

*Белоусов А.А.<sup>1,2</sup>, Вольхин Ю.Н.<sup>1</sup>, Гамиловская А.В.<sup>1,2</sup>,  
Дубровская А.А.<sup>1,2</sup>, Тихонов Е.В.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>АО «Центральное конструкторское бюро автоматики»

<sup>2</sup>Омский государственный технический университет

## Сверхширокополосный радиوفотонный смеситель

В данной статье описан сверхширокополосный радиوفотонный смеситель, предназначенный для преобразования радиосигналов диапазона СВЧ.

**Ключевые слова:** сверхширокополосные смесители СВЧ, радиوفотонный тракт, радиوفотонные смесители, модулятор Маха-Цандера.

Одним из ключевых элементов приёмных трактов радиоэлектронных систем (РЭС) для радиоэлектронной борьбы (РЭБ) являются сверхширокополосные смесители (СС) диапазона СВЧ. Самые широкие диапазоны рабочих частот (ДРЧ) по всем входам-выходам имеют тройные балансные смесители (ТБС), которые реализованы на диодах с барьером Шоттки (ДБШ). Однако даже ТБС имеют относительно узкие ДРЧ по выходу сигнала промежуточной частоты (СПЧ) и любая попытка его расширения приводит к снижению верхней границы ДРЧ по входам радиосигнала (РС) и сигнала гетеродина (СГ). Поэтому разработчикам РЭС для РЭБ приходится рассматривать другие варианты реализации СС и в том числе с использованием других физических принципов, которые не предполагают использования только полупроводниковых нелинейных элементов.

В [1], а также некоторых предыдущих работах авторов, упоминаются радиوفотонные смесители (РФС). В частности, в [2] показано, что радиوفотонный тракт (РФТ, рис. 1), состоящий из источника оптического сигнала (ИОС), двух электрооптических модуляторов Маха-Цандера (ММЦ 1, ММЦ 2), трёх оптических трактов (ОТ 1, ОТ 2, ОТ 3) и фотодетектора (ФД) может выполнять функцию СС.

Если на электроды управляющих линий (ЭУЛ) ММЦ 1 и ММЦ 2 будут поданы РС с частотой  $f_c$  и мощностью  $P_{fc.vx}$ , СГ с частотой  $f_g$  и мощностью  $P_{fg.vx}$ , а также постоянные напряжения смещения  $U_{см 1}$  и  $U_{см 2}$ , которые будут соответствовать напряжениям на ЭУЛ ( $U_{эул}$ ) в точках перегиба модуляционных характеристик ММЦ 1 и ММЦ 2, то на выходе ФД, в частности, будут сформированы сигналы с частотами  $f_c$ ,  $f_g$ , и СПЧ с частотами  $f_{пч} = f_c + f_g$  и  $f_{пч} = f_c - f_g$  (рис. 2). Для случая  $f_c < f_g$  алгебраическое выражение для частоты последнего СПЧ будет записано так:  $f_{пч} = f_g - f_c$

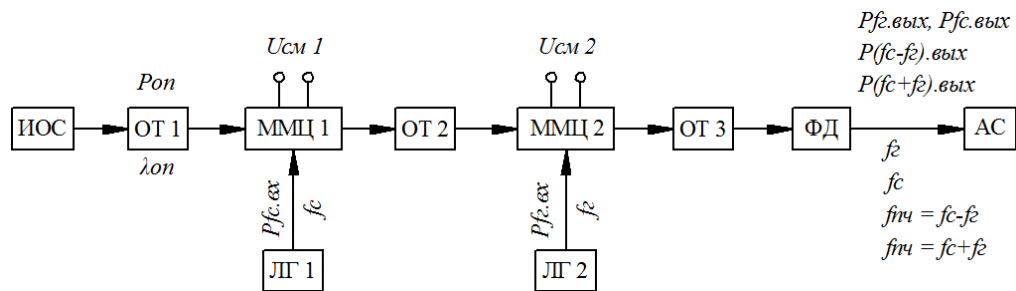


Рис. 1. Схема структурная сверхширокополосного РФТ - РФС: АС - анализатор спектра; ИОС - источник оптического сигнала; ЛГ 1, ЛГ 2 - лабораторные генераторы; ММЦ 1, ММЦ 2 - модуляторы Маха-Цандера; ОТ 1, ОТ 2, ОТ 3 - оптические тракты; ФД - фотодетектор

