

УДК 621.391

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ШУМОВ ГЕТЕРОДИНА НА ДИОДНЫЕ СМЕСИТЕЛИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

В.В. МУРАВЬЁВ, А.А. ТАМЕЛО, Д.В. ЖУРАВЛЁВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 7 апреля 2008

Проведено моделирование типовых схем построения смесителей миллиметрового диапазона с учетом шумов гетеродина. Рассчитаны основные параметры диодных балансных и небалансных смесителей миллиметрового диапазона: потери преобразования, шумовое отношение, коэффициент подавления шумов гетеродина, общий коэффициент шума смесителя с предварительным усилителем промежуточной частоты. Проведен анализ влияния параметров смесителя на общий коэффициент шума.

*Ключевые слова:* балансные и небалансные смесители, коэффициент подавления шумов гетеродина, коэффициент шума смесителя.

### Введение

Основным параметром пассивной системы радиовидения миллиметрового диапазона является ее чувствительность, которая определяется шумовой температурой системы, складывающейся из шумов приемника и шумов антенны. Чем ниже шумы, тем выше чувствительность [1].

Смеситель является одним из наиболее шумящих узлов приемника. Поэтому весьма актуальным является исследование шумовых параметров диодных смесителей миллиметрового диапазона, шумы которых вносят большой вклад в общие шумы системы и влияют на ее чувствительность.

Диод с барьером Шоттки (ДБШ) является наиболее универсальным и широко используемым нелинейным элементом смесителей миллиметрового диапазона из-за высокой чувствительности, пригодности для работы в широком диапазоне частот, малых габаритов, достаточной механической прочности и стойкости к неблагоприятным климатическим воздействиям. ДБШ может работать в интервале температур от комнатной ( $T=290$  К) до температуры жидкого гелия ( $T\approx 15$  К). При глубоком охлаждении его чувствительность возрастает в 3–7 раз [2]. Этот факт является важным, так как для повышения общей чувствительности системы радиовидения необходимо охлаждать те узлы приемника, которые имеют наибольшую шумовую температуру.

Недостатком ДБШ-смесителей является потребность в относительно большой, порядка милливатта, мощности гетеродина.

## Моделирование смесителей с учетом шумов гетеродина

Основной задачей моделирования является анализ прохождения шумов гетеродина на выход КВЧ смесителя.

На рис. 1 представлена функциональная схема небалансного смесителя (НБС) с генератором шума (ГШ), включенным в цепь гетеродина. Такое включение ГШ позволяет учесть шумы гетеродина при преобразовании частоты. На ДБШ воздействуют два напряжения: сигнала ( $U_c, f_c$ ) и напряжение гетеродина ( $U_r, f_r$ ) совместно с шумом ( $U_{ш}$ ). В качестве источника сигнала выступает амплитудно-модулированное (АМ) колебание. Фильтр промежуточной частоты выделяет напряжение промежуточной частоты  $U_{пч}$  с разностной частотой  $f_{пч} = f_r - f_c$ . На рис. 1 также показан колебательный контур, настроенный на частоту сигнала ( $\Phi_c$ ) и колебательный контур, настроенный на частоту гетеродина ( $\Phi_r$ ).

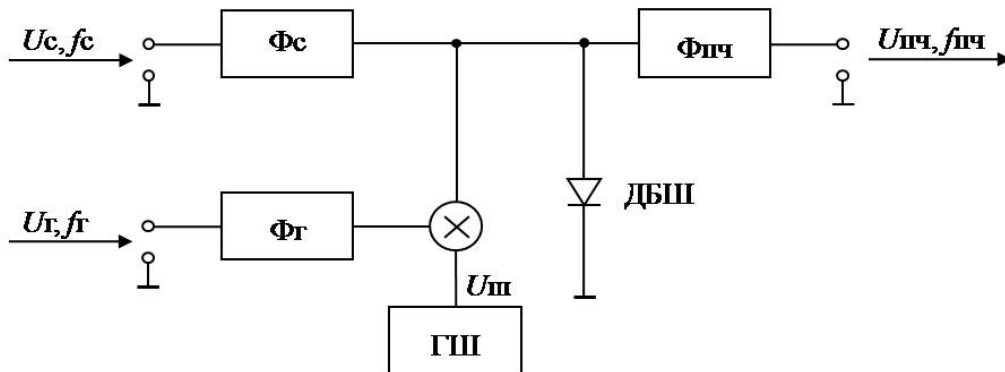


Рис. 1. Функциональная схема НБС

Принципиальная электрическая схема НБС 8-миллиметрового диапазона волн представлена на рис. 2. Параметры элементов данной схемы соответствуют анализируемому диапазону волн. В качестве сигнала используется АМ колебание одной частоты. В качестве гетеродина используется источник синусоидального колебания с частотой  $f_r = 37,5$  ГГц.

На рис. 2 кроме вышеперечисленных параметров также обозначено:  $R_4, R_5$  — ограничивающие сопротивления источника сигнала и гетеродина соответственно;  $L_c C_c$  — колебательный контур, настроенный на частоту сигнала;  $L_{пч} C_{пч}, L_k C_k$  — колебательные контура, настроенные на промежуточную частоту; DA1 — масштабирующий усилитель, выполняющий функцию буфера;  $R_n$  — сопротивление нагрузки.

