

## Радиофотонные методы генерации и обработки радиочастотных сигналов

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

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

В данной работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований устройств генерации и преобразования радиосигналов, реализованных в соответствии с принципами радиофотоники. Приведены различные варианты построения волоконно-оптических линий задержки, малошумящих широкополосных оптоэлектронных генераторов, умножителей и смесителей радиочастотных сигналов.

*Ключевые слова:* радиофотоника, электрооптический модулятор, оптоэлектронный генератор, преобразователи частоты.

### Введение

Применение оптических методов передачи и обработки радиочастотных сигналов в радиолокации и связи является одним из перспективных направлений. Использование методов радиофотоники при создании узлов приемопередающей аппаратуры может обеспечить значительное улучшение их основных тактико-технических характеристик: увеличение разрешающей способности по дальности и информативность, обеспечение высокой помехозащищенности и уменьшение массогабаритных характеристик. Достижение перечисленных преимуществ возможно благодаря внедрению функциональных узлов на основе электрооптических модуляторов, демодуляторов, источников и приемников оптического сигнала, оптических линий задержек и фазовращателей, волоконно-оптических линий связи.

### 1. Элементная база

Создание любого радиофотонного устройства невозможно без таких оптических компонентов, как лазерный излучатель, модулятор, фотоприемник и оптическое волокно. В статье представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований различных радиофотонных устройств (модулей), выполненных на следующей элементной базе: полупроводниковый лазерный модуль EMCORE TTX1994, модулятор

интенсивности излучения Optilab IM-1550, оптическое волокно Corning SMF-28e+, и фотодиодный модуль EMCORE 2522 B

### 2. Волоконно-оптическая линия задержки

Одним из основных узлов практически любого радиофотонного устройства является оптическая линия задержки радиочастотного сигнала. В зависимости от функционального назначения радиофотонного устройства она может быть выполнена по-разному. Рассмотрим волоконно-оптическую линию задержки (ВОЛЗ) с внешним электрооптическим модулятором интенсивности излучения (МИИ) (рис. 1, а). Модуляционная характеристика МИИ может быть описана следующим выражением:

$$K_{ЭОМ} = \frac{1}{2} \left[ 1 + b \cos \left( \varphi_0 + \pi \frac{U_{см}}{U_{\pi}} \right) \right],$$

где  $U_{\pi}$  – полуволновое напряжение модулятора;  $b$  – коэффициент разбаланса плеч интерферометра;  $U_{см}$  – напряжение смещения;  $\varphi_0$  – начальный сдвиг фазы (встроенный).

Принцип действия ВОЛЗ с внешним модулятором следующий: непрерывное оптическое излучение с лазерного источника поступает на оптический вход модулятора интенсивности излучения. На управляющий вход МИИ поступает модулирующий высокочастотный (ВЧ) сигнал. С выхода МИИ модулированное ВЧ-сигналом

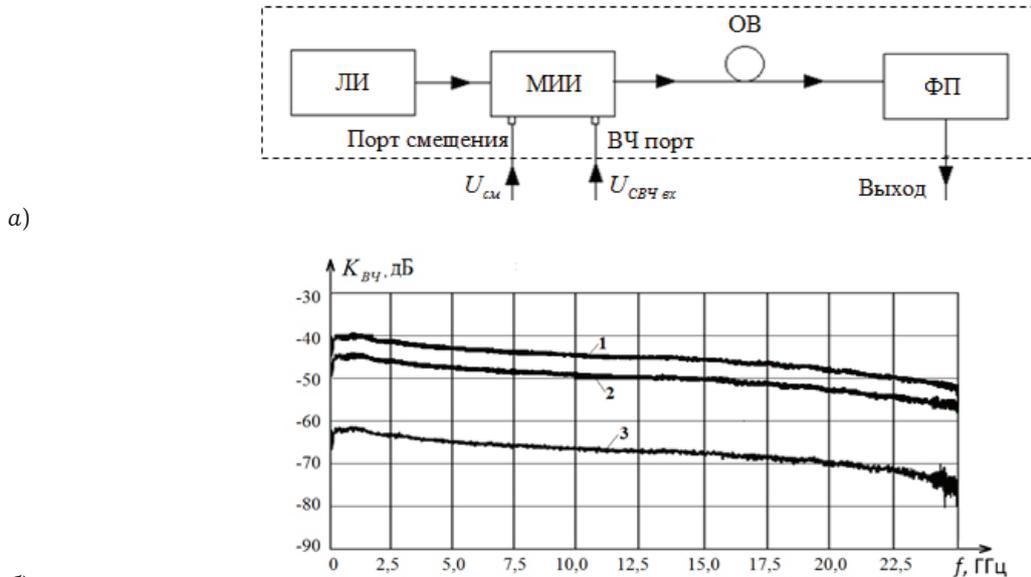


Рис. 1. Структурная схема ВОЛЗ с электрооптическим модулятором (а) и значения коэффициента передачи такой ВОЛЗ по первой гармонике (б)