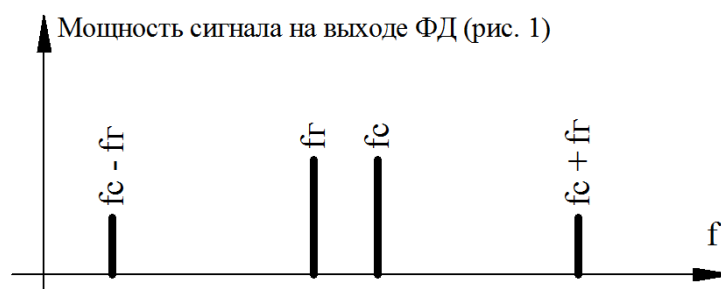


Рис.2. Возможный спектр выходного сигнала на выходе ФД (рис. 1)

В данной работе описаны результаты измерений некоторых параметров такого РФС, который состоял из ИОС с длиной волны излучения ( $\lambda_{оп}$ )  $\sim 1.55$  мкм и мощностью выходного сигнала ( $P_{оп}$ )  $\sim 13$  дБм, ММЦ 1 с верхней границей ДРЧ по входу РС  $\sim 12$  ГГц, полуволновым напряжением ( $U_{\pi}$ )  $\sim 4.4$  В и потерями в оптическом тракте ( $K_3$ )  $\sim 3.2$  дБ, ММЦ 2 с верхней границей ДРЧ по входу СГ  $\sim 40$  ГГц,  $U_{\pi} \sim 3.3$  В и  $K_3 \sim 4.5$  дБ, ФД с верхней границей ДРЧ по выходу СПЧ  $\sim 16$  ГГц и фоточувствительностью ( $P_{ф}$ )  $\sim 0.7$  А/В, ОТ 1 и ОТ 2 в виде волокон с сохранением поляризации типа PMF-28 и ОТ 3 в виде одномодового волокна типа SMF-28 ([www.corning.com](http://www.corning.com)). РС и СГ с частотами  $f_c$  и  $f_g$  и уровнями мощности  $P_{f_c, вх}$  и  $P_{f_g, вх}$  подавались от обычных лабораторных генераторов (ЛГ 1 и ЛГ 2, рис. 1), а спектр сигнала на выходе ФД контролировался анализатором спектра (АС, рис. 1).

На рис. 3 приведены зависимости уровней мощности составляющих спектра сигналов на выходе ФД:  $P_{f_c, вых}$  на частоте  $f_c$ ,  $P_{f_g, вых}$  на частоте  $f_g$ ,  $P_{(f_c+f_g), вых}$  на частоте  $f_c+f_g$ ,  $P_{(f_c-f_g), вых}$  на частоте  $f_c-f_g$  от уровня мощности СГ -  $P_{f_g, вх}$ . Из этого рисунка видно, что “полезные” составляющие спектра с частотами  $f_c-f_g$  и  $f_c+f_g$  достигают своего максимума при  $P_{f_g, вх} \approx 21$  дБм. Это значение соответствует амплитуде СГ порядка 2.5 В, что составляет  $\sim 75\%$  от значения  $U_{\pi}$  ММЦ 2. Таким образом, можно сделать следующий вывод: оптимальная амплитуда СГ при  $U_{см 2}$  (рис. 1), соответствующем  $U_{эул}$  в одной из точек перегиба модуляционной характеристики (рис. 2) ММЦ 2, должна составлять  $\frac{3}{4}$  от  $U_{\pi}$  ММЦ 2.

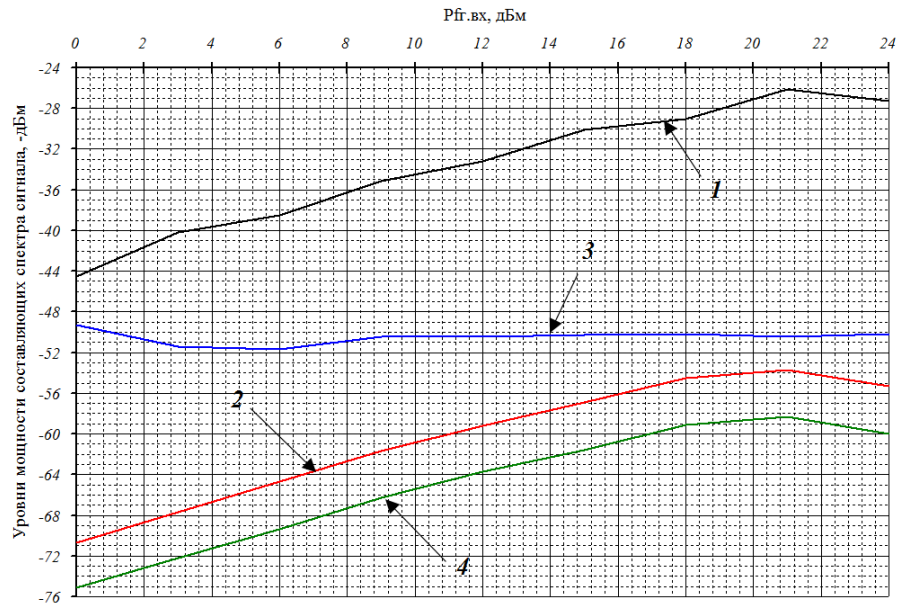


Рис. 3. Зависимость уровней мощности составляющих спектра сигнала на выходе ФД (рис. 1) от уровня  $P_{fg.vx}$  при  $f_c = 10$  ГГц,  $P_{fc.vx} = 0$  дБм,  $f_g = 3$  ГГц; 1 -  $P_{fg.vyx}$ , 2 -  $P_{(fc-f_g).vyx}$ , 3 -  $P_{fc.vyx}$ , 4 -  $P_{(fc+f_g).vyx}$

На рис. 4 приведена частотная зависимость потерь преобразования РФС (рис. 1) в диапазоне СПЧ для составляющей спектра сигнала на выходе ФД с частотой  $f_{пч} = f_g - f_c$  при  $f_c = \text{const} = 2$  ГГц,  $P_{fc.vx} = 0$  дБм,  $P_{fg.vx} = 15$  дБм. Из этого рисунка видно, что данный РФС имеет очень высокие потери преобразования: 50-60 дБ. Однако по аналогии с простейшим РФТ, который описан в [4], можно предположить, что при уменьшении  $U_L$  ММЦ 1 до 1 В и менее и увеличении  $P_{оп}$  до 20 дБм и более, потери преобразования могут снизиться на 2-3 порядка. А в данном случае можно оценить ширину ДРЧ данного РФС в полосе СПЧ: она достигает 4 ГГц при неравномерности 2 дБ, более 8 ГГц при неравномерности 4 дБ и почти 12 ГГц при неравномерности 6 дБ.

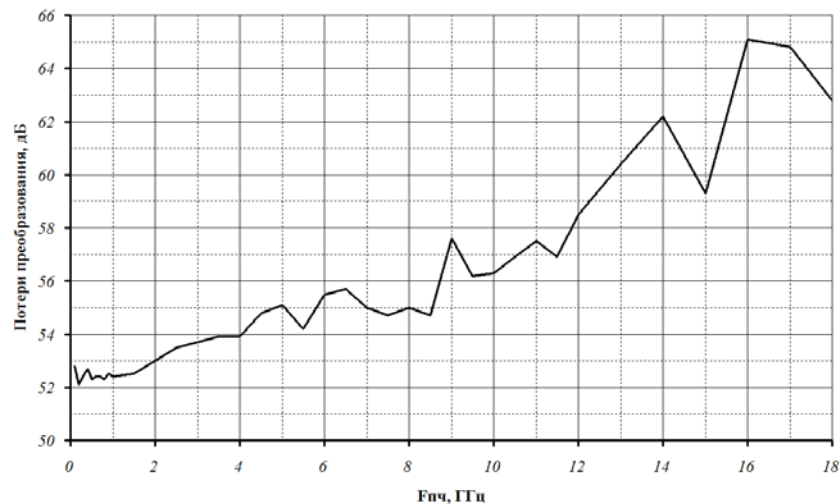


Рис. 4. Частотная зависимость потерь преобразования РФС (рис. 1) в диапазоне СПЧ при  $f_c = \text{const} = 2$  ГГц,  $f_{пч} = f_g - f_c$ ,  $P_{fc.vx} = 0$  дБм,  $P_{fg.vx} = 15$  дБм

На рис. 5 приведена частотная зависимость потерь преобразования РФС (рис. 1) в диапазоне РС для составляющей спектра сигнала на выходе ФД с частотой  $f_{пч} = f_{г} - f_{с} = \text{const} = 2$  ГГц и частотные зависимости развязок между трактами при  $P_{fс.вх} = 0$  дБм,  $P_{fг.вх} = 15$  дБм.

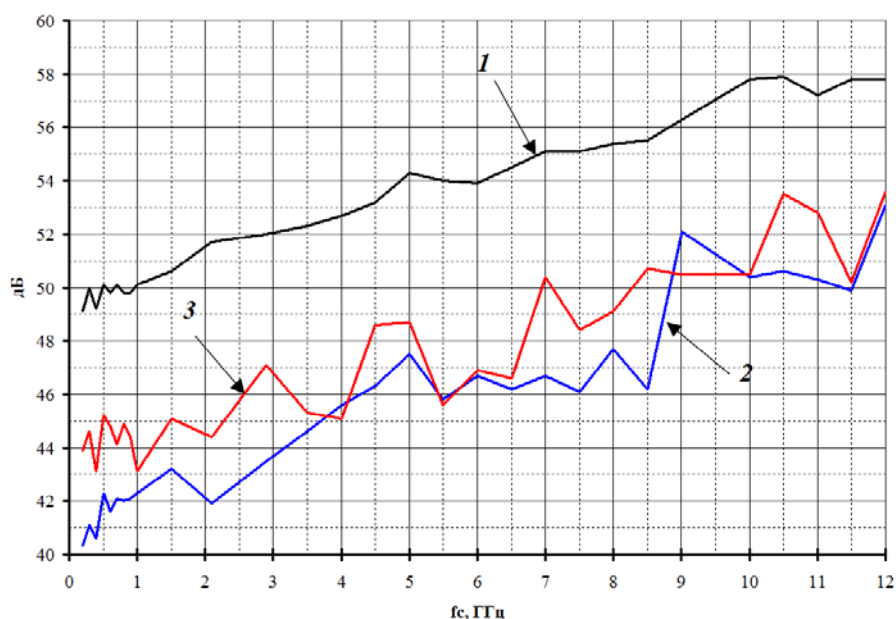


Рис. 5. Частотная зависимость потерь преобразования РФС (рис. 1) в диапазоне РС для  $f_{пч} = \text{const} = f_{г} - f_{с} = 2$  ГГц и частотные зависимости развязок между трактами при  $P_{fс.вх} = 0$  дБм,  $P_{fг.вх} = 15$  дБм: 1-потери преобразования; 2-развязка между трактом РС и трактом СПЧ; 3-развязка между трактом СГ и трактом СПЧ

Из этого рисунка видно, что развязка между трактом СГ и трактом СПЧ превышает 43 дБ, что является просто выдающимся результатом для СС. Также можно говорить об огромной развязке между трактами РС и СГ, значение которой было практически невозможно измерить. К негативным результатам данного эксперимента следует отнести высокую неравномерность частотной зависимости потерь преобразования: в ДРЧ РС 0.1 - 12.0 ГГц она превышает 8 дБ. Другим негативным моментом является то, что “пролезающий” на выход ФД РС с частотой  $f_{с}$  имеет больший уровень мощности, чем “полезный” сигнал с частотой  $f_{г}-f_{с}$ . При этом необходимо отметить следующее: в данном случае при уменьшении  $U_{п}$  ММЦ 1 до 1 В и менее и увеличении  $P_{оп}$  до 20 дБм также можно ожидать снижения потерь преобразования на 2-3 порядка, но на эти же 2-3 порядка увеличится и уровень “пролезающего” на выход ФД РС с частотой  $f_{с}$ .

*Авторы выражают благодарность сотрудникам ЗАО "РТИ-Радио" ([www.rti-r.ru](http://www.rti-r.ru)) и лично Алексею Николаевичу Шулунову за предоставленную возможность проведения данных экспериментальных работ.*

### Библиографический список

1. Michael E Manka. Microwave Photonics for Electronic Warfare Applications // Microwave photonics, 2008. jointly held with the 2008 asia-pasific microwave photon ics conference. mwp/apmp 2008. international topical meeting on.
2. Белоусов А.А., Вольхин Ю.Н., Гамиловская А.В., Дубровская А.А. Тихонов Е.В. О применении методов и средств радиопотоники для обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн // Прикладная фотоника, №1, -Пермь, -2014.-С.65-86.
3. Вольхин Ю.Н., Гамиловская А.В. О возможности реализации сверхширокополосных аналоговых радиопотонных трактов диапазона СВЧ с положительными коэффициентами передачи // «Материалы XVIII координационного научно-технического семинара по СВЧ технике» (Нижегородская область, п. Хахалы - 2013).