig. 12. Frequency response of the filter at $N = 20$, $L_1 = 3$ pH, $L_2 = 2,5$ pH, $R_1 = 1$ mOhm, $R_2 = 50$ mOhm

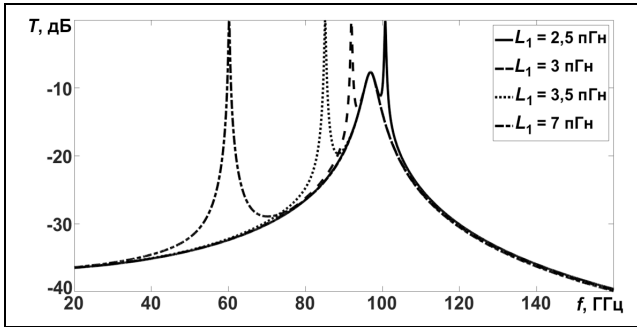


Рис. 13. Графики зависимости частотной характеристики крестообразного несимметричного полосового фильтра от индуктивности первой катушки при $N = 20$, $C = 1$ пФ, $L_2 = 2,7$ пГн, $R_1 = 1$ мОм, $R_2 = 50$ мОм

Fig. 13. Frequency response of the filter at $N = 20$, $C = 1$ pF, $L_2 = 2,7$ pH, $R_1 = 1$ mOhm, $R_2 = 50$ mOhm

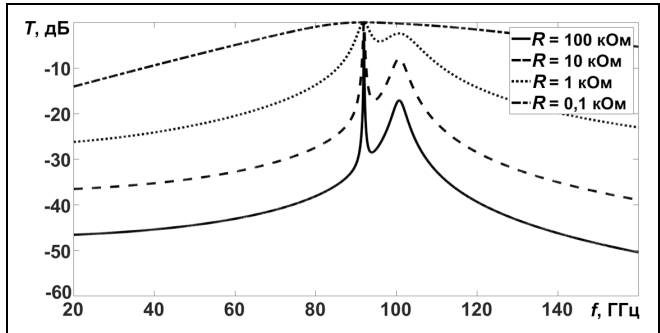


Рис. 16. Графики зависимости частотной характеристики крестообразного несимметричного полосового фильтра от сопротивления нагрузки при $N = 20$, $C = 1$ пФ, $L_1 = 3$ пГн, $L_2 = 2,5$ пГн, $R_1 = 1$ мОм, $R_2 = 50$ мОм

Fig. 16. Frequency response of the filter at $N = 20$, $C = 1$ pF, $L_1 = 3$ pH, $L_2 = 2,5$ pH, $R_1 = 1$ mOhm, $R_2 = 50$ mOhm

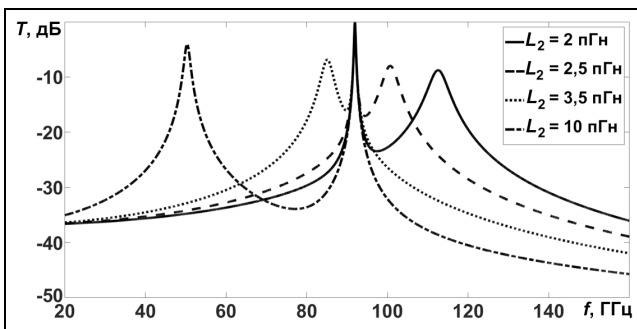


Рис. 14. Графики зависимости частотной характеристики крестообразного несимметричного полосового фильтра от индуктивности второй катушки при $N = 20$, $C = 1$ пФ, $L_1 = 3$ пГн, $R_1 = 1$ мОм, $R_2 = 50$ мОм

Fig. 14. Frequency response of the filter at $N = 20$, $C = 1$ pF, $L_1 = 3$ pH, $R_1 = 1$ mOhm, $R_2 = 50$ mOhm

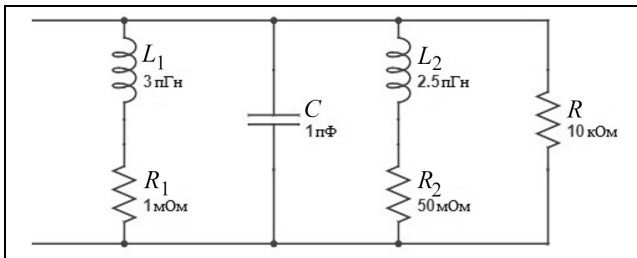


Рис. 15. Эквивалентная схема фильтра с сопротивлением нагрузки

Fig. 15. Equivalent network of the filter with the load resistance

происходит при увеличении значений емкости конденсатора и уменьшении индуктивности второй катушки и числа контуров в схеме. При варировании сопротивления нагрузки происходит изменение крутизны характеристики и коэффициента передачи на частоте резонанса Фано.