излучение поступает в оптическое волокно. С выхода волокна излучение поступает на вход фотоприемника, где происходит демодуляция сигнала. Величина задержки ВЧ-сигнала прямо пропорциональна длине оптического волокна.

Экспериментально определенные значения коэффициента передачи такой ВОЛЗ по первой гармонике ВЧ-сигнала для трех разных значений напряжения смещения  $U_{см} = 0$  (кривая 1);  $U_{см} = U_{\pi}/4$  (кривая 2);  $U_{см} = U_{\pi}/2$  (кривая 3) представлены на рис. 1, б.

Нежелательные спектральные компоненты на выходе ВОЛЗ можно устранить, выбирая соответствующее напряжение смещения. Если будет подано такое напряжение смещения, чтобы рабочая точка расположилась в области квадратуры модуляционной характеристики модулятора, то максимум чувствительности достигается на основной частоте, а гармоники четного порядка устраняются. При смещении рабочей точки в нелинейную область характеристики в спектре выходного сигнала отсутствуют гармоники нечетного порядка, а четные гармоники достигают максимальной величины.

### 3. Оптоэлектронный генератор

Генераторы СВЧ-сигналов, которые строятся по традиционным технологиям, для многих задач оказываются малоприменимыми из-за недостаточной стабильности, высокого уровня фазовых шумов или малой перестройки по частоте. Генераторы на диэлектрических резонаторах имеют ограничения, как по уровню фазовых

шумов, так и по диапазону рабочих частот, что связано с малой добротностью частотозадающего элемента. Значительно уменьшить уровень шума можно при использовании генератора с лейкосапфировым резонатором (минус 170 дБ/Гц при отстройке на 1 кГц от несущей), но такие генераторы так же ограничены по диапазону рабочих частот [1].

Достаточно новым и весьма перспективным способом создания перестраиваемых по частоте, сверхмалошумящих автогенераторов с верхней граничной частотой, превышающей 60 ГГц, является применение в них стабилизированной малошумящей волоконно-оптической линии задержки с запаздыванием в ней сигнала (от 2 мкс до 50 мкс при полосе частот до 100 ГГц), с малыми потерями СВЧ-мощности. В состав волоконно-оптической линии задержки входят последовательно соединенные источник оптического излучения (лазерный излучатель), модулятор интенсивности, волоконно-оптическая система (например, одиночный волоконно-оптический световод) и фотоприемник. В лучших образцах СВЧ-генераторов с подобной линией задержки уже достигнута очень низкая спектральная плотность мощности фазовых шумов (минус 160 дБ/Гц и менее) при отстройках по частоте от несущей на 1–10 кГц. Кратковременная нестабильность частоты таких автогенераторов не хуже  $10^{-10}$ . Малый фазовый шум СВЧ-генератора достигается за счет создания на базе волоконно-оптической линии задержки сверхвысокодобротного оптоэлектронного резонатора

