

Обзор схем диодных двойных балансных смесителей

Максим ШЕВЛЯКОВ
Алексей КОНДРАТЕНКО
Евгений КАРЕВ
Алексей ШТРАУХ
alkon@micran.ru

В статье рассматриваются результаты сравнительного анализа основных электрических характеристик диодных двойных балансных смесителей, выполненных по трем различным схемам. Смесители разработаны в ЗАО «НПФ Микран» (г. Томск). Конструктивно все устройства выполнены по гибридно-интегральной технологии на подложках из поликора ВК-100.

В отечественной литературе практически отсутствуют публикации, посвященные разработке диодных двойных балансных смесителей (ДДБС), построенных по схеме «звезда», а также по кольцевой схеме с «U-коленом». Благодаря структурной развязке трактов гетеродина и промежуточной частоты смесители, построенные по данным схемам, позволяют работать на «высоких» промежуточных частотах при достижении приемлемых значений развязок между трактами. Применение в качестве нелинейных элементов диодов представляет собой компромисс между простотой реализации устройства и достижимыми параметрами в плане динамических характеристик и подавления неосновных продуктов преобразования.

В статье представлен обзор схем диодных двойных балансных смесителей, приведены результаты экспериментального исследования основных электрических характеристик для трех различных схем.

Схемы построения двойных балансных смесителей

Классическая кольцевая схема

В преобразовательной технике широко применяются ДДБС, построенные по кольцевой схеме [1, 2]. Эквивалентная схема подобного смесителя, а также одна из возможных ее реализаций в диапазоне СВЧ приведены на рис. 1.

Противофазные трансформаторы для схемы на рис. 1б представляют собой мосты Маршанда, выполненные в микрополосковом исполнении на основе четвертьволновых отрезков линий с боковой связью. Подобные устройства могут осуществлять функцию противофазного деления сигналов с приемлемыми параметрами в полосе частот порядка октавы [3]. Возможно некоторое расширение рабочей полосы частот за счет увеличения потерь преобразования смесителя и (или) увеличения мощности гетеродина.

Противофазные трансформаторы могут быть выполнены как на короткозамкнутых

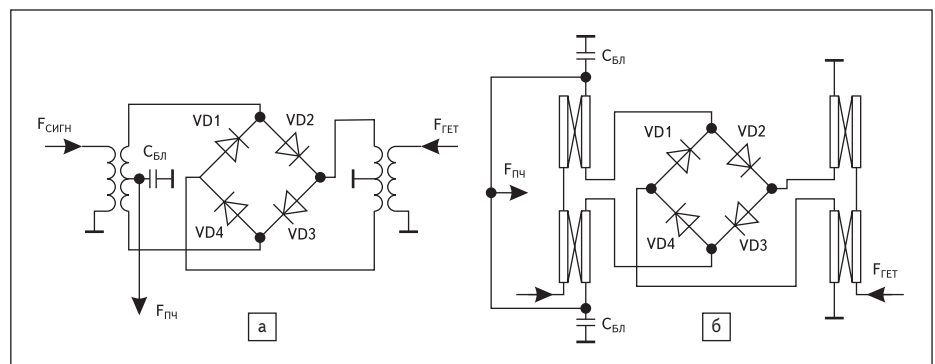


Рис. 1. Классическая кольцевая схема: а) эквивалентная схема; б) пример реализации в диапазоне СВЧ

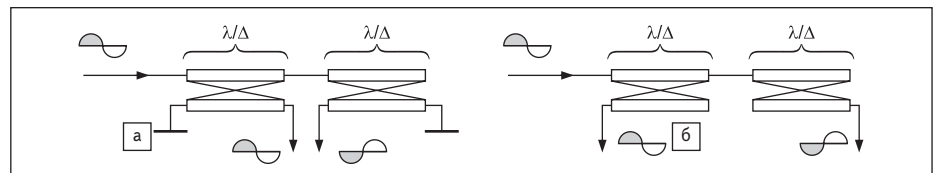


Рис. 2. Возможные реализации противофазных трансформаторов: а) трансформатор на короткозамкнутых отрезках связанных линий; б) трансформатор на разомкнутых отрезках связанных линий

отрезках связанных линий, так и на разомкнутых (рис. 2). Следует отметить, что целесообразно применение однотипных трансформаторов для радиосигнала и для гетеродина, так как это обеспечит реализацию более широкой полосы рабочих частот для устройства в целом.

