

# СВЧ-преобразователи частоты.

## Часть 1. Основные сведения о преобразователях частоты

Сергей ДИНГЕС,  
к. т. н.  
Виктор КОЧЕМАСОВ,  
к. т. н.

**В первой статье из цикла, посвященного общему обзору СВЧ-преобразователей частоты, рассмотрены ключевые характеристики данных устройств, их классификация и возможные варианты структуры. Основное внимание уделено преобразователям в интегральном, модульном и приборном конструктивном исполнении.**

### Общая информация о преобразователях частоты

Функционирование радиооборудования СВЧ-диапазона основано на использовании преобразователей сигналов по частоте, кратко называемых преобразователями частоты.

РЧ-преобразователи частоты (RF Frequency Converter, FC) являются маломощными устройствами, преобразующими радио-частотные сигналы с одной частоты на другую или из одной области частот в другую.

Действующий ГОСТ 24375-80 (Радиосвязь. Термины и определения) дает такое определение: преобразователь частот — электрическая цепь, осуществляющая преобразование частоты и включающая гетеродин, смеситель и полосовой фильтр. В примечании к документу отмечено, что в отдельных случаях полосовой фильтр может отсутствовать.

Преобразователи частот используются во входных цепях трактов приема для переноса спектра СВЧ-сигналов в сравнительно низкочастотный диапазон промежуточных частот, где уже и происходит качественная необходимая обработка сигналов. В трактах передачи — это выходные устройства, преобразующие сформированные информационные сигналы из низкочастотной области baseband или ПЧ-частот в СВЧ-диапазон для дальнейшей передачи по радиоканалам. Очень широко используются преобразователи частоты в трактах синтеза частот РО различного назначения и практически во всех видах КИА.

Для преобразования частот СВЧ-сигналов используются РЧ-узлы различного назначения и принципа действия, на основе которых разрабатывается широкая номенклатура преобразователей частоты: детекторы, смесители, стробоскопические преобразователи, умножители, делители, генераторы гармоник, модуляторы. Основное внимание в этой статье уделено преобразователям в интегральном, модульном и приборном конструктивном исполнении.

### Смесители сигналов

Наиболее часто ядром — основой преобразователей частоты — являются смесители сигналов. Смеситель (Mixer) сигналов (См) — функциональный узел, предназначенный для объединения двух или более РЧ-сигналов и формирования выходного сигнала, являющегося обычно суммой или разностью входных сигналов.

В действующем ГОСТ 24375-80 приведено следующее определение: смеситель сигналов — электрическая цепь, создающая спектр комбинационных частот при подаче на нее двух или более сигналов разной частоты.

Смеситель, как правило, используется для преобразования с повышением или с понижением частоты модулированного РЧ-сигнала и может называться в этом случае преобразователем сигнала (Signal Converter) или преобразователем частоты (Frequency Converter). Если выходная частота смесителя меньше входной, смеситель называют смесителем с преобразованием сигнала с понижением по частоте (Downconverting Mixer), или вниз, в противном случае — смесителем с преобразованием сигнала с повышением по частоте (Upconverting Mixer), или вверх.

В большинстве случаев смеситель (См) — это функциональный узел, имеющий два входа и один выход (часто называемые портами) и используемый, как правило, для преобразования частоты сигнала.

Один из подаваемых в смеситель сигналов имеет входную частоту  $f_{вх}$  (РЧ-сигнал), другой — частоту гетеродина  $f_{гет}$ . Получаемый в результате их взаимодействия выходной сигнал смесителя является определенной комбинацией  $f_{вх}$  и  $f_{гет}$ . Сигнал на выходе смесителя с преобразованием сигнала вниз обычно называют сигналом промежуточной частоты (ПЧ)  $f_{пч}$ .

На рис. 1 показан спектр сигнала на выходе смесителя с преобразованием частоты вниз. В этом смесителе частота гетеродина (Local Oscillator)  $f_{гет}$  ниже входной частоты, то есть

реализована так называемая нижняя настройка гетеродина (Low-side Injection). В идеальном случае на выходе смесителя присутствуют только желательные частоты со значениями  $f_{вх} + f_{гет}$  и  $f_{вх} - f_{гет}$ . Поскольку у полупроводниковых приборов — нелинейная вольт-амперная

### Список используемых сокращений и терминов

- БС — базовая станция
- БСм — балансный смеситель
- Гет — гетеродин
- ДвПрЧ — подсистемы двунаправленного преобразования частот
- ДД — динамический диапазон
- ЗК — зеркальный канал
- КвСм — квадратурный смеситель
- КвПрЧ — квадратурный преобразователь частоты
- Кпр — коэффициент преобразования
- МС — модуль с соединителями
- н/д — нет данных
- н/к — некорпусированный компонент
- ПЗК ПрЧ — преобразователь частоты с подавлением ЗК (Image Reject Downconverter)
- ПМ (SMT) — поверхностный монтаж
- Прм — приемник
- Прд — передатчик
- ПрЧ — преобразователь частоты
- ПрЧПов — преобразователь частоты с повышением
- ПрЧПон — преобразователь частоты с понижением
- ПрЧУМ — преобразователь по частоте с выходным усилителем мощности
- ПП — потери преобразования
- СГСм — субгармонический смеситель
- ШПрЧ — широкополосный преобразователь частоты
- BW (Band Wide) — рабочая полоса частот
- FC (Frequency Converters) — преобразователи частоты
- РНЕМТ — транзистор с высокой подвижностью электронов
- Rx — приемник
- Tx — передатчик