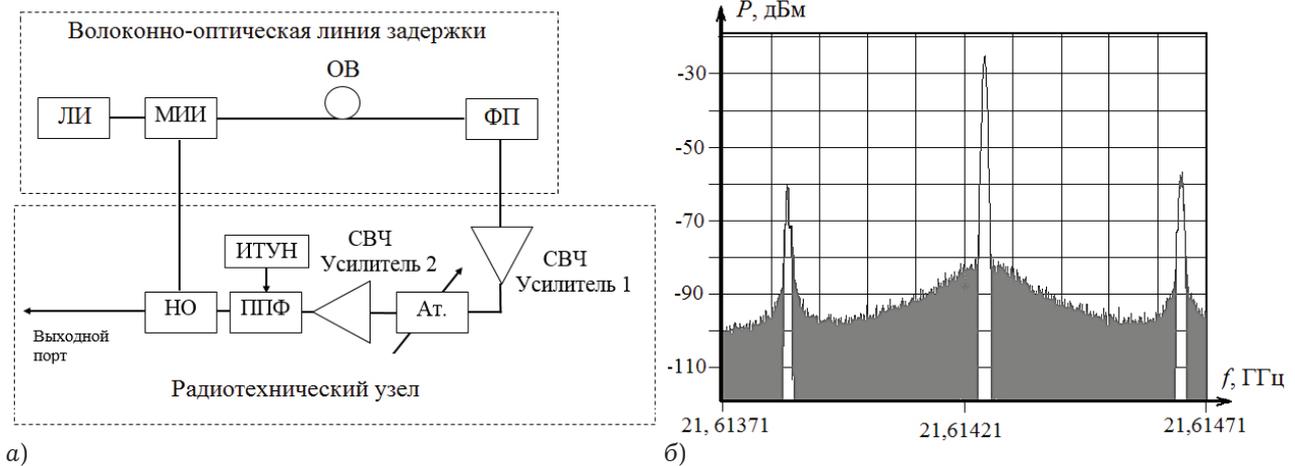


Рис. 2. Структурная схема (а) и спектрограмма выходного сигнала (б) автогенератора с внешним электрооптическим модулятором

с нагруженной эквивалентной добротностью до  $800 \cdot 10^3$  [2–4]. Важным достоинством оптической линии задержки является то, что ее характеристики могут синтезироваться в зависимости от назначения генератора.

На основе вышеописанной линии задержки был изготовлен макет одноконтурного радиопотонного автогенератора СВЧ-сигналов (рис. 2, а), работающий в диапазоне частот от 15 до 22 ГГц.

Помимо описанной выше ВОЛЗ в состав генератора входит радиотехнический тракт. Он был выполнен из следующих элементов: два усилителя СВЧ маломощных (диапазон частот 15–22 ГГц; коэффициент усиления 40 дБ), аттенюатор волноводный перестраиваемый (Ат.), ответвитель направленный (ОН) и полосно-пропускающий ЖИГ-фильтр (ППФ) с источником тока, управляемым напряжением (ИТУН).

Принцип работы автогенератора в стационарном режиме следующий. Непрерывное излучение ЛИ поступает на вход МИИ. Далее модулированное СВЧ-сигналом оптическое излучение проходит через оптическое волокно и поступает на вход ФП, в котором происходит его демодуляция. Высокодобротный ППФ выделяет частоту генерации, подавляя СВЧ-колебания на других частотах. Для стабильной работы ППФ используется источник тока, управляемый напряжением. Демодулированный СВЧ-сигнал усиливается и поступает на НО, который одну часть сигнала направляет в выходной порт генератора, а другую часть – на управляющий вход МИИ, замыкая тем самым цепь положительной обратной связи.

Время задержки ВЧ-сигнала в ВОЛЗ и минимальное расстояние между спектральными составляющими в спектре выходного сигнала ге-

нератора (область свободной дисперсии) можно определить, воспользовавшись формулами:

$$\tau_{ОВ} = \frac{nl}{c},$$

$$\Delta f = \frac{1}{\tau_{ОВ}},$$

где  $n$  – показатель преломления световода;  $l$  – длина волоконного световода;  $c$  – скорость света в свободном пространстве.

В применяемой ВОЛЗ используется ОВ Corning SMF-28e+ длиной 515 м и групповым показателем преломления 1,45. Следовательно, в соответствие с выше приведенными формулами, получаем:  $\tau_{ОВ} = 2,489 \cdot 10^{-6}$  с,  $\Delta f = 402$  кГц.

Было проведено экспериментальное исследование спектрального состава выходного сигнала автогенератора с помощью анализатора спектра Rohde & Schwarz FSU50, при этом мощность лазера составляла 10 дБм, а длина оптической линии задержки 515 м. Результат такого исследования при полосе обзора анализатора 1 МГц представлен на рис. 2, б. Из этого рисунка видно, что расстояние между соседними модами в спектре выходного сигнала составило 407 кГц, что соответствует теоретическим оценкам.

Эквивалентную добротность оптической линии задержки можно определить как

$$Q = \frac{\omega_0 \tau}{2} = \frac{\pi f_0}{\Delta f} = \frac{\pi \cdot 17,17 \cdot 10^9}{400 \cdot 10^3} = 134\,785,$$

где  $\omega_0$  – центральная частота;  $\tau$  – время задержки в петле обратной связи;  $\Delta f$  – расстояние между соседними спектральными составляющими.

Значение величин  $\omega_0$  и  $\Delta f$  определялись исходя из полученного спектра выходного сигнала автогенератора, представленного на рис. 2, б.

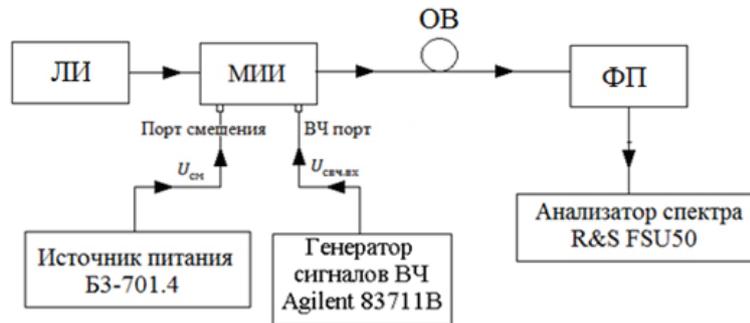


Рис. 3. Структурная схема лабораторной установки для исследования спектра выходного сигнала с фотодетектора

Так же была предпринята попытка измерить фазовый шум отдельной спектральной составляющей сигнала, но ввиду того, что собственные шумы анализатора превышали фазовый шум генератора, измерить последний не удалось, поэтому можем говорить лишь о том, что фазовый шум на частоте  $f = 16,720857$  ГГц не хуже минус 105 дБ/Гц при отстройке на 10 кГц.

#### 4. Преобразователи (умножители и смесители) частоты

Радиофотонные умножители частоты представляют большой интерес, прежде всего тем, что работают по новому принципу, не схожему с применяемыми в классических умножителях. Основным элементом, благодаря которому и происходит умножение, является модулятор, в качестве которого, как и в случае автогенератора, часто применяется модулятор на основе интерферометра Маха – Цандера [5].

Для измерения уровня спектральных составляющих на выходе фотоприемника была собрана установка, схема которой приведена на рис. 3.

Для осуществления умножения частоты входного ВЧ-сигнала необходимо установить рабочую точку на участок модуляционной характеристики с максимальной нелинейностью, который для используемых модуляторов наблюдается при напряжении смещения 2,3 В. Если при этом модулировать оптическое излучение гармоническим сигналом с частотой 1 ГГц, уровень мощности которого варьируется от минус 3 до 16 дБм с шагом 1 дБм при постоянной мощности оптического излучения 6 дБм, то будет получена зависимость, приведенная на рис. 4.

При положении рабочей точки в экстремуме модуляционной характеристики на выходе ЭОМ первая гармоника подавлена, а вторая растет линейно с ростом мощности. Зависимость уровня второй гармоники от мощности модулирующего СВЧ-сигнала является линейной, начиная

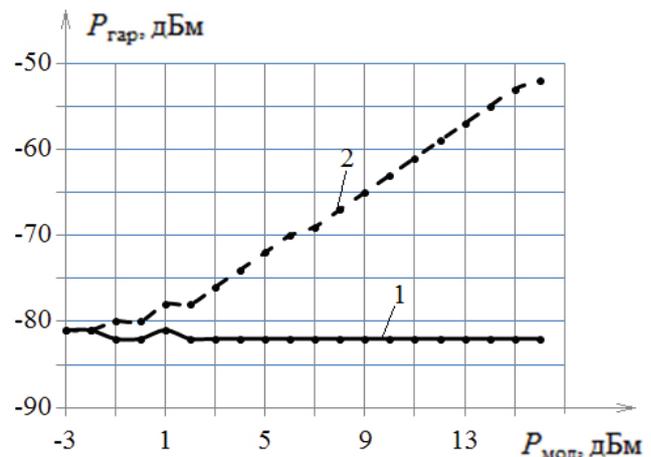


Рис. 4. Зависимость уровней первых двух гармоник от входной мощности СВЧ-сигнала при  $U_{\text{см}} \approx 2,3$  В и при  $P_{\text{опт}} = 6$  дБм

с 1 дБм мощности модулирующего ВЧ-сигнала (пороговый эффект).

Одним из существенных недостатков интегрального модулятора на основе интерферометра Маха – Цандера является изменение положения рабочей точки, которое приводит к медленному изменению напряжения [6]. Причиной этого могут быть как внешние источники: температура, влажность или механическая нагрузка, так и внутренние источники, которые связаны с перераспределением электрического заряда внутри структур модулятора. В результате возникает необходимость постоянной подстройки напряжения смещения на электродах модулятора с целью удержания интерферометра Маха – Цандера в точке минимума пропускания (чтобы реализовать умножение частоты входного ВЧ-сигнала). В проведенном эксперименте зависимость требуемого значения напряжения смещения от уровня мощности ВЧ-сигнала имеет вид, приведенный на рис. 5.

При повышении мощности входного сигнала от минус 3 до 1 дБм требуемое напряжение смещения изменяется достаточно ощутимо – в пределах 0,1 В. При дальнейшем увеличе-

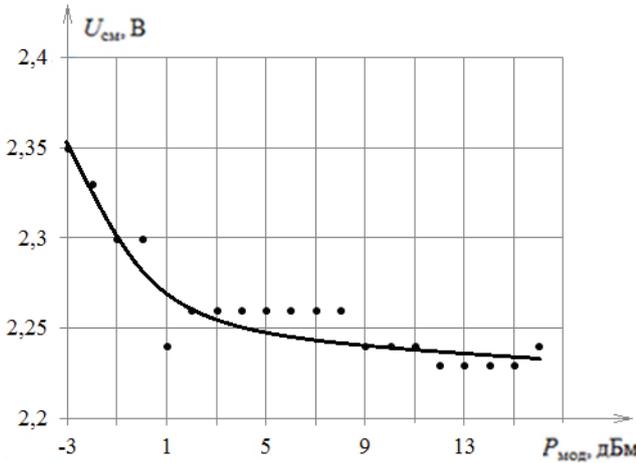


Рис. 5. Зависимость требуемого напряжения смещения от мощности входного ВЧ-сигнала

нии мощности эти изменения уже значительно меньше – в пределах трех сотых вольта.

С использованием той же экспериментальной установки, при фиксированных уровнях модулирующего сигнала в 16 дБм, оптической мощности в 15 дБм, изменяя напряжение смещения в пределах от 0 до 9 В была получена зависимость мощностей первой и второй гармоник на выходе электрооптического модулятора от напряжения смещения, поданного на порт смещения. Результаты такого эксперимента приведены на рис. 6.

Из рисунка видно, что происходит перераспределение энергии между первой и второй гармониками. В квадратуре наблюдается максимум на основной частоте, при смещении рабочей точки происходит возрастание уровня второй гармоники и понижение уровня первой. В точке максимальной нелинейности первая гармоника подавлена относительно второй на 20–25 дБм.

Аналогичная зависимость (уровня гармоник от напряжения смещения), но для трех гармоник, была получена при теоретическом расчете с учетом экспериментально определенного встроенного сдвига фаз модулятора и полувольтного напряжения смещения (рис. 7).

Аналитическое выражение для теоретического определения зависимости мощности выходного излучения от напряжения смещения модулятора имеют следующий вид [7]:

$$P_{\text{вых}} = \frac{0,08R\Pi_{\text{ФД}}^2 P_{\text{вх}}^2}{\alpha_{\text{ЭОМ}}^2} \times \left\{ 1 + b \left[ \cos(\varphi_0) \cos\left(\pi \frac{U_{\text{см}}}{U_{\pi}}\right) \left( J_0\left(\pi \frac{U_{\text{СВЧ вх}}}{U_{\pi}}\right) + \right. \right. \right.$$

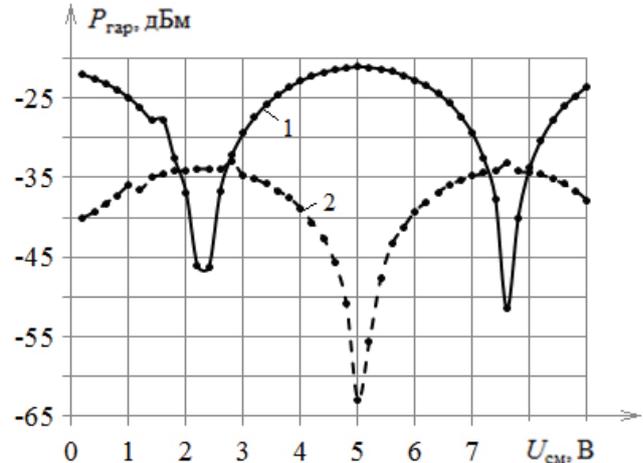


Рис. 6. Зависимость уровня первых двух гармоник от напряжения смещения (экспериментальная)

$$+ 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n} \left( \pi \frac{U_{\text{СВЧ вх}}}{U_{\pi}} \right) \cos(2n\omega_m t) \Bigg] - \cos(\varphi_0) \sin\left(\pi \frac{U_{\text{см}}}{U_{\pi}}\right) 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1} \left( \pi \frac{U_{\text{СВЧ вх}}}{U_{\pi}} \right) \times \cos((2n-1)\omega_m t) - \sin(\varphi_0) \sin\left(\pi \frac{U_{\text{см}}}{U_{\pi}}\right) \times \left[ J_0\left(\pi \frac{U_{\text{СВЧ вх}}}{U_{\pi}}\right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n} \left( \pi \frac{U_{\text{СВЧ вх}}}{U_{\pi}} \right) \times \cos(2n\omega_m t) \right] - \sin(\varphi_0) \cos\left(\pi \frac{U_{\text{см}}}{U_{\pi}}\right) \times \left. \times 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1} \left( \pi \frac{U_{\text{СВЧ вх}}}{U_{\pi}} \right) \cos((2n-1)\omega_m t) \right\}^2.$$

Здесь  $R = 50$  Ом и  $\Pi_{\text{ФД}} = 0,7$  А/Вт – нагрузка и чувствительность фотодетектора соответственно;  $P_{\text{вх}} = 15$  дБм и  $\alpha_{\text{ЭОМ}} = 5$  дБ – мощность оптической несущей и оптические потери в модуляторе соответственно;  $b = 1$  – коэффициент разбаланса плеч интерферометра.

Из рис. 6 и 7 видно, что экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими не только качественно, но и количественно.

Смеситель сигналов также является важным компонентом приема-передающей аппаратуры, спутникового оборудования, информационно-измерительных систем и т. д. [8–10]. Наибольшее распространение получили диодные смесители частот, такие смесители обладают высоким быстродействием и низким уровнем шумов [11]. Но перспективными и принципиально новыми являются смесители сигналов, построенные на элементной базе радиофотоники [12].

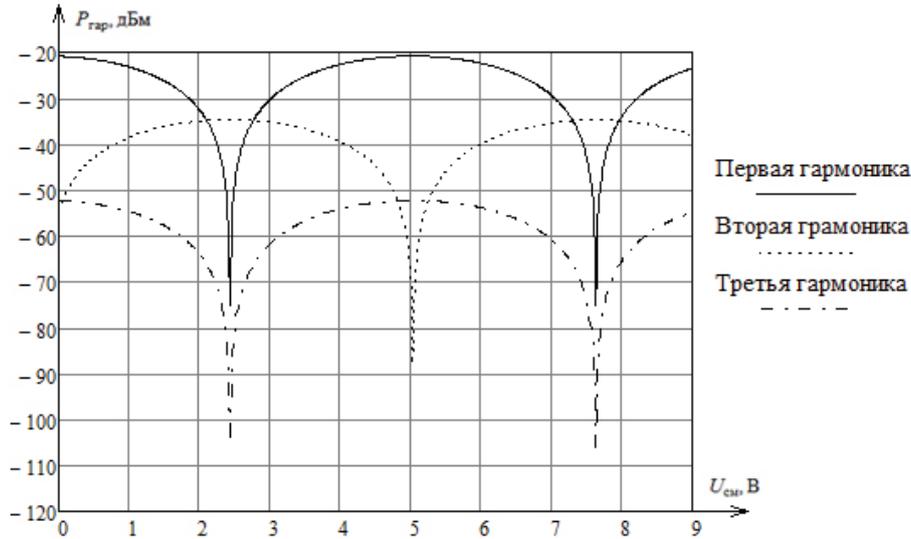


Рис. 7. Зависимость уровня первых трех гармоник от напряжения смещения (теоретическая)

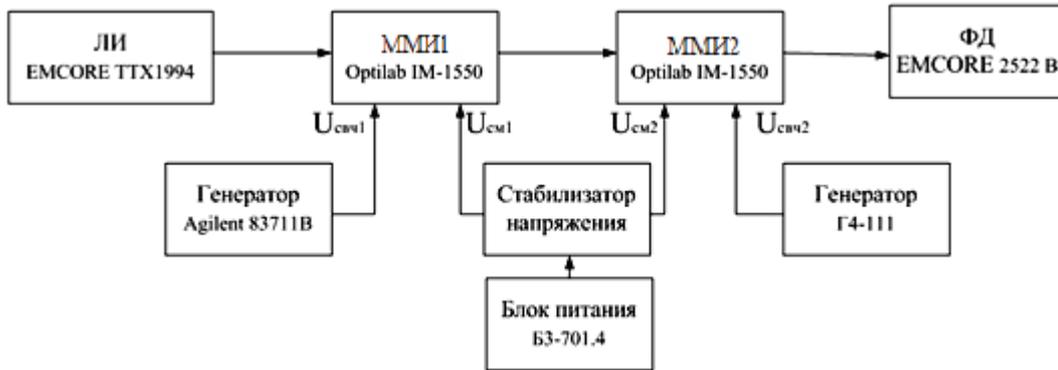


Рис. 8. Структурная схема лабораторного макета: ЛИ – лазерный излучатель; ММИ 1, ММИ 2 – оптоэлектронные модуляторы на базе интерферометра Маха – Цандера; ФД – фотодетектор

Структурная схема смесителя СВЧ-сигналов на дискретной элементной базе радиофотоники представлена на рис. 8.

Принцип действия такого смесителя заключается в следующем: оптический сигнал с лазерного излучателя поступает на ММИ 1, модулируется первым СВЧ-сигналом, спектр на выходе ММИ 1 содержит три гармонические составляющие. Полученный сигнал повторно модулируется в ММИ 2 вторым СВЧ-сигналом, в результате спектр на выходе ММИ 2 содержит девять гармонических составляющих среди которых присутствуют гармоники на разностной и суммарной частоте СВЧ-сигналов. Затем сигнал детектируется фотодетектором.

Оптический спектр рассчитывается в предположении, что лазерный излучатель генерирует оптическое излучение постоянной мощности  $P_0$ , модуляция оптического излучения производится гармоническими сигналами. Мощность оптического излучения на выходе второго модулятора можно выразить как:

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

$$W_{n,m} = \frac{i^{n+m}}{2} \left( e^{\frac{i\pi}{2}(U_{01}-U_{02})} J_m \left( -\frac{\pi U_{x2}}{2} \right) + e^{\frac{i\pi}{2}(U_{01}+U_{02})} J_m \left( \frac{\pi U_{x2}}{2} \right) \right) \times J_n \left( \frac{\pi U_{x1}}{2} \right) e^{i(m\varphi_m + n\varphi_n)},$$

где  $U_{01}, U_{02}$  – нормированные напряжения смещений;  $U_{x1}, U_{x2}$  – нормированные амплитуды модулирующих напряжений;  $\omega_n, \omega_m$  – круговые частоты модулирующих сигналов.

Для проверки полученных результатов был экспериментально снят спектр сигнала на выходе смесителя в оптическом диапазоне. В ходе исследований был зафиксирован максимальный уровень комбинационных составляющих на выходе второго модулятора в минус 40 дБм. Частоты модулирующих сигналов были равны

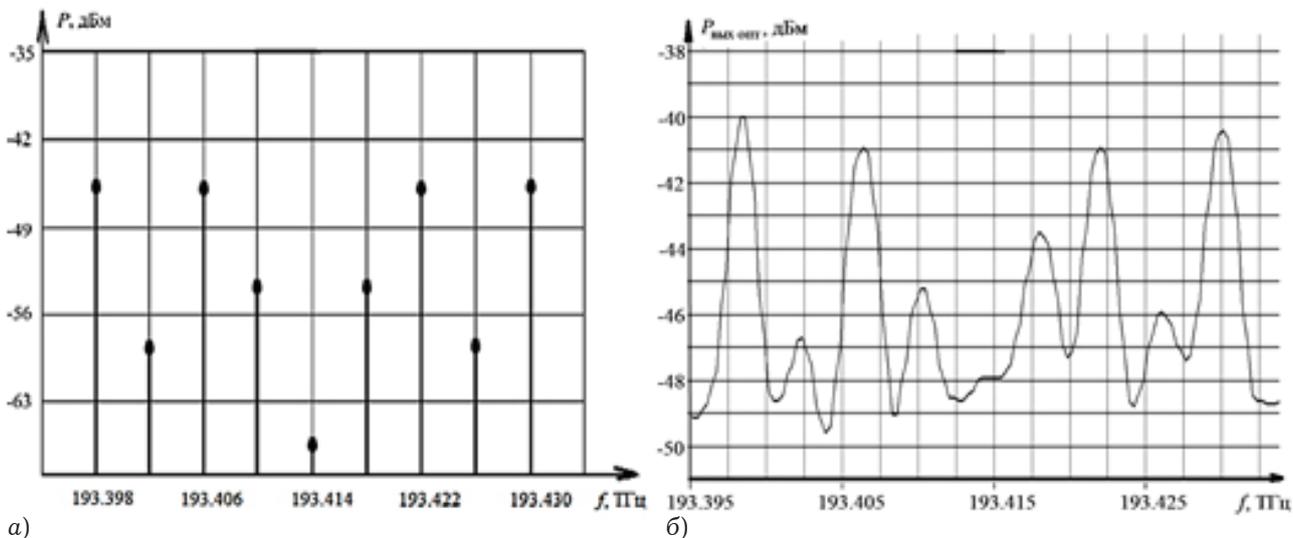


Рис. 9. Оптический спектр на выходе второго модулятора: теоретический (а) и экспериментальный (б)

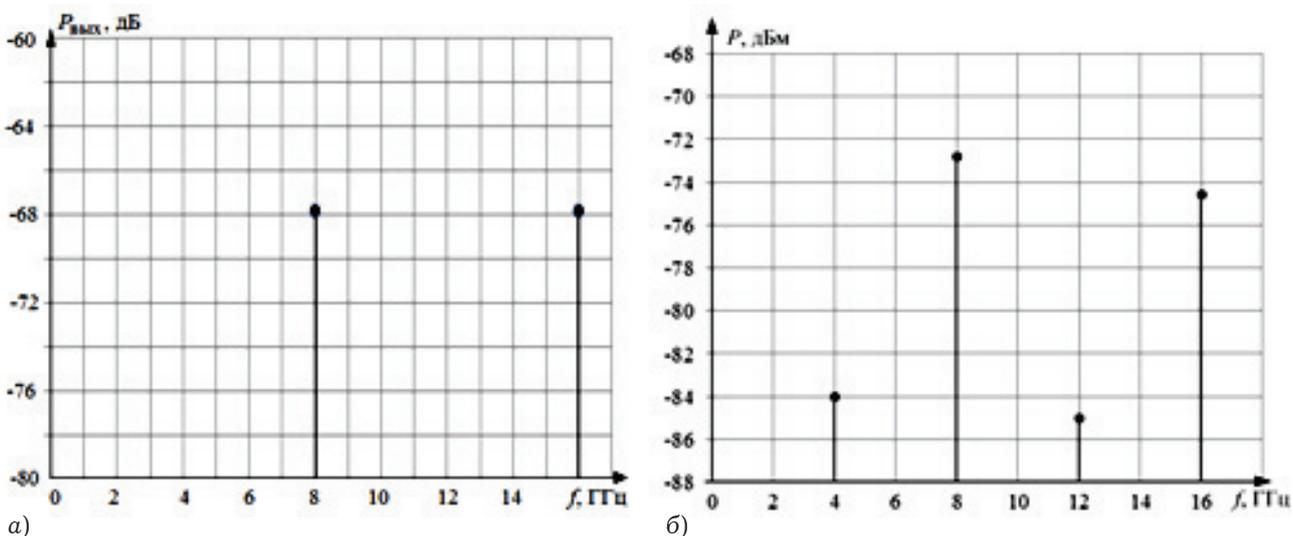


Рис. 10. Радиочастотный спектр на выходе фотодетектора: теоретический (а) и экспериментальный (б)

$f_1 = 4$  ГГц,  $f_2 = 12$  ГГц. Теоретический спектр оптического сигнала на выходе второго модулятора при данных условиях показан на рис. 9, а, а на выходе фотодетектора – на рис. 10, а. Результаты эксперимента представлен на рис. 9, б и 10, б.

Как видно из рисунка, оптический спектр сигнала, рассчитанный теоретически, совпадает с экспериментальными данными с точностью до 4 дБм. Аналогичное сравнение проведено в ВЧ-области. Спектр сигнала на выходе фотодетектора представлен на рис. 10, б.

### Заключение

В данной работе рассмотрены устройства, выполненные с применением принципов радиофотоники, такие как: волоконно-оптические линии задержки, оптоэлектронные генераторы, умножители и смесители частоты. На имеющейся

элементной базе были выполнены все вышеперечисленные устройства. Проведены теоретические расчеты и экспериментальные исследования.

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

### Список литературы

1. Царапкин Д.П. Методы генерирования СВЧ-колебаний с минимальным уровнем фазовых шумов: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2004. 413 с.
2. Борцов А.А. Оптоэлектронный генератