

Инверторы сопротивления с нефостеровской отрицательной емкостью и трехзвенные полосно-пропускающие фильтры на их основе

Н.С. Калмыков, Д.В. Холодник

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: демонстрируется возможность применения инверторов сопротивления с нефостеровскими отрицательными емкостями, выполненными в виде активных цепей, в составе трехзвенных полосно-пропускающих фильтров СВЧ. Показано, что на основе таких инверторов можно создавать устойчивые фильтры с увеличенной до 30% полосой пропускания, и более симметричной передаточной характеристикой, чем на традиционных инверторах сопротивления.

Ключевые слова: инверторы сопротивления, нефостеровские элементы, отрицательная емкость, конверторы отрицательного импеданса, полосно-пропускающие фильтры, перестраиваемые фильтры

1. Введение

Полосно-пропускающие фильтры (ППФ) на связанных резонаторах содержат в своем составе инверторы сопротивления (проводимости) в качестве элементов связи между резонаторами. Традиционно инверторы сопротивления выполняются в виде четвертьволновых отрезков длинных линий или цепей на элементах с сосредоточенными параметрами [1].

На рисунке 1-а приведена традиционная Т-образная схема инвертора сопротивления [1], емкости конденсаторов которой равны по абсолютной величине, но имеют разные знаки. Отрицательные емкости внешних конденсаторов схемы инвертора реализуются путем их поглощения емкостями контуров ППФ, между которыми включается инвертор. Условия физической реализации пассивного фильтра требуют, чтобы значения результирующих емкостей были неотрицательными. Это накладывает определенные ограничения на соотношения между значениями емкостей контуров и инверторов. В случае частотно-перестраиваемых фильтров это также ограничивает диапазон перестройки центральной частоты [2].

В последнее время наблюдается повышенный интерес к применению так называемых нефостеровских элементов (НФЭ), представляющих собой активные цепи, которые имитируют поведение гипотетических пассивных отрицательных емкостей и индуктивностей [3]. Благодаря своим уникальным дисперсионным характеристикам, НФЭ применяются для компенсации частотной зависимости традиционных реактивностей, в том числе для широкополосного согласования электрически малых антенн [4, 5], создания широкополосных бездисперсионных метаматериалов и метаповерхностей [6], а также различных широкополосных СВЧ-устройств: усилителей [7, 8], генераторов [9, 10], фазовращателей [11, 12] и т.п.

На основе НФЭ могут быть также созданы инверторы сопротивления, которые не требуют поглощения отрицательных емкостей и обладают более широкой рабочей полосой частот по сравнению с традиционными аналогами, что открывает новые возможности для проектирования фильтров на связанных резонаторах. Преимущества таких инверторов сопротивления были продемонстрированы нами в [3] на примере двухзвенного ППФ.

В настоящей работе впервые обсуждается возможность использования инверторов сопротивления с НФЭ для разработки трехзвенных ППФ. Показано, что инверторы сопротивления данного типа могут успешно применяться в трехзвенных ППФ с относительной шириной полосы пропускания, достигающей 30%, с обеспечением устойчивости цепи ППФ. При этом ППФ с инверторами сопротивления на основе НФЭ не подвержены изменению крутизны фронтов передаточной характеристики в отличие от ППФ с традиционными инверторами сопротивления. Отсутствие необходимости поглощения отрицательных емкостей в случае инверторов с НФЭ также расширяет диапазон перестройки центральной частоты ППФ.

2. Инверторы сопротивления с НФЭ

Реализация отрицательных емкостей схемы инвертора сопротивления (рисунок 1-а) в виде НФЭ исключает необходимость их поглощения контурами ППФ. С применением НФЭ также становится возможной реализация инвертора сопротивления с единственной отрицательной емкостью (рисунок 1-б), что позволяет минимизировать количество НФЭ [3]. Данная схема инвертора сопротивления обладает такими же частотными характеристиками, что и схема с двумя отрицательными емкостями с точностью до знака фазы коэффициента передачи, которая меняется с -90° на $+90^\circ$.