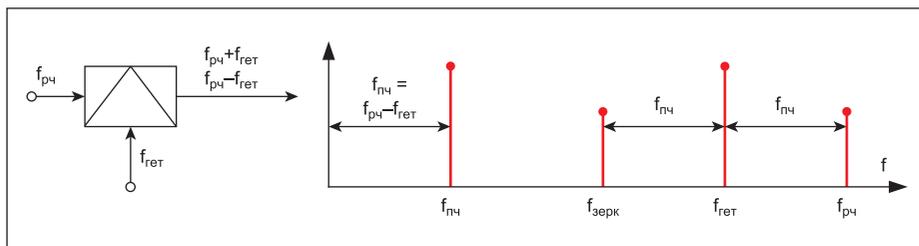


Рис. 1. Радиочастотный смеситель и типовой спектр на выходе смесителя с нижней настройкой гетеродина

характеристика (ВАХ), в функции, описывающей их нелинейность, присутствует большая компонента второго порядка. Это позволяет получать продукт смешения с большим уровнем. Однако в выходном сигнале смесителя появляются побочные составляющие, ухудшающие эффективность преобразования.

Вообще говоря, на выходе смесителя получают комбинационные частоты  $\pm mf_{\text{вх}} \pm nf_{\text{гет}}$ , где  $m$  и  $n = 1, 2, 3, \dots$  Нежелательные (паразитные) компоненты на выходе смесителя отфильтровываются с помощью фильтров с необходимыми параметрами. При выборе значений ПЧ следует учитывать их появление в полосе сигнала ПЧ и наличие зеркального канала (Image Frequency). Как показано на рис. 1, он отстоит на величину  $2f_{\text{пч}}$  от РЧ-сигнала, и сигналы с частотами  $f_{\text{зерк}}$  преобразуются непосредственно на величину  $2f_{\text{пч}}$  наряду с полезным входным сигналом. Шумы и нежелательные сигналы, присутствующие на входе смесителя на этой зеркальной частоте, ухудшают характеристики системы. Эта проблема частично решается путем применения описанных далее фильтров или смесителей с подавлением зеркального канала.

В смесителях с преобразованием частоты вверх, например в трактах передачи, входным сигналом смесителя является сигнал ПЧ. Выходной сигнал представляет собой сумму или разность частот гетеродина и ПЧ в зависимости от нижней или верхней настройки гетеродина. Если на выходе смесителя требуется частота  $f_{\text{вых}} = f_{\text{вх}} + f_{\text{гет}}$ , то разност-

ная частота  $f_{\text{вых}} = f_{\text{вх}} - f_{\text{гет}}$  является зеркальной и должна быть подавлена до смесителя или в смесителе с подавлением зеркального канала. В большинстве смесителей используется внутренняя фильтрующая система, которая уменьшает уровни нежелательных компонентов на выходе узла. Кроме того, для подавления нежелательных составляющих применяются балансные смесители.

Все РЧ-смесители могут быть разделены на две большие группы: пассивные смесители (Passive Mixer) и активные смесители (Active Mixer) [21.1].

В пассивных смесителях в качестве нелинейных элементов применяются, в основном, полупроводниковые диоды. При использовании в пассивных смесителях транзисторов, как правило полевых, они применяются в качестве ключей.

В активных смесителях используют полупроводниковые транзисторы в активном или ключевом режимах.

В инженерной практике активными смесителями иногда называются СВЧ-изделия, у которых на входе одного или нескольких портов включены встроенные широкополосные усилители.

По типу схемотехнической реализации смесители можно разделить на несколько основных групп (рис. 2):

- несимметричные (небалансные) смесители (Single Ended Mixer);
- одиночные балансные смесители (Single Balanced Mixer);

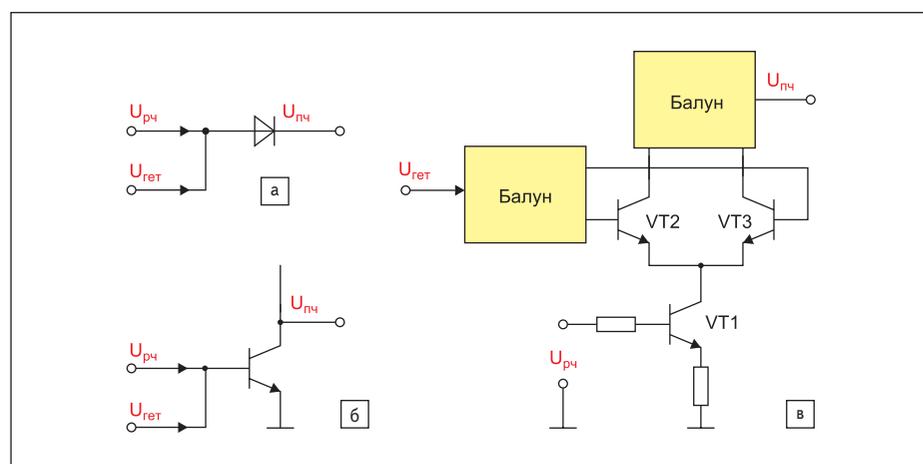


Рис. 2. Смесители:

а) небалансный пассивный; б) небалансный активный; в) балансный с симметрирующими устройствами

- двойные балансные смесители (Double Balanced Mixer);
- тройные балансные смесители (Triple Balanced Mixer);
- смесители с подавлением зеркального сигнала (Image Reject Mixer).

