

## Радиофотонный смеситель СВЧ радиосигналов: теоретическое описание и экспериментальное исследование

В.В. Бирюков, В.А. Грачев, С.А. Капустин, М.А. Палачев, А.С. Раевский

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород  
ул. Минина, 24

В настоящей статье приведены теоретический расчет радиофотонного смесителя с применением методов спектрального анализа сигналов и результаты экспериментального исследования спектрального состава оптических сигналов в радиофотонном смесителе. Представлена экспериментальная установка, которая состоит из источника оптического излучения, двух модуляторов Маха – Цандера, оптического анализатора спектра и вспомогательного оборудования для задания напряжений смещения и формирования СВЧ-сигналов. Получены выражения для определения амплитудных коэффициентов гармонических составляющих в спектре сигнала радиофотонного смесителя на выходе второго электрооптического модулятора. В результате экспериментального исследования были определены амплитуды комбинационных составляющих в оптическом спектре на выходе исследуемого смесителя.

*Ключевые слова:* радиофотоника, радиофотонный смеситель частот, электрооптический модулятор.

### Введение

Смесители частот находят свое применение в радиоприемной аппаратуре, оборудовании спутниковой связи, информационно-измерительных системах и других областях, где необходим перенос сигнала на промежуточную частоту для его регистрации и обработки [1–3]. На сегодняшний день наибольшее распространение получили диодные смесители частоты, т. к. они отличаются хорошим быстродействием и невысоким уровнем шумов [4]. Тем не менее, перспективными являются смесители частот, построенные на новых принципах радиофотоники (с использованием волоконно-оптической линии и двух электрооптических модуляторов интенсивности излучения). Смещение частот достигается за счет вывода рабочей точки модуляторов на нелинейный участок модуляционной характеристики (МХ) с помощью подачи напряжения на один из портов.

### 1. Теоретическая часть

Радиофотонный смеситель частот в общем случае состоит из трех блоков – блока электрооптического преобразования (ЭОП), оптоволоконного тракта (ОВТ) и блока оптоэлектронного преобразования (ОЭП). Блок ЭОП состоит из лазерного диода (ЛД) и двух модуляторов интенсивности излучения на базе интерферометров Маха – Цандера (ММЦ 1 и ММЦ 2). Блок ОВТ

служит для передачи сигнала, а ОЭП, основным элементом которого является фотодетектор, осуществляет преобразование оптического сигнала в электрический. Схема радиофотонного смесителя представлена на рис. 1.

Принцип работы данного смесителя заключается в следующем: в первом модуляторе Маха – Цандера (ММЦ 1) производится амплитудная модуляция оптического излучения от лазерного диода входным электрическим сигналом. После модуляции оптический сигнал будет содержать три спектральные составляющие с частотами  $(f_{оп})$ ,  $(f_{оп} + f_c)$  и  $(f_{оп} - f_c)$ . Затем, оптический сигнал с выхода ММЦ 1 через ОВТ 1 поступает во второй модулятор Маха – Цандера (ММЦ 2). В ММЦ 2 осуществляется амплитудная модуляция оптического сигнала сигналом гетеродина. Продуктом этой модуляции является модулированный оптический сигнал, спектр которого содержит девять спектральных составляющих  $(f_{оп})$ ,  $(f_{оп} + f_c)$ ,  $(f_{оп} - f_c)$ ,  $(f_{оп} + f_T)$ ,  $(f_{оп} - f_T)$ ,  $(f_{оп} + f_c - f_T)$ ,  $(f_{оп} + f_c + f_T)$ ,  $(f_{оп} - f_c - f_T)$  и  $(f_{оп} - f_c + f_T)$ . Полученный оптический сигнал через ОВТ 2 поступает на оптический вход фотодетектора, на выходе которого формируется электрический сигнал, содержащий четыре спектральных составляющих  $(f_c)$ ,  $(f_T)$ ,  $(f_c + f_T)$ ,  $(f_c - f_T)$ . Необходимая спектральная составляющая может быть выделена полосовым фильтром.

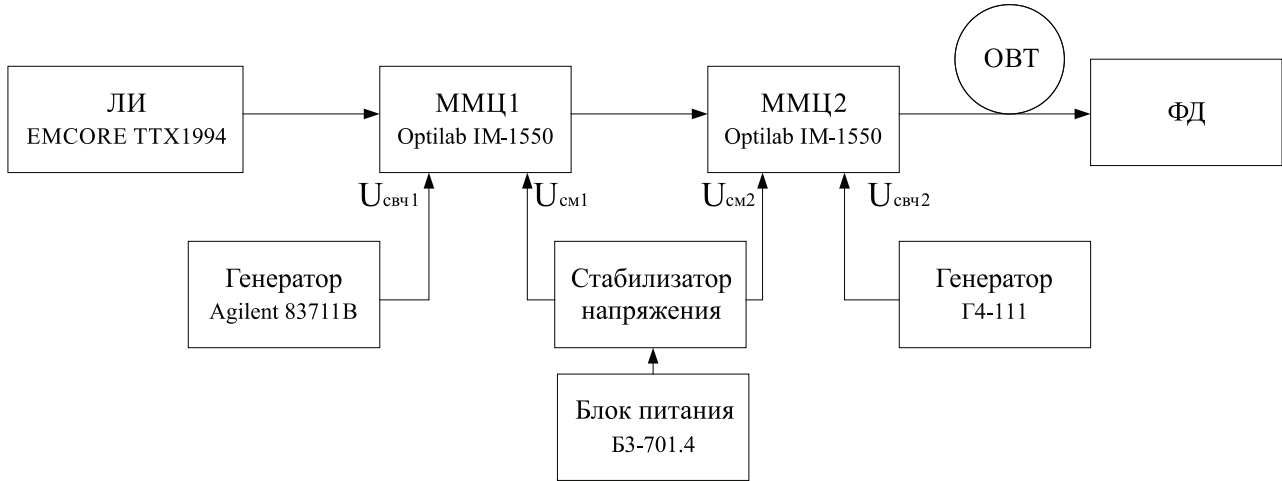


Рис. 1. Схема радиофотонного смесителя: ЛИ – лазерный излучатель; ММЦ 1, ММЦ 2 – оптоэлектронные модуляторы на базе интерферометра Маха – Цандера; ОВТ – оптоволоконный тракт; ФД – фотодетектор

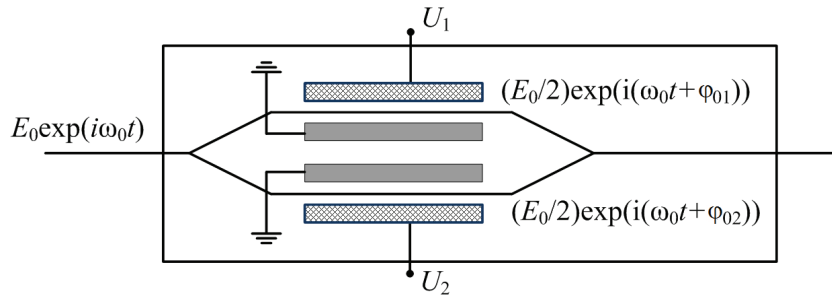


Рис. 2. Модулятор Маха – Цандера

В результате на выходе будем иметь сигнал на промежуточной частоте.

Для определения уровня гармонических составляющих был произведен теоретический расчет спектра на выходе ММЦ 2.

Электромагнитная волна от лазерного излучателя с частотой  $\omega_0$  и амплитудой  $E_0$  поступает на вход ММЦ 1. Оптический модулятор Маха – Цандера представляет собой два встречно включенных Y-разветвителя, по которым распространяется оптическое излучение (рис. 2). Попадая на разветвитель, свет делится на два пучка с равными амплитудами  $E_0 / 2$ .

На выходе ММЦ 1 получим:

$$E_{\text{мод1}} = E_0 e^{i(\omega_0 t + \varphi_0)} \cos\left(\frac{\pi}{4} \frac{U_1 + U_2}{U_\pi}\right) e^{\frac{i\pi}{4} \left(\frac{U_1 - U_2}{U_\pi}\right)},$$

где  $\varphi_0$  – начальная фаза ММЦ 1;  $U_1, U_2$  – напряжения, приложенные к плечам модулятора;  $U_\pi$  – полуволновое напряжение.

На плечи модулятора подаются одинаковые напряжения  $U_1 = U_2 = U$ , в результате формула принимает вид:

$$E_{\text{мод1}} = E_0 e^{i(\omega_0 t + \varphi_0)} \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{U}{U_\pi}\right).$$

Представляем СВЧ-сигнал, поданный на управляющий вход ММЦ 1 ( $U / U_\pi$ ), как сумму постоянного напряжения смещения и гармонического сигнала:

$$\frac{U}{U_\pi} = U_{01} + U_{x1}(t),$$

где  $U_{01}$  – нормированное постоянное напряжение смещения;  $U_{x1} = U_{x1} \cos(\omega_n t + \varphi_n)$  – нормированный СВЧ-сигнал с генератора 1.

В результате имеем:

$$E_{\text{мод1}} = E_0 e^{i(\omega_0 t + \varphi_0)} \cos\left(\frac{\pi}{2} [U_{01} + U_{x1}(t)]\right).$$

Произведя аналогичные преобразования, на выходе ММЦ 2 имеем:

$$E_{\text{мод2}} = \frac{E_0}{2} e^{i(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_{02})} \times \cos\left(\frac{\pi}{2} [U_{01} + U_{x1}(t)]\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} [U_{02} + U_{x2}(t)]\right), \quad (1)$$

где  $U_{02}$  – нормированное постоянное напряжение смещения;  $U_{x2} = U_{x2} \cos(\omega_m t + \varphi_m)$  – нормированный СВЧ-сигнал с генератора 2;  $\varphi_{02}$  – начальная фаза ММЦ 2.

Используя тригонометрические соотношения, формулы Эйлера и Ангера – Якоби, учитывая, что  $P \sim E^2$ , мощность на выходе второго ЭОМ можно выразить как:

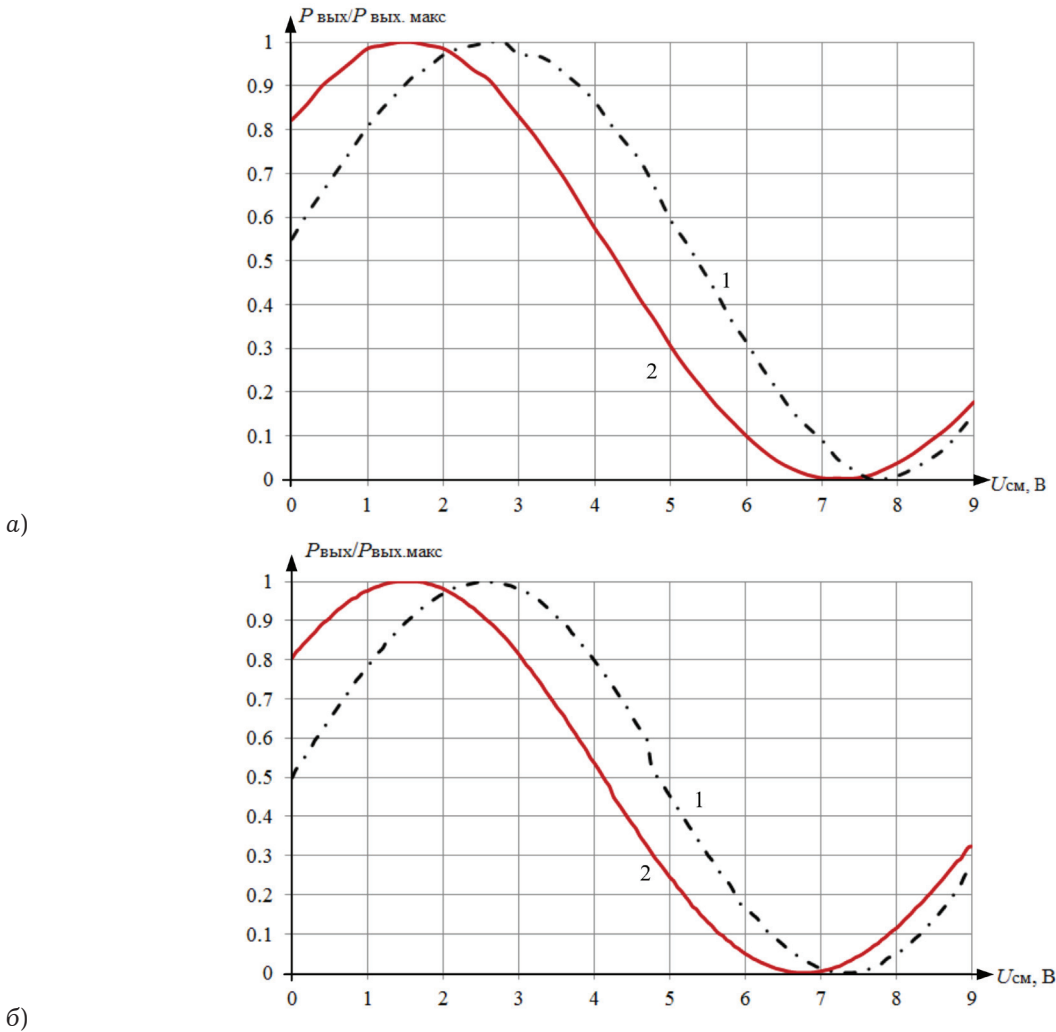


Рис. 3. Модуляционные характеристики: а) ММЦ 1; б) ММЦ 2

$$P_{\text{вых}} = P_0 \operatorname{Re} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} W_{n,m}^2 e^{i(n\omega_n + m\omega_m)t}, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} |W_{n,m}| = & \left| \frac{i^{n+m}}{2} \right| \left| e^{\frac{i\pi}{2}(U_{01}-U_{02})} J_m \left( -\frac{\pi U_{x2}}{2} \right) + \right. \\ & \left. + e^{\frac{i\pi}{2}(U_{01}+U_{02})} J_m \left( \frac{\pi U_{x2}}{2} \right) \right| \left| J_n \left( \frac{\pi U_{x1}}{2} \right) e^{i(m\varphi_m + n\varphi_n)} \right|; \end{aligned}$$

$P_0$  – мощность оптического излучения на входе ММЦ 1.

## 2. Экспериментальная часть

При экспериментальном исследовании радиофотонного смесителя одной из главных задач является снятие модуляционных характеристик оптоэлектронных модуляторов интенсивности излучения на базе интерферометра Маха – Цандера [5]. Данная процедура необходима для определения полуволнового напряжения, начальной фазы модулятора и областей максимальной не-

линейности. Установив рабочие точки модуляторов в одну из таких областей, будем наблюдать появление сигнала на промежуточной частоте. Для создания радиофотонного смесителя использовались два модулятора OptilabIM-1550.

Модуляционные характеристики модуляторов представлены на рис. 3. Они были сняты экспериментально при изменении напряжения смещения от 9 до 0 В (кривые 2) и от 0 до 9 В (кривые 1). Видно, что области максимальной нелинейности располагаются в промежутках от 1 до 3,5 В и от 5 до 8,5 В. Полуволновые напряжения ММЦ 1 и ММЦ 2 составляют 5,1 В.

Для определения уровня суммарных и разностных комбинационных составляющих на выходе второго ЭОМ был собран макет, структурная схема которого представлена на рис. 4.

Проведя ряд экспериментов, удалось получить максимальный уровень комбинационных составляющих на выходе второго ЭОМ при  $U_{\text{см}1} = 7.35$  В;  $U_{\text{см}2} = 7.80$  В;  $P_{\Gamma 1} = 15$  дБм;  $P_{\Gamma 2} = 13$  дБм;  $P_{\text{опт}} = 15$  дБм;  $\lambda = 1550$  нм. Он со-

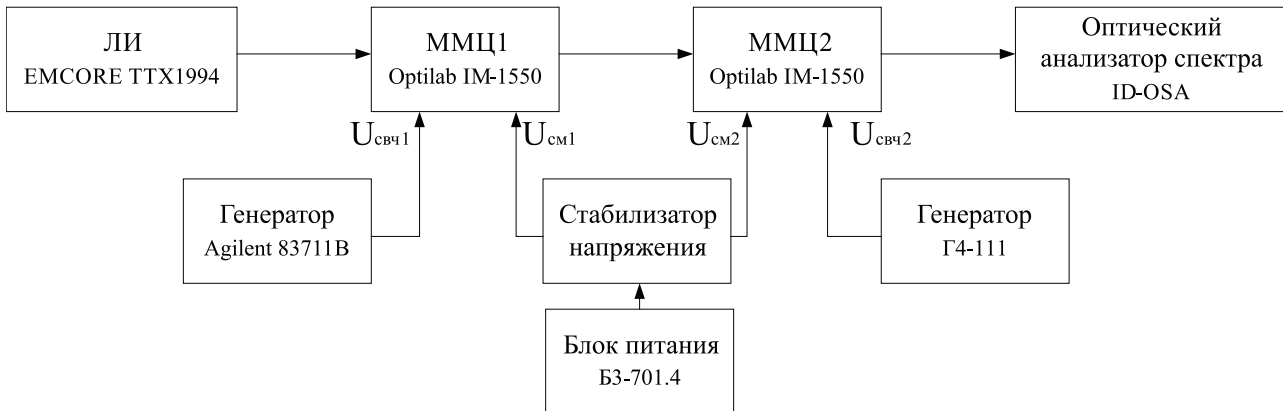


Рис. 4. Схема радиофотонного смесителя частот

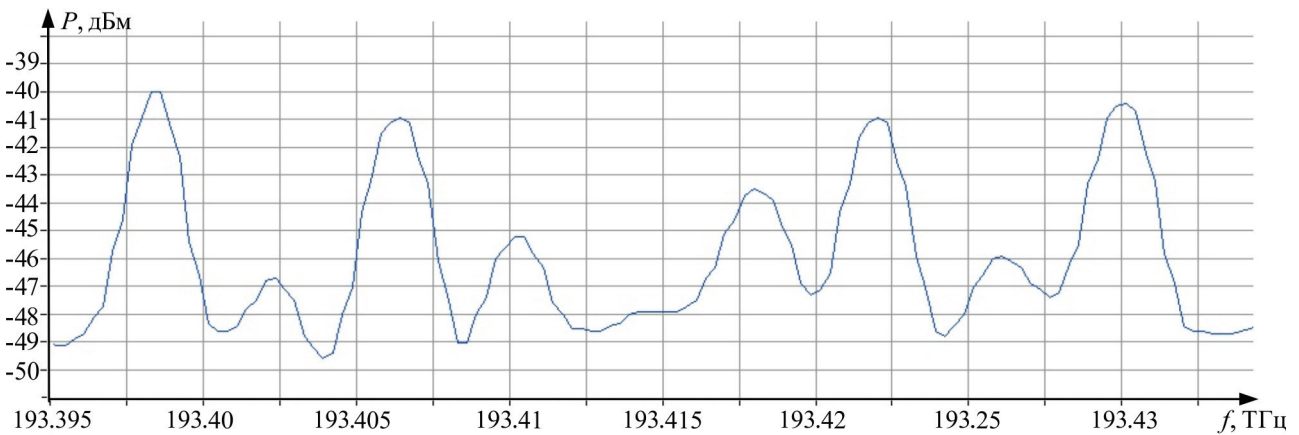


Рис. 5. Оптический спектр на выходе ММЦ 2

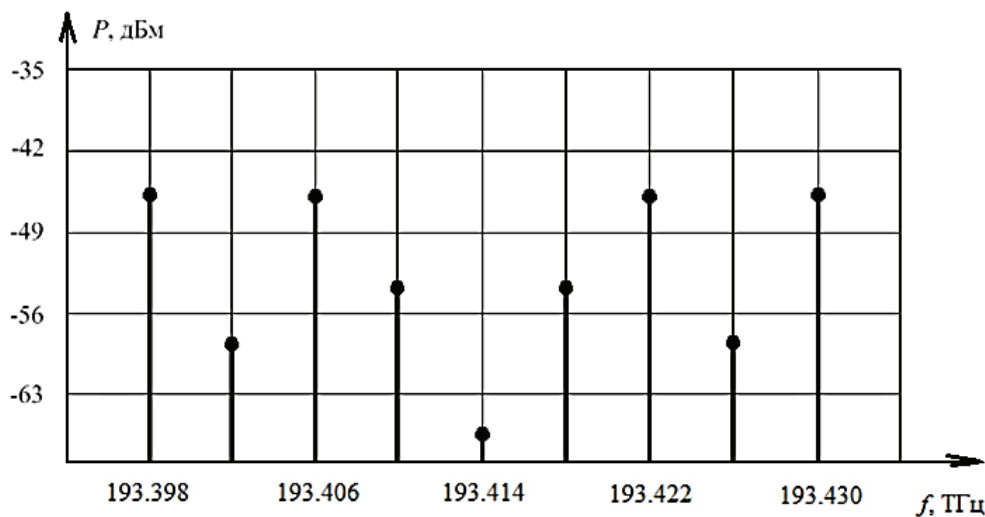


Рис. 6. Спектр сигнала на выходе второго ЭОМ, рассчитанный теоретически

ставил порядка минус 40 дБм. Результат эксперимента представлен на рис. 5.

Для теоретического расчета спектра сигнала на выходе второго ЭОМ, значения параметров, при которых был получен максимальный уровень комбинационных составляющих, были подставлены в выражение (2). Результаты расчета показаны на рис. 6.

## Заключение

Таким образом, в данной работе получена формула для нахождения амплитуд гармонических составляющих спектра напряженности на выходе радиофотонного смесителя. Проведен эксперимент, в результате которого установлены уровни комбинационных составляющих на разностной и суммарной частотах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-19-01628).

### Список литературы

1. О применении методов и средств радиوفотоники для обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн / А.А. Белоусов [и др.] // Прикладная фотоника. 2014. № 1. С. 65–86.
2. Радиофотонные системы двухчастотного симметричного зондирования контура усиления Манделъштама-Бриллюэна в одномодовых оптических волокнах / О.Г. Морозов [и др.] // Прикладная фотоника. 2015. Т. 2. № 3. С. 223–245.
3. Manka M.E. Microwave photonics for electronic warfare applications // International Topical Meeting on Microwave Photonics jointly held with the 2008 Asia-Pacific Microwave Photonics Conference. 2008. P. 275–278.
4. Данилин А.А., Лавренко Н.С. Приборы и техника радиоизмерений: уч. пос. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. С. 202.
5. Исследование характеристик волоконно-оптических линий задержки с различными типами модуляции интенсивности оптического излучения / В.В. Бирюков [и др.] // Материалы 26-ой международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо-2016). 2016.

---

## Radio-photon mixer of microwave radio signals: theoretical description and experimental study

*V.V. Biryukov, V.A. Grachev, S.A. Kapustin, M.A. Palachev, A.S. Rayevsky*

In this paper, a theoretical calculation of a radio-photon mixer is performed using spectral analysis of signals and the results of an experimental study of the spectral composition of optical signals in a radio-photon mixer. An experimental setup consisting of a source of optical radiation, two Mach – Zehnder modulators, an optical spectrum analyzer and auxiliary equipment for specifying the bias voltages and the formation of microwave signals is presented. Expressions are obtained for determining the amplitude coefficients of the harmonic components in the spectrum of the signal of the radio-photon mixer at the output of the second electro-optical modulator. As a result of the experimental study, the amplitudes of the combination components in the optical spectrum at the output of the mixer under study were determined.

*Keywords:* radiophotonics, radiophotons mixer of frequency, electro-optical modulator.

---