

# «Способы передачи электрической энергии: СВЧ преобразователи»

## Преобразователи СВЧ

Преобразователи СВЧ-предназначены для линейного переноса спектра сигнала из одной области радиочастотного диапазона в другую. Линейным называют перенос спектра без изменения вида и без искажений параметров модуляции сигнала. В супергетеродинных приемниках перенос спектра производится на промежуточную частоту. Преобразование частоты сигнала можно получить при подаче принятого сигнала на активный элемент радиотехнического устройства (транзистор, диод, микросхему, варикап), параметры которого периодически изменяются во времени с частотой, отличной от частоты принимаемого сигнала. Изменение параметров производится с использованием специального генератора – гетеродина.

Преобразователем частоты, в состав которого входят три функциональные группы (смеситель, гетеродин, фильтр), иногда ошибочно называют смеситель.

## Примечание

Преобразователь частоты применяется в [радиоприемниках](#), построенных по [супергетеродинной](#) схеме, в устройствах генерирования и формирования сигнала ( в [радиопередатчиках](#), [синтезаторах частот](#)), различных [радиоизмерительных приборах](#) (селективных [вольтметрах](#), [анализаторах спектра](#), [модулометрах и девиометрах](#), установках для измерения [ослаблений](#)).

Например, в супергетеродинном радиоприемнике с фиксированным значением [промежуточной частоты](#) перенос полосы радиочастот сигнала вниз (реже — вверх) позволяет применять неперестраиваемый сложный [фильтр основной селекции](#) с высокой прямоугольностью [частотной характеристики](#) для подавления помех по соседнему каналу (то есть качественно улучшить частотную избирательность по сравнению с [радиоприемником прямого усиления](#)), а также

использовать [усилитель промежуточной частоты](#), более эффективный по сравнению с диапазонным усилителем радиочастоты. Перестройка частот такого радиоприемника осуществляется изменением частоты входящего в состав преобразователя частоты гетеродина.

### **Устройство и принцип действия**

Функционально преобразователь частоты включает в себя три составные части — гетеродин, смеситель и выходной [полосовой фильтр](#). Гетеродин представляет собой генератор сигнала синусоидальной формы, настраиваемый, либо с фиксированной частотой. Смеситель — основная часть преобразователя, нелинейное электронное устройство, в котором происходит образование нужного спектра. Принцип действия смесителя состоит в том, в результате нелинейных процессов образуются комбинационные [гармоники](#), частоты которых равны разностям или суммам частот гармоник входных сигналов, либо частот кратных частотам исходных гармоник. Амплитуды полученных комбинационных гармоник пропорциональны амплитудам исходных, таким образом, каждый из наборов комбинационных гармоник (разностных, суммарных, разностных и суммарных кратным) эквивалентен спектру входного сигнала, сдвинутому по частоте. Полосовой фильтр предназначен для селекции нужного набора гармоник, обычно выполнен по стандартной схеме полосового фильтра на LC-элементах.

Конструктивно преобразователь частоты может быть выполнен в виде единого устройства, в том числе на интегральной микросхеме с дополнительными элементами, в виде двух блоков (блок гетеродина и блок смесителя с фильтром) либо, в некоторых случаях, в разнесённом виде, например, в установках для измерения ослаблений смеситель и фильтр представляют собой обособленные устройства, а в качестве гетеродина используется сторонний [измерительный генератор](#), не входящий в комплект установки.

### **Характеристики преобразователей частоты**

- По частотным свойствам возможны два варианта преобразователей

- С перестраиваемым гетеродином и фиксированным значением несущей выходного сигнала — наиболее распространённый вариант, используемый в радиоприёмных и измерительных устройствах. Частотными параметрами в этом случае являются: диапазон перестройки гетеродина (и следовательно диапазон входных сигналов) и значение несущей выходного сигнала (ПЧ)
- С фиксированным гетеродином — используется в специальных случаях, в качестве частотных параметров при этом будут: допустимые значения частоты входного сигнала и значение величины переноса спектра
- Внутренние параметры преобразователя зависят от типа нелинейного элемента в смесителе
- Крутизна преобразования — отношение амплитуды выходного тока (при закороченном выходе) к амплитуде напряжения входного сигнала
- Внутренний коэффициент усиления — отношение амплитуды напряжения ПЧ к амплитуде напряжения входного сигнала
- Коэффициент шума преобразователя




## **Диапазон СВЧ**

Развитие систем связи идет в направлении внедрения сложных и цифровых сигналов, повышения скорости передачи цифровых потоков, что в свою очередь приводит к расширению спектра передаваемых частот и необходимости использования диапазона сверхвысоких частот (до 100 ГГц). По международным стандартам к диапазону СВЧ относят сантиметровый диапазон волн (3 ... 30 ГГц), но в обиходе к этому диапазону причисляют области метровых (ОВЧ), дециметровых (УВЧ) сантиметровых (СВЧ) и миллиметровых (КВЧ) волн. Нижняя граница СВЧ диапазона определяется невозможностью использования колебательных систем с сосредоточенными постоянными. На частотах выше 300

МГц катушка индуктивности колебательного контура вырождается в один неполный виток, а требуемая емкость контура становится соизмеримой с входной емкостью транзистора совместно с емкостью монтажа. Контур превращается в отрезок линии. В диапазоне СВЧ используются пассивные элементы с распределенными параметрами, передача энергии с помощью полых труб (волноводов), конструкция активных устройств (усилителей, генераторов) с непосредственным энергетическим обменом между электронным потоком и электромагнитным полем колебательной системы. Верхняя граница СВЧ диапазона определяется близостью к тепловому излучению (длинным инфракрасным волнам) где требуются иные подходы к генерированию, усилению и передаче электромагнитной энергии.

### **Элементная база СВЧ**

В приемниках СВЧ приходится применять совершенно другую элементную базу и материалы для основных узлов. В качестве резонансных систем применяются отрезки коаксиальных или микрополосковых линий и объемные резонаторы. Общим свойством всех этих элементов является многоволновость – способность резонировать на большом количестве собственных частот. Для создания широкодиапазонных фильтров в диапазонах сантиметровых и миллиметровых волн в настоящее время применяют высокодобротные монокристаллические ферритовые резонаторы (добротность 5000 ... 10 000), которые допускают механическую перестройку в широком диапазоне частот. Большое распространение получили резонаторы на монокристаллах железо-иттриевого граната (ЖИГ-сферы), имеющие диаметр 0,3 ... 1 мм. На ЖИГ резонаторах разработаны фильтры для диапазона частот от 2 до 40 ГГц. Усиление СВЧ колебаний обычным усилительным каскадом, включающим в себя отдельную резонансную систему и усилительный прибор возможно на частотах метрового и дециметрового диапазонов. На частотах сантиметрового диапазона часто используются усилительные элементы, работающие на новых принципах усиления. Обычные лампы и транзисторы не обеспечивают устойчивую работу в

диапазоне СВЧ. В качестве элементной базы могут использоваться СВЧ транзисторы, диоды Ганна, лавинопролетные и туннельные диоды, варакторные диоды полупроводниковых параметрических усилителей, лампы бегущей волны, клистроны и некоторые другие. Основным источником помех в СВЧ диапазоне являются собственные шумы приемника. Поэтому к усилителям СВЧ предъявляются жесткие требования с точки зрения обеспечения малых собственных шумов. Наименьший уровень шумов имеют квантовые парамагнитные усилители. В схемах гетеродинов сантиметрового диапазона волн используются отражательные клистроны, малогабаритные и маломощные магнетроны, лампы обратной волны и другие электронные приборы. В смесителях приемников применяются СВЧ транзисторы и полупроводниковые диоды. Кроме общих требований к элементной базе и устройствам СВЧ аппаратуры предъявляется ряд специфических требований:  высокая точность изготовления элементов, обусловленная зависимостью электрических параметров устройств от их геометрических размеров;  применение металлов с высокой проводимостью и высокое качество обработки токонесущих поверхностей с целью получения минимальных активных потерь;  отсутствие на токонесущих поверхностях окислов и загрязнений, приводящих к росту диэлектрических потерь;

Элементная база приемников СВЧ интенсивно развивается. Большие достижения в разработке малощумящих СВЧ транзисторов привели к возможности их широкого использования в сигнальном тракте приемника.

### **Шумы преобразователей частоты**

Преобразователь частоты является одним из первых каскадов приемника, поэтому его шумы могут существенно влиять на общий коэффициент шума и, следовательно, на реальную чувствительность РПрУ. Причины шумов преобразователя те же, что и в других каскадах. Для определения коэффициента шума преобразователя частоты на невзаимном элементе можно использовать эквивалентную шумовую схему, подобную шумовой схеме селеативного усилителя и полученные на ее основе соотношения. При этом параметры

смесительных каскадов должны соответствовать режиму преобразования. Следует также учитывать влияние побочных каналов приема на коэффициент шума. Если избирательность преселектора на частотах побочных каналов недостаточно велика, то части спектра, совпадающие с побочными каналами, после преобразования попадут в полосу пропускания тракта промежуточной частоты и общий шум на выходе возрастет. Это повышение уровня шума можно оценить эквивалентным увеличением эффективной шумовой полосы приемника. Основное влияние на увеличение шума оказывает зеркальный канал, но если избирательность по зеркальному каналу не менее 10 дБ, то его влиянием можно пренебречь. При расчетах часто полагают, что коэффициент шума транзисторных преобразователя частоты в 1,5...2 раза превышает коэффициент шума усилительных каскадов, работающих на тех Преобразователи частоты 127 же транзисторах. Современные транзисторные преобразователи СВЧ имеют шумовую температуру порядка 1000...1500 К. В диапазоне СВЧ часто используются диодные смесители В диодном преобразователе частоты шумовые процессы вызываются теми же причинами, что и в транзисторном, но вследствие взаимности преобразовательного элемента они приобретают более сложный характер. Шумовой ток диода содержит небольшую тепловую составляющую, но в основном определяется дробовыми флуктуациями носителей через р-п- переход. Этот ток создает напряжение во входной и выходной цепях смесителя. Кроме того, входная и выходная цепи имеют компоненты токов тепловых шумов. Шум входной цепи в результате прямого преобразования создает напряжение промежуточной частоты на выходе и добавляется к выходным шумам контура и диода. Этот шум вследствие обратного преобразования переносится в полосу частот сигнала и создает соответствующее напряжение на входном контуре, которое затем в результате прямого преобразования переносится обратно в полосу пропускания УПЧ, что увеличивает шумы диодного преобразователя. Помимо рассмотренных, в преобразователях СВЧ существуют шумы гетеродина, имеющие широкий спектр. Мешающее действие оказывают составляющие вблизи частоты сигнала и зеркального канала, которые в результате преобразования попадают в

полосу пропускания тракта промежуточной частоты. На сантиметровых и миллиметровых волнах шумы гетеродина могут приводить к увеличению коэффициента шума преобразователя в 2 и более раз. Эффективной мерой уменьшения шумов гетеродина является применение балансных преобразователей частоты. Коэффициент шума линейного тракта приемника с преобразователем можно определить по формуле. Если преселектор состоит только из входной цепи без усилителя частоты сигнала, то шумы преобразователя сказываются сильнее. У диодных преобразователей частоты на коэффициент шума приемника заметное влияние может оказать шум УПЧ. Его первые каскады должны быть малошумящими.

### **Малошумящие транзисторные усилители СВЧ**

К малошумящим усилителям СВЧ предъявляется комплекс достаточно жестких и в известной мере противоречивых требований. Они должны обладать: ☐ очень малым коэффициентом шума; ☐ высоким коэффициентом усиления; ☐ широким динамическим диапазоном; ☐ равномерной АЧХ и линейной ФЧХ в широкой полосе частот. Полоса усиливаемых частот делается достаточно широкой, чтобы исключить необходимость перестройки усилителя. В настоящее время применительно к системам радиосвязи, радиовещания и телевидения в наибольшей мере этим требованиям удовлетворяют транзисторные малошумящие усилители. Используются: ☐ биполярные транзисторы СВЧ на частотах до 7 ГГц; ☐ полевые транзисторы с затвором Шоттки до миллиметрового диапазона включительно. Свойства усилителя диапазона СВЧ описываются параметрами, отличающимися от параметров усилителей умеренно высоких частот, что связано с особенностью измерений на СВЧ. Рассматриваются: ☐ входные и выходные коэффициенты отражения  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ ; ☐ функции усиления и отражения мощности  $K_p$  и  $K_{от}$ . Важную роль играют шумовые параметры (коэффициент шума, шумовое число, мера шума).

## Структурная схема однокаскадного усилителя СВЧ

Усилительный прибор представлен в виде четырехполюсника, описываемого волновыми параметрами матрицы рассеяния (системой  $S$  – параметров). Эти параметры могут быть определены методом измерения падающих и отраженных волн или рассчитаны по известным классическим  $Y$ -параметрам усилительного прибора. Волновые уравнения относительно комплексных амплитуд падающих и отраженных волн позволяют определить характеристики усилителя радиосигналов диапазона СВЧ при различных параметрах источника сигнала и нагрузки. Усилитель согласуется по входу и выходу с источником сигнала и с нагрузкой ( $R_{\Gamma} = \rho_0$ ,  $R_{\text{н}} = \rho_0$ ). Реальные входной и выходной СВЧ тракты имеют в режиме согласования с источником сигнала и с нагрузкой волновые сопротивления порядка 50 Ом, которые отличаются от значений, необходимых для нормальной работы транзистора. Поэтому усилитель должен включать в себя согласующие цепи СЦ1 и СЦ2, трансформирующие значения сопротивлений.

Важнейшим условием нормальной работы транзисторного усилителя СВЧ является его устойчивость. Всегда существующие в усилителе внутренние и внешние паразитные обратные связи приводят к тому, что на столь высоких частотах транзистор в значительной степени утрачивает свойства невзаимности, и при определенных соотношениях нагрузочных сопротивлений  $Z_1$  и  $Z_2$  усилитель может самовозбудиться. Самовозбуждение возможно в случае, когда  $S$ -параметры таковы, что активная составляющая входного или выходного сопротивления транзистора становится отрицательной, причем входное сопротивление зависит от его нагрузки, а выходное — от сопротивления источника сигнала, пересчитанного к его входным зажимам. Отрицательному активному сопротивлению соответствует коэффициент отражения, модуль которого больше единицы. Усилитель считается безусловно (абсолютно) устойчивым в заданном диапазоне частот, если он не возбуждается в этом диапазоне при подключении к транзистору любых комплексных сопротивлений  $Z_1$  и  $Z_2$  с положительными активными составляющими. Если существуют значения сопротивлений  $Z_1$  и  $Z_2$ , при которых усилитель способен самовозбудиться, он является потенциально устойчивым



(условно устойчивым, потенциально неустойчивым). Для потенциально устойчивого усилителя важно определить области допустимых сопротивлений источника сигнала и нагрузки  $Z_1$  и  $Z_2$  на зажимах транзистора, при которых усилитель будет работать устойчиво. Если эти сопротивления выбраны правильно, то активные составляющие соответственно выходного и входного сопротивлений транзистора положительны, и модули коэффициентов отражения от его выхода и входа меньше единицы. При разработке усилителей СВЧ стремятся использовать транзисторы, находящиеся в области безусловной устойчивости. Если транзистор не удовлетворяет условиям абсолютной устойчивости, его переводят в эту область последовательным или параллельным включением стабилизирующего резистора в выходную цепь. Стабилизирующий резистор компенсирует отрицательную действительную часть выходного сопротивления во всем частотном диапазоне, вследствие чего эквивалентный активный элемент становится абсолютно устойчивым. Соответствующим выбором параметров согласующих цепей СЦ1 и СЦ2 можно обеспечить различные режимы работы усилителя. Наиболее часто используются режимы экстремального усиления и минимального шума. Реализуемый номинальный коэффициент усиления мощности определяется отношением мощности в нагрузке к номинальной мощности источника сигнала, т.е. к максимальной мощности, которую этот источник может отдать в комплексно-сопряженную нагрузку. Коэффициент усиления имеет экстремальное значение в условиях одновременного комплексно-сопряженного согласования транзистора по входу и выходу, при котором коэффициенты отражения на его входе и выходе равны нулю. Важнейшим показателем транзисторных усилителей СВЧ является коэффициент шума, уменьшение которого часто составляет основную задачу проектирования. Коэффициент шума усилителя зависит от сопротивления источника сигнала, приведенного к зажимам транзистора, и может быть минимизирован выбором этого сопротивления. Обеспечение возможно меньшего коэффициента шума называют оптимальным рассогласованием по входу.

В усилителях на биполярных транзисторах используется преимущественно схема включения с общим эмиттером, при которой обеспечивается безусловная устойчивость в широком диапазоне частот. В широкополосных усилителях применяют включение с ОЭ, в узкополосных - с ОЭ и ОБ. Усилители на полевых транзисторах с затвором Шоттки строятся по схеме с общим истоком. Поскольку в узкополосных усилителях важнейшим параметром является коэффициент шума, согласующие цепи СЦ таких усилителей должны иметь минимум активных потерь, поэтому их строят на реактивных элементах, как правило, с распределенными параметрами. Обычно узкополосные согласующие цепи выполняются в виде Г-образных звеньев или других комбинаций из отрезков микрополосковых линий, причем широко используются короткозамкнутые и разомкнутые шлейфы и четвертьволновые трансформаторы полных сопротивлений. В качестве примера вспомним, что четвертьволновая короткозамкнутая линия без потерь имеет бесконечно большое входное сопротивление, а такая же разомкнутая на конце линия – бесконечно малое.

### **Принципиальная схема однокаскадного узкополосного маломощного усилителя**

Транзистор включен по схеме с общим истоком. Цепь согласования СЦ1 образована отрезками микрополосковых линий длиной  $l_1, l_2$ , согласующая цепь СЦ2 - отрезками  $l_3, l_4$ . В общем случае волновые сопротивления линий не одинаковы, отрезки  $l_1, l_3$  образуют короткозамкнутые шлейфы. Стабилизирующее сопротивление  $R_{ст}$  по высокой частоте подключено параллельно выходным зажимам транзистора. Для формирования АЧХ узкополосных маломощных усилителей можно использовать фильтры сосредоточенной избирательности на входе или на выходе. Применяются также цепи отрицательной обратной связи из реактивных элементов.

Схема однокаскадного узкополосного маломощного усилителя СВЧ. Поскольку коэффициент усиления транзистора уменьшается с ростом частоты, вопросы согласования в широкополосных усилителях решают на верхней частоте рабочего

диапазона. Возникающее при этом избыточное усиление на нижних частотах устраняется реактивными или диссипативными (поглощающими) выравнивающими цепями.

### **Балансная схема усилителя СВЧ**

Противоречие между согласованием по мощности и рассогласованием по шумам в одном каскаде в значительной мере преодолевается в балансной схеме, которая в простейшем случае содержит два квадратурных направленных ответвителя: НО1 делит пополам мощность входного сигнала и подает ее на входы двух одиночных транзисторных каскадов, в НО2 усиленные мощности суммируются в общей нагрузке. В рассматриваемой схеме в качестве делителя и сумматора мощности применены часто используемые двухшлейфовые направленные ответвители, образованные из четвертьволновых отрезков микрополосковых линий. В плечах НО1 сигналы сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ , в плечах 2 обоих НО, куда мощность теоретически поступать не должна, включены согласованные балластные сопротивления. Поступающие на входы 3 и 4 НО2 усиленные сигналы со сдвигом фаз  $90^\circ$  суммируются в плече 1.

Коэффициент усиления балансного усилителя равен коэффициенту усиления одиночного, его динамический диапазон почти вдвое шире, чем у одиночного. Анализ показывает, что даже если одиночные усилители по отдельности согласованы плохо, балансный усилитель оказывается практически идеально согласованным по входу и выходу, что облегчает создание многокаскадных усилителей. В настоящее время транзисторные маломощные усилители СВЧ изготавливаются преимущественно в виде гибридных интегральных микросхем с навесными корпусными и бескорпусными активными элементами. Усилители в виде полупроводниковых интегральных микросхем уступают гибридным по шумовым показателям и повторяемости параметров. Полосы усиления составляют 4...80 %, коэффициенты усиления на каскад 4... 15 дБ (типичные значения 5...8 дБ), коэффициенты шума 2...6 дБ (шумовая температура 170...870 К), динамический диапазон 80...90 дБ. Значительное улучшение шумовых

показателей обеспечивается охлаждением усилителей до температуры жидкого азота (77 К), водорода (20 К) или гелия (4,2 К). Так, усилители на полевых транзисторах с затвором Шоттки, охлаждаемые до температуры жидкого водорода, имеют шумовую температуру 30...50 К (коэффициент шума 0,4...0,7 дБ). Однако применение криогенной системы значительно ухудшает массогабаритные показатели приемников, ведет к повышению стоимости и потребления энергии, снижению надежности.

### **Транзисторные преобразователи СВЧ**

В диапазоне СВЧ биполярные транзисторы используются как смесители преобразователей частоты до частот 4...6 ГГц, на более высоких частотах лучшие показатели имеют преобразователи на полевых транзисторах с затвором Шоттки (ПТШ). Как уже упоминалось, для преобразования частоты используют как полевые, так и биполярные транзисторы. Преобразование частоты в смесителях происходит вследствие периодического изменения крутизны характеристики прямой передачи под действием напряжения гетеродина. Возможны различные варианты схем подачи напряжения сигнала и гетеродина на смесительные элементы. Суть работы на гетеродине на полевом транзисторе. Напряжение сигнала подано в цепь затвора, а напряжение гетеродина – в цепь истока. По сигналу получается схема с общим истоком, а для гетеродина – схема с общим затвором. Этим достигается хорошая развязка цепей сигнала и гетеродина. Развязывать цепи сигнала и гетеродина необходимо по следующим причинам: • необходимо исключить взаимное влияние настроек сигнального и гетеродинного контуров; • необходимо исключить излучение напряжения гетеродина антенной. У полевого транзистора сток-затворная характеристика квадратична, поэтому зависимость крутизны этой характеристики  $Y_{21}$  от напряжения между затвором и истоком линейна. Исходное смещение на затворе  $U_{30}$  берут равным половине напряжения отсечки, а амплитуду напряжения гетеродина  $U_{\Gamma}$  равной  $U_{30}$ , чтобы полностью использовать линейный участок изменения крутизны и не заходить в область появления токов затвора. При этом Преобразователи частоты 130

амплитуда первой гармоники крутизны  $(Y_{21})_1 = 0,5Y_{21\max}$ . Крутизна преобразования  $Y_{пр21} = 0,5(Y_{21})_1 = 0,25 Y_{21\max} = 0,5Y_{21}(U_{30})$ . Следовательно, крутизна преобразования в 2 раза меньше крутизны в режиме усиления при том же напряжении смещения на затворе  $U_{30}$ . В рассмотренном режиме без отсечки благодаря линейной зависимости крутизны характеристики от напряжения между затвором и истоком  $Y_{21}(U_3)$  амплитуды высших гармоник крутизны равны нулю, следовательно, будет только два побочных канала приема: зеркальный и прямого прохождения. Напряжения сигнала и гетеродина подаются на разные затворы. В этой схеме преобразование частоты происходит потому, что при изменении напряжения на гетеродинном затворе изменяется крутизна сток-затворной характеристики по сигнальному затвору. Постоянное смещение на базе и амплитуду напряжения гетеродина часто выбирают таким образом, чтобы транзистор работал без отсечки тока. Если рабочая точка не выходит за пределы линейного изменения крутизны проходной характеристики транзистора  $Y_{21}(U_{БЭ})$ , то зависимость  $Y_{21}(t)$  близка к гармонической, что уменьшает количество побочных каналов приема. Амплитуда напряжения гетеродина при этом имеет порядок 100 ... 150 мВ. При увеличении напряжения гетеродина возникает работа с отсечкой тока, что позволяет увеличить крутизну преобразования и, соответственно, коэффициент передачи смесителя. В этом режиме также уменьшается зависимость крутизны преобразования от амплитуды напряжения гетеродина. Недостатком такого режима является увеличение числа побочных каналов приема за счет преобразования частоты сигнала по гармоникам частоты гетеродина. Амплитуду напряжения сигнала на входе смесителя устанавливают не более 5 мВ, что обеспечивает линейность его работы по входному сигналу. При этом отсутствуют полужеркальные каналы приема. Аналитический расчет параметров преобразователей частоты на биполярных транзисторах возможен с использованием экспоненциальной аппроксимации характеристик. Крутизна преобразования транзисторов примерно в 1,5 ... 2 раза меньше крутизны характеристики в усилительном режиме, входные и выходные сопротивления транзисторов в режиме преобразования приблизительно в 1,5...2 раза больше, чем

в режиме усиления, а входные и выходные емкости в режиме усиления и преобразования фактически одинаковы. Хорошая развязка цепей сигнала и гетеродина и высокая устойчивость против самовозбуждения в широком диапазоне частот достигаются в каскодных смесителях. В диапазоне СВЧ их следует рассматривать как эквивалентные схемы, так как в реальных конструкциях СВЧ резонансные цепи выполняются в виде цепей с распределенными параметрами (отрезков линий или объемных резонаторов).

### **Диодные преобразователи частоты**

В диапазоне СВЧ их следует рассматривать как эквивалентные схемы, так как в реальных конструкциях СВЧ резонансные цепи выполняются в виде цепей с распределенными параметрами (отрезков линий или объемных резонаторов). Если частота гетеродина находится в пределах полосы пропускания входного (сигнального) контура, то сопротивление этого контура для напряжения гетеродина достаточно велико, и может быть использована схема с параллельным соединением сигнальной и гетеродинной цепей. Если частота гетеродина выходит за пределы полосы пропускания входного контура, целесообразно использовать последовательное соединение. Для создания дополнительного смещения на диоде в схему может быть включено постоянное напряжение  $E$ . За счет дополнительного смещения обеспечивается режим емкостного преобразования частоты. Полная эквивалентная схема диода в общем случае содержит активную проводимость  $g$  и емкость  $p$ - $n$  перехода  $C$ , индуктивность  $LS$  и сопротивление  $rS$  соединительных проводников, а также емкость держателя диода  $CD$ . У диодов, предназначенных для преобразования частоты в диапазонах дециметровых и сантиметровых волн,  $LS$  и  $rS$ , очень малы. Их можно не учитывать и пользоваться более простой схемой, полагая емкость диода равной сумме емкости  $C$   $p$ - $n$  перехода и  $CD$ . Изменение активной проводимости и емкости диода под воздействием напряжения гетеродина в отсутствие дополнительного смещения Диод преобразователя частоты используется в одном из следующих режимов: напряжение гетеродина изменяется преимущественно в области прямого тока. В преобразователе частоты применяется диод с малой емкостью. В этом случае

главную роль играет нелинейная резистивность диода. Такой преобразователь частоты называется резистивным; используется закрытый переход диода. В преобразователе частоты применяется диод со сравнительно большой нелинейной емкостью, т.е. варикап. При этом резистивность проявляется слабо. Такой преобразователь частоты называется емкостным. В отличие от транзисторных преобразователей частоты, в которых в основном проявляется эффект прямого преобразования частоты, работа диодного преобразователя частоты описывается уравнениями прямого и обратного преобразования. В случае неинвертирующего преобразования (частота сигнала выше частоты гетеродина) они записываются в виде  $I_{\text{п}} = Y_{\text{пр} 21} U_{\text{с}} + Y_{\text{пр} 22} U_{\text{п}} ; I_{\text{с}} = Y_{\text{пр} 11} U_{\text{с}} + Y_{\text{пр} 12} U_{\text{п}} .$  Преобразователи частоты в случае инвертирующего преобразования (частота сигнала ниже частоты гетеродина) они записываются в виде  $I_{\text{п}} = Y_{\text{пр} 21} U_{\text{с}} * + Y_{\text{пр} 22} U_{\text{п}} ; I_{\text{с}} = Y_{\text{пр} 11} U_{\text{с}} + Y_{\text{пр} 12} U_{\text{п}} * .$  Вариант емкостного преобразователя частоты мы рассмотрим в главе о параметрических усилителях. Для резистивного диодного преобразователя, пренебрегая емкостями, нетрудно получить параметры преобразования в виде  $Y_{\text{пр} 21} = Y_{\text{пр} 12} = G_{\text{пр}} ; Y_{\text{пр} 11} = Y_{\text{пр} 22} = G_0 .$  Здесь  $G_{\text{пр}} = 0.5 G_1$  – преобразующая проводимость (или крутизна преобразования), равная при простом преобразовании половине амплитуды первой гармоники изменения крутизны характеристики диода, а  $G_0$  – постоянная составляющая изменения проводимости диода. Коэффициентом передачи мощности диодного смесителя называют отношение мощности, выделяемой в нагрузке, к номинальной мощности источника сигнала. При оптимальном выборе коэффициентов включения  $m_1$  и  $m_2$  коэффициент передачи мощности равен  $K_{\text{Рmax}} = \mu_{\text{пр} 1} + 1 - \mu_{\text{пр} 2}^2 .$  Здесь  $\mu_{\text{пр}} = G_{\text{пр}} / G_0 .$  Реально у современных резистивных диодных преобразователей частоты  $K_{\text{Рmax}} = 0.2 \dots 0.4.$  По величине коэффициента передачи, по уровню интермодуляционных искажений, по динамическому диапазону и по шумовым характеристикам диодные смесители уступают транзисторным, тем не менее, они широко применяются в диапазоне СВЧ. В преобразователях частоты используют следующие типы диодов: точечные диоды, образованные контактом металл-

полупроводник; диоды с барьером Шотки, образованным напылением металла на полупроводник; туннельные диоды; обращенные диоды. Преобразователь на туннельном диоде может иметь коэффициент передачи больше единицы вследствие отрицательной проводимости диода в зоне туннельного эффекта, однако для него характерны малая стабильность параметров преобразования и склонность к самовозбуждению. Кроме того, Преобразователи частоты 136 туннельные и обращенные диоды имеют малую энергетическую прочность и технологически сложны в изготовлении. Преобразователи на диодах с эффектом Шотки отличаются высокой надежностью работы, низкой относительной шумовой температурой, хорошей повторяемостью параметров при массовом производстве. Это обеспечивает их широкое применение в современной радиоэлектронной аппаратуре.

### **Многократное взаимодействие колебаний комбинационных частот**

Для преобразователей СВЧ характерно многократное взаимодействие колебаний комбинационных частот. В частности, возникают эффекты, обусловленные обратными и вторичными преобразованиями. Рассмотрим проявление этих эффектов на примере смесителя с разностной частотой  $f_{\text{ПР}} = |f_{\text{Г}} - f_{\text{С}}|$ . Спектры частот при преобразовании частоты:  $f_{\text{Г}}$  - частота гетеродина,  $f_{\text{С}}$  - частота сигнала,  $f_{\text{ПР}}$  - промежуточная частота разностного преобразования,  $f_{\text{З}}$  - частота зеркального канала,  $f_{\text{СЧ}}$  - суммарная частота сигнала и гетеродина.

В диапазоне СВЧ наряду с прямым преобразованием частоты имеет место обратное преобразование: выходное напряжение промежуточной частоты преобразуется во входное напряжение сигнальной и зеркальной частот. В результате вторичного преобразования входное напряжение зеркальной частоты, возникшее при обратном преобразовании, образует на выходе смесителя колебание с преобразованной частотой, равной промежуточной. Фаза этого колебания зависит от многих факторов и, как правило, отличается от фазы напряжения промежуточной частоты, получаемого при основном преобразовании, что может приводить к появлению частотных и фазовых искажений сигнала.



Возникновение колебаний зеркальной частоты в смесителе возможно и без обратного преобразования из-за непосредственного взаимодействия колебаний сигнальной частоты и второй гармоники гетеродина  $2f_{\Gamma} - f_C = f_3$ . Далее колебания зеркальной частоты преобразуются на промежуточную частоту приемника. Оказывают свое влияние колебания суммарной частоты сигнала и гетеродина  $f_{CЧ} = f_{\Gamma} + f_C$ , которые образуются в результате прямого преобразования на выходе смесителя. В результате обратного преобразования они создают на входе колебания с частотой сигнала  $f_C = f_{CЧ} - f_{\Gamma}$ , которые в результате вторичного преобразования попадают на промежуточную частоту приемника.

Для предотвращения частотных и фазовых искажений из-за влияния колебаний зеркальной частоты и суммарной частоты применяют смесители с использованием энергии комбинационных частот путем отражения или поглощения этих колебаний в специальных фильтровых схемах.

### **Интегральные приемные СВЧ модули**

Приемным модулем называется конструктивно и функционально законченный блок, выполняющий функции усиления, преобразования частоты, фильтрации и обработки сигналов. Интегральные модули объединяют несколько интегральных функциональных узлов: усилитель, фильтр, смеситель. Они не содержат разъемных соединений, малогабаритны и надежны.

Этот модуль выполняет функции линейной части приемного тракта. Он может использоваться в станциях радиосвязи, на радиорелейных линиях связи и т. д. В радиолокационных станциях используются приемопередающие модули, объединяющие передатчик и приемно-усилительную часть радиоприемника.

Сигнал генератора поступает на циркулятор, развязывающий передающую и приемную части модуля. Далее он поступает в антенну и излучается в пространство. Принятый той же антенной отраженный сигнал с циркулятора поступает на смеситель, на второй вход которого подается часть мощности от

генератора. Разностная частота сигнала на выходе смесителя равна доплеровскому сдвигу частоты, возникающему за счет движения цели. Модуль используется в доплеровских РЛС, позволяющих измерять радиальную скорость объекта. СВЧ модули реализуются в основном по гибридно-интегральной технологии. Модуль состоит из нескольких кристаллов, расположенных на общей диэлектрической подложке и соединенных между собой отрезками микрополосковых линий.

## **Выводы**

По международным стандартам к диапазону СВЧ относят сантиметровый диапазон волн (3 ... 30 ГГц), но в обиходе к этому диапазону причисляют области метровых (ОВЧ), дециметровых (УВЧ) сантиметровых (СВЧ) и миллиметровых (КВЧ) волн.

В приемниках СВЧ приходится применять совершенно другую элементную базу и материалы для основных узлов. В качестве резонансных систем применяются отрезки коаксиальных или микрополосковых линий и объемные резонаторы.

В схемах гетеродинов сантиметрового диапазона волн используются отражательные клистроны, малогабаритные и маломощные магнетроны, лампы обратной волны и другие электронные приборы.

В смесителях приемников применяются СВЧ транзисторы и полупроводниковые диоды. Усилители и преобразователи СВЧ 195

К малошумящим усилителям СВЧ предъявляется комплекс достаточно жестких и в известной мере противоречивых требований. Они должны обладать: • очень малым коэффициентом шума; • высоким коэффициентом усиления; • широким динамическим диапазоном; • равномерной АЧХ и линейной ФЧХ в широкой полосе частот.

Значительное улучшение шумовых показателей обеспечивается охлаждением усилителей до температуры жидкого азота (77 К), водорода (20 К) или гелия (4,2

К). Так, усилители на полевых транзисторах с затвором Шоттки, охлаждаемые до температуры жидкого водорода, имеют шумовую температуру 30...50 К (коэффициент шума 0,4...0,7 дБ). Однако применение криогенной системы значительно ухудшает массогабаритные показатели приемников, ведет к повышению стоимости и потребления энергии, снижению надежности.

В диапазоне СВЧ биполярные транзисторы используются как смесители преобразователей частоты до частот 4...6 ГГц, на более высоких частотах лучшие показатели имеют преобразователи на полевых транзисторах с затвором Шоттки (ПТШ).

Приемным модулем называется конструктивно и функционально законченный блок, выполняющий функции усиления, преобразования частоты, фильтрации и обработки сигналов. Интегральные модули объединяют несколько интегральных функциональных узлов: усилитель, фильтр, смеситель. Они не содержат разъемных соединений, малогабаритны и надежны.

Регенеративным усилителем называют устройство, обеспечивающее усиление радиосигналов за счет внесения в электрическую цепь отрицательного сопротивления. Внесение отрицательного сопротивления соответствует внесению в эту цепь дополнительной энергии от источника постоянного тока или от генератора высокочастотной накачки.

С увеличением вносимого в контур отрицательного сопротивления добротность контура и усиление усилителя возрастают, однако при этом его полоса пропускания сужается.

В современных радиоприемных устройствах СВЧ в принципе возможно применение усилителей на туннельных диодах и диодах Ганна. Усилители и преобразователи СВЧ 196

Современные усилители на туннельных диодах работают на частотах до 20 ГГц, обеспечивая усиление 13...20 дБ на каскад при коэффициенте шума 5...6 дБ в

полосе 10...15 %. Их недостатками являются малая мощность насыщения и низкая устойчивость к перегрузкам мощностью СВЧ.

Усиление сигнала в параметрическом усилителе основано на преобразовании энергии высокочастотных колебаний вспомогательного генератора, называемого генератором накачки, в энергию принимаемого сигнала с помощью параметрических реактивных приборов (емкости или индуктивности). Обычно активным элементом параметрического усилителя является нелинейная емкость перехода параметрического диода. Источником энергии параметрического усилителя является генератор накачки (гетеродин), а не батарея постоянного тока, как в транзисторных усилителях.