Небалансные смесители (Single Ended Mixer, SEM) в настоящее время применяются крайне редко, т. к. не обеспечивают приемлемой развязки между портами, а мощность выходного полезного сигнала зависит от уровней как входного, так и опорного сигналов. Главное преимущество небалансных смесителей наряду с их схемотехнической простотой состоит в том, что они работают в очень широком диапазоне частот, перекрывающем более пяти декад. Это делает вполне оправданным их использование в некоторых приложениях подвижной связи.

Лучшими характеристиками обладают балансные смесители (БСм). Существуют разные схемотехнические варианты их реализации. Общим свойством таких структур является их схемная симметрия. Различные варианты схемотехнической реализации балансных смесителей приведены далее.

Для качественного функционирования этих смесителей входные напряжения, подаваемые на симметричные части устройства, должны иметь одинаковые амплитуды и противоположные фазы. Поскольку зачастую источники сигналов, подаваемых на смеситель, не имеют балансных (дифференциальных, двухтактных) выходов, на входе смесителя применяются симметрирующие устройства или схемы. Достаточно простым устройством такого типа являются РЧ-трансформаторы — балуны, специально предназначенные для перехода с балансных к небалансным схемам и наоборот. Вывод средней точки одной из обмоток такого трансформатора соединяется с массой (общим проводом), поэтому имеет нулевой потенциал. В результате, если мгновенная полярность на одном из незаземленных выводов обмотки положительна, на другом она отрицательна.

Наилучшую развязку между портами обеспечивают балансные смесители (Single-balanced Mixer), а между всеми тремя портами — двойные балансные смесители (смесители с двойной балансировкой, ДБС) (Double-balanced Mixer).

### Преобразователи сигналов

Наиболее общая конфигурация преобразователя, показанная на рис. 3, содержит смеситель частот (frequency mixer) и буферные каскады на всех или некоторых портах компонента.

При этом наиболее часто используемым компаниями-изготовителями классификационным признаком, переводящим смеситель в класс преобразователей частоты, является наличие на входных и выходных портах компонента элементов частотной

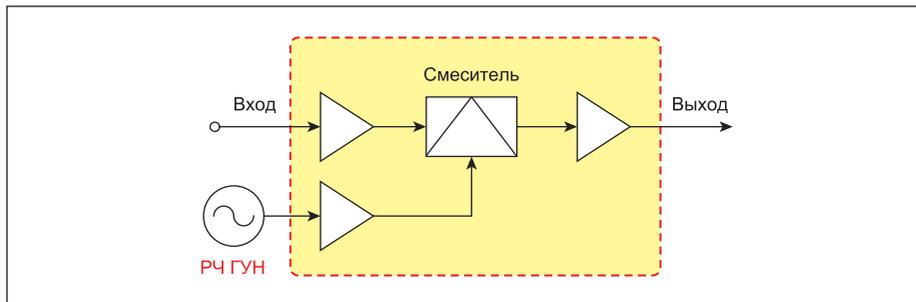


Рис. 3. Общая конфигурация преобразователя частоты

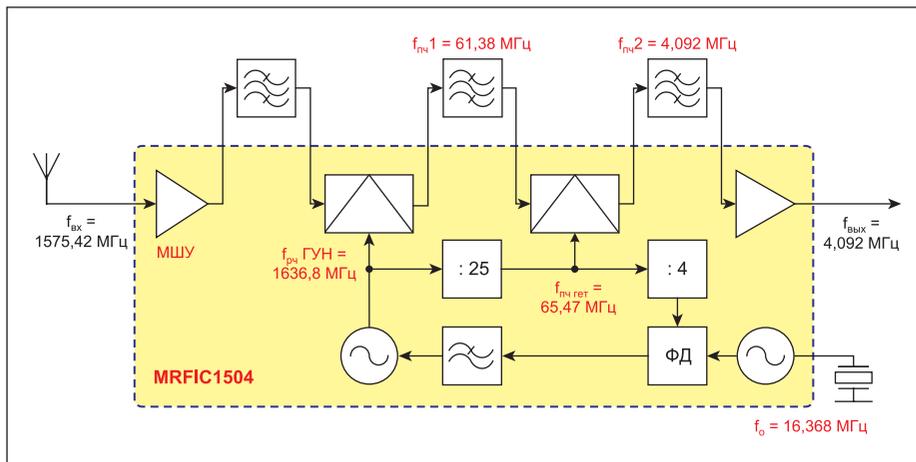


Рис. 4. Функциональная схема преобразователя GPS-сигнала MRFIC1504 компании Motorola

фильтрации. Тем не менее даже в разных информационных источниках производителя один и тот же компонент может именоваться и смесителем, и преобразователем или даже приемником или передатчиком.

Более развитые конфигурации преобразователей могут содержать входные фильтры (input filter), фильтры гетеродина (local oscillator filter), фильтры ПЧ (IF filter), умножители частоты (frequency multiplier) гетеродина, а также один или несколько каскадов усиления ПЧ-сигнала (IF amplification). Еще более сложные конфигурации РЧ-преобразователей частоты могут также включать РЧ-гетеродин (local oscillator, LO), компоненты компенсации усиления (gain compensation) и предусилителя РЧ-сигнала (RF preamplifier).

