

## ОБЗОР И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ РЕАЛИЗАЦИИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ АНАЛОГОВЫХ ПРОЦЕССОРОВ ДИАПАЗОНА СВЧ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ РАДИОФОТОНИКИ

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

<sup>1</sup>АО «Центральное конструкторское бюро автоматики», 644027, г. Омск, Космический пр-т, 24а

<sup>2</sup>ФГБОУ «Омский государственный технический университет», 644050, г. Омск, пр-т Мира, 11

Данная статья представляет результат теоретических и экспериментальных работ в области радиофотонных систем сотрудников АО «ЦКБА». Используя методы и средства радиофотоники, можно создавать сверхширокополосные аналоговые волоконно-оптические линии передачи с малыми потерями, а также различные сверхширокополосные аналоговые процессоры (фазовый манипулятор, умножитель частоты, амплитудный детектор, преобразователь частоты). Такие устройства могут применяться в системах радиосвязи, радионавигации, радиоэлектронной борьбы, радиоэлектронной разведки, радиоэлектронного противодействия, а также в радиолокационных системах.

**Ключевые слова:** сверхширокополосный радиофотонный тракт, аналоговая волоконно-оптическая линия связи, фазовый манипулятор, умножитель частоты на два, преобразователь частоты, амплитудный детектор

**Сведения об авторах:** Гамиловская Анастасия Вадимовна, аспирант, ckba@omsknet.ru; Белоусов Алексей Александрович, аспирант, ckba@omsknet.ru; Тихонов Евгений Витальевич, аспирант, ckba@omsknet.ru; Дубровская Алёна Андреевна, ckba@omsknet.ru; Вольхин Юрий Николаевич, ckba@omsknet.ru

---

## OVERVIEW AND THE STUDY OF POSSIBLE METHODS OF ULTRA-WIDEBAND MICROWAVE ANALOG PROCESSORS IMPLEMENTATION USING RADIO-PHOTONIC TECHNIQUES

A.V. Gamilovskaya<sup>1,2</sup>, A. A. Belousov<sup>1,2</sup>, E. V. Tikhonov<sup>1,2</sup>, A. A. Dubrovskaya<sup>1</sup>,  
Yu. N. Volkhin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC «Central Design Bureau of Automatics», 644027, Omsk, Kosmicheskii prospect, 24a

<sup>2</sup>Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional Education  
«Omsk State Technical University», 644050, Omsk, prospect Mira, 11

Results of theoretical and experimental researches on radio-photon systems of engineers of JSC «Central Design Bureau of Automatics» are presented in this article. Radio-photon techniques allow the creation of low loss ultra-wideband analog fiber-optic transmitting lines and various ultra-wideband analog processors (phase manipulator, frequency multiplier, amplitude detector, frequency converter). Such devices could be used in radio-systems, navigation, electronic warfare, radio-electronic intelligence, electronic countermeasures and radars.

**Keywords:** ultra-wideband radio-photon path, analog fiber-optic line, phase manipulator, frequency duplexer, frequency converter, amplitude detector

**Data of authors:** Gamilovskaya Anastasiya Vadimovna, postgraduate, ckba@omsknet.ru; Belousov Aleksey Aleksandrovich, postgraduate, ckba@omsknet.ru; Tikhonov Evgeniy Vitalievich, postgraduate, ckba@omsknet.ru; Dubrovskaya Alena Andreevna, ckba@omsknet.ru; Volkhin Yury Nikolaevich, ckba@omsknet.ru

## Введение

В настоящий момент фотонные технологии активно применяются в различных областях науки и техники. Однако, существуют и другие фотонные технологии менее известные, но не менее значимые для некоторых отраслей науки и техники. Например, фотонные технологии обработки высокочастотных радиосигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. Данные технологии относятся к одной из перспективных отраслей науки и техники – радиофотонике (микроволновой фотонике), а упомянутая выше обработка радиосигналов осуществляется в радиофотонных трактах (РФТ).

В некоторых предыдущих публикациях сотрудников АО «ЦКБА» [1, 2] было рассказано о теоретических и экспериментальных изысканиях в области простейших РФТ, которые состояли из источника оптического сигнала (ИОС), модулятора Маха-Цандера (ММЦ), фотодетектора (ФД) и соединяющих их оптических трактов (ОТ). В этих публикациях было показано, что такие РФТ являются альтернативой коаксиальным линиям передачи, превосходя последние по ряду ключевых параметров: диапазону рабочих частот (ДРЧ), коэффициенту передачи ( $K_n$ ) и неравномерности  $K_n$  в ДРЧ. В других публикациях [3, 4] было показано, что РФТ можно использовать для реализации различных аналоговых процессоров:

- фазового манипулятора;
- умножителя частоты на два;
- преобразователя частоты (смесителя);
- амплитудного детектора.