Заключение

На основе эквивалентной схемы проведено аналитическое исследование резонансов Фано для крестообразного несимметричного полосового фильтра.

Показано, что в схеме без сопротивления катушек индуктивности значение максимума резонанса Фано практически равно максимуму основного резонанса, а при увеличении сопротивления на второй

частоты резонанса Фано, в то время как частота обычного резонанса и его максимум остаются прежними. Кроме того, с ростом индуктивности L_2 происходит уменьшение коэффициента передачи на частоте резонанса Фано.

Рассмотрим влияние сопротивления нагрузки на частотную характеристику фильтра, схема которого показана на рис. 15. Графики зависимости частотной характеристики фильтра для данного случая показаны на рис. 16, откуда следует, что при уменьшении сопротивления нагрузки R происходит рост максимума резонанса Фано до значения $T \approx 0$ дБ при $R = 100$ Ом. Рост сопротивления нагрузки приводит к увеличению крутизны частотной характеристики, а при уменьшении сопротивления ее крутизна уменьшается и уже при $R = 100$ Ом происходит слияние обоих максимумов в монотонную линию.

Таким образом, сопротивление оказывает значительное влияние на форму резонанса Фано. В частности, рост сопротивления катушки индуктивности приводит к уменьшению коэффициента передачи на частоте резонанса Фано и, как следствие, к его спаду. Кроме того, при наличии сопротивления катушки уменьшение максимума резонанса Фано

катушке происходит уменьшение значения коэффициента передачи на частоте резонанса Фано вплоть до его полного исчезновения.

Рост числа контуров в схеме приводит к уменьшению крутизны частотной характеристики фильтра, а при наличии в схеме сопротивления на катушках индуктивности – к увеличению максимума резонанса Фано.

При изменении емкости конденсатора наблюдается сдвиг частот резонансов и изменение крутизны частотной характеристики, а при наличии сопротивления на катушке – еще и обратно пропорциональное изменение значения максимума резонанса Фано.

Изменение индуктивности катушек влияет на сдвиг частоты основного резонанса при увеличении значений параметра первой катушки и на сдвиг частоты резонанса Фано при увеличении параметра второй катушки. Также изменение индуктивности второй катушки при условии наличия сопротивления на ней пропорционально изменению коэффициента передачи на частоте резонанса Фано.

При изменении сопротивления нагрузки происходит изменение крутизны характеристики и коэффициента передачи на частоте резонанса.

Полученные в работе результаты подтверждают возможность применения эффекта резонанса Фано на основе простых электрических схем для решения ряда актуальных задач СВЧ-электроники, а также задач практической медицины, в частности, для построения волноведущих структур резонаторной камеры в составе СВЧ-стерилизатора медицинских инструментов.