Применение короткозамкнутых отрезков связанных линий более предпочтительно при построении смесителей, так как в противном случае на параметры трансформаторов существенное влияние оказывают реактивные цепи фильтра промежуточной частоты (ПЧ). Этот факт осложняет процедуру проектирования трансформаторов и снижает возможность применения смесителя в целом в плане выбора диапазона ПЧ.

Сигнал ПЧ необходимо снимать через фильтр нижних частот (ФНЧ), который выполняет функцию дополнительного подав-

ления неосновных продуктов преобразования и обеспечивает необходимую трансформацию сопротивлений для сигнала в полосе ПЧ. В случаях, когда длина плеч мостов Маршанда много больше их ширины, возможно сворачивание противофазного трансформатора радиосигнала в кольцо с целью более удобного съема сигнала ПЧ. В противном случае усложняется структура ФНЧ.

На рис. 3 показаны примеры топологической реализации кольцевых ДДБС в микрополосковом исполнении для С- и Х-диапазона частот.

Применение ДДБС, построенных по кольцевой схеме, затруднено в случаях, когда диапазон ПЧ находится достаточно близко к диапазону частот радиосигнала (либо гетеродина). Этот факт обусловлен наличием блокировочной емкости, замыкающей плечи мостов Маршанда на землю по ра-

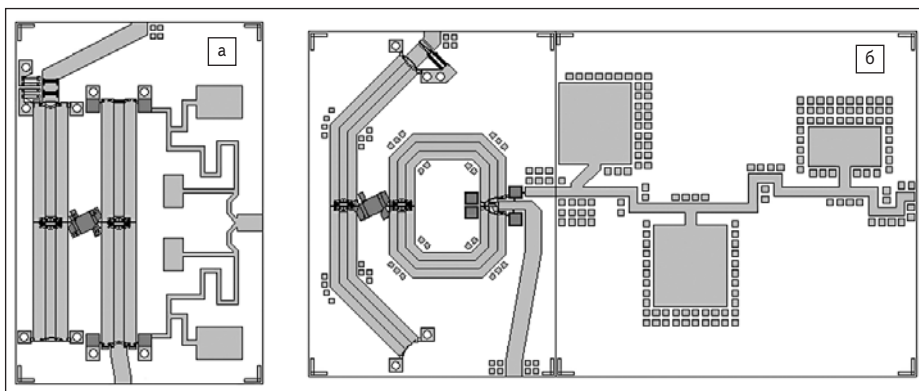


Рис. 3. Примеры топологической реализации кольцевых смесителей:
а) топология кольцевого смесителя X-диапазона; б) топология кольцевого смесителя С-диапазона

диосигналу. Шунтирующий эффект для сигналов ПЧ от наличия данной емкости приводит к увеличению потерь преобразования смесителя. Уменьшение номинала емкости приводит к сужению полосы рабочих частот смесителя вследствие рассогласования плеч мостов Маршанда. Альтернативным решением данной проблемы является применение ДДБС, выполненных по схеме «звезда» [1, 4].

Звездообразная схема

Точка соединения диодов, с которой снимается сигнал ПЧ в смесителе по схеме «звезда», развязана с входами радиосигнала и гетеродина. Благодаря подобной структурной развязке смеситель может применяться в случаях, когда требуется работа устройства на «высоких» ПЧ (полоса сигнала ПЧ расположена достаточно близко к полосе частот радиосигнала и гетеродина). На рис. 4 представлена эквивалентная схема подобного смесителя, а также одна из возможных ее реализаций в диапазоне СВЧ. Как и в предыдущем случае, противофазные трансформаторы выполнены на отрезках четвертьволновых связанных линий.