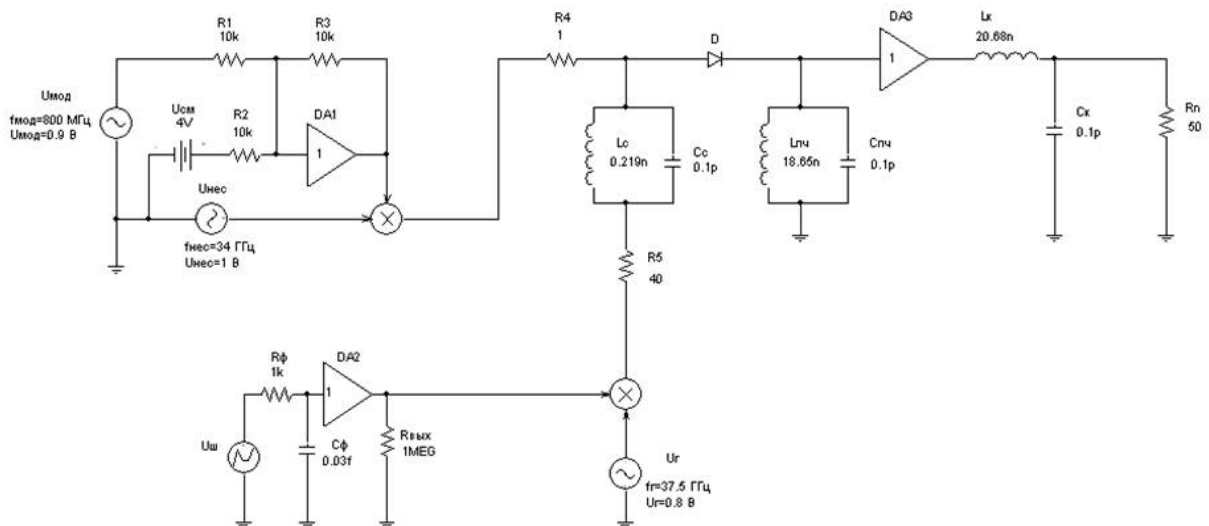


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема НБС 8-миллиметрового диапазона волн:  
 $a$  — модулятор;  $b$  — генератор шума;  $v$  — гетеродин;  $z$  — смеситель

На рис. 3 приведены временная зависимость и спектр АМ колебания.

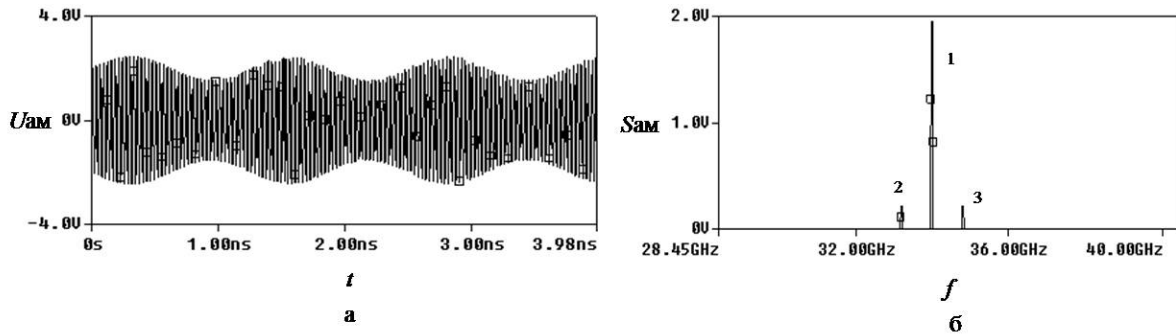


Рис. 3. Временная зависимость (а) и спектр (б) АМ колебания:  
 1 —  $f_{центр}=34$  ГГц; 2 —  $(f_{центр}-f_{бок1})=800$  МГц; 3 —  $(f_{бок2}-f_{центр})=800$  МГц

Источник  $U_{ш}$  генерирует случайное напряжение. Этот сигнал — первичный источник шума (заготовка). Элементы  $R_{\phi}$  и  $C_{\phi}$  фильтруют этот сигнал, а усилитель DA2 его усиливает. RC-фильтр устраняет проблемы сходимости вычислений, вызываемые прерывистым характером входного шумового сигнала. Временная зависимость шумового сигнала  $U_{ш}(t)$  изображена на рис. 4.

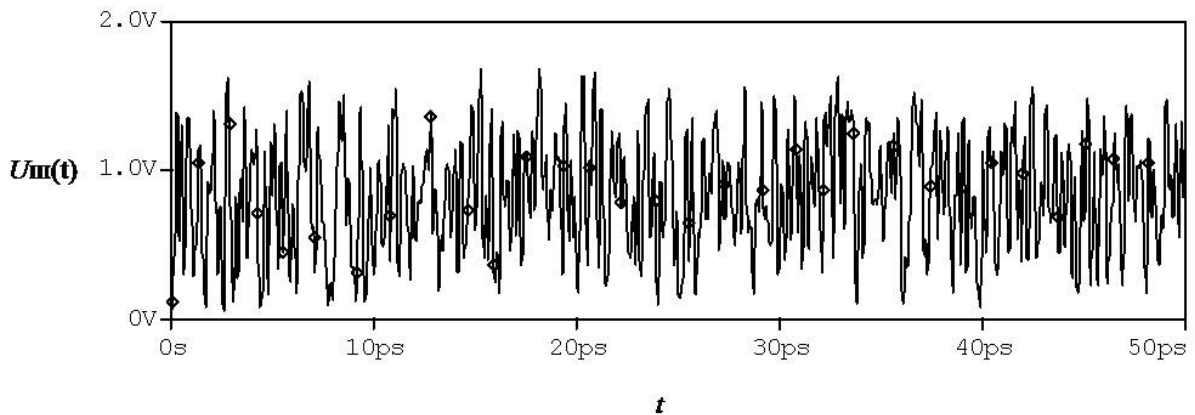


Рис. 4. Временная зависимость шумового сигнала  $U_{ш}(t)$

При моделировании КВЧ смесителей использовалась Spice-модель диода Шоттки со следующими параметрами: сопротивление потерь диода  $R_s=3,5$  Ом, емкость диода при нулевом смещении  $C_{j0}=10$  фФ, ширина запрещенной зоны  $E_g=0,69$  эВ, температурный коэффициент тока насыщения  $X_{ti}=2$ ,  $I_d=1$  мА,  $U_d=0,8$  В (значения тока  $I_d$  и напряжения  $U_d$  берутся из ВАХ используемого ДБШ). Принятые параметры диода соответствуют параметрам ДБШ, которые изготовлены в НИИПП (Томск, Россия).