При этом предполагалось, что РФТ используется для реализации какого-то одного из перечисленных выше аналоговых процессоров.

В данной статье предлагается рассмотреть возможность физической реализации такого универсального РФТ, который будет выполнять функции всех этих аналоговых процессоров (рис. 1). Этот РФТ состоит из одного ИОС, двух ММЦ (ММЦ1 и ММЦ2), одного ФД, трёх ОТ (ОТ1, ОТ2, ОТ3), двух электрических коммутаторов (ЭК1, ЭК2), высокочастотной согласованной нагрузки (СН), одного частотного фильтра (ЧФ), одной интегрирующей цепи (ИЦ) и нескольких электрических трактов. При этом необходимо отметить следующее: на выходах ОТ1 и ОТ2 поляризация оптических сигналов должна оставаться такой же, как и на их входах. Поэтому, если в качестве ОТ1 и ОТ2 будут использоваться оптические волокна, то применять можно будет только волокна с сохранением поляризации, например PMF-28 производства фирмы Corning.

Рассмотрим различные виртуальные трансформации данного РФТ при той или иной конфигурации поданных на него электрических сигналов.

Если на электроды управляющей линии (ЭУЛ [1, 2]) ММЦ1 подать напряжение сме-

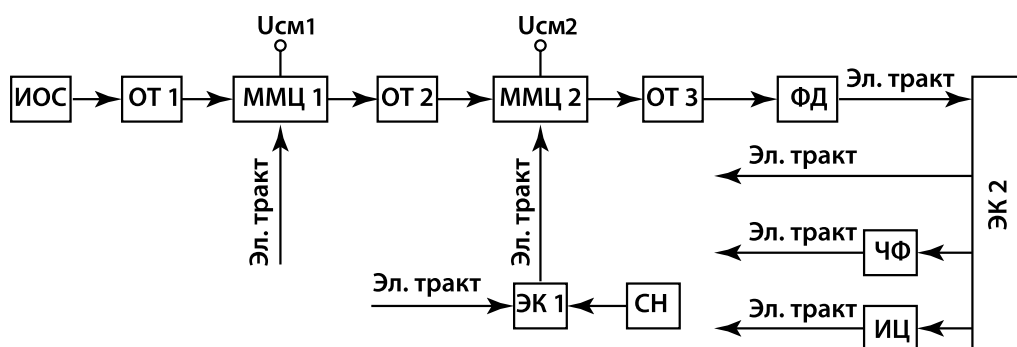


Рис. 1

### Схема многофункционального РФТ:

ОТ1, ОТ2, ОТ3 – оптический тракт; ИОС – источник оптического сигнала; ИЦ – интегрирующая цепь; ММЦ1, ММЦ2 – модуляторы Маха-Цандера; СН – высокочастотная нагрузка СВЧ; ФД – фотодетектор; ЧФ – частотный фильтр; ЭК1, ЭК2 – электрические коммутаторы (двухканальный и трёхканальный)

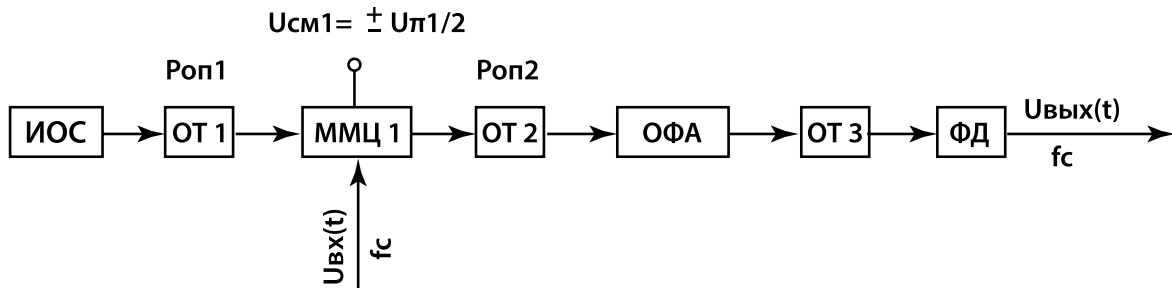


Рис. 2

Схема РФТ с функцией СВЧ сверхширокополосной аналоговой линии передачи, СВЧ-усилителя и фазового манипулятора

щения ( $U_{см1}$ ) равное  $+U_{\pi1}/2$  или  $-U_{\pi1}/2$  (где  $U_{\pi1}$  – полуволновое напряжение ММЦ1), на ЭУЛ ММЦ2 подать напряжение смещения ( $U_{см2}$ ) равное нулю, к электрическому входу ММЦ2 через одно из плеч ЭК1 подключить СН, а электрический выход ФД через одно из плеч ЭК2 подключить к широкополосному электрическому тракту, то приведённый на рис. 1 РФТ виртуально трансформируется в более простой РФТ (рис. 2), в котором ММЦ2 будет выполнять функцию оптического фиксированного аттенюатора (ОФА) с некоторым минимальным уровнем затухания.

Такой РФТ можно использовать в качестве альтернативы коаксиальной линии передачи. При этом электрический сигнал  $U_{вх(t)}$

с частотой  $f_c$  на выходе данного РФТ при определённых условиях может иметь даже большую амплитуду, чем входной электрический сигнал  $U_{вх(t)}$  с такой же частотой  $f_c$ . То есть при определённых значениях  $U_{\pi1}$  и мощности оптического сигнала на выходе ИОС ( $P_{оп1}$ ) такой РФТ будет иметь положительный коэффициент передачи СВЧ сигнала [1, 2, 5], и, как следствие, сможет выполнять функцию сверхширокополосного СВЧ усилителя.

Используя эту же виртуальную конфигурацию РФТ (рис. 2) и периодически изменяя  $U_{см1}$  на ЭУЛ ММЦ1 от  $+U_{\pi1}/2$  до  $-U_{\pi1}/2$ , можно осуществлять фазовую манипуляцию ( $\pm 180^\circ$ ) передаваемого по РФТ сигнала так, как это показано на рис. 3 и рис. 4.

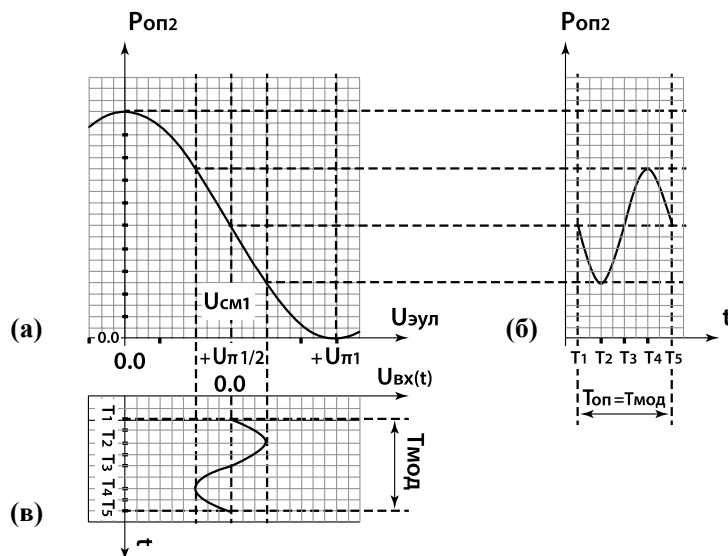


Рис. 3

Модуляция оптического сигнала в ММЦ1 (рис. 2) при  $U_{см1} = +U_{\pi1}/2$ :

- а) модуляционная характеристика ММЦ1; б) временная развёртка мощности промодулированного оптического сигнала на выходе ММЦ1; в) временная развёртка входного электрического модулирующего сигнала

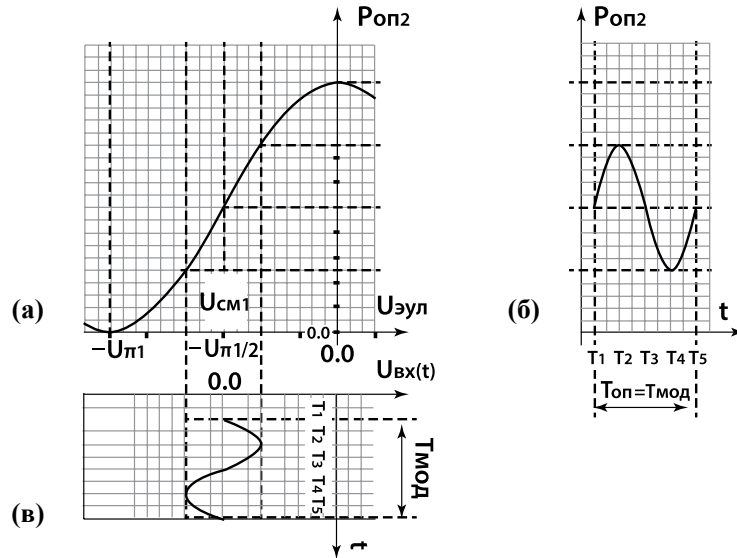


Рис. 4

Модуляция оптического сигнала в ММЦ1 (рис. 2) при  $U_{см1} = -U_{\pi/2}$ :  
 а) модуляционная характеристика ММЦ1; б) временная развёртка мощности промодулированного оптического сигнала на выходе ММЦ1; в) временная развёртка входного электрического модулирующего сигнала

Используя эту же виртуальную конфигурацию РФТ (рис. 2), но при  $U_{см1} = 0$  В, можно получить высокоэффективный сверхширокополосный умножитель частоты на два (рис. 5).

Рассмотрим ещё одну функцию, которая может нести в себе представленный на рис. 1 многофункциональный РФТ. Если на ЭУЛ ММЦ1 подать  $U_{см1} = +U_{\pi}$ , на ЭУЛ ММЦ2 подать  $U_{см2} = 0$ , к электриче-

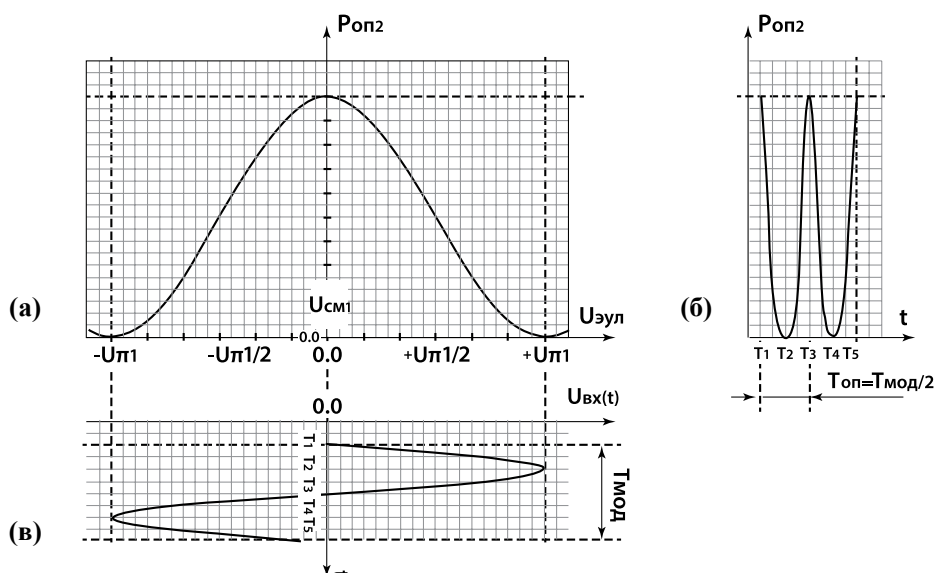


Рис. 5

Модуляция оптического сигнала в ММЦ1 (рис. 2) при  $U_{см1} = 0$ :  
 а) модуляционная характеристика ММЦ1; б) временная развёртка мощности промодулированного оптического сигнала на выходе ММЦ1; в) временная развёртка входного электрического модулирующего сигнала

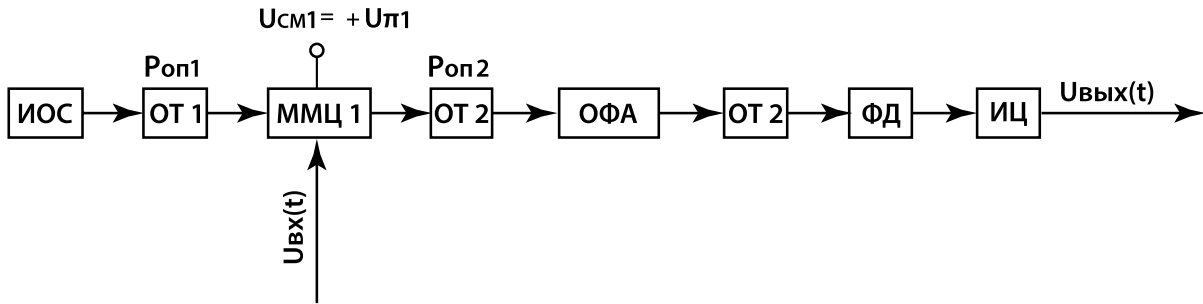


Рис. 6

Схема РФТ с функцией амплитудного детектора

скому входу ММЦ2 через одно из плеч ЭК1 подключить СН, а к электрическому выходу ФД через одно из плеч ЭК2 подключить ИЦ, то можно получить радиофотонный тракт с функцией амплитудного детектора (рис. 6).

Принцип работы такого радиофотонного амплитудного детектора поясняется эякурами на рис. 7. Если на электрический вход ММЦ1 подать последовательность радиоимпульсов длительностью  $\tau_{ри}$  и периодом следования  $T_{ри}$  (рис. 7в), то на выходе ИЦ будет формироваться последовательность видеоимпульсов с такой же длительностью  $\tau_{ри}$  и с таким же периодом следования  $T_{ри}$  (рис. 7г).

Возможность реализации такой функции РФТ была проверена экспериментально. При этом использовались ИОС с длиной волны 1,55 мкм и  $P_{оп1} = 24$  мВт, ММЦ1 с  $U_{п1} = 5$  В и потерями в оптическом тракте около 4,5 дБ и низкочастотный ФД с ИЦ. Параметры видеоимпульсов на выходе ИЦ (рис. 8) контролировались цифровым осциллографом Teltronix DPO 7254С.

Используя такие радиофотонные детекторы, можно получить рабочую чувствительность, которая (при определённых условиях) будет на порядки превышать рабочую чувствительность амплитудных детекторов на диодах.

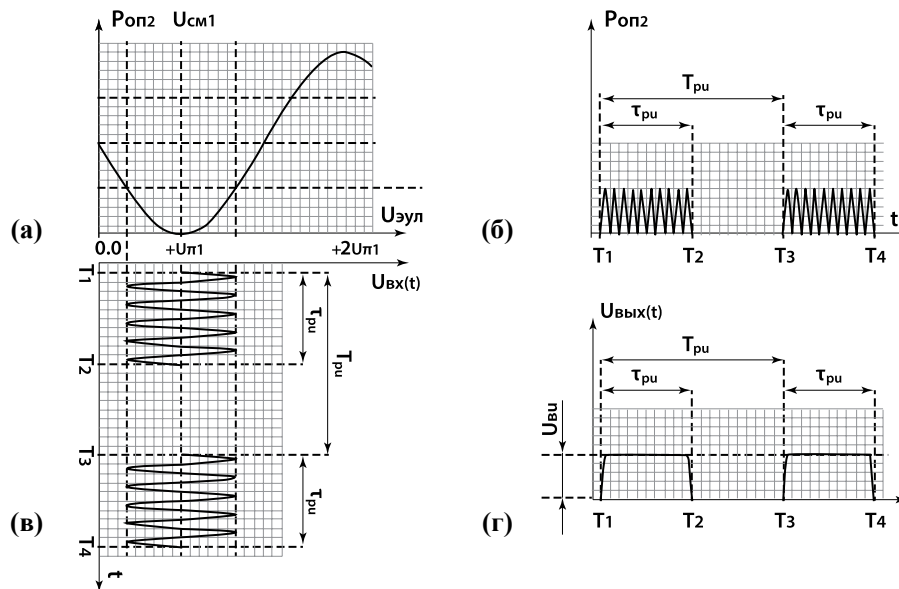


Рис. 7

- Модуляция оптического сигнала в ММЦ1 (рис. 6) при  $U_{см1} = +U_{п1}$ :
- а) модуляционная характеристика ММЦ1; б) временная развёртка мощности промодулированного оптического сигнала на выходе ММЦ1;
  - в) временная развёртка входного электрического модулирующего сигнала;
  - г) временная развёртка выходного электрического сигнала на выходе ИЦ

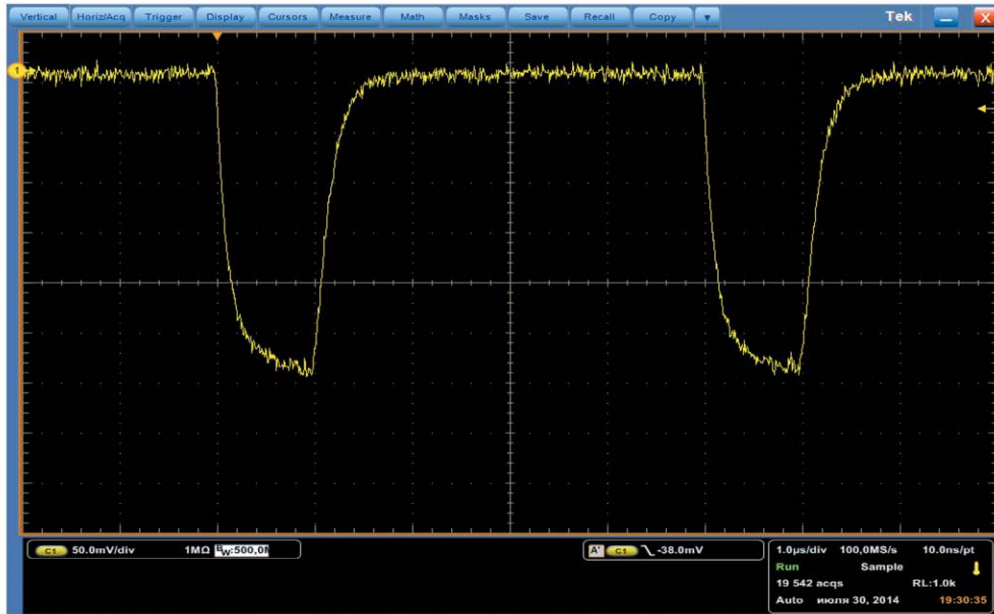


Рис. 8

Отклик на экране осциллографа, установленного на выходе ИЦ радиофотонного амплитудного детектора

Далее вновь вернёмся к начальной схеме структурного многофункционального РФТ (рис. 1).

Если на ЭУЛ ММЦ1 будет подано смещение  $U_{cm1} = +U\pi/2$  или  $U_{cm1} = -U\pi/2$ , на ЭУЛ ММЦ2 будут поданы смещения  $U_{cm2} = +U\pi/2$  или  $U_{cm2} = -U\pi/2$  (где  $U\pi/2$  – полуволновое напряжение ММЦ2), на электрический вход ММЦ1 будет подан высокочастотный сигнал  $U_{вх(t)}$  с частотой сигнала  $f_c$ , на электрический вход ММЦ2 через одно из плеч ЭК1 будет подан высокочастотный сигнал  $U_{r(t)}$  с частотой гетеродитна  $f_r$ , а к электрическому выходу ФД через одно из плеч ЭК2 будет под-

ключен ЧФ, то приведённый на рис. 1 РФТ виртуально трансформируется в РФТ, приведённый на рис. 9, а в спектре сигнала  $U_{вх(t)}$  на выходе ФД (рис. 10) будут присутствовать гармоники с частотами  $f_c + f_r$  и  $f_c - f_r$  (или  $f_r - f_c$ ). Требуемая составляющая этого спектра  $U_{пч(t)}$  с требуемой частотой  $f_{пч}$  и будет выделена ЧФ (рис. 9).

Такой способ реализации радиофотонных смесителей преобразователей частоты был описан в [6]. Данные смесители потенциально имеют широчайшие ДРЧ: – по тракту промежуточной частоты ДРЧ ограничен только ДРЧ по электрическому выходу ФД;

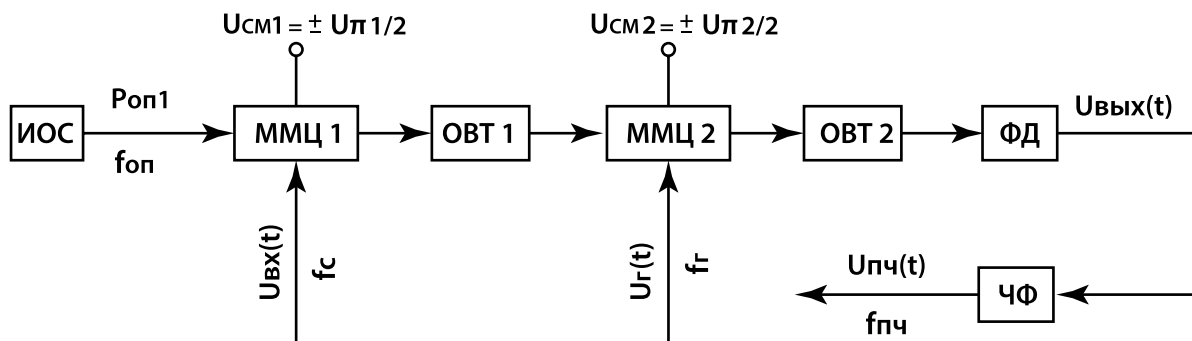


Рис. 9

Схема РФТ с функцией преобразователя частоты (смесителя)

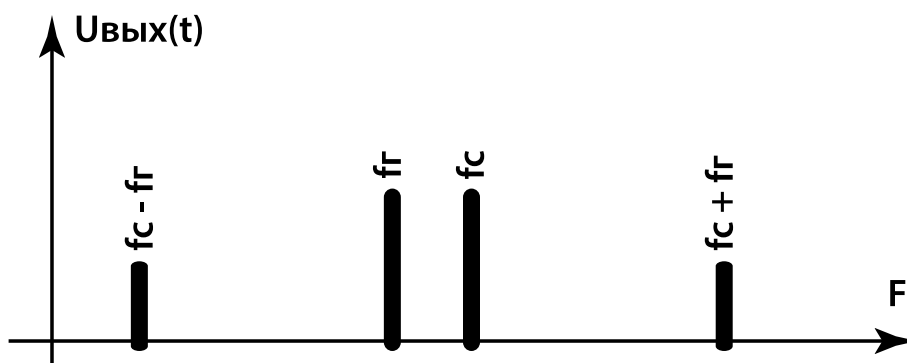


Рис. 10

Спектр оптического сигнала на выходе ФД (рис. 9)

– по тракту входного сигнала и сигнала гетеродина – только ДРЧ по электрическим входам ММЦ1 и ММЦ2.

На сайтах производителей [4] предлагаются ФД с ДРЧ по электрическому выходу до 60 ГГц и выше и ММЦ с ДРЧ по электрическому входу до 100 ГГц и выше.

Возможность реализации радиофотонного смесителя была проверена экспериментально. При этом использовались:

- ИОС с длиной волны 1,55 мкм и  $P_{\text{оп1}} \approx 24$  мВт;
- ММЦ1 с верхней границей ДРЧ в окрестностях 12 ГГц, с  $U_{\pi 1}$  в окрестностях 6 В и потерями в оптическом тракте около 4 дБ;
- ММЦ2 с верхней границей ДРЧ в окрестностях 35 ГГц, с  $U_{\pi 1}$  в окрестностях 5 В и потерями в оптическом тракте около 5 дБ;
- ФД с фоточувствительностью около 0,35 А/Вт на длине волны 1,55 мкм и верхней границей ДРЧ в окрестностях 16 ГГц.

При подаче на электрический вход ММЦ1 входного сигнала  $U_{\text{вх}(t)}$  с  $f_c = 10$  ГГц и уровнем мощности около 0 дБм (1 мВт), а на вход ММЦ2 – сигнала гетеродина  $U_r(t)$  с частотой  $f_r = 3$  ГГц и уровнем мощности 18 дБм (64 мВт), на выходе детектора был получен ожидаемый спектр со следующим набором частот:  $f_r$  (3 ГГц),  $f_c - f_r$  (7 ГГц),  $f_c$  (10 ГГц),  $f_c + f_r$  (13 ГГц).

Была зафиксирована очень высокая развязка между трактами входного сигнала и сигнала гетеродина и трактом сигнала промежуточной частоты – около 45 дБ. Необходимо отметить, что высокий уровень потерь преобразования (около 54) был обусловлен относительно низкой мощностью оптического сигнала

ла  $P_{\text{оп1}} \approx 24$  мВт на выходе ИОС (или входе ММЦ1) и относительно высоким значением  $U_{\pi 1} \approx 6$  В. С высокой долей уверенности – по аналогии с приведёнными в [1, 2] результатами расчётов – можно предположить, что при увеличении уровня  $P_{\text{оп1}}$  до 100 мВт и более и снижении значения  $U_{\pi 1}$  до 1 В и менее, потери преобразования в таких радиофотонных смесителях будут либо соизмеримы с потерями в «традиционных» сверхширокополосных смесителях на полупроводниковых диодах с барьером Шоттки, либо будут ниже.

**Выводы**

Предложенное радиофотонное устройство может выполнять до пяти различных видов аналоговой обработки сигнала. При физической реализации этих функций при помощи средств и методов «традиционной» радиоэлектроники потребовалось бы пять отдельных устройств.

Выбор этих функций осуществляется при помощи малоинерционных «электрических» команд. В частности, данное радиофотонное устройство может трансформироваться из детектора в смеситель и наоборот. Это позволит осуществлять практически мгновенную трансформацию приёмного устройства из приёмника прямого усиления в супергетеродинный приёмник.

При этом можно с высокой долей уверенности предполагать, что такие радиифотонные приёмники будут превосходить «традиционные» приёмники не только по ширине диапазона рабочих частот, но и по другим основным параметрам.

## *Литература*

1. Вольхин Ю. Н., Гамиловская А. В. О возможности реализации сверхширокополосных аналоговых радиофотонных трактов диапазона СВЧ с положительными коэффициентами передачи // «Материалы XVIII координационного научно-технического семинара по СВЧ технике» (Нижегородская область, п. Хахалы, 2013).
2. Белоусов А. А., Вольхин Ю. Н., Гамиловская А. В., Дубровская А. А. Теоретическое и экспериментальное моделирование сверхширокополосных аналоговых радиофотонных трактов диапазона СВЧ // Материалы 5-й юбилейной общероссийской научно-технической конференции «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем». – М.: Радиотехника, 2014. – С. 122-135.
3. Белоусов А. А., Вольхин Ю. Н., Дубровская А. А. Обзор возможных вариантов реализации сверхширокополосных аналоговых процессоров дециметрового, сантиметрового, и миллиметрового диапазонов длин волн с использованием методов и средств радиофотоники // Материалы 2-й Всероссийской научно-технической конференции «Перспективы развития РЛС дальнего обнаружения и интегрированных систем и комплексов информационного обеспечения Воздушно-космической обороны». – М.: Радиотехника, 2014. – С. 122-135.
4. Белоусов А. А., Вольхин Ю. Н., Гамиловская А. В., Дубровская А. А., Тихонов Е. В. О применении методов и средств радиофотоники для обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн // Прикладная фотоника. – № 1. – Пермь, 2014. – С. 65-86.
5. Ackerman E., Betts G., Burns W., Campbell J., Cox C., Duan N., Prince J., Regan M. and Roussel H. Signal-to-noise performance of two analog photonic links using different noise reduction techniques // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Honolulu, Hawaii, June 2007, pp. 51-54.
6. Michael E Manka. Microwave Photonics for Electronic Warfare Applications//Microwave photonics, 2008. Jointly held with the 2008 asia-pasific microwave photonics conference. mwp/apmp 2008. international topical meeting on.

## *References*

1. Volkhin Yu. N., Gamilovskaya A. V. *Materialy XVIII koordinatsionnogo nauchno-tekhnicheskogo seminarina po SVCH tekhnike* [Proceedings of XVIII coordination scientific and technological seminar on microwave engineering]. Nizhegorodskaya region, Khakhaly, 2013.
2. Belousov A. A., Volkhin Yu. N., Gamilovskaya A. V., Dubrovskaya A. A. *Materialy 5 yubileynoy obscherossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Obmen opytom v oblasti sozdaniya sverkhshirokopolosnykh radioelektronnykh sistem* [Proceedings of the 5th anniversary all-Russian scientific and technical conference «Exchange of experience in the field of ultra-wideband radio-electronic systems»]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014, pp. 122-135.
3. Belousov A. A., Volkhin Yu. N., Dubrovskaya A. A. *Materialy 2 vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Perspektivy razvitiya RLS dalnego obnaruzheniya i integrirovannykh sistem i kompleksov informacionnogo obespecheniya vozdušno-kosmicheskoy oborony»* [Proceedings of the 2nd all-Russian scientific and technical conference «Prospects for the development of early warning radars and integrated systems and complexes of Aeorospace Defence information support»]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014, pp. 122-135.
4. Belousov A. A., Volkhin Yu. N., Gamilovskaya A. V., Dubrovskaya A. A., Tikhonov E. V. On the application of methods and means of radio-photonics for signal processing at decimeter, centimeter and millimeter wavelength ranges. *Prikladnaya fotonika* [Applied photonics], 2014, № 1, pp. 65-86.
5. Ackerman E., Betts G., Burns W., Campbell J., Cox C., Duan N., Prince J., Regan M., and Roussel H. Signal-to-noise performance of two analog photonic links using different noise reduction techniques // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Honolulu, Hawaii, June 2007, pp. 51-54.
6. Michael E Manka Microwave Photonics for Electronic Warfare Applications // Microwave photonics, 2008. Jointly held with the 2008 asia-pasific microwave photonics conference.