Сигнал ПЧ необходимо снимать через ФНЧ, который выполняет функцию дополнительного подавления неосновных продуктов преобразования и обеспечивает необходимую трансформацию сопротивлений для сигнала в полосе ПЧ. На рис. 5 приведены примеры топологической реализации микрополосковых ДДБС по схеме «звезда» для различных диапазонов частот.

К недостаткам смесителей, построенных по схеме «звезда», в первую очередь следует отнести тот факт, что развязка «гетеродин – радиосигнал» хуже, чем полученная для кольцевого смесителя. (Здесь и далее развязка «гетеродин – радиосигнал» должна рассматриваться без учета влияния ФНЧ в тракте ПЧ для объективного сравнения параметров смесителей, построенных по различным схемам.)

Для нормальной работы смесителя требуется большая мощность гетеродина, так как противофазный трансформатор гетеродина

нагружен как на рабочую пару диодов, так и на трансформатор радиосигнала. Этот же факт объясняет и худшее качество развязки

«гетеродин – радиосигнал». Кроме того, в данных смесителях труднее достичь приемлемой развязки «гетеродин – ПЧ», так как на данный параметр имеет заметное влияние разброс показателей для разных плеч противофазного трансформатора сигнала, что неактуально для кольцевого смесителя.

Кольцевая схема с «U-коленом»

Продолжением разработки двойных балансных смесителей является схема модернизированного кольцевого смесителя с «U-коленом» [5, 6]. Данная схема, так же как и описанная выше схема классического кольцевого смесителя, превосходит схему «звезда» в плане развязок по гетеродину. Кроме того, она в достаточной степени свободна от ограничения, связанного с применением смесителя в случаях, когда требуется работа в диапазоне ПЧ, близком к диапазону радиосигнала. Это достигается отказом от применения бло-

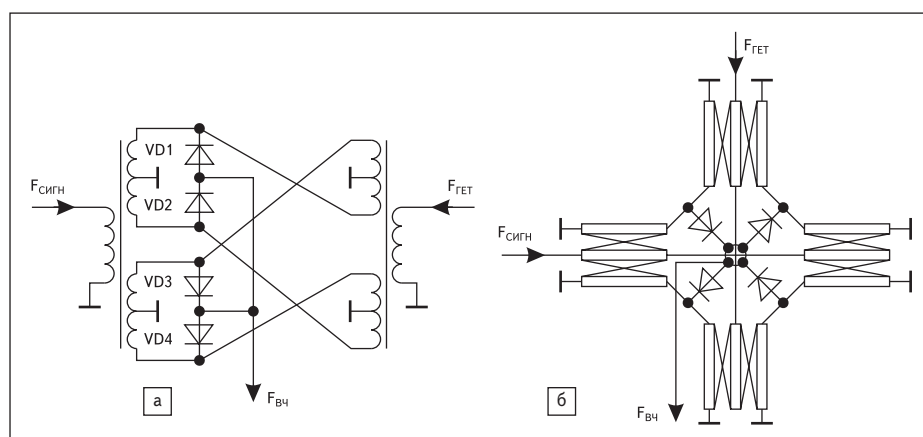


Рис. 4. Звездообразная схема: а) эквивалентная схема; б) пример реализации в диапазоне СВЧ