ВАХ Spice-модели диода Шоттки, применяемого при моделировании, приведена на рис. 5.

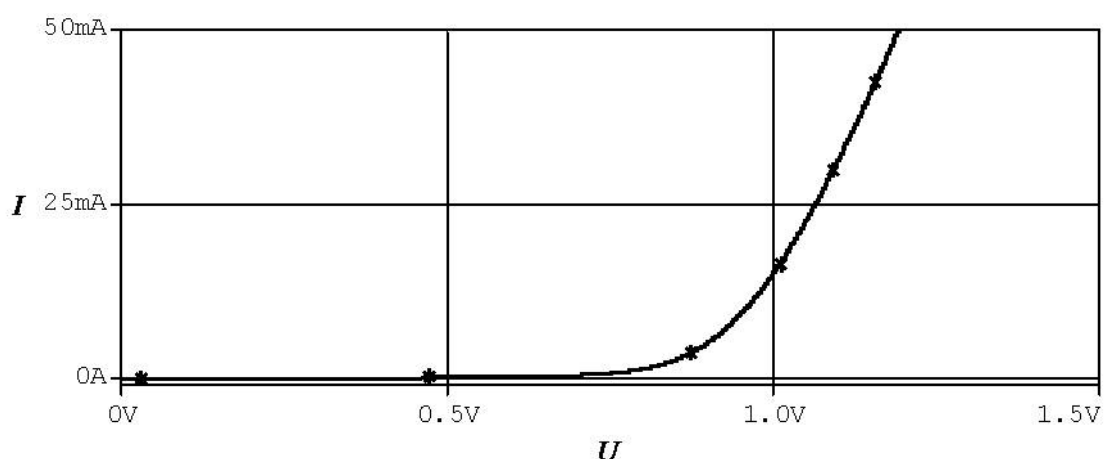


Рис. 5. Прямая ветвь вольтамперной характеристики ДБШ

Чтобы уменьшить нелинейные искажения смесителя (число комбинационных составляющих) необходимо выбирать рабочий участок вольтамперной характеристики диода по форме близкий к квадратичному. Согласно рис. 5, этот участок соответствует напряжению диода  $U_d=0,7-0,9$  В при токе диода  $I_d \approx 1$  мА.

Временная зависимость напряжения гетеродина совместно с шумом на выходе перемножителя  $U_{гш}(t)$  показана на рис. 6.

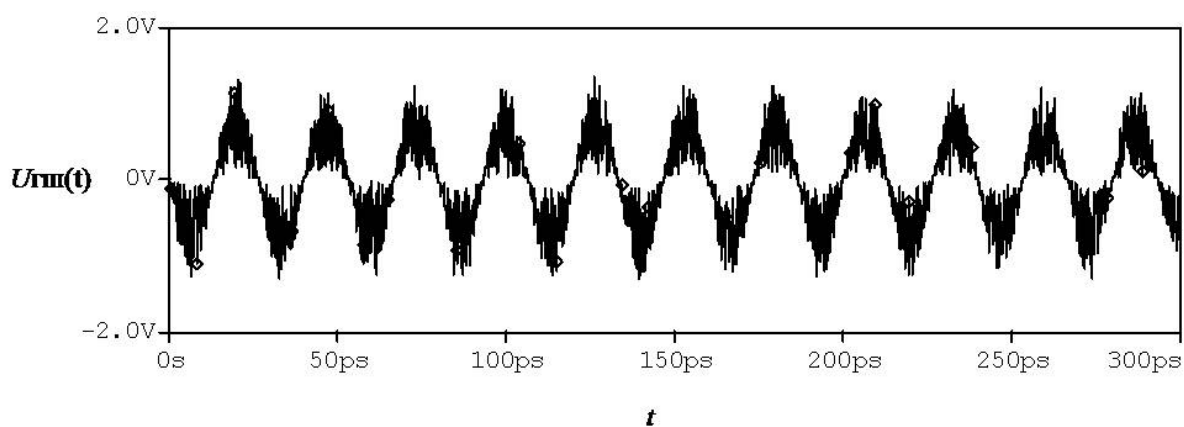


Рис. 6. Временная зависимость напряжения гетеродина совместно с шумом  $U_{гш}(t)$

Исходными данными для расчета элементов схемы КВЧ смесителя являются диапазон частот и параметры диода. Поскольку моделирование осуществляется во временной области, то основными задаваемыми параметрами являются шаг по времени и конечное время моделирования.

Проведя моделирование схемы НБС 8-миллиметрового диапазона волн (рис. 2) можно получить временную зависимость напряжения на выходе НБС  $U_{вых\text{НБС}}(t)$  (рис. 7). Эта зависимость показывает, что шумы гетеродина проходят на выход смесителя.

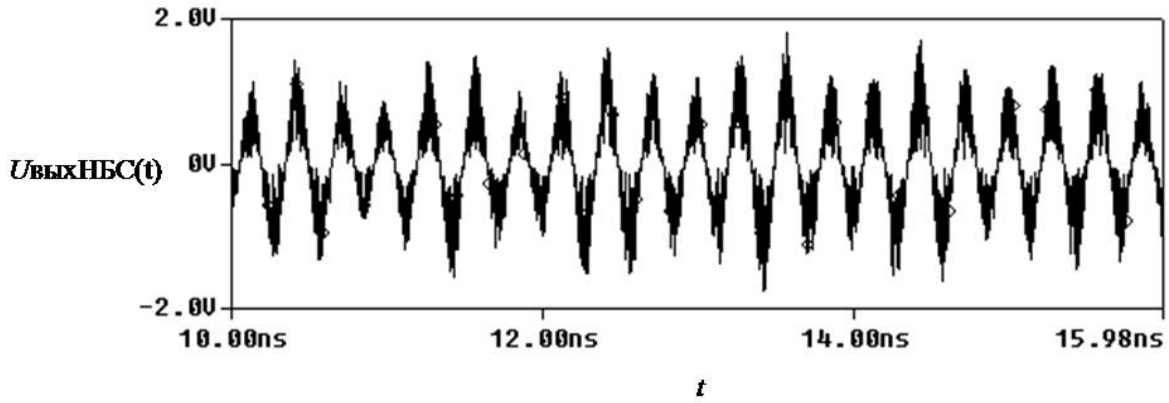


Рис. 7. Временная зависимость напряжения на выходе НБС

На рис. 8, по аналогии со схемой НБС на рис. 2, представлена схема балансного смесителя (БС) 8-миллиметрового диапазона волн с генератором шума, включенным в цепь гетеродина. Расчет элементов данной схемы производится аналогично расчету элементов схемы НБС.

Проведя моделирование схемы БС 8-миллиметрового диапазона волн (рис. 8) можно получить спектр напряжения на выходе БС  $U_{\text{вых}}\text{БС}(t)$  (рис. 9).

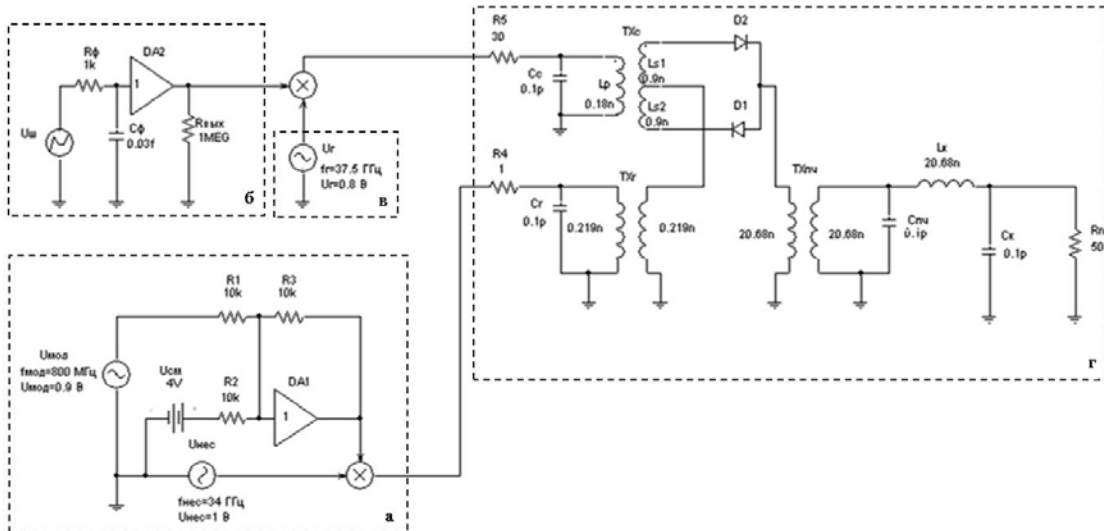


Рис. 8. Принципиальная электрическая схема БС 8-миллиметрового диапазона волн:  
*a* — модулятор; *б* — генератор шума; *в* — гетеродин; *г* — смеситель

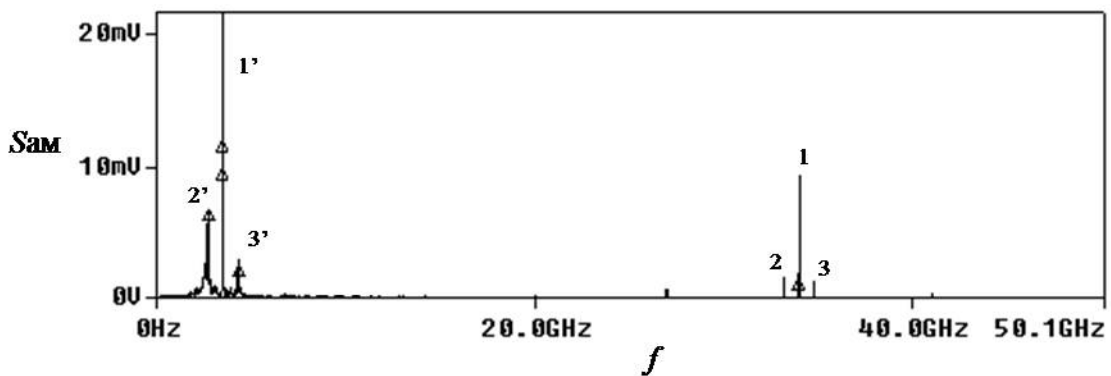


Рис. 9. Спектр напряжения на выходе БС: 1 —  $f_{\text{центр}}=34$  ГГц; 2 —  $(f_{\text{центр}}-f_{\text{бок1}})=800$  МГц; 3 —  $(f_{\text{бок2}}-f_{\text{центр}})=800$  МГц; 1' —  $f_{\text{центр}}=3,5$  ГГц; 2' —  $(f_{\text{центр}}-f_{\text{бок1}'})=800$  МГц; 3' —  $(f_{\text{бок2}'}-f_{\text{центр}'})=800$  МГц

Как видно из рис. 9, БС подавляет преобразованные шумы гетеродина и переносит входной сигнал (АМ колебания) из высокочастотной области ( $f_c=34$  ГГц) на промежуточную частоту ( $f_{пч}=3,5$  ГГц) с сохранением закона изменения амплитуды.

### Расчет параметров смесителей с учетом шумов гетеродина

Рассчитаем влияние шумов гетеродина на параметры НБС и БС: шумовое отношение  $t_{нбс\Sigma}$  ( $t_{бс\Sigma}$ ), шумовое отношение гетеродина  $t_{Г0}$ , общий коэффициент шума смесителя с ПУПЧ  $F_{нбсу}$  ( $F_{бсу}$ ), потери преобразования сигнала  $L_{нбс}$  ( $L_{бс}$ ), коэффициент подавления шумов гетеродина  $S_{ш}$ .

Вывод формул для расчета указанных параметров произведен на основе эквивалентных схем, приведенных в работе [3].

Преобразованные шумы гетеродина увеличивают результирующие выходные шумы смесителя, которые можно характеризовать суммарным шумовым отношением. Для НБС это отношение рассчитывается по формуле:

$$t_{нбс\Sigma} = t_{нбс} + \frac{t_{Г}}{L_{д}}, \quad (1)$$

где  $t_{нбс}$  — шумовое отношение НБС, равное шумовому отношению диода, т.е.  $t_{нбс} = t_{д}$ , дБ;  $t_{Г}$  — шумовое отношение гетеродина, дБ;  $L_{д}$  — потери преобразования диода, дБ.

Суммарное шумовое отношение БС вычисляется по формуле:

$$t_{бс\Sigma} = t_{бс} + \frac{t_{Г}}{L_{м} L_{бс} S_{ш}}, \quad (2)$$

где  $t_{бс}$  — шумовое отношение БС, равное среднему значению шумовых отношений диодов, т.е.  $t_{бс} = \frac{t_{д1} + t_{д2}}{2}$ , дБ;  $L_{м}$  — потери СВЧ моста БС, дБ;  $L_{бс}$  — потери преобразования БС, дБ;  $S_{ш}$  — коэффициент подавления шумов гетеродина, дБ.

Для характеристики уровня выходных шумов гетеродинных приборов используют удельное шумовое отношение гетеродина  $t_{Г0}$ , соответствующее выходным шумам гетеродина, приходящимся на 1 мВт его выходной мощности на несущей частоте. При этом шумовое отношение гетеродина  $t_{Г}$  находится по формуле:

$$t_{Г} = t_{Г0} P_{Г}, \quad (3)$$

где  $P_{Г}$  — мощность гетеродина, подводимая ко входу БС или к диоду НБС, мВт. Величина  $t_{Г0}$  зависит от типа гетеродина, рабочей длины волны и величины промежуточной частоты.

Общий коэффициент шума смесителя с ПУПЧ  $F_{су}$  находится по формуле:

$$F_{су} = L_{с} (t_{с\Sigma} + F_{упч} - 1), \quad (4)$$

где  $L_{с}$  — потери преобразования смесителя, дБ;  $F_{упч}$  — коэффициент шума ПУПЧ, дБ.

Согласно (4), общий коэффициент шума НБС с ПУПЧ  $F_{\text{нбсу}}$  и общий коэффициент шума БС с ПУПЧ  $F_{\text{бсу}}$  находятся по (5) и (6) соответственно:

$$F_{\text{нбсу}} = L_{\text{нбс}} \left( t_{\text{нбс}} + \frac{t_{\Gamma}}{L_{\text{д}}} + F_{\text{упч}} - 1 \right), \quad (5)$$

$$F_{\text{бсу}} = L_{\text{м}} L_{\text{бс}} \left( t_{\text{бс}} + \frac{t_{\Gamma}}{L_{\text{м}} L_{\text{бс}} S_{\text{ш}}} + F_{\text{упч}} - 1 \right). \quad (6)$$

Результирующие потери преобразования сигнала в НБС  $L_{\text{нбс}}$  находятся по формуле:

$$L_{\text{нбс}} = L_{\text{д}} L_{\Gamma}, \quad (7)$$

где  $L_{\text{д}}$  — суммарные потери преобразования диода, дБ;  $L_{\Gamma}$  — потери мощности сигнала, обусловленные ответвлением в цепь гетеродина, дБ.

Суммарные потери преобразования диода  $L_{\text{д}}$  включают в себя потери смесительных камер на отражение и поглощение, и определяются формулой:

$$L_{\text{д}} = L_{\text{д0}} L_{\text{отр}} L_{\text{кам}}, \quad (8)$$

где  $L_{\text{д0}}$  — потери преобразования диода при его полном согласовании в смесительной камере

до КСВ=1, дБ;  $L_{\text{отр}} = \frac{(1+\rho_{\text{д}})^2}{4\rho_{\text{д}}}$  — потери мощности сигнала и гетеродина в смесительной камере на отражение, дБ;  $\rho_{\text{д}}$  — КСВ смесительной камеры, раз;  $L_{\text{кам}}$  — потери преобразования

в смесительной камере, обусловленные поглощением и излучением КВЧ колебаний, дБ.

Параметры БС, такие как потери преобразования  $L_{\text{бс}}$  и коэффициент подавления шумов гетеродина  $S_{\text{ш}}$ , зависят от степени разброса параметров диодов БС. С учетом этого потери преобразования сигнала в БС  $L_{\text{бс}}$  находятся по формуле

$$L_{\text{бс}} = L_{\text{бс}}^{\cdot} L_{\text{д2}}, \quad (9)$$

где  $L_{\text{бс}}^{\cdot}$  — нормированные потери преобразования БС, находимые по (10), дБ;  $L_{\text{д2}}$  — суммарные потери преобразования второго диода, находимые по (8), дБ:

$$L_{\text{бс}}^{\cdot} = \frac{2L^{\cdot}(1+R^{\cdot})}{(1+\sqrt{L^{\cdot}R^{\cdot}})^2}, \quad (10)$$

где  $L^{\cdot} = \frac{L_{\text{д1}}}{L_{\text{д2}}}$  — разброс суммарных потерь преобразования диодов  $L_{\text{д1,2}}$ , дБ;  $R^{\cdot} = \frac{R_{\text{д1}}}{R_{\text{д2}}}$  — разброс выходных сопротивлений диодов  $R_{\text{д1,2}}$ , дБ.

Коэффициент подавления шумов гетеродина  $S_{\text{ш}}$  рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{ш}} = \frac{1 + \sqrt{\delta L R}}{(1 - \sqrt{\delta L R})^2}. \quad (11)$$

где  $\delta$  — неравномерность распределения мощности СВЧ моста, дБ.

Исходными данными для расчета параметров смесителей являются параметры диода, смесительной камеры, КВЧ моста, ПУПЧ и гетеродина. В качестве ДБШ выбран диод АА121А, в качестве СВЧ моста — мост щелевого типа, в качестве гетеродина — генератор Ганна со стабилизирующим резонатором.

Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.

Рассчитанные параметры для НБС и БС приведены соответственно в табл. 2 и 3.

Таблица 1. Исходные данные для расчета параметров смесителей

Параметры ДБШ	
Потери преобразования $L_{\text{д0}}$ , дБ	$L_{\text{д01}}=4; L_{\text{д02}}=4,1$
Шумовое отношение $t_{\text{д}}$ , раз	$t_{\text{д1}}=1; t_{\text{д2}}=0,7$
Выходное сопротивление $R_{\text{д}}$ , Ом	$R_{\text{д1}}=300; R_{\text{д2}}=310$
Параметры смесительной камеры	
КСВ $\rho_{\text{д}}$ , раз	$\rho_{\text{д1}}=1; \rho_{\text{д2}}=1,2$
Потери преобразования в камере $L_{\text{кам}}$ , дБ	$L_{\text{кам1}}=0,1; L_{\text{кам2}}=0,3$
Параметры СВЧ моста	
Разбаланс амплитуд $\delta$ , дБ	-0,1
Потери $L_{\text{м}}$ , дБ	0,1
Параметры ПУПЧ	
Коэффициент шума $F_{\text{упч}}$ , дБ	0,5
Параметры гетеродина	
Удельное шумовое отношение $t_{\text{г0}}$ , раз	10
Мощность $P_{\text{г}}$ для НБС, мВт	1
Мощность $P_{\text{г}}$ для БС, мВт	1,5
Потери сигнала $L_{\text{г}}$ , дБ	0,25

Таблица 2. Рассчитанные параметры НБС

Параметр	Значение параметра
Суммарные потери преобразования диода $L_{\text{д}}$ , дБ	4,136
Результирующие потери преобразования сигнала в НБС $L_{\text{нбс}}$ , дБ	4,386
Шумовое отношение НБС $t_{\text{нбс}}$ , раз	1
Шумовое отношение гетеродина $t_{\text{г}}$ , раз	10
Суммарное шумовое отношение НБС $t_{\text{нбс}\Sigma}$ , раз	4,86
Общий коэффициент шума НБС с ПУПЧ $F_{\text{нбсу}}$ , дБ	11,36



Таблица 3. Рассчитанные параметры БС

Параметр	Значение параметра
Суммарные потери преобразования диода $L_{д1}$ , дБ	4,136
Суммарные потери преобразования диода $L_{д2}$ , дБ	4,436
Разброс суммарных потерь преобразования диодов $L'$ , дБ	-0,336
Разброс выходных сопротивлений диодов $R'$ , дБ	-0,142
Нормированные потери преобразования БС $L'_{бс}$ , дБ	-0,17
Результирующие потери преобразования сигнала в БС $L_{бс}$ , дБ	4,26
Коэффициент подавления шумов гетеродина $S_{ш}$ , дБ	26,7
Шумовое отношение НБС $t_{бс}$ , раз	0,85
Шумовое отношение гетеродина $t_g$ , раз	15
Суммарное шумовое отношение БС $t_{бс\Sigma}$ , раз	0,86
Общий коэффициент шума БС с ПУПЧ $F_{бсv}$ , дБ	4,3

Как видно из табл. 2, 3, БС обеспечивает коэффициент шума в два раза меньший по сравнению с коэффициентом шума НБС. Этот выигрыш в коэффициенте шума обусловлен подавлением шумов гетеродина в БС (рис. 9).

Рассмотрим, как влияет удельное шумовое отношение гетеродина на общий коэффициент шума смесителя с ПУПЧ. Данная зависимость изображена на рис. 10.

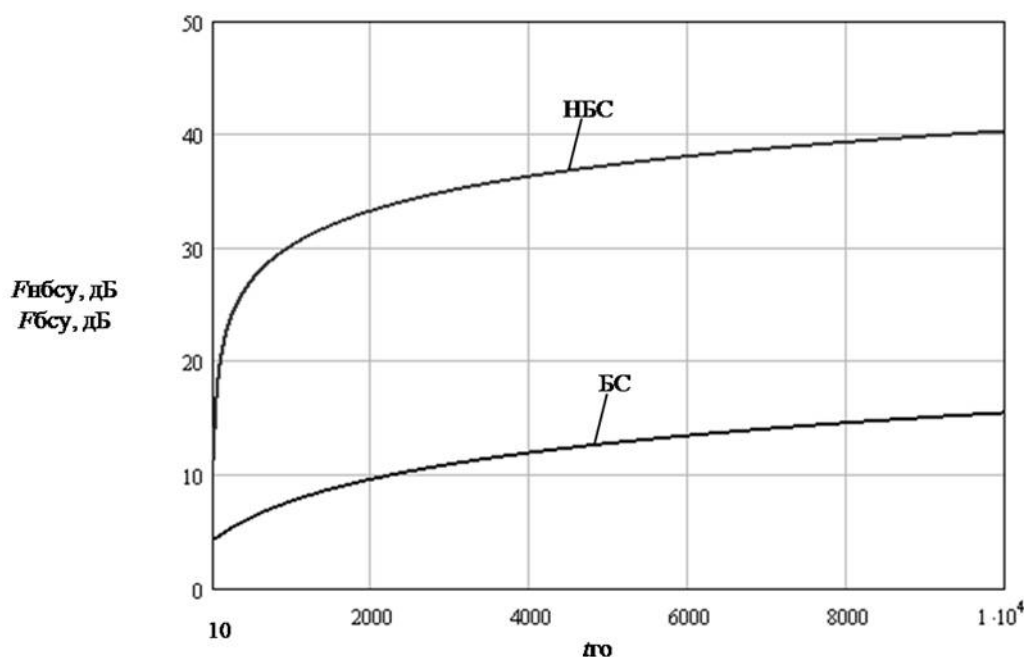


Рис. 10. Зависимость коэффициента шума НБС и БС от удельного шумового отношения гетеродина

Как видно из зависимости, представленной на рис. 10, общий коэффициент шума смесителя с ПУПЧ сильно возрастает с 11,3 до 33,3 дБ для НБС и с 4,3 до 9,6 дБ для БС при изменении удельного шумового отношения гетеродина от 10 до 2000 единиц. Этот факт накладывает определенные требования на выбор типа гетеродина, т.е. нужно выбирать гетеродин с малым значением удельного шумового отношения гетеродина  $t_{Г0}$ .

Рассмотрим на примере НБС, как влияют на общий коэффициент шума смесителя с ПУПЧ потери преобразования диода. Такая зависимость изображена на рис. 11, откуда видно, что для получения низкого коэффициента шума смесителя необходимо использовать диоды с низкими значениями потерь преобразования.

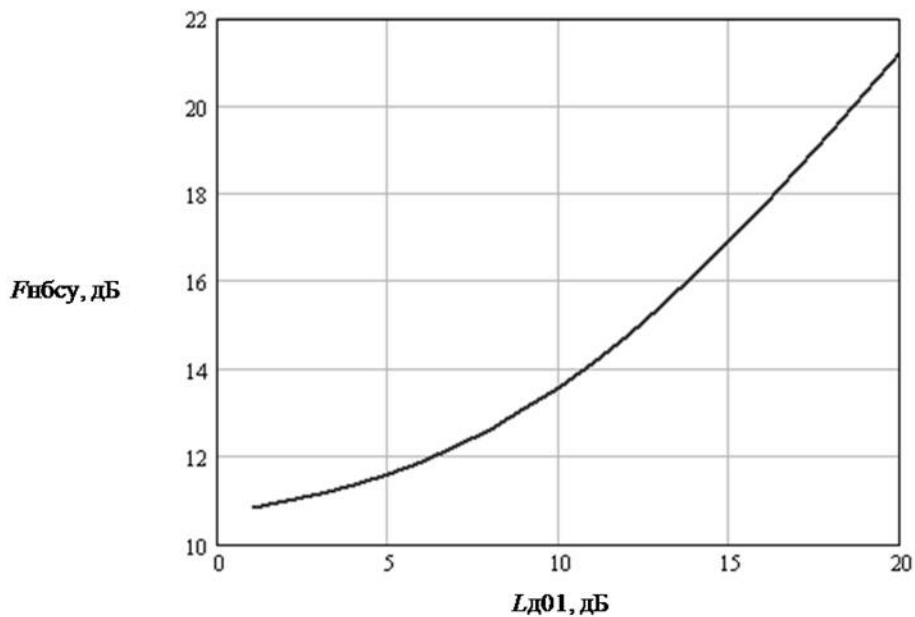


Рис. 11. Зависимость коэффициента шума НБС от потерь преобразования диода

Рассмотрим зависимость общего коэффициента шума БС с ПУПЧ от степени разброса потерь преобразования диодов БС  $L'$ . Для  $L_{д01}=4$  дБ и  $L_{д02}=4-10$  дБ эта зависимость будет иметь вид, изображенный на рис. 12.

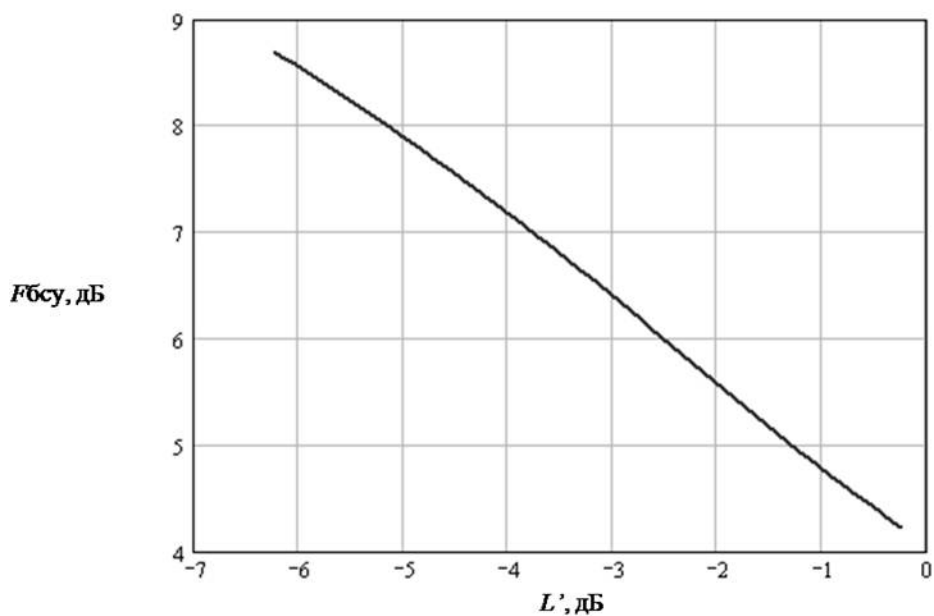


Рис. 12. Зависимость коэффициента шума БС от степени разброса потерь преобразования диодов БС  $L'$

На рис. 13 изображена зависимость общего коэффициента шума БС с ПУПЧ от степени разброса выходных сопротивлений диодов БС  $R'$  при  $R_{д1}=300$  Ом и  $R_{д2}=300-600$  Ом.

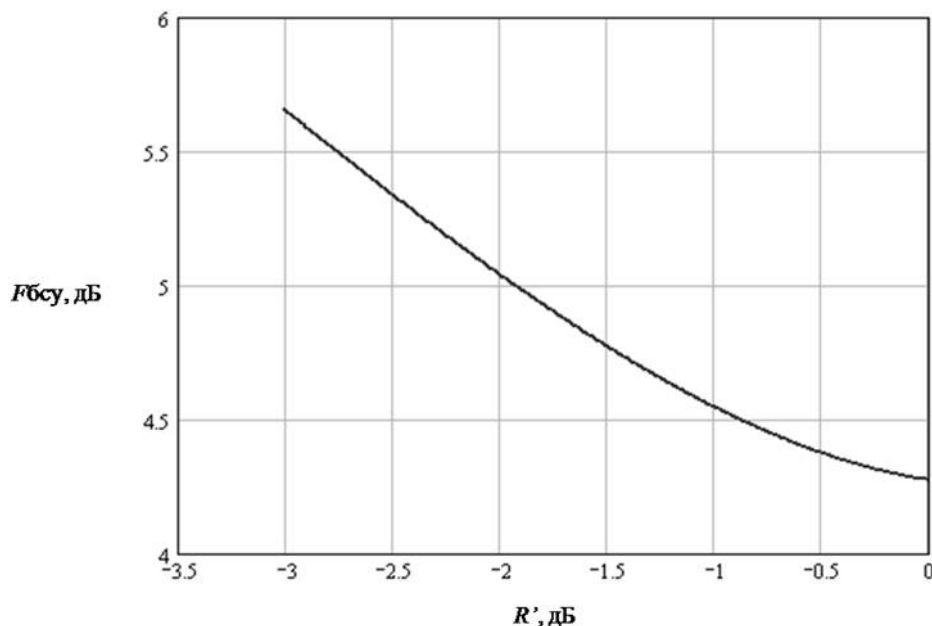


Рис. 13. Зависимость коэффициента шума БС от степени разброса выходных сопротивлений диодов БС  $R'$

Как видно из рис. 12 и 13, для получения низкого коэффициента шума БС необходимо использовать диоды с малым разбросом параметров.

На общий коэффициент шума смесителя с ПУПЧ влияет также мощность гетеродина  $P_{\Gamma}$ . Как видно из (8) и (9), для уменьшения коэффициента шума необходимо использовать диоды, которые позволяют работать с возможно меньшими значениями мощности гетеродина.

### Заключение

Как показало моделирование и расчет параметров КВЧ смесителей, основным недостатком НБС, ограничивающим их применение, является большой, по сравнению с БС, коэффициент шума и, как следствие, меньшая чувствительность. Это происходит из-за преобразования амплитудных шумов гетеродина в шумы канала промежуточной частоты. Указанного недостатка лишены БС. Они имеют меньшее значение коэффициента шума, чем НБС за счет подавления шумов гетеродина.

Как показала зависимость коэффициента шума НБС и БС от удельного шумового отношения гетеродина, необходимо выбирать гетеродин с малым значением удельного шумового отношения гетеродина  $t_{\Gamma 0}$ . При этом, как видно из рис. 10, необходимо учитывать то, что коэффициент шума смесителя сильно возрастает при удельном шумовом отношении гетеродина равном от 10 до 2000 единиц.

Расчеты и анализ рис. 11–13 показывают, что для получения низкого коэффициента шума БС необходимо использовать диоды не только с низкими значениями потерь преобразования и шумового отношения, но и с малым разбросом параметров диодов, а также хорошим согласованием и меньшим значением мощности гетеродина.

Результаты моделирования позволяют реализовать рассмотренные схемы в монолитном интегральном исполнении при использовании сверхминиатюрных пассивных элементов с сосредоточенными параметрами.

# STUDY THE INFLUENCE OF THE HETERODYNE NOISE ON THE DIODE MIXERS OF THE MILLIMETER WAVES RANGE

V.V. MURAVJEV, A.A. TAMELO, D.V. ZHURAVLEV

## Abstract

Simulation of typical schemes of millimeter wave mixer design taking into account heterodyne noise has been carried out. Key parameters of diode balancing and not balancing millimeter wave mixer has been calculated namely conversion losses, noise ratio, heterodyne noise suppression ratio and mixer noise ratio with preamplifier of intermediate frequency. The influence of mixer parameters on the noise factor has been analysed.

## Литература

1. *Муравьев В.В., Тамело А.А., Журавлев Д.В.* // Докл. БГУИР. 2006. № 3. С. 93–103.
2. *Розанов Б.А., Розанов С.Б.* Приемники миллиметровых волн. М., 1989.
3. *Подъячий В.И., Подъячий Д.В., Шульга В.М.* // Радиопизика и радиоастрономия. 2006. Т. 11, № 1. С. 88–99.