Примером преобразователя частот с такой развитой структурой, приведенной на рис. 4, может служить интегральная схема (ИС) преобразователя GPS-сигнала MRFIC1504 (Integrated GPS Downconverter) для навигационных систем GNSS-диапазона 1,575 ГГц, разработанная компанией Motorola. Интегральная схема предназначена для использования в GPS-приемниках с двойным преобразованием частоты и упакована в корпус LQFP48 для поверхностного монтажа. В корпусе ИС находятся смесители, кварцевый генератор, компоненты петли ФАПЧ, петлевой фильтр. Номинальная промежуточная выходная частота ИС равна 4,092 МГц.

### Основные параметры и характеристики преобразователей и смесителей

Эксплуатационные качества преобразователей частоты определяются большим числом показателей. Преобразователь в наиболее общей конфигурации содержит смеситель частот и буферные каскады на всех или некоторых портах компонента. В силу этого основной набор наиболее значимых характеристик смесителей и преобразователей частот совпадает.

Эксплуатационные качества этих компонентов определяются большим числом показателей. Ниже приводятся основные параметры и характеристики, используемые для оценки качества смесителей и преобразователей частоты.

- Диапазон рабочих частот по каждому из портов. Эти характеристики являются главнейшими показателями, которые в значительной степени определяют конечный выбор типа смесителя и преобразователя частот. Типовые серийно выпускаемые смесители имеют максимальные рабочие частоты в диапазоне 100 МГц...100 ГГц. Следует отметить, что, например, компания Farran предлагает смеситель на субгармониках модели WHMB-02 в волноводном исполнении с рабочими частотами 328–500 ГГц.
- Потери преобразования ПП (Conversion Loss, CL). Потери преобразования являются критерием эффективности преобразования сигнала РЧ в сигнал ПЧ. Это отношение уровня (как правило, мощности)

сигнала на выходе компонента к сигналу на входе смесителя, выраженное в дБ.

- Коэффициент преобразования, или коэффициент передачи (Conversion Gain, CG). В англоязычной литературе параметр CG обычно применяют к активным смесителям, а CL — к пассивным. Избыточное усиление смесителя может отрицательно сказаться на динамическом диапазоне РЧ-тракта в целом. В большинстве случаев наличие больших вносимых потерь преобразования смесителя также нежелательно, особенно при использовании пассивных смесителей. Активные смесители обеспечивают коэффициент передачи в диапазоне  $-1...20$  дБ, тогда как типовое значение потерь преобразования пассивных смесителей составляет 5–8 дБ.
- Коэффициент шума (Noise Figure) — это отношение величины сигнал-шум (SNR) на входе компонента к величине сигнал-шум на его выходе, измеренное при  $T = 290$  К. Коэффициент шума пассивных смесителей численно равен потерям преобразования. Коэффициент шума активных смесителей зависит от их схемотехнической реализации и используемых элементов.
- Коэффициент шума двух боковых полос (Double Sideband, DSB) включает шумовые и сигнальные вклады в сигналы РЧ и зеркальных каналов.
- Коэффициент шума одной боковой полосы (Single Sideband, SSB) не включает зеркальный сигнал, но включает шум в зеркальном канале, определяя во многом характеристики компонента на зеркальной частоте и требуемой частоте.
- Уровень и качество сигнала гетеродина (Local Oscillator Drive). Идеальный смеситель должен быть нечувствительным к уровням гетеродинного сигнала и содержащихся в нем кратных гармоник. В реальных устройствах параметры гетеродина должны соответствовать параметрам смесителя. Для пассивных двойных балансных диодных смесителей необходим уровень сигнала гетеродина 5–25 дБм. Активным смесителям требуется уровень гетеродина в пределах  $-20...30$  дБм в зависимости от схемотехнической реализации. Таким образом, проектирование или выбор опорного (гетеродинного) генератора самым тесным образом связаны с выбранным типом смесителя или преобразователя.
- Развязка (изоляция) портов (Port-to-Port Isolations). Развязка представляет собой параметр, характеризующий степень подавления паразитного прохождения сигнала, приложенного к какому-либо входу (порту) компонента, на два других вывода. Единственный сигнал, который должен присутствовать на выходе смесителя или преобразователя, — это сигнал промежуточной частоты. Неидеальность развязки портов приводит, в частности, к возникновению явления самосмещения сигналов (рис. 5), существенно ухудшающего каче-

ство функционирования тракта. Величина развязки зависит от того, является ли смеситель небалансным, простым балансным или двойным балансным. В небалансных смесителях вообще отсутствует развязка между портами. Наилучшую развязку между всеми тремя портами обеспечивают двойные балансные смесители.

- Согласование полных сопротивлений (импедансов) (Impedance Matching). Независимо от того, какой смеситель применяется в системе, активный или пассивный, для получения его оптимальных параметров необходимо выполнить тщательное согласование всех его трех входов (портов) с соответствующими трактами. В активных смесителях в результате рассогласования обычно снижается коэффициент усиления. Пассивные смесители особенно чувствительны к рассогласованию по выходу промежуточной частоты. В результате этого возникают большие потери преобразования, и увеличивается уровень паразитных составляющих преобразования.
- Смещение постоянной составляющей (DC offset) может быть определено как значение напряжения на выходе ПЧ-смесителя, когда смеситель используется как фазовый детектор при подаче на него только сигнала гетеродина. Это — показатель асимметричности смесителя и его правильной схемотехнической реализации, равный нулю для идеального смесителя.
- Нелинейность преобразования, или нелинейные искажения преобразования (Conversion Compression), характеризуется величиной максимального РЧ-сигнала на входе, при котором смеситель находится в линейном режиме.
- Однодецибелной точкой компрессии смесителя называется уровень входного сигнала, при котором потери преобразования смесителя увеличиваются на 1 дБ.
- Динамический диапазон (Dynamic Range). Нижний предел динамического диапазона смесителя определяется его коэффициентом шума, а верхний предел — уровнями компрессии коэффициента передачи, интермодуляционных составляющих и теплового разрушения.
- Точка пересечения третьего порядка (Third Order Intercept Point, TOI). Наиболее нежелательные продукты нелинейности третьего порядка после смешения двух входных РЧ-сигналов с близко расположенными частотами  $f_1$  и  $f_2$  с колебанием гетеродина  $f_{\text{гет}}$  возникают на частотах  $(2f_1 \pm f_2) \pm f_{\text{гет}}$  и  $(2f_2 \pm f_1) \pm f_{\text{гет}}$ . В смесителе с преобразованием частоты вниз наиболее важным является учет комбинационной частоты третьего порядка  $(2f_1 - f_2) - f_{\text{гет}}$  и  $(2f_2 - f_1) - f_{\text{гет}}$  при попадании их в тракт ПЧ. Линейность (Linearity) смесителя зависит от уровня входного сигнала. Смеситель с высокой линейностью имеет высокий TOI. Линейность устройства можно наглядно представить,

построив график его амплитудной характеристики, т. е. зависимость уровня сигнала ПЧ на выходе смесителя от уровня входного РЧ-сигнала.

- Для квадратурных I/Q-смесителей в дополнение к приведенным выше должны быть добавлены два параметра: разбаланс амплитуд (Magnitude imbalance), дБ, и разбаланс фаз (Phase imbalance) квадратурных каналов, градусы.

При решении вопроса, какой из доступных РЧ-преобразователей частоты лучше применить в конкретном изделии, следует учитывать их наиболее важные характеристики:

- диапазон частот ( $f_{\text{вх}}$ ) входного и выходного ( $f_{\text{вых}}$ ) сигналов;
- выходная мощность ( $P_{\text{вых}}$ ) РЧ-сигнала и требуемая мощность гетеродина ( $P_{\text{гет}}$ );
- коэффициент преобразования (Кпр) (Conversion Gain), который рассчитывается как выраженное в дБ отношение выходной РЧ-мощности к входной мощности;
- неравномерность коэффициента преобразования Кпр (Gain Flatness) в диапазоне рабочих частот или неравномерность уровня выходного сигнала;
- уровни нежелательных частотных компонентов в выходном сигнале или степень их подавления, выраженная в дБ относительно уровня полезного сигнала;
- обратные потери (Return loss) — отношение в децибелах падающей мощности (прямо направленной) и отраженной (обратно направленной) мощности;
- коэффициент шума  $K_{\text{ш}}$  (NF) представляет собой выраженное в дБ отношение сигнал-шум на входе компонента, поделенное на отношение сигнал-шум на выходе;
- форм-фактор (Form Factor) — вид корпусирования и конструктивного исполнения компонента.

#### Выбор частотного плана РЧ-устройств

Частотный план ЧП (Frequency Plan) устройства — графически представляемый частотный план устройства — это его предельно упрощенная структурная схема, на которой обязательно показаны устройства генерирования и преобразования сигналов — преобразователи, генераторы, модуляторы, делители и умножители. На плане приводятся номиналы генерируемых и преобразуемых частот и, при необходимости, размещаются устройства фильтрации.

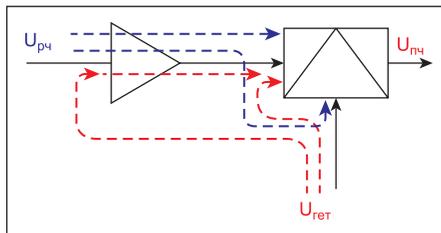


Рис. 5. Влияние неидеальности развязки портов на работу смесителя

Частотный план РЧ-трактов необходимо формировать с учетом ряда факторов:

- требований стандарта — полосы рабочих частот на входе приемника и выходе передатчика; номиналов канальных частот, используемых видов модуляции и т. д.;
  - требований к подавлению внеполосных излучений на выходе передатчика, определяемых стандартом;
  - требований к подавлению сигналов на частотах внеполосного приема;
  - наличия синтезаторов частот, обладающих необходимыми параметрами, диапазона рабочих частот; шага сетки частот; времени установления частоты;
  - сложившейся практики построения структур приемопередатчиков: наличия промышленных фильтров, прежде всего фильтров ПЧ, на необходимые частоты, отдельных функциональных узлов, работающих на определенных частотах, и т. д. Выбор архитектуры РЧ-блока и соответствующих частот его внутренних сигналов должен производиться так, чтобы выполнялись все требования соответствующих стандартов с использованием наименьшего количества компонентов, достижения низкого потребления мощности от источников питания и минимальной стоимости [2]. При этом разработчики, как правило, решают ряд конкретных задач:
  - на начальном этапе проектирования тщательно рассчитывают наличие и величины нежелательных комбинационных составляющих на выходах преобразователей сигналов и учитывают их влияние;
  - минимизируют количество используемых в РЧ-блоке генераторов и синтезаторов частоты, т. к. эти компоненты и особенно внешние ГУН ИС являются достаточно дорогостоящими;
  - минимизируют диапазон перестройки ГУН, чтобы упростить разработку и стоимость используемых генераторов;
  - минимизируют количество используемых дорогих РЧ-фильтров;
  - минимизируют потребляемую РЧ-блоком мощность, тщательно прорабатывая режимы уменьшения энергопотребления (Standby Modes);
  - выбирают правильное соотношение используемых аппаратных и программных средств, учитывая энергопотребление АЦП и применяемого в baseband-тракте процессора ЦСП;
  - при расчетах всех параметров РЧ-блока с некоторым запасом учитываются практические ограничения, накладываемые параметрами имеющихся в распоряжении реальных РЧ-компонентов.
- Частотный план (frequency plan) устройства напрямую зависит от архитектуры и топологии реализуемого РЧ-тракта, количества преобразований вниз и режимов работы, например учета симплектности или дуплектности работы. При комплексном частотном

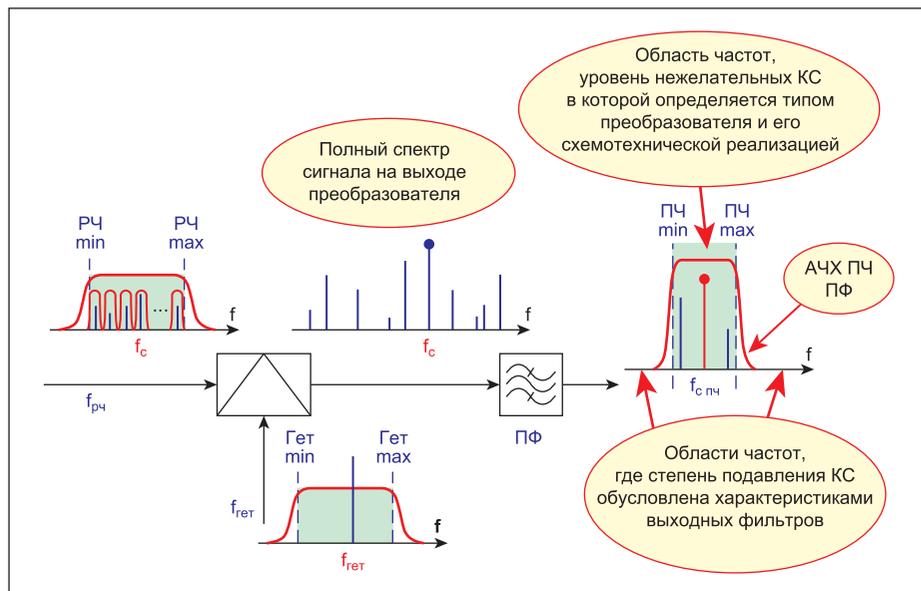


Рис. 6. Частотные спектры преобразователя

планировании необходимо изучить блокирующие сигналы, сигналы на частотах зеркальных каналов и каналы побочного излучения и приема. Эти РЧ-компоненты являются радиосигналами, которые передаются в эфире другим радиооборудованием и могут проникнуть в разные участки приемного РЧ-тракта. Они могут или сразу насытить РЧ-тракты, или взаимодействовать с полезным (формируемым или принимаемым) сигналом, ухудшая качество его обработки.

При преобразовании сигналов в РЧ-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 (Spurious Response).

Вообще говоря, на выходе преобразователя формируется ряд комбинационных составляющих с частотами  $\pm mf_{\text{РЧ}} \pm nf_{\text{Гет}}$ , где  $m$  и  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Комбинационную составляющую принято характеризовать ее порядком, который равен сумме чисел  $m+n$ .

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 узла зависит только от типа преобразователя, используемого активного элемента и его режима (рис. 6).

Особенно острой является проблема подавления нежелательных компонент при преобразовании сигналов в РЧ-блоках устройств мобильной связи, где обрабатываются многоканальные сигналы, в качестве гетеродинов используются широкополосные перестра-

иваемые ГУН, а также в многодиапазонных и многомодовых устройствах. Следует помнить, что в реальных многоканальных радиосистемах, например в мобильной связи, на вход используемых функциональных узлов и, в частности, преобразователей частоты подается многочастотный сигнал, занимающий достаточно широкую полосу частот. Причем сигнал может появиться в любом из рабочих каналов. Для исключения этого явления необходима тщательная проработка частотного плана устройства и выбор таких значений частот гетеродинов и ПЧ, при которых обеспечивается подавление нежелательных компонент до приемлемого уровня.

Определение наличия возможных комбинационных составляющих на выходе преобразователя может быть произведено с помощью номограмм [9]. По осям номограммы откладываются входная РЧ/Гет и выходная ПЧ/Гет частоты преобразователя, нормированные относительно частоты гетеродина Гет.

По этой номограмме можно определить частотный спектр сигнала на выходе преобразователя и найти опасные с точки зрения фильтрации КС. Для определения комбинационных составляющих, совпадающих с полезной КС на выходе преобразователя, следует построить на диаграмме две прямые, проходящие через точки  $f_{\text{РЧ}}/f_{\text{Гет}}$  и  $f_{\text{ПЧ}}/f_{\text{Гет}}$ , и исследовать область вблизи точки их пересечения. Если через точку пересечения проходит одна из прямых, приведенных на диаграмме и соответствующая какой-либо КС, то эта комбинационная составляющая попадает непосредственно в полосу пропускания выходного фильтра и не может быть эффективно подавлена. Использование номограмм позволяет сделать первичное размещение ПЧ — выбор приемлемой области ее значений.

При первичном выборе значения ПЧ следует учитывать, что выбор высокого значения

промежуточной частоты  $f_{\text{ПЧ}}$  облегчает подавление зеркального канала. Однако при выборе низких значений промежуточной частоты обеспечивается более устойчивая работа каскадов ПЧ и высокая избирательность по соседнему каналу. С учетом этого противоречия и происходит выбор значений частот на выходе ПЧ (промежуточных частот).

После первичного выбора на номограмме размещения рабочей области уже можно определить точное значение  $f_{\text{ПЧ}}$ .

В этом случае задача оптимального выбора значения ПЧ считается выполненной:

- обеспечивается отсутствие на выходе преобразователя частот наиболее опасных КС низкого порядка;
- достигнуто наличие наибольших из возможных КС высоких порядков.

Следует отметить, что использование на начальном этапе проектирования номограммы — графического, полного визуального представления частотного плана — позволяет найти разумные решения по ЧП: области с минимальными КС, приемлемые значения частот ПЧ, частоты гетеродинов и т. д.

Дальнейшее детальное проектирование, оптимизация ЧП могут осуществляться уже с использованием специализированных компьютерных программ.

### Наиболее часто употребляемые значения ПЧ

При выборе частотного плана РЧ-блока следует учитывать сложившуюся практику выбора номиналов промежуточных частот ПЧ, используемых в приемопередатчиках различных радиотехнических систем.

- Радиоприемники АМ: 110 кГц, 450 кГц, 455 кГц, 456 кГц, 460 кГц, 465 кГц, 470 кГц, 475 кГц, 480 кГц.
- Радиоприемники ФМ (FM): 262 кГц, 455 кГц, 1,6 МГц, 5,5 МГц, 6,5 МГц, 10,7 МГц, 10,8 МГц, 11,2 МГц, 11,7 МГц, 11,8 МГц, 21,4 МГц, 75 МГц, 98 МГц.
- Радиоприемники с двойным преобразованием частоты: 10,7 МГц (1 ПЧ), 470 кГц (2 ПЧ).
- Системы космической связи (Satellite uplink-downlink equipment), первая ПЧ приемников: 70 МГц, 950–1450 МГц.
- Приемники систем глобального позиционирования GNSS: 61,38 МГц (1 ПЧ) и 4,092 МГц (2 ПЧ).
- Наземное СВЧ-радиооборудование (Terrestrial microwave equipment): 250 МГц, 70 МГц, 75 МГц.
- РЧ контрольно-измерительное оборудование: 310,7 МГц; 160 МГц, 21,4 МГц.
- Спутниковые системы: для коммерческих изделий наиболее часто — 70 или 140 МГц. Профессиональные системы: 1000–2150 МГц, 950–1900 МГц, 1052–1788 МГц, 1100–2150 МГц.

В таблице приведены некоторые значения употребляемых номиналов ПЧ и опорных частот радиооборудования связи.

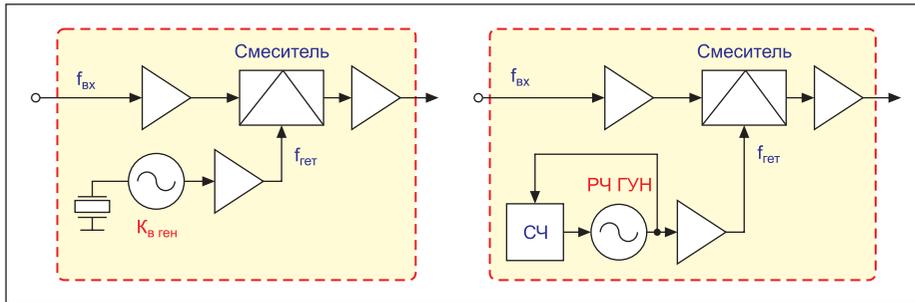


Рис. 7. Структуры кварцевого и синтезаторного преобразователей частоты

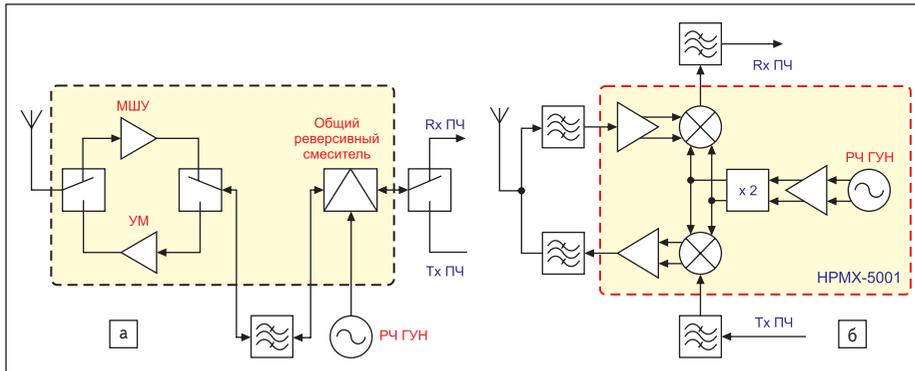


Рис. 8. Примеры использования в структуре приемопередатчика TDD: а) реверсивного преобразователя; б) ИС HPMX-5001 компании Agilent

Таблица. Наиболее употребляемые номиналы ПЧ и опорных частот

Система	ПЧ1, МГц	ПЧ2, МГц	f <sub>оп</sub> , МГц
GSM900	225 (Rx); 270 (Tx)	45 (Rx)	13
GSM900	149 (Rx); 194 (Tx)	52 (Rx)	13
GSM1800 (DCS)	175; 200; 225; 254; 256; 199 (BTS GSM)		200
GSM1900 (PCS)	175; 200; 225; 254; 256; 199 (BTS GSM)		200
CDMA	85,38; 130,38; 183,6; 210,38; 220,38		
WCDMA	120; 150; 160; 190; 380		
DECT	110, 59 / 112,32	10,7	1728
PHS	248,45 / 243,95	10,7	220
CT1	21,4		25
ISM 2,4	110, 59; 112,32	10,7	
ISM 5	10,7; 21,4		
TDMA	83; 86	0,450; 0,455	30
WLAN 5,7 (802.11a)	200 (Rx); 280 (Tx)		
Транкинг 140 МГц	21,721,4	0,45; 0,455	21,25; 21,855
Транкинг 430 МГц	45,1	0,455	21,25

входной сигнал на необходимую частоту в пределах широкого рабочего диапазона. Возможности такого преобразователя не ограничены конкретным, достаточно узким, диапазоном частот, как в большинстве структур преобразователей частоты с повышением и понижением. Для обозначения таких перестраиваемых ПрЧ ряд компаний использует термин «гибкие преобразователи» (agile converters).

## Типы преобразователей частот

Наиболее часто включаемым в структуру преобразователя элементом наряду с собственно смесителем является РЧ-генератор. По методу получения опорного сигнала (waveform function) преобразователи частоты делятся на две группы: синтезаторные преобразователи (synthesized converter) и кварцевые (кварцованные) преобразователи (crystal controlled converter). В синтезаторных преобразователях для получения требуемого опорного колебания применяется синтезатор частот, выполненный, как правило, на основе петель ФАПЧ (активный синтез), в то время как в кварцевых преобразователях для получения требуемой частоты используется кварцевый генератор (рис. 7). Вообще кварцевые преобразователи обладают, как правило, лучшими характеристиками, чем синтезаторные.

Преобразователи РЧ-частот выпускаются в следующих конфигурациях, определяемых соотношением номиналов частот на входе и выходе устройства.

- Преобразователи сигналов вверх по частоте, называемые иногда преобразователями частоты с повышением (Upconverter), или повышающими (ПрЧПов), осуществляют перенос РЧ-сигналов в более высокий частотный диапазон. Вообще стандартным применением повышающих преобразователей является перенос сформированного на ПЧ сигнала на частоту рабочего канала тракта передачи.

- Преобразователи сигналов вниз по частоте (Downconverter), или преобразователи частоты с понижением (ПрЧПон), в своем каноническом применении производят перенос СВЧ-сигналов в определенный диапазон промежуточных частот (ПЧ).
- Сдвоенные, или дуальные (Dual Upconverters/Downconverters), как и реверсивные, или двунаправленные (Reverse Converter) преобразователи частоты, можно использовать для переноса частоты вверх или вниз (с повышением или понижением) в определенном диапазоне по обе стороны от рабочей частоты ПЧ или baseband-сигнала, что для устройства с временным дуплексированием TDD иллюстрируется на рис. 8а. В качестве примера использования реверсивного преобразователя частоты в приемопередающем устройстве системы с временным дуплексированием TDD на рис. 8б показано применение преобразователя HPMX-5001 компании Agilent. Данная модель преобразователя позволяет осуществить перенос сигнала РЧ-диапазона 1,5–2,5 ГГц в тракте приема вниз на частоту ПЧ, как и преобразование с повышением частоты ПЧ-РЧ в тракте передачи. Следует отметить, что в данной ИС (Upconverter/Downconverter) для преобразования сигналов используются все-таки отдельные узлы приема и передачи, а не полностью реверсивный общий узел, показанный на рис. 8а.
- Перестраиваемые преобразователи (variable converter) могут преобразовывать

## Литература

1. Maas S. A. Microwave Mixers. Norwood, MA: Artech House. 1986.
2. Hassun R. Frequency Converters: Understanding the Benefits of Simple and Complex Architectures // Microwave Journal. 2006, October 13. Vol. 49. Issue 10 (2006-01).
3. Morrissey J., Walsh P. High Performance Integrated 24 GHz FMCW Radar Transceiver Chipset for Auto and Industrial Sensor Applications. [www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/High-Performance-Integrated-24-GHz-FMCW-Radar-Transceiver-Chipset.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/High-Performance-Integrated-24-GHz-FMCW-Radar-Transceiver-Chipset.pdf)
4. Kapoor A., Toledano A. The Changing Landscape of Frequency Mixing Components. [www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/The-Changing-Landscape-of-Frequency-Mixing-Components.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/The-Changing-Landscape-of-Frequency-Mixing-Components.pdf)
5. Cornwell G., Gupta Ch. Investigate Wideband Frequency Converters // Microwaves & RF. 2016. April.
6. Hindle P. Mil SatCom Capacity Crunch: The BUC Stops Here // Microwave Journal. 2009, August 1. [www.microwavejournal.com/articles/8313-mil-satcom-capacity-crunch-the-buc-stops-here](http://www.microwavejournal.com/articles/8313-mil-satcom-capacity-crunch-the-buc-stops-here)
7. Dunsmore J. P. Testing satellite frequency converters // Microwave Journal. 2007, August. Vol. 50. Issue 8.
8. Aycin E. Satcom Transceiver Delivers Linear 13 W. [www.nardamiteq.com/product-spec/NARDA\\_finalePrint.pdf](http://www.nardamiteq.com/product-spec/NARDA_finalePrint.pdf)
9. Манасевич В. Синтезаторы частот (Теория и проектирование): пер. с англ. / Под ред. А. С. Галина. М.: Связь, 1979.