Список источников

1. *Fano U.* Sullo spettro di assorbimento dei gas nobili presso il limite dello spettro d'arco // *Nuovo Cim.* 1935. V. 12 № 3. P. 154–161.
2. *Fano U.* Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts // *Phys. Rev.* 1961. V. 124. № 6. P. 1866–1878.
3. *Rybin M.V., Khanikaev A.B., Inoue M., Samusev K.B., Steel M.J., Yushin G., Limonov M.F.* Fano resonance between Mie and Bragg scattering in photonic crystals // *Phys. Rev. Lett.* 2009. V. 103 № 2. 023901.
4. *Miroshnichenko E., Flach S., Kivshar Y.S.* Fano resonances in nanoscale structures // *Rev. Mod. Phys.* 2010. V. 82. № 3. P. 2257–2298.
5. *Luk'yanchuk B., Zheludev N.I., Maier S.A., Halas N.J., Nordlander P., Giessen H., Chong C.T.* The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials // *Nat. Mater.* 2010. V. 9. № 9. P. 707–715.
6. *Rahmani M., Luk'yanchuk B., Hong M.* Fano resonance in novel plasmonic nanostructures // *Laser Phot. Rev.* 2013. V. 7. № 3. P. 329–349.
7. *Zhang S., Genov D.A., Wang Y., Liu M., Zhang X.* Plasmon-induced transparency in metamaterials // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 101. № 4. 047401.
8. *Hao F., Nordlander P., Sonnefraud Y., Van Dorpe P., Maier S.A.* Tunability of subradiant optical sensing // *ACS Nano.* 2009. V. 3. № 3. P. 643–652 (2009).
9. *Verellen N., Sonnefraud Y., Sobhani H., Hao F., Moshchalkov V.V., Van Dorpe P., Nordlander P., Maier S.A.* Fano resonances in individual coherent plasmonic nanocavities // *Nano Lett.* 2009. V. 9. № 4. P. 1663–1667.
10. *Liu N., Weiss T., Mesch M., Langguth L., Eigenthaler U., Hirscher M., Sönnichsen C., Giessen H.* Planar metamaterial analogue of electromagnetically induced transparency for plasmonic sensing // *Nano Lett.* 2010. V. 10. № 4. P. 1103–1107.
11. *Lassiter J.B., Sobhani H., Fan J.A., Kundu J., Capasso F., Nordlander P., Halas N.J.* Fano resonances in plasmonic nanoclusters: geometrical and chemical tunability // *Nano Lett.* 2010. V. 10. № 8. P. 3184–3189.
12. *Fan J.A., Wu C., Bao K., Bao J., Bardhan R., Halas N.J., Manoharan V.N., Nordlander P., Shvets G., Capasso F.* Self-assembled plasmonic nanoparticle clusters // *Science* 2010. V. 328. № 5982. P. 1135–1138.
13. *Hentschel M., Saliba M., Vogelgesang R., Giessen H., Alivisatos A.P., Liu N.* Transition from isolated to collective modes in plasmonic oligomers // *Nano Lett.* 2010. V. 10. № 7. P. 2721–2726.
14. *Hentschel M., Dregely D., Vogelgesang R., Giessen H., Liu N.* Plasmonic oligomers: The role of individual particles in collective behavior // *ACS Nano.* 2011. V. 5. № 3. P. 2042–2050.
15. *Fu Y.H., Zhang J.B., Yu Y.F., Luk'yanchuk B.* Generating and manipulating higher order Fano resonances in dual-disk ring plasmonic nanostructures // *ACS Nano.* 2012. V. 6. № 6. P. 5130–5137.
16. *Cetin E., Altug H.* Fano resonant ring/disk plasmonic nanocavities on conducting substrates for advanced biosensing // *ACS Nano.* 2012. V. 6. № 11. P. 9989–9995.
17. *Wu, Khanikaev A.B., Adato R., Arju N., Yanik A.A., Altug H., Shvets G.* Fano-resonant asymmetric metamaterials for ultrasensitive spectroscopy and identification of molecular monolayers // *Nat. Mater.* 2011. V. 11. № 1. P. 69–75.
18. *Ye J., Wen F., Sobhani H., Lassiter J.B., Van Dorpe P., Nordlander P., Halas N.J.* Plasmonic nanoclusters: Near-Field properties of the Fano resonance interrogated with SERS // *Nano Lett.* 2012. V. 12. № 3. P. 1660–1667.
19. *Gallinet B., Martin O.J.F.* Ab-initio theory of Fano resonances in plasmonic nanostructures and metamaterials // *Phys. Rev. B.* 2011. V. 83. № 23. 235427.
20. *Gallinet B., Martin O.J.F.* Influence of electromagnetic interactions on the line shape of plasmonic Fano resonances // *ACS Nano.* 2011. V. 5. № 11. P. 8999–9008.

21. *Giannini V., Francescato Y., Amrania H., Phillips C.C., Maier S.A.* Fano resonances in nanoscale plasmonic systems: A parameter-free modeling approach // *Nano Lett.* 2011. V. 11. № 7. P. 2835–2840.
22. *Fan S.H.* Sharp asymmetric line shapes in side-coupled waveguide-cavity systems // *Appl. Phys. Lett.* 2002. V. 80. P. 908–910.
23. *Genet C., van Exter M.P., Woerdman, J.P.* Fano-type interpretation of red shifts and red tails in hole array transmission spectra // *Opt. Commun.* 2003. V. 255. P. 331–336.
24. *Hao F. et al.* Symmetry breaking in plasmonic nanocavities: Subradiant LSPR sensing and a tunable Fano resonance // *Nano Lett.* 2008. V. 8. P. 3983–3988.
25. *Rybin M.V. et al.* Fano resonance between Mie and Bragg scattering in photonic crystals // *Phys. Rev. Lett.* 2009. V. 103. 023901.
26. *Attaran et al.* Circuit Model of Fano Resonance on Tetramers, Pentamers, and Broken Symmetry Pentamers // *Plasmonics.* 2014. V. 9. P. 1–11.
27. *Butet J., Russier-Antoine I., Jonin C., Lascoux N., Benichou E., Brevet P.-F.* Sensing with multipolar second harmonic generation from spherical metallic nanoparticles // *Nano Lett.* 2012. V. 12. № 3. P. 1697–1701.
28. *Butet J., Martin O. J. F.* Refractive index sensing with Fano resonant plasmonic nanostructures: A symmetry based nonlinear approach // *Nanoscale*, Accepted article. 2014. DOI: 10.1039/C4NR05623J.
29. *Kanjanasit K., Wang C. H.* Fano resonance in a metamaterial consisting of two identical arrays of square metallic patch elements separated by a dielectric spacer // *Appl. Phys. Lett.* 2013. V. 102. № 25. Art. no. 251108.
30. *Liao Z., Pan B.C., Shen X., Cui T.J.* Multiple Fano resonances in spoof localized surface plasmons // *Opt. Express.* 2014. V. 22. № 13. P. 15710–15717.
31. *Komarov V.V., Zwick T., Marahrens S., Molchanov S.* Fano-Resonant Frequency-Selective Surface with Cross-Shaped Apertures // *IEEE microwave and wireless components letters.* 2019. V. 29. P. 775–778.
32. *Porterfield D.W., Hesler J.L., Densing R., Mueller E.R., Crowe T.W., Weikle II R.M.* Resonant metal-mesh bandpass filters for the far infrared // *Applied optics.* 1994. V. 33. P. 6046–6052.
33. *Комаров В.В.* Оптимизация S-параметров численных моделей диссипативных СВЧ-элементов сложной конфигурации // *Электромагнитные волны и электронные системы.* 2006. Т. 11. № 2–3. С. 64–73.
34. *Мещанов В.П., Алавердян С.А., Кабанов И.Н., Комаров В.В.* Разработка и моделирование двумерных периодических структур для узкополосной фильтрации сигналов // *Радиотехника.* 2014. № 10. С. 9–13.

Информация об авторах

Вил Бариевич Байбурун – д.ф.-м.н., профессор,
профессор кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем»
SPIN-код: 1983-6164

Вячеслав Вячеславович Комаров – д.т.н., профессор,
профессор кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации»
SPIN-код: 6238-6611

Валерий Петрович Мещанов – д.т.н., профессор, директор
Author ID: 3116

Максим Игоревич Балакин – к.ф.-м.н., доцент,
зав. кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации»
SPIN-код: 2027-4242

Вячеслав Александрович Киркица – студент,
кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»
SPIN-код: не представлен

Статья поступила в редакцию 24.06.2022
Одобрена после рецензирования 04.07.2022
Принята к публикации 28.07.2022

Original article

Analytical Fano resonance models for frequency-selective microwave surfaces

V.B. Bayburin¹, V.V. Komarov², V.P. Meshanov³, M.I. Balakin⁴, V.A. Kirkitsa⁵

^{1,2,4,5} Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)

³ NPP "Nika-SVCh" LLC (Saratov, Russia)

¹ baiburinvb@rambler.ru; ² vyacheslav.komarov@gmail.com; ³ nika373@bk.ru;

⁴ balakinmaxim@gmail.com; ⁵ SKrkts@mail.ru

Abstract

Currently, one of the most promising and widely used filters for the microwave range is a cross-shaped symmetrical bandpass filter. Changing the shape of a cross-shaped symmetrical bandpass filter leads to the formation of a Fano resonance in its frequency response. The Fano resonance effect can be used in the design of ultra-sensitive sensors, ultra-compact antennas and lasers. But due to the small number of works devoted to the use of the Fano resonance in the microwave range, there is a need for an analytical study of the influence of filter parameters on the Fano resonance in a cross-shaped band pass filter. The purpose of our work is to study the influence of geometric parameters of the filter on its frequency response with Fano resonance. As a result, the frequency characteristics of a cross-shaped asymmetric bandpass filter were constructed at different values of the parameters of the analytical filter circuit. The capacitance of the capacitor, the inductance and resistance of the coils, the load resistance, as well as the number of circuits were used as parameters. In accordance with this, the influence of the circuit parameters on the shape of the Fano resonance was considered.

The investigations was funded by Russian Science Foundation (project № 22-19-00357, <https://rscf.ru/project/22-19-00357/>).

Keywords

Bandpass filter, Fano resonance, analytical circuit, frequency characteristic

For citation

Bayburin V.B., Komarov V.V., Meshanov V.P., Balakin M.I., Kirkitsa V.A. Analytical Fano resonance models for frequency-selective microwave surfaces. Radiotekhnika. 2022. V. 86. № 10. P. 155–164. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202210-18> (In Russian)

References

- Fano U. Sullo spettro di assorbimento dei gas nobili presso il limite dello spettro d'arco. *Nuovo Cim.* 1935. V. 12 № 3. P. 154–161.
- Fano U. Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts. *Phys. Rev.* 1961. V. 124. № 6. P. 1866–1878.
- Rybin M.V., Khanikaev A.B., Inoue M., Samusev K.B., Steel M.J., Yushin G., Limonov M.F. Fano resonance between Mie and Bragg scattering in photonic crystals. *Phys. Rev. Lett.* 2009. V. 103 № 2. 023901.
- Miroshnichenko E., Flach S., Kivshar Y.S. Fano resonances in nanoscale structures. *Rev. Mod. Phys.* 2010. V. 82. № 3. P. 2257–2298.
- Luk'yanchuk B., Zheludev N.I., Maier S.A., Halas N.J., Nordlander P., Giessen H., Chong C.T. The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials. *Nat. Mater.* 2010. V. 9. № 9. P. 707–715.
- Rahmani M., Luk'yanchuk B., Hong M. Fano resonance in novel plasmonic nanostructures. *Laser Phot. Rev.* 2013. V. 7. № 3. P. 329–349.
- Zhang S., Genov D.A., Wang Y., Liu M., Zhang X. Plasmon-induced transparency in metamaterials. *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 101. № 4. 047401.
- Hao F., Nordlander P., Sonnefraud Y., Van Dorpe P., Maier S.A. Tunability of subradiant optical sensing. *ACS Nano.* 2009. V. 3. № 3. P. 643–652 (2009).
- Verellen N., Sonnefraud Y., Sobhani H., Hao F., Moshchalkov V.V., Van Dorpe P., Nordlander P., Maier S.A. Fano resonances in individual coherent plasmonic nanocavities. *Nano Lett.* 2009. V. 9. № 4. P. 1663–1667.
- Liu N., Weiss T., Mesch M., Langguth L., Eigenthaler U., Hirscher M., Sönnichsen C., Giessen H. Planar metamaterial analogue of electromagnetically induced transparency for plasmonic sensing. *Nano Lett.* 2010. V. 10. № 4. P. 1103–1107.
- Lassiter J.B., Sobhani H., Fan J.A., Kundu J., Capasso F., Nordlander P., Halas N.J. Fano resonances in plasmonic nanoclusters: geometrical and chemical tunability. *Nano Lett.* 2010. V. 10. № 8. P. 3184–3189.
- Fan J.A., Wu C., Bao K., Bao J., Bardhan R., Halas N.J., Manoharan V.N., Nordlander P., Shvets G., Capasso F. Self-assembled plasmonic nanoparticle clusters. *Science* 2010 V. 328. № 5982. P. 1135–1138.
- Hentschel M., Saliba M., Vogelgesang R., Giessen H., Alivisatos A.P., Liu N. Transition from isolated to collective modes in plasmonic oligomers. *Nano Lett.* 2010. V. 10. № 7. P. 2721–2726.
- Hentschel M., Dregely D., Vogelgesang R., Giessen H., Liu N. Plasmonic oligomers: The role of individual particles in collective behavior. *ACS Nano.* 2011. V. 5. № 3. P. 2042–2050.
- Fu Y.H., Zhang J.B., Yu Y.F., Luk'yanchuk B. Generating and manipulating higher order Fano resonances in dual-disk ring plasmonic nanostructures. *ACS Nano.* 2012. V. 6. № 6. P. 5130–5137.
- Cetin E., Altug H. Fano resonant ring/disk plasmonic nanocavities on conducting substrates for advanced biosensing. *ACS Nano.* 2012. V. 6. № 11. P. 9989–9995.
- Wu, Khanikaev A.B., Adato R., Arju N., Yanik A.A., Altug H., Shvets G. Fano-resonant asymmetric metamaterials for ultrasensitive spectroscopy and identification of molecular monolayers. *Nat. Mater.* 2011. V. 11. № 1. P. 69–75.

18. Ye J., Wen F., Sobhani H., Lassiter J.B., Van Dorpe P., Nordlander P., Halas N.J. Plasmonic nanoclusters: Near-Field properties of the Fano resonance interrogated with Sers. *Nano Lett.* 2012. V. 12. № 3. P. 1660–1667.
19. Gallinet B., Martin O.J.F. Ab-initio theory of Fano resonances in plasmonic nanostructures and metamaterials. *Phys. Rev. B.* 2011. V. 83. № 23. 235427.
20. Gallinet B., Martin O.J.F. Influence of electromagnetic interactions on the line shape of plasmonic Fano resonances. *ACS Nano.* 2011. V. 5. № 11. P. 8999–9008.
21. Giannini V., Francescato Y., Amrania H., Phillips C.C., Maier S.A. Fano resonances in nanoscale plasmonic systems: A parameter-free modeling approach. *Nano Lett.* 2011. V. 11. № 7. P. 2835–2840.
22. Fan S.H. Sharp asymmetric line shapes in side-coupled waveguide-cavity systems. *Appl. Phys. Lett.* 2002. V. 80. P. 908–910.
23. Genet C., van Exter M.P., Woerdman, J.P. Fano-type interpretation of red shifts and red tails in hole array transmission spectra. *Opt. Commun.* 2003. V. 255. P. 331–336.
24. Hao F. et al. Symmetry breaking in plasmonic nanocavities: Subradiant LSPR sensing and a tunable Fano resonance. *Nano Lett.* 2008. V. 8. P. 3983–3988.
25. Rybin M.V. et al. Fano resonance between Mie and Bragg scattering in photonic crystals. *Phys. Rev. Lett.* 2009. V. 103. 023901.
26. Attaran et al. Circuit Model of Fano Resonance on Tetramers, Pentamers, and and Broken Symmetry Pentamers. *Plasmonics.* 2014. V. 9. P. 1–11.
27. Butet J., Russier-Antoine I., Jonin C., Lascoux N., Benichou E., Brevet P.-F. Sensing with multipolar second harmonic generation from spherical metallic nanoparticles. *Nano Lett.* 2012. V. 12. № 3. P. 1697–1701.
28. Butet J., Martin O. J. F. Refractive index sensing with Fano resonant plasmonic nanostructures: A symmetry based nonlinear approach. *Nanoscale*, Accepted article. 2014. DOI: 10.1039/C4NR05623J.
29. Kanjanasit K., Wang C. H. Fano resonance in a metamaterial consisting of two identical arrays of square metallic patch elements separated by a dielectric spacer. *Appl. Phys. Lett.* 2013. V. 102. № 25. Art. no. 251108.
30. Liao Z., Pan B.C., Shen X., Cui T.J. Multiple Fano resonances in spoof localized surface plasmons. *Opt. Express.* 2014. V. 22. № 13. P. 15710–15717.
31. Komarov V.V., Zwick T., Marahrens S., Molchanov S. Fano-Resonant Frequency-Selective Surface with Cross-Shaped Apertures. *IEEE microwave and wireless components letters.* 2019. V. 29. P. 775–778.
32. Porterfield D.W., Hesler J.L., Densing R., Mueller E.R., Crowe T.W., Weikle II R.M. Resonant metal-mesh bandpass filters for the far infrared. *Applied optics.* 1994. V. 33. P. 6046–6052.
33. Komarov V.V. Optimizacija S-parametrov chislennyh modelej dissipativnyh SVCh-jelementov slozhnoj konfiguracii. *Jelektromagnitnyye volny i jelektronnyye sistemy.* 2006. T. 11. № 2–3. S. 64–73.
34. Meshhanov V.P., Alaverdjan S.A., Kabanov I.N., Komarov V.V. Razrabotka i modelirovanie dvmernyh periodicheskikh struktur dlja uz-kopolosnoj fil'tracii signalov. *Radiotekhnika.* 2014. № 10. S. 9–13.

Information about the authors

Vil B. Bayburin – Dr.Sc.(Phys.-Math.), Professor, Department "Information Security of Automated Systems"

Vyacheslav V. Komarov – Dr.Sc. (Eng.), Professor, Department "Radio Electronics and Telecommunication"

Valeriy P. Meshanov – Dr.Sc. (Eng.), Professor, Director

Maksim I. Balakin – Ph.D. (Phys.-Math.), Assistant professor, Department "Radio Electronics and Telecommunication"

Vyacheslav A. Kirkitsa – Student, Department "Radio Electronics and Telecommunication"

The article was submitted 24.06.2022

Approved after reviewing 04.07.2022

Accepted for publication 28.07.2022