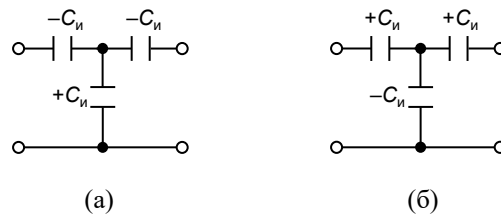


Рисунок 1. Т-образные емкостные схемы инверторов сопротивления: (а) с внешними отрицательными емкостями, (б) с центральной отрицательной емкостью.

На практике НФЭ реализуются при помощи активных цепей, известных как конверторы отрицательного импеданса (КОИ), которые преобразуют импеданс нагрузки во входной импеданс противоположного знака. Широкое распространение получила схема КОИ, предложенная Линвиллом [13]. На рисунке 2-а показана схема инвертора сопротивления, в котором для реализации центральной отрицательной емкости используется КОИ Линвилла, выполненный на биполярных транзисторах Infineon BFR843EL3. Емкости перекрестной связи и разделительные емкости равны $C = 10$ нФ. В цепях смещения используются резисторы $R = 1,4$ кОм. Напряжение питания составляет $V = 10$ В. Назначение отдельных элементов схемы и процесс проектирования такого КОИ подробно рассмотрены в [3].

На практике неидеальность транзисторов приводит к тому, что КОИ преобразует сопротивление нагрузки с некоторой ошибкой. Ошибка преобразования компенсируется посредством коррекции нагрузки КОИ [3]. Поэтому для реализации инвертора сопротивления с коэффициентом преобразования $K = 44$ Ом, у которого емкость Т-образной схемы на частоте $f_0 = 2,45$ ГГц равна $|C_n| = 1/(2\pi f_0 K) = 1,48$ пФ, используется нагрузка $C_n = 1,53$ пФ. Последовательно с емкостью в нагрузку КОИ включено сопротивление $R_n = 41$ Ом, которое преобразуется в отрицательное и позволяет тем самым компенсировать вещественную часть входного импеданса КОИ.

Частотные зависимости входного импеданса и параметров рассеяния инвертора сопротивления на базе КОИ (рисунок 2-а) представлены на рисунках 2-б и 2-в, соответственно, в сравнении с характеристиками инвертора, содержащего идеальную отрицательную емкость (рисунок 1-б). При использовании реальных транзисторов вещественная часть входного импеданса слабее зависит от частоты, чем у инвертора с

идеальной отрицательной емкостью. В то же время инвертор с КОИ демонстрирует частотную зависимость мнимой части входного импеданса и фазы коэффициента передачи – характеристик, которые у инвертора с идеальным НФЭ от частоты не зависят. По совокупности дисперсионных характеристик инвертор сопротивления на базе КОИ обладает более широкой рабочей полосой частот, что позволяет создавать на основе таких инверторов ППФ с более широкой полосой пропускания.