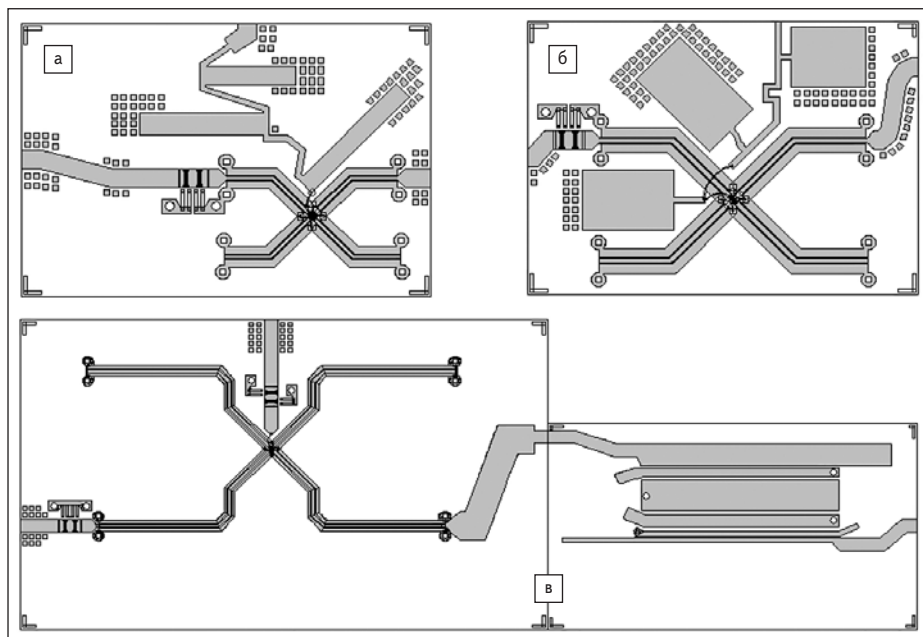


Рис. 5. Примеры топологической реализации звездообразных смесителей:
а) топология звездообразного смесителя X-диапазона; б) топология звездообразного смесителя С-диапазона;
в) топология звездообразного смесителя L-диапазона

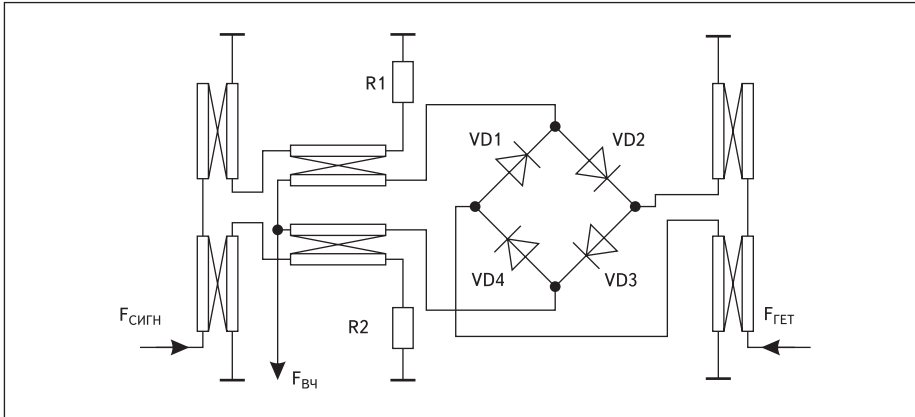


Рис. 6. Кольцевая схема с «U-коленом»

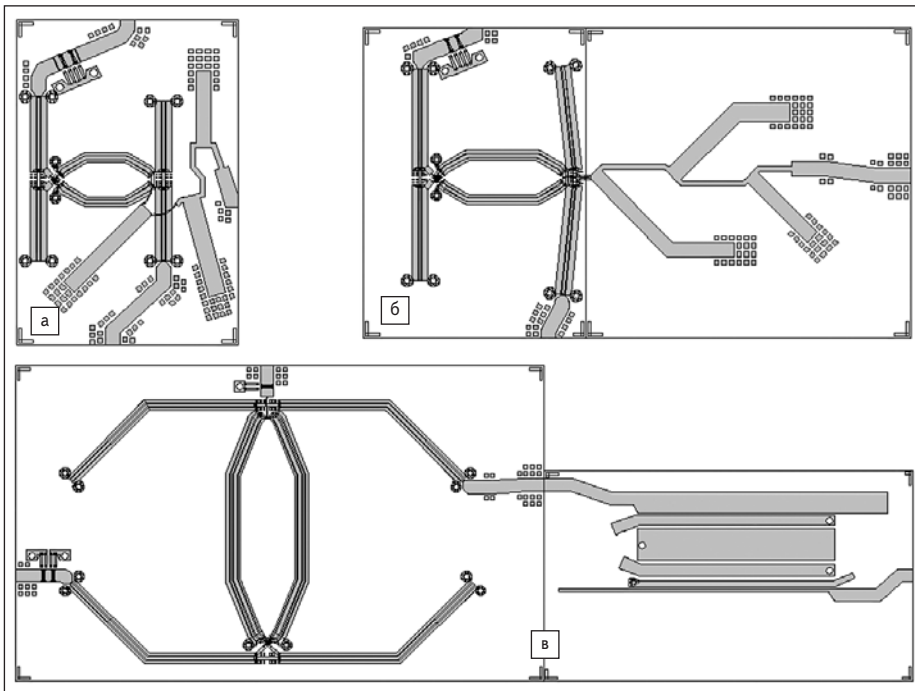


Рис. 7. Примеры топологической реализации кольцевых смесителей с «U-коленом»:
 а) топология смесителя с «U-коленом» для X-диапазона; б) топология смесителя с «U-коленом» для C-диапазона;
 в) топология смесителя с «U-коленом» для L-диапазона

кировочных емкостей, приводящих к заметному шунтированию сигналов ПЧ, и применением так называемого U-колена из направленных ответвителей, что, в свою очередь,

улучшает развязку «гетеродин – ПЧ» и облегчает дальнейшую фильтрацию. Пример реализации подобной схемы смесителя в диапазоне СВЧ приведен на рис. 6.

Таблица. Основные электрические характеристики смесителей

Параметр	Кольцевая схема		Звездообразная схема			Кольцевая схема с «U-коленом»		
	X-диап.	C-диап.	X-диап.	C-диап.	L-диап.	X-диап.	C-диап.	L-диап.
Диапазон радиосигнала, ГГц	8,5–9,5	5,0–6,0	8,5–9,5	5,0–6,0	0,9–1,4	8,5–9,5	5,0–6,0	0,9–1,4
Диапазон гетеродина, ГГц	8,5–9,5	5,0–6,0	8,5–9,5	5,0–6,0	0,9–1,4	8,5–9,5	5,0–6,0	0,9–1,4
Диапазон ПЧ, ГГц	2,6–3,7	2,6–3,7	2,6–3,7	2,6–3,7	2,6–3,7	2,6–3,7	2,6–3,7	2,6–3,7
Оптимальная мощность гетеродина РГ, дБм	15	15	16	18	16	15	16	15
Потери преобразования ЛП (при РГ), дБ	–7,5	–7,3	–6,5	–6,5	–6,6	–7,3	–6,3	–7,3
Неравномерность ЛП в полосе ПЧ (при фиксированной частоте гетеродина), дБ	±0,4	±0,6	±0,4	±0,8	±0,6	±0,3	±0,3	±0,4
Развязка «гетеродин – радиосигнал», не менее, дБ	–25	–23	–21	–22	–21	–25	–23	–23
Развязка «гетеродин – ПЧ», не менее, дБ	–30	–27	–30	–27	–25	–30	–27	–25

Сужения рабочей полосы частот и увеличения потерь преобразования вследствие применения дополнительных элементов в цепях радиосигнала на практике обнаружено не было. На рис. 7 показаны примеры топологической реализации микрополосковых ДДБС, построенных по кольцевой схеме с «U-коленом» для различных диапазонов частот.

Сравнительный анализ типовых смесительных схем

Измерения основных электрических характеристик смесительных схем проводились в 2007 году на базе ЗАО «НПФ Микран» (г. Томск). На рис. 8 приведена фотография экспериментальных образцов, подготовленных к тестированию.

