

Системы телекоммуникации, устройства передачи, приема и обработки сигналов

УДК 621.372.632

С. П. Бровченко, Г. Г. Галустов, Д. В. Мирвода, И. В. Сидько
Технологический институт
Южного федерального университета в г. Таганроге

Коэффициент шума гетеродинного преобразователя частоты с поглощением энергии на частоте зеркального канала

Представлен анализ шумовых параметров варисторного преобразователя частоты с реализацией режима поглощения энергии комбинационных составляющих на частоте зеркального канала.

Коэффициент шума, преобразователь частоты, зеркальная частота, узкополосный режим преобразования, потери преобразования

В [1] показано, что при малом нормальном коэффициенте шума малошумящего усилителя (МШУ), устанавливаемого в высокочастотный тракт (ВЧТ) радиоприемного устройства, вклад шумов гетеродинного преобразователя частоты (ПЧ) в результирующий коэффициент шума ВЧТ становится более ощутимым. Низкими значениями нормального коэффициента шума (порядка одного и менее децибел) обладают МШУ, выполненные на транзисторах с высокой подвижностью электронов (НЕМ-транзисторах) [2].

Настоящая статья посвящена рассмотрению нормального интегрального коэффициента шума понижающего гетеродинного ПЧ с реализацией режима поглощения энергии комбинационных составляющих на частоте зеркального канала (ЗК), определяемой как $f_{\text{ЗК}} = |f_{\text{с}} - 2f_{\text{г}}|$, где $f_{\text{с}}$ – частота преобразуемого сигнала, а $f_{\text{г}}$ – частота гетеродинного колебания. Целесообразность использования таких ПЧ обусловлена малой неравномерностью их частотной характеристики. Причиной данной неравномерности является эффект вторичного (двойного обратного) преобразования, ощутимо проявляющегося при использовании взаимного, например варисторного, преобразовательного элемента (ПЭ). Суть в том, что из-за наличия внутренней обратной связи взаимного ПЭ на его входе (на входе смесителя) появляются внутренние комбинационные помехи – продукты преобразования на $f_{\text{ЗК}}$. Отражаясь от фильтра, устанавливаемого на входе смесителя с целью реализации узкополосного режима преобразования, энергия указанных помех возвращается в ПЭ и переносится на промежуточную частоту (ПЧ) $f_{\text{ПЧ}} = |f_{\text{с}} - f_{\text{г}}|$, добавляясь к энергии полезных продуктов преобразования. Ток на ПЧ выходе в этом случае можно рассматривать как сумму двух составляющих, одна из которых обусловлена прямым преобразованием, а другая – двойным обратным (взаимодействием колебания гетеродина с комбинационными колебаниями на $f_{\text{ЗК}}$). Фазовые соотношения токов этих составляющих обусловливают

© Бровченко С. П., Галустов Г. Г., Мирвода Д. В., Сидько И. В., 2012

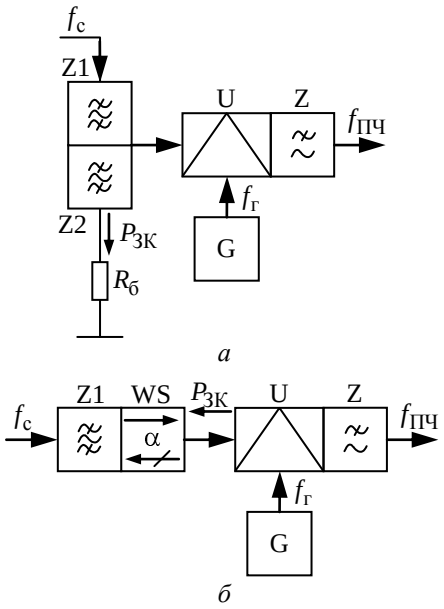


Рис. 1

либо увеличение (составляющие синфазны), либо уменьшение (составляющие противофазны) коэффициента передачи смесителя. При изменении, например частоты гетеродина, фазовые соотношения рассматриваемых составляющих токов промежуточной частоты также изменяются. Это и приводит к неравномерности частотной характеристики коэффициента передачи ПЧ.

Если энергию комбинационных составляющих на $f_{ЗК}$, появляющихся на входе смесителя, рассеивать в диссипативной нагрузке, то неравномерность частотной характеристики ПЧ уменьшится, так как существенно меньшая часть энергии комбинационных составляющих на $f_{ЗК}$ будет подвергаться двойному обратному преобразованию на $f_{ПЧ}$.

Режим поглощения энергии комбинационных составляющих на частоте ЗК обеспечивается включением на входе широкополосного смесителя полосно-пропускающего фильтра (ППФ), содержащего частотно-избирательную диссипативную нагрузку (фильтр с поглощением) или СВЧ-вентили. Варианты схемотехнического построения ПЧ показаны на рис. 1.

В схеме на рис. 1, *а* фильтр с поглощением образован диплексером, содержащим фильтры Z1, Z2 и балластный резистор $R_б$. Фильтр Z1 обеспечивает узкополосный режим преобразования, а резистор $R_б$ рассеивает мощность $P_{ЗК}$ комбинационных составляющих на $f_{ЗК}$, поступающих с выхода фильтра Z2.

Вариант ПЧ по схеме на рис. 1, *б* предусматривает рассеяние мощности $P_{ЗК}$ в СВЧ-вентиле WS, установленном между фильтрами Z1 и смесителем U, на который подводится также колебание гетеродина G с частотой $f_г$.

Смесители U в рассматриваемых вариантах ПЧ могут быть как небалансными (НБС) и балансными (БС), так и двойными балансными (ДБС). Фильтр Z в структуре ПЧ формирует его полосу пропускания, в которой размещается спектр преобразованного радиосигнала.

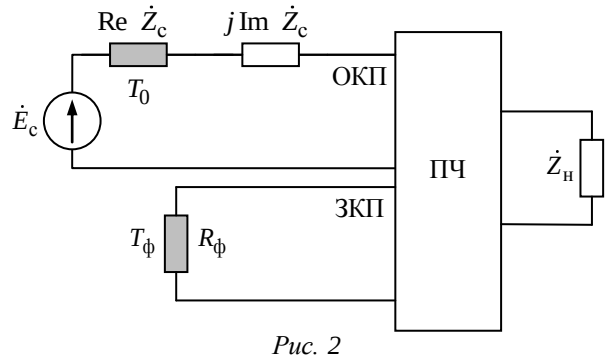


Рис. 2

Если при анализе ограничиться учетом только основного канала приема (ОКП) и зеркального канала приема (ЗКП), то схему замещения ПЧ можно представить шестиполюсником (рис. 2).

Здесь к входу ОКП подключен источник ЭДС $\dot{E}_c$ с внутренним сопротивлением $\dot{Z}_c = \text{Re}\ \dot{Z}_c + j\,\text{Im}\ \dot{Z}_c$, вещественная часть которого находится при стандартной темпе-

ратуре $T_0 = 273$ K. Вход шестиполюсника, соответствующий ЗКП, нагружен на шумящий балластный резистор $R_б$ с эффективной шумовой температурой, численно равной физической температуре окружающей среды $T_ф$ K , при которой находится либо сам балластный резистор $R_б$, либо СВЧ-вентиль WS. Входы шестиполюсника ОКП и ЗКП как бы "вырезают" из широкополосного энергетического спектра теплового (флуктуационного) шума, создаваемого шумящими резисторами $\mathrm{Re}\,\dot{Z}_с$ и $R_б$, полосы, соответствующие шумовой полосе $П_ш$, формируемой фильтром Z в структуре ПЧ. Выход шестиполюсника нагружен на комплексное (в общем случае) сопротивление нагрузки $\dot{Z}_н$.

Допустим, что коэффициенты передачи ПЧ по номинальной мощности при прямом преобразовании шумов ОКП и ЗКП одинаковы. С учетом того, что собственные шумы ПЧ приводятся к входу каждого канала приема, выражение для его нормального коэффициента шума в соответствии с классическим определением [3] запишется как

$$\tilde{K}_{ш_{ПЧ}} = \frac{P_{ш_{ОКП}}\ T_0\ + P_{ш_{ЗКП}}\ T_ф\ + P_{с\ ш_{ОКП}}\ T_{к_{ПЧ}}\ + P_{с\ ш_{ЗКП}}\ T_{к_{ПЧ}}}{P_{ш_{ОКП}}\ T_0}, \qquad (1)$$

где $P_{ш_{ОКП}}$, $P_{ш_{ЗКП}}$ – номинальные мощности источников шумов, подключенных к входам ОКП и ЗКП шестиполюсника соответственно; $P_{с\ ш_{ОКП}}$, $P_{с\ ш_{ЗКП}}$ – номинальные мощности собственного шума ПЧ, приведенного к его входу в пределах шумовых полос $П_ш$, располагаемых в ОКП и в ЗКП соответственно; $T_{к_{ПЧ}}$ – абсолютная шумовая температура на входах ОКП и ЗКП шестиполюсника, характеризующая собственные шумы ПЧ основного и зеркального каналов приема.

Учитывая, что $P_{ш_{ОКП}}\ T_0\ = kT_0П_ш$; $P_{ш_{ЗКП}}\ T_ф\ = kT_ф П_ш$ ($k = 1.38\cdot10^{-23}$ Дж/K – постоянная Больцмана) и допуская идентичность энергетических спектров собственных шумов ПЧ, приведенных к его входу в полосах ОКП и ЗКП: $P_{с\ ш_{ОКП}}\ T_{к_{ПЧ}}\ = P_{с\ ш_{ЗКП}}\ T_{к_{ПЧ}}\ = kT_{к_{ПЧ}} П_ш$, выражение приведем (1) к виду

$$\tilde{K}_ш = 1 + t_ф + 2t_{к_{ПЧ}}, \qquad (2)$$

где $t_ф = T_ф / T_0$, $t_{к_{ПЧ}} = T_{к_{ПЧ}} / T_0$ – относительные шумовые температуры.

В узкополосном режиме преобразования полезный сигнал, шум источника сигнала и собственные шумы ПЧ, приведенные к его входу, действуют только в полосе ОКП. Более того, мощность собственных шумов ПЧ, приведенных к его входу, в указанном режиме численно равна суммарной мощности собственных шумов, приведенных к входам ОКП и ЗКП шестиполюсника (см. рис. 2). Таким образом, в рамках ранее сделанных приближений энергетический спектр собственного шума ПЧ, приведенного к его входу, в узкополосном режиме преобразования определяется суммой действующих в полосах ОКП и ЗКП энергетических спектров шума в широкополосном режиме преобразования. Из этого утверждения следует, что шумовая температура на входе ПЧ, характеризующая его собст-

венные шумы в узкополосном режиме преобразования определится как $t_{\text{ш}_{\text{ПЧ}}} = 2t_{\text{к}_{\text{ПЧ}}}$, а выражение (2) может быть записано в виде

$$\tilde{K}_{\text{ш}} = t_{\text{ф}} + K_{\text{ш}_{\text{ПЧ}}}, \tag{3}$$

где $K_{\text{ш}_{\text{ПЧ}}} = 1 + t_{\text{ш}_{\text{ПЧ}}}$ – нормальный интегральный коэффициент шума гетеродинного ПЧ в узкополосном режиме преобразования без реализации режима поглощения энергии комбинационных составляющих на частоте зеркального канала. В предположении, что смеситель U не вызывает сужения шумовой полосы, сформированной фильтром Z, этот коэффициент определится выражением [3]:

$$K_{\text{ш}_{\text{ПЧ}}} = K_{\text{ш}_{\text{см}}} + \left. K_{\text{ш}_{\text{Z}}} - 1 \right/ K_{P_{\text{см ном}}}, \tag{4}$$

где $K_{\text{ш}_{\text{см}}}$, $K_{\text{ш}_{\text{Z}}}$ – нормальные интегральные коэффициенты шума смесителя и выходного фильтра в структуре ПЧ; $K_{P_{\text{см ном}}}$ – номинальный коэффициент передачи смесителя по мощности.

Заметим, что выражение (3) с учетом (4) при $t_{\text{ф}} = 1$ хорошо согласуется с положениями работ [3], [4]. Полученное в настоящей статье выражение для нормального коэффициента шума ПЧ учитывает влияние физической температуры диссипативной нагрузки, в которой рассеивается энергия комбинационных составляющих на $f_{\text{ЗК}}$.

Рассмотрим более детально шумовые параметры варисторных ПЧ, которые в отличие от ПЧ на активных ПЭ позволяют реализовать частотные характеристики коэффициента передачи с лучшей линейностью.

Варисторный смеситель и фильтр в структуре ПЧ являются пассивными устройствами с коэффициентами передачи по номинальной мощности, меньшими единицы. Полагая, что эти элементы находятся при стандартной температуре, в соответствии с положениями работ [3], [4] выражение (4) можно преобразовать к виду $K_{\text{ш}_{\text{ПЧ}}} = t_{\text{вых см}} + {} + L_{\text{п}_{\text{Z}}} \left[f_{\text{ПЧ}_0} - 1 \right] L_{\text{п см}}$, где $t_{\text{вых см}} = K_{\text{ш см}} / L_{\text{п см}}$ – относительная шумовая температура на выходе пассивного смесителя ($K_{\text{ш см}}$ – нормальный интегральный коэффициент шума пассивного смесителя; $L_{\text{п см}} = 1 / K_{P_{\text{см ном}}}$ – потери преобразования смесителя в узкополосном режиме преобразования); $L_{\text{п}_{\text{Z}}}$ – потери, вносимые фильтром Z на центральной частоте $f_{\text{ПЧ}_0}$ его полосы пропускания. Выражение для $t_{\text{вых см}}$ можно записать в несколько ином виде: $t_{\text{вых см}} = 1 / L_{\text{п}} + t_{\text{ш}_{\text{ПЭ}}}$, где $t_{\text{ш}_{\text{ПЭ}}} = n_{\text{ш}_{\text{ПЭ}}} + \Delta n_{\text{ш}_{\text{ПЭ}}}$ – параметр, имеющий физический смысл относительной шумовой температуры, характеризующий шумы, вносимые варисторным ПЭ с подключенным к нему источником гетеродинного колебания, причем $n_{\text{ш}_{\text{ПЭ}}}$ – компонент, характеризующий собственные шумы ПЭ; $\Delta n_{\text{ш}_{\text{ПЭ}}}$ – приращение, учитывающее шумы гетеродина.

Значение $n_{\text{ш}_{\text{ПЭ}}}$ характеризует собственные шумы ПЭ при конкретно заданном режиме по постоянному току, устанавливаемом источником внешнего смещения и амплитудой гетеродинного колебания. Оно определяется отношением энергетического спектра собственных шумов ПЭ на его выходе $G_{\text{ПЭ вых}}$ к стандартной интенсивности "белого" шума $n_{\text{ш}_{\text{ПЭ}}} = G_{\text{ПЭ вых}} / \ kT_0$.

Если ПЭ простейший (например, содержит только один полупроводниковый диод), значение $n_{\text{ш}_{\text{ПЭ}}}$ характеризует "шумовое отношение диода". Для некоторых типов диодов этот параметр является справочным. Специфика определения шумового отношения диодов пояснена в [5].

Приращение $\Delta n_{\text{ш}_{\text{ПЭ}}}$ определится как $\Delta n_{\text{ш}_{\text{ПЭ}}} = 2G_{\text{г вх}} / \ kT_0 k_{\text{с}} L_{\text{п см}}$, где $G_{\text{г вх}}$ – энергетический спектр шумов гетеродина на входе смесителя в полосах ОКП и ЗКП; $k_{\text{с}}$ – параметр, учитывающий схемотехнические особенности смесителя. Если фазовая компенсация шумовых токов гетеродинного колебания на выходе смесителя отсутствует, то $k_{\text{с}} = 1,$ если же она предусмотрена, то обычно полагают $k_{\text{с}} = 15\ldots100.$ В идеальном случае (полная фазовая компенсация шумовых токов гетеродинного колебания на выходе смесителя) $k_{\text{с}} \to \infty$ и $\Delta n_{\text{ш}_{\text{ПЭ}}} \to 0,$ что означает отсутствие шумов гетеродина на выходе смесителя. Данным свойством обладают БС и ДБС, у которых любой (в том числе и шумовой) сигнал, подводимый к той же паре полюсов смесителя, что и колебание гетеродина, будучи перенесенным в окрестность промежуточной частоты, оказывается подавленным по сравнению с величиной полезных продуктов преобразования. Реализация фазовой компенсации шумов гетеродина в БС и ДБС достигается сбалансированностью схемы самого смесителя, что в значительной степени определяется идентичностью параметров используемых нелинейных элементов.

Энергетический спектр шумов гетеродина зависит от многих факторов, в том числе от значения $f_{\text{ПЧ}}.$ Чем выше значение $f_{\text{ПЧ}},$ тем меньше вклад избыточного шума гетеродина в его результирующий энергетический спектр, действующий в полосах ОКП и ЗКП.

Отметим одну характерную особенность. Сложная зависимость $t_{\text{вых см}}$ от режима варисторного ПЭ по постоянному току (и, в частности, от амплитуды колебания гетеродина) указывает на то, что выбор оптимального значения мощности гетеродина по критерию минимума потерь преобразования еще не означает минимизации коэффициента шума смесителя. Минимальное значение $t_{\text{ш}_{\text{ПЭ}}},$ а следовательно, и $t_{\text{вых см}},$ при мощности гетеродина будет меньшей, чем та, при которой потери $L_{\text{п см}}$ минимальны.

Обобщение результатов проведенного анализа приводит к следующим выводам.

Реализация режима поглощения энергии комбинационных составляющих на $f_{\text{ЗК}}$ приводит к увеличению нормального интегрального коэффициента шума ПЧ на величину, равную относительной физической температуре, при которой находится диссипативная нагрузка, рассеивающая энергию указанных комбинационных составляющих.

С целью снижения коэффициента шума в структурах гетеродинных ПЧ следует использовать БС и ДБС, добиваясь максимально возможной фазовой компенсации шумов гетеродина на выходе ПЧ.

Оптимальное значение мощности гетеродина следует выбирать не по критерию минимума потерь преобразования, а по критерию минимального значения нормального интегрального коэффициента шума ПЧ.

Радикальное снижение нормального интегрального коэффициента шума варисторного ПЧ достигается при искусственном охлаждении как диссипативной нагрузки, поглощающей энергию комбинационных составляющих на частоте зеркального канала, так и всей конструкции варисторного ПЧ. Одним из способов искусственного охлаждения является применение термоэлектрических охладителей на эффекте Пельтье [6]. Реализация данного способа приводит к необходимости всестороннего рассмотрения проблемы искусственного охлаждения элементов усилительно-преобразовательного тракта.

С целью снижения вклада шумов варисторного ПЧ в результирующий нормальный коэффициент шума усилительно-преобразовательного тракта необходимо увеличивать коэффициенты передачи по номинальной мощности функциональных узлов, устанавливаемых в тракт до варисторного ПЧ.

Результаты анализа шумовых параметров варисторного ПЧ (согласованного по ЗЧ) могут быть использованы при проектировании усилительно-преобразовательных трактов радиоприемных устройств различных назначений.

Список литературы

1. Способ снижения шумовой температуры на входе сверхвысокочастотных радиоприемных устройств / С. П. Бровченко, Г. Г. Галустов, А. С. Хаза, А. В. Кравец // М.: Телекоммуникации. 2008. № 2. С. 25–28.

2. Приемные системы спутникового телевидения / И. П. Бушминский, М. И. Кузнецов, А. А. Романов, М. Ф. Тюхин / под ред. М. Ф. Тюхина. 2-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 302 с.

3. Белоусов А. П., Каменецкий Ю. А. Коэффициент шума. М: Радио и связь, 1981. 112 с.

4. Крейнгель Н. С. Шумовые параметры радиоприемных устройств.: Радио и связь, 1969. 138 с.

5. Гусятинер М. С., Горбачев А. И. Полупроводниковые сверхвысокочастотные диоды. М.: Радио и связь, 1983. 224 с.

6. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи / Л. Г. Гассанов, А. А. Липатов, В. В. Марков, Н. А. Могильченко. М.: Радио и связь, 1982. 288 с.

S. P. Brovchenko, G. G. Galustov, D. V. Mirvoda, I. V. Sidko
Institute of technology of the Southern Federal university in Taganrog

Noise factor of the heterodyne converter with absorption of mirror frequency energy

The noise parameters analysis the varistor's converter of frequency with realization absorption mode of combinational components energy on mirror frequency is presented.

Noise rate, frequency converter, mirror frequency, narrow-band mode conversion, conversion loss

Статья поступила в редакцию 22 мая 2012 г.