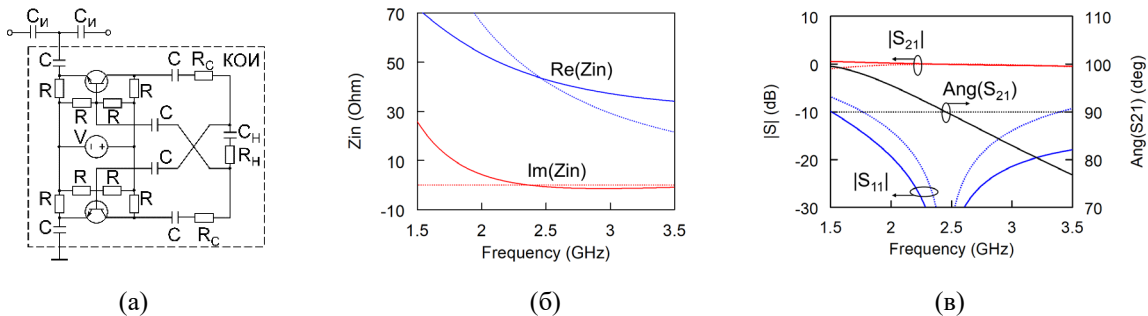


Рисунок 2. Инвертор сопротивления с НФЭ на основе КОИ Линвилла: (а) схема, (б) частотная зависимость входного импеданса, (в) частотная зависимость параметров рассеяния ($R_c = 0$). Пунктиром показаны характеристики инвертора с идеальной отрицательной емкостью.

Как показано в [3, 14], инвертор сопротивления на основе КОИ (рисунок 2-а) способен функционировать в устойчивом режиме. Устойчивость обеспечивается введением в цепь коллектора стабилизирующих резисторов R_c , которые ограничивают ток, протекающий через нагрузку КОИ. Увеличение их сопротивления улучшает устойчивость цепи, но ухудшает частотные характеристики инвертора сопротивления. Разработанный инвертор сопротивления устойчив при $R_c = 37$ Ом и выше, что подтверждается результатами анализа в частотной и временной областях.

3. Трехзвенные ППФ с инверторами на НФЭ

Схема трехзвенного ППФ на последовательных LC -контурах, связанных через инверторы сопротивления, показана на рисунке 3. Для фильтра с центральной частотой $f_0 = 2450$ МГц, шириной полосы пропускания $\Delta f = 735$ МГц (30%) и коэффициентом отражения в полосе пропускания -20 дБ значения элементов всех контуров составляют $C_s = 0,46$ пФ и $L_s = 9,24$ нГн при использовании инверторов сопротивления с $K = 44$ Ом, что соответствует $|C_{и}| = 1,48$ пФ.

На рисунке 4-а представлены в сравнении частотные зависимости коэффициентов передачи и отражения для ППФ с инверторами сопротивления на базе КОИ (рисунок 2-а), ППФ с традиционными инверторами сопротивления (рисунок 1-а), идеальные отрицательные емкости которых поглощаются емкостями контуров, а также для ППФ с идеальными частотно-независимыми инверторами сопротивления.

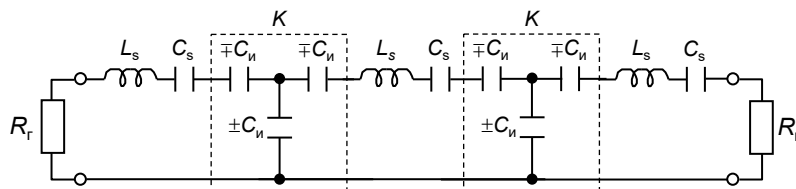


Рисунок 3. Схема трехзвенного ППФ с инверторами сопротивления.

Рабочая полоса частот традиционного инвертора сопротивления ограничена $\pm 10\%$ от центральной частоты из-за частотной зависимости вещественной части входного импеданса (рисунок 2-б). Использование таких инверторов в ППФ с относительной полосой пропускания в 30% приводит к сильной деградации АЧХ: фильтр имеет более

широкую полосу пропускания, сдвинутую вниз относительно расчетной центральной частоты, неравномерные пульсации коэффициента отражения и худший уровень согласования в полосе пропускания, а также разную крутизну фронтов передаточной характеристики (рисунок 4-а).

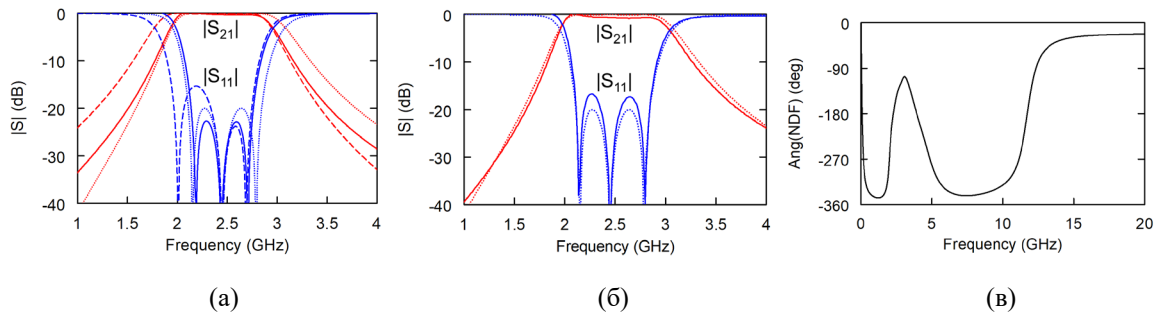


Рисунок 4. Частотные характеристики трехзвенного ППФ с инверторами сопротивления на основе КОИ (сплошные линии), с традиционными инверторами сопротивления (штриховые линии) и с идеальными частотно-независимыми инверторами сопротивления (пунктир): (а) модуль коэффициента передачи и отражения до коррекции КОИ, (б) модуль коэффициента передачи и отражения после коррекции КОИ, (в) фаза НДФ.

В свою очередь ППФ с инверторами на основе КОИ демонстрирует ширину полосы пропускания лишь немногим меньше, чем при использовании идеальных частотно-независимых инверторов сопротивления, а характеристика отражения имеет в полосе пропускания равные пульсации по уровню -23 дБ (рисунок 4-а), что говорит о недостаточной связи между контурами. Увеличение связи путем коррекции коэффициента преобразования инверторов сопротивления приводит к расширению полосы пропускания. Требуемая ширина полосы пропускания в 30% достигается при $K = 47$ Ом, при этом согласование по входу не хуже -17 дБ (рисунок 4-б). Новому значению K соответствуют следующие значения элементов схемы КОИ: $|C_{н}| = 1,29$ пФ, $C_{н} = 1,82$ пФ, $R_{н} = 51$ Ом. Следует отметить тот факт, что у ППФ с инверторами сопротивления на основе КОИ практически не изменяется крутизна фронтов передаточной характеристики в отличие от ППФ с традиционными инверторами сопротивления.

Устойчивость ППФ с инверторами на основе КОИ анализировалась в частотной области по критерию нормированной детерминантной функции (НДФ) [15]. Поскольку изменение фазы НДФ не превышает 360 градусов (рисунок 4-в), цепь ППФ устойчива. Устойчивость ППФ достигается при $R_c = 45$ Ом. Увеличение сопротивления стабилизирующих резисторов по отношению к случаю одиночного инвертора сопротивления связано с тем, что в составе трехзвенного ППФ используются два таких инвертора.

Для перестройки центральной частоты ППФ изменение емкостей контуров и инверторов сопротивления осуществляется по разным законам [2]: емкости контуров изменяются как $C_s(m) = C_s(f_0)/m^2$, а емкости инверторов – как $C_{н}(m) = C_{н}(f_0)/m$, где $m = f_0(m)/f_0$. В результате у ППФ с традиционными инверторами сопротивления после поглощения отрицательных емкостей инверторов могут получаться отрицательные или очень малые положительные значения результирующих емкостей, нереализуемые на практике. Анализ с использованием выражений, приведенных в [2], показывает, что рассматриваемый трехзвенный ППФ с полосой пропускания 30% имеет следующее теоретическое ограничение на перестройку центральной частоты: $m \geq 0,618$, которое обусловлено тем, что результирующие емкости во всем диапазоне перестройки должны оставаться положительными. В то же время у ППФ с инверторами на НФЭ не существует теоретических ограничений на перестройку центральной частоты, т.к. отсутствует необходимость поглощения отрицательных емкостей инверторов.

4. Заключение

Инверторы сопротивления с НФЭ, предоставляют ряд преимуществ для проектирования ППФ. Прежде всего, отсутствие необходимости поглощения отрицательных емкостей позволяет использовать такие инверторы с резонаторами различных типов (не только с последовательными LC -контурами, как было показано в рассмотренном примере). Это также снимает ограничения на перестройку центральной частоты, присущие ППФ с традиционными инверторами сопротивления.

С целью минимизации числа НФЭ целесообразно использовать схему инвертора сопротивления с центральной отрицательной емкостью.

Дисперсионные характеристики инверторов сопротивления, отрицательные емкости которых реализуются на основе КОИ, позволяют применять их в ППФ с более широкой полосой пропускания, чем у фильтров на традиционных инверторах сопротивления. Показано, что на базе инверторов сопротивления с КОИ можно создавать трехзвенные ППФ с полосой пропускания до 30%. При этом ширина полосы пропускания и крутизна фронтов АЧХ практически не изменяются, в то время как у ППФ на традиционных инверторах сопротивления наблюдается существенное искажение АЧХ уже при ширине полосы пропускания от 10-15%.

Впервые продемонстрировано, что трехзвенный ППФ с двумя инверторами сопротивления с КОИ может функционировать в устойчивом режиме. К тому же обеспечение устойчивости не приводит к заметному компромиссу в отношении АЧХ.

Список литературы

1. Маттей Д. Л. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи – М.: Связь, 1972.
2. Kholodnyak D., Turgaliev V., Baskakova A. A method to design lumped-element tunable bandpass filters with constant absolute bandwidth // 44th European Microwave Conference. – IEEE, 2014. – P. 335-338.
3. Buiantuev B. Physically-oriented design of negative capacitors based on Linvill's floating impedance converter // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2022. V. 70, N. 1. – P. 139-154.
4. Sussman-Fort S. E., Rudish R. M. Non-Foster impedance matching of electrically-small antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2009. – V. 57, N. 8. – P. 2230-2241.
5. Ivanov N., Turgaliev V., Kholodnyak D. Performance improvement of an electrically-small loop antenna matched with non-foster negative inductance // 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. – IEEE, 2017. – P. 348-351.
6. Hrabar S. First ten years of active metamaterial structures with “negative” elements // EPJ Applied Metamaterials. – 2018. – V. 5, N. 9. – P. 1-12.
7. Lee S. et al. A 6–18 GHz GaN pHEMT power amplifier using non-Foster matching // 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. – IEEE, 2015. – P. 1-4.
8. Akwuruoha C. N., Hu Z. 55 to 59 GHz MMIC non-Foster circuit enabled class-J GaAs pHEMT power amplifier // 2018 International Conference on IC Design & Technology. – IEEE, 2018. – P. 149-152.
9. Chen Y., Mouthaan K. Wideband varactorless LC VCO using a tunable negative-inductance cell // IEEE Transactions on Circuits and Systems. – 2010. – V. 57. – N. 10. – P. 2609-2617.
10. Wu Q. et al. A– 189 dBc/Hz FOMT wide tuning range Ka-band VCO using tunable negative capacitance and inductance redistribution // 2013 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. – IEEE, 2013. – P. 199-202.
11. Kholodnyak D. et al. A frequency independent phase inverting all-pass network suitable for a design of ultra-wideband 180° phase shifters // 41st European Microwave Conference. – IEEE, 2011. – P. 643-646.
12. Al Mokdad S. et al. Wide-band active tunable phase shifter using improved non-Foster circuit // 25th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems. – IEEE, 2018. – P. 449-452.
13. Linvill J. G. Transistor negative impedance converters // Proceedings of the IRE. – 1953. – V. 41, N. 6. – P. 725-729.
14. Brizic A. et al. Investigation of impedance inverter based on band-pass non-Foster negative capacitor // 23rd International Conference on Applied Electromagnetics and Communications. – IEEE, 2019. – P.1-3.
15. Jimenez-Martin J. L. et al. Full conditions for the stability analysis of negative impedance converters // 6th European Conference on Antennas and Propagation. – IEEE, 2012. – P. 135-138.