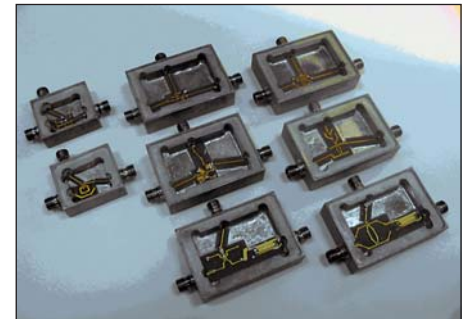


Рис. 8. Экспериментальные образцы, подготовленные к тестированию

Конструктивно все смесители выполнены по гибридно-интегральной технологии на подложках толщиной 0,5 мм. Материал подложек — поликор ВК-100 ($\epsilon = 9,8$). Подложки крепятся к титановым основаниям для сопряжения коэффициентов линейного расширения материалов при монтаже в корпус. В макетах использовались образцы GaAs кристаллов счетверенной диодной сборки производства НПФ «Микран».

В рамках сравнительного анализа рассматривались результаты измерений следующих электрических характеристик смесительных схем: потери преобразования, оптимальная мощность гетеродина, а также развязки между трактами. Измерения проводились при использовании скалярного анализатора цепей и внешнего перестраиваемого генератора в качестве сигнала гетеродина. Результаты измерений представлены в таблице. Данные, касающиеся развязок, представлены с учетом влияния ФНЧ в тракте ПЧ, что усложняет сравнение смесителей. Однако в связи с тем, что звено ФНЧ во всех случаях выполняет также и функцию трансформации сопротивлений, измерения без него нельзя считать корректными.

Данные, приведенные в таблице, являются оптимальными для описываемых смесителей, однако все смесители измерялись в более широких частотных диапазонах, где они

могут использоваться при некотором ухудшении параметров потерь преобразования и неравномерностей. В результате анализа приведенных параметров могут быть сделаны следующие выводы.

1. В случае, когда необходима работа устройства на «высоких» ПЧ, очень близких к полосе, занимаемой радиосигналом или гетеродином, и когда развязки между каналами имеют второстепенное значение, предпочтение следует отдавать смесителям, построенным по схеме «звезда».
2. В случае, когда развязки между каналами имеют существенное значение, однако все еще есть необходимость работать на «высоких» ПЧ, предпочтение следует отдавать смесителям, построенным по кольцевой схеме с «U-коленом».
3. В случае, когда требуется работа в очень широких полосах частот, а остальные параметры являются второстепенными, предпочтение следует отдавать смесителям, построенным по классической кольцевой схеме.
4. Во всех случаях при работе смесителей в более широкой полосе частот требуется большая мощность гетеродина. ■

Литература

1. Maas S. Microwave Mixers, 2nd ed. Boston, MA: Artech House, 1993.
2. Gilmore R., Besser L. Practical RF circuits design for modern wireless systems. Vol. 2: Active circuits and systems. (Artech House microwave library).
3. Puglia K. Electromagnetic Simulation of Some Common Balun Structures // IEEE Microwave Magazine. 2002. September.
4. Maas S. A., Chang K. W. "A Broadband, Planar, Doubly Balanced Monolithic Ka-Band Diode Mixer", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 41, No. 12, P.p. 2330-2335. 1993. December.w
5. Maas S. A. Broadband Planar Monolithic Balanced Mixers and Frequency Multipliers // 1998 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings. 1998.
6. Шеерман Ф. И., Баров А. А., Гроо Е. П., Гюнтер В. Я, Петрова Т. С. Широкополосные монолитные смеситель и умножитель частоты, выполненные по двойной балансной схеме // 15-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2005). Севастополь, 12–16 сентября 2005 г.: Материалы конф.: В 2 т. Севастополь: Вебер, 2005.