

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.5.2>

УДК: 621.37

СПОСОБ ПОДАВЛЕНИЯ ПАРАЗИТНОГО КАНАЛА ПРИЕМА В УСТРОЙСТВАХ ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В.В. Скульдицкий, С.В. Мельников, Д.Г. Юдин

Всероссийский научно-исследовательский институт «Градиент»,
344000, Ростов-на-Дону, пр. Соколова, 96

Статья поступила в редакцию 16 апреля 2026 г.

Аннотация. В настоящей статье рассматривается проблема спектральной чистоты выходного сигнала частотного преобразователя. Показано, что при незначительном частотном разnose входного и выходного диапазонов в полосу полезного сигнала попадает одна из гармоник входного сигнала, уровень подавления которой недостаточен для обеспечения требуемого динамического диапазона. Приведено математическое обоснование возникновения паразитного отклика. Выполнен анализ двух подходов к решению задачи, один из которых – перенос выходного диапазона вверх по частоте. В качестве альтернативы предложен способ переключения между двумя фиксированными выходными диапазонами с использованием комбинированного полосового фильтра. Даны полезные практические рекомендации и иллюстративный пример

Ключевые слова: преобразователь частоты, паразитный канал, подавление гармоник, частотный смеситель, комбинационные помехи.

Автор для переписки: Скульдицкий Владислав Валерьевич,

vladislavskulditsky@yandex.ru

Введение

Современные радиочастотные системы, включая радиоприемники, радиолокационные станции, радиопеленгаторы и средства радиоэлектронной разведки, в своей основе содержат устройства частотного преобразования [1]. Их ключевая функция – перенос спектра полезного сигнала из одной частотной области в другую для последующей эффективной обработки. От качества выполнения этой операции напрямую зависят основные характеристики всей системы: чувствительность, избирательность, динамический диапазон и помехозащищенность.

Одной из наиболее сложных проблем проектирования широкополосных приемников является возникновение паразитного канала, связанного с сигналом, частота которого попадает в середину входного рабочего диапазона преобразователя частоты (ПЧ). Если обозначить границы этого диапазона как $f_{\min}$ и $f_{\max}$, то частота проблемной помехи $f_{\text{помех}}$ рассчитывается по формуле:

$$f_{\text{помех}} \approx \frac{f_{\min} + f_{\max}}{2}. \quad (1)$$

Механизм возникновения такого канала обусловлен интермодуляционными процессами высших порядков и гармониками сигналов в нелинейном элементе смесителя. В частности, помеха на частоте $f_{\text{помех}}$, взаимодействуя с гармониками сигнала гетеродина $f_{\text{гет}}$, может создавать комбинационный продукт на разностной частоте, попадающий в полосу пропускания ПЧ. Такой продукт успешно проходит последующие фильтры ПЧ и маскируется под полезный сигнал, если выполняется условие:

$$f_{\min_пч} \leq f_{\text{помех}} \leq f_{\max_пч}. \quad (2)$$

Актуальность разработки способа борьбы с данным видом помех обусловлена повсеместным внедрением широкополосных приемных систем. В таких устройствах использование узкополосных входных фильтров, способных

подавить помеху на частоте $f_{\text{помех}}$, не представляется возможным, так как они ограничили бы общую перестраиваемую полосу. Классические схемотехнические методы [2], например, применение двойных балансных смесителей [3], подавляют, в первую очередь, определенные гармоники, но часто оказываются неэффективными против конкретных интермодуляционных продуктов.

Для решения поставленной задачи необходимо провести анализ механизма формирования паразитных составляющих канала и разработать способ их подавления. Такой способ должен быть совместим с требованиями широкополосности, технологичности и сохранения основных параметров приемного тракта.

1. Анализ формирования паразитных составляющих в выходном диапазоне частотного преобразователя

План распределения частот в устройстве напрямую зависит от архитектуры и топологии реализуемого радиочастотного тракта, количества преобразований и режимов работы. При комплексном частотном планировании необходимо изучить блокирующие сигналы, сигналы на частотах зеркальных каналов и каналы побочного излучения и приема. Эти компоненты являются радиосигналами, которые передаются в эфире другим радиооборудованием и способны проникнуть в разные участки приемного тракта. Они могут или сразу насытить радиочастотные тракты, или взаимодействовать с полезным сигналом, ухудшая качество его обработки [1,4].

При преобразовании сигналов в радиочастотных блоках используются операции сложения и вычитания частот, осуществляемые с помощью преобразователей сигналов. На их выходе наряду с полезными сигналами образуется целый ряд комбинационных составляющих (КС), являющихся паразитными или мешающими. Таким образом, на выходе преобразователя формируется ряд комбинационных составляющих с частотами $\pm mf_{\text{вх}}$ и $\pm nf_{\text{гет}}$, где $m, n \in \{1, 2, \dots\}$. Комбинационную составляющую принято характеризовать ее порядком, который равен сумме $m+n$.

Нежелательные компоненты на выходе преобразователя отфильтровываются с помощью фильтров с необходимыми параметрами. Однако, зачастую комбинационные составляющие попадают непосредственно в полосу пропускания выходных фильтров преобразователей и в силу этого не могут быть удалены. Уровень такой составляющей на выходе зависит только от типа преобразователя, используемого активного элемента и его режима [4-6].

В современных широкополосных системах измерения и связи часто возникает необходимость преобразования сигнала из нижнего диапазона частот в более высокий. На выходе ПЧ в спектре сигнала содержится множество комбинационных составляющих. Наибольшую амплитуду среди них, помимо основного тона гетеродина и зеркального канала, имеет вторая и третья гармоники входного сигнала. Уровень подавления $2f_{\text{вх}}$ в балансных смесителях составляет, как правило, от 20 до 40 дБ относительно несущей, чего в условиях жестких требований к чистоте спектра оказывается недостаточным [4-6].

Рассмотрим случай, когда выходная частота ПЧ должна быть равна $f_{\text{пч}} = 3000 \pm 45$ МГц, входной диапазон – от 30 до 3000 МГц, где частота полезного сигнала равна $f_{\text{вх}} = 1510$ МГц, а ее вторая гармоника – $2f_{\text{вх}} = 2 \cdot 1510 = 3020$ МГц. Частота гетеродина выбирается из условия:

$$f_{\text{гет}} - f_{\text{вх}} = f_{\text{пч}}, \quad (3)$$

где $f_{\text{вх}}$ – частота входного сигнала, $f_{\text{пч}}$ – частота выходного сигнала, $f_{\text{гет}}$ – частота сигнала гетеродина.

Для преобразования входного сигнала в диапазон промежуточных частот в районе 3000 МГц гетеродин должен быть $f_{\text{гет}} = 4500$ МГц, так как, если мы настроимся точно на входной сигнал, то на выходе ПЧ получим только полезный сигнал, равный $2f_{\text{вх}}$. Следовательно, по формуле (3) можно рассчитать частоту полезного сигнала на выходе ПЧ, которая составляет $f_{\text{пч}} = 2990$ МГц.

Выполненные расчеты позволяют сделать вывод, что обе частоты 2990 МГц и 3020 МГц находятся внутри полосы пропускания выходного

фильтра 3000 ± 45 МГц. Таким образом, спектр на выходе устройства содержит ложный сигнал, отстоящий от полезного на 30 МГц, с уровнем подавления около 60 дБ относительно несущей, что продемонстрировано на рис. 1.

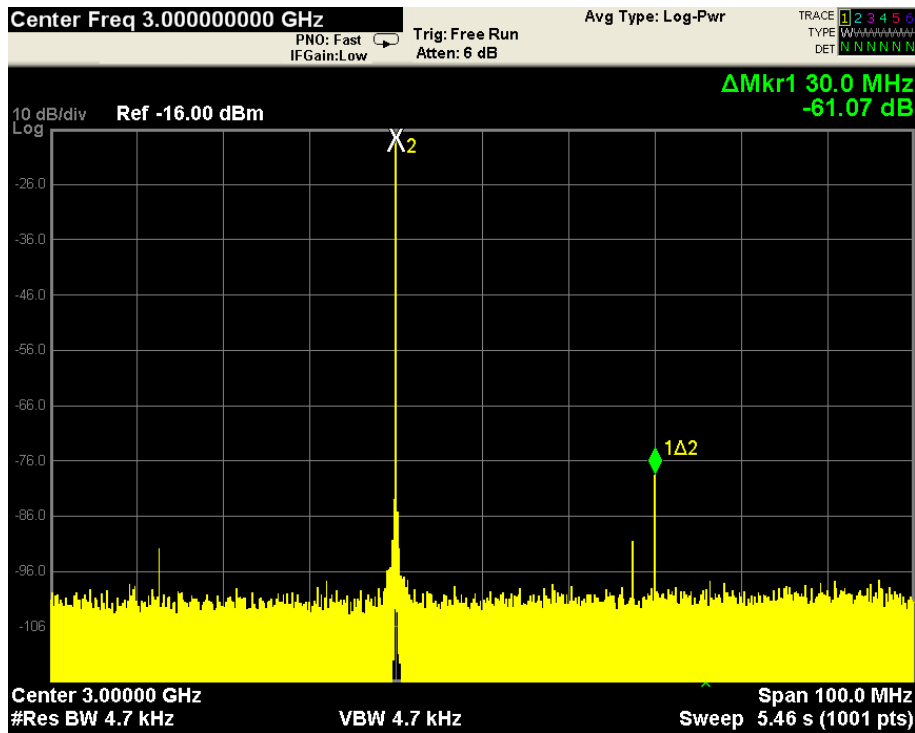


Рис. 1. Основной сигнал и паразитные составляющие на выходе ПЧ в частотном диапазоне 3000 ± 45 МГц при входном сигнале 1510 МГц.

Аналогичным способом можем рассчитать для случая, когда $f_{\text{гет}} = 4000$ МГц, $f_{\text{вх}} = 1010$ МГц, а ее третья гармоника $3f_{\text{вх}} = 3030$ МГц. Тогда на выходе ПЧ получаются два сигнала с частотами 2990 МГц и 3030 МГц, которые также попадают в полосу пропускания выходного фильтра, что показано на рис. 2.

Разделить такие сигналы фильтрацией не представляется возможным без внесения частотно-зависимых искажений в полезный сигнал.

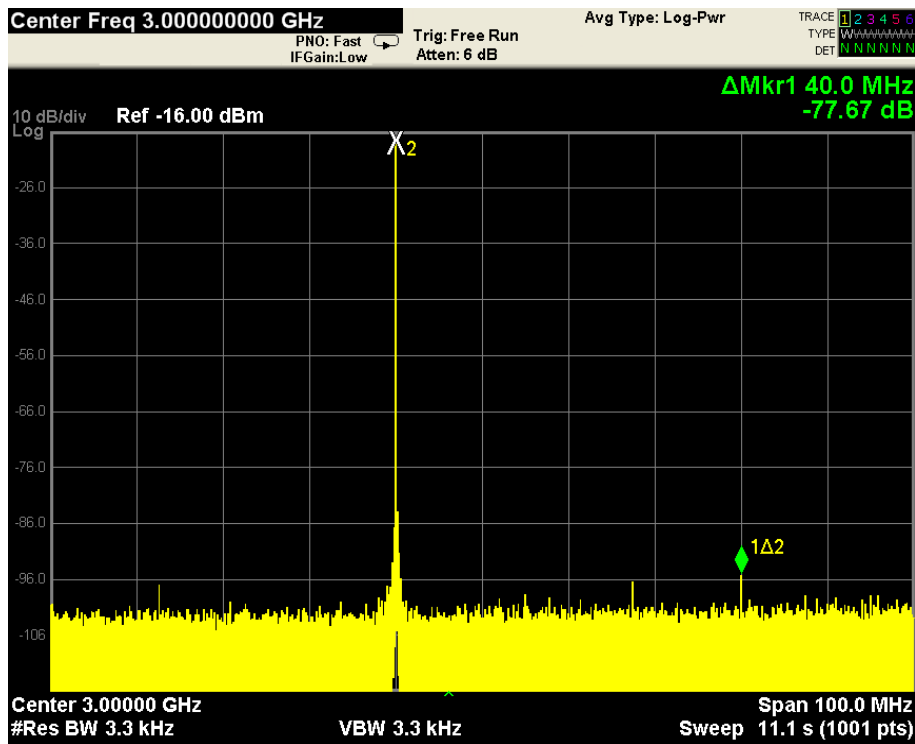


Рис. 2. Основной сигнал и паразитные составляющие на выходе ПЧ в частотном диапазоне 3000 ± 45 МГц при входном сигнале 1010 МГц.

2. Анализ классического способа борьбы с паразитными составляющими

Наиболее очевидным способом устранения влияния гармоник входного сигнала является увеличение частоты гетеродина настолько, чтобы полезная промежуточная частота оказалась значительно выше [6].

Например, при $f_{\text{гет}} = 7500$ МГц и $f_{\text{вх}} = 1510$ МГц полезный сигнал составит 5990 МГц, исходя из формулы (3), а $2f_{\text{вх}} = 3020$ МГц и $3f_{\text{вх}} = 4530$ МГц. В таком случае паразитные составляющие расположены ниже выходного диапазона ПЧ, что позволяет эффективно подавить вторую и третью гармоники простым фильтром нижних частот или полосовым фильтром на выходе.

Недостатками способа [5,6] являются:

- рост фазовых шумов при умножении частоты гетеродина;
- усложнение синтезатора частоты. Требуется применение высокочастотных генераторов, управляемых напряжением;
- стоимость компонентов. СВЧ-смесители, усилители и фильтры для диапазона свыше 6 ГГц существенно дороже аналогичных компонентов для диапазона менее 6 ГГц;

- экранирование и развязка. Усложняется конструкция изделия, возрастают требования к экранированию трактов гетеродина и ПЧ.

Таким образом, несмотря на эффективность подавления паразитных гармоник, данный подход приводит к неоправданному усложнению и удорожанию конструкции изделия, особенно в условиях серийного производства.

3. Предлагаемый способ решения поставленной задачи

В качестве альтернативного решения предлагается отказаться от идеи поднять промежуточную частоту ПЧ до заведомо безопасного уровня, и вместо этого использовать два фиксированных выходных диапазона с переключением между ними. Входной диапазон при этом остается неизменным, а выходной диапазон выбирается программно. Для этого необходимо установить переключатели и комбинированный полосовой фильтр [7], включающий в себя два независимых фильтра для обоих диапазонов или же два отдельных фильтра. Для формирования сигнала гетеродина используется синтезатор на основе фазовой автоподстройки частоты с низким уровнем фазовых шумов [8]. Структура такого ПЧ представлена на рис. 3.

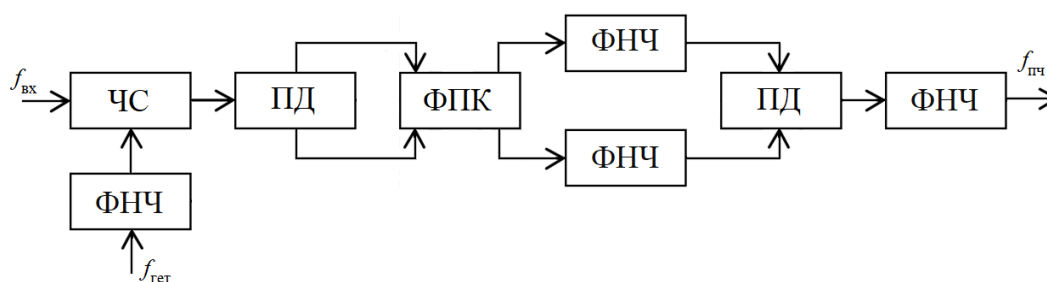


Рис. 3. Структура преобразователя частоты с двумя выходными переключаемыми диапазонами.

Здесь ЧС – частотный смеситель, ПД – переключатель диапазонов, ФНЧ – фильтр низких частот, ФПК – фильтр полосовой комбинированный, $f_{\text{вх}}$ – входная частота, $f_{\text{гет}}$ – частота гетеродина, $f_{\text{пч}}$ – выходная частота преобразователя.

Принцип работы ПЧ заключается в том, что в зависимости от частоты входного сигнала контроллер преобразователя выбирает такую частоту гетеродина и соответствующий выходной фильтр, чтобы гармоники входного сигнала гарантированно не попадали в выбранную полосу ПЧ.

Для расчета сигналов на выходе ПЧ возьмем $f_{\text{вх}} = 1510$ МГц, $2f_{\text{вх}} = 3020$ МГц и $f_{\text{гет}} = 5000$ МГц. В таком случае на выходе ПЧ получаются два сигнала с частотами 3490 МГц и 3020 МГц. В данном примере перенос идет в выходной диапазон ПЧ, равный 3500 ± 45 МГц, из чего следует вывод, что гармоника входного сигнала остается вне выходного диапазона ПЧ (см. рис. 1). Спектр такого преобразователя частоты представлен на рис. 4.

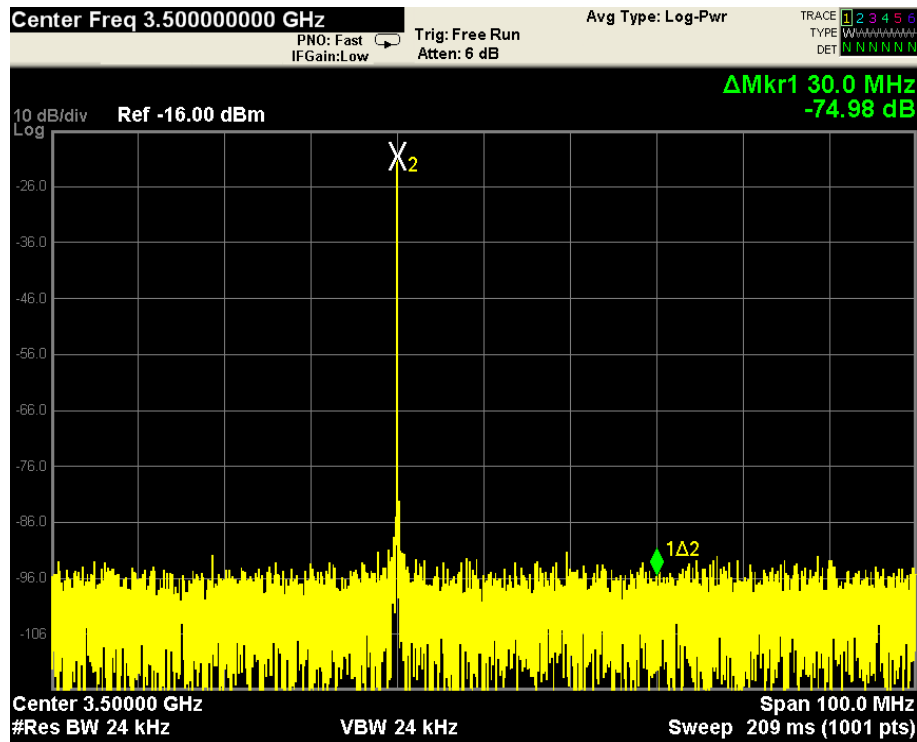


Рис. 4. Основной сигнал на выходе ПЧ в частотном диапазоне 3500 ± 45 МГц при входном сигнале 1510 МГц.

По аналогии с примером, приведенным выше, можно произвести расчеты для входной частоты $f_{\text{вх}} = 1010$ МГц и $f_{\text{гет}} = 4500$ МГц. Такой спектр на выходе ПЧ не имеет паразитных составляющих, что продемонстрировано на рис. 5 в сравнении со спектром на рис. 2.

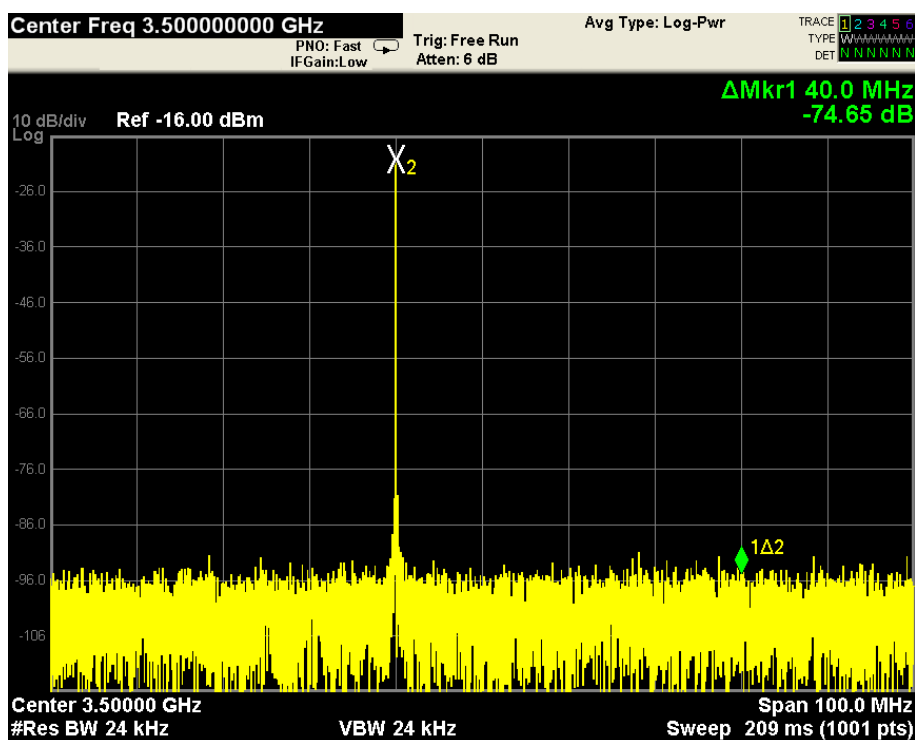


Рис. 5. Основной сигнал на выходе ПЧ в частотном диапазоне 3500 ± 45 МГц при входном сигнале 1010 МГц.

К недостаткам метода можно отнести следующее:

- требуется более сложный алгоритм управления (выбор режима по частоте и составление частотного плана);
- вносятся дополнительные потери на переключателях диапазонов (порядка 1-2 дБ для каждого).

Тем не менее, эти недостатки не являются критическими по сравнению с удорожанием и усложнением всей схемотехнической реализации при переходе на частоты выше 6 ГГц.

Заключение

Анализ проведенных экспериментов показал, что работа преобразователя частоты с выходным диапазоном, близким к входному диапазону, неизбежно сопровождается проблемой попадания гармоник входного сигнала в полосу полезного сигнала. Традиционный способ решения – увеличение частоты гетеродина и выходного диапазона ПЧ – позволяет устранить данное явление,

но влечет за собой рост конструктивных сложностей, фазовых шумов и стоимости готового изделия.

Альтернативным и обоснованным решением является использование двух фиксированных выходных диапазонов с переключением между ними и применение комбинированного фильтра. Данный способ позволяет сохранить низкую частоту гетеродина, минимизировать фазовые шумы и обеспечить высокую спектральную чистоту выходного сигнала без применения дорогостоящих СВЧ-компонентов.

Литература

1. Дингес С., Кочемасов В. СВЧ-преобразователи частоты. Часть 1. // Компоненты и технологии. – 2018. – № 4. – С. 18–23.
2. Боков А.С., Марков Ю.В., Никитин Н.П. Устройства приема и обработки сигналов: проектирование. Учебно-методическое пособие. // УрФУ им. Б.Н. Ельцина. – 2020. – С. 75–80.
3. Бобрешов А.М., Малежин М.И., Степкин В.А., Усков Г.К. Двойной балансный смеситель для перемножения сверхширокополосных импульсных сигналов. // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. – 2014. – №. 2. – С. 5–13.
4. Подстригаев А.С. Смоляков А.В. Исследование спектра сигнала при двукратном частотном преобразовании. // Труды МАИ. – 2020. – №. 114. С. 10.
5. Женатов Б.Д. Уменьшение уровня суммарных интермодуляционных помех третьего порядка в цифровых радиоприемных устройствах. // Открытое образование. – 2011. – № 2-2. – С. 106–109.
6. Халиков А.А., Хуррамов А.Ш.У. Анализ электромагнитной совместимости и методы разработки частотного плана. // Universum: технические науки. – 2022. – № 8. – С. 36–39.
7. Ruonan M., Yongle W., Leidan P., Wei Z., Weimin W. A Miniaturized Low-Loss Switchable Single- and Dual-Band Bandpass Filter. // International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering: date of publication 10.07.2023.

8. Скульдицкий В.В., Быкадоров А.А., Мельников С.В., Юдин Д.Г. Оптимизация структуры и калибровка синтезатора частоты с низким уровнем фазовых шумов в контуре фазовой автоподстройки. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 10.

Для цитирования:

Скульдицкий В.В., Мельников С.В., Юдин Д.Г. Способ подавления паразитного канала приема в устройствах частотного преобразования. // Журнал Радиоэлектроники. – 2026. – №. 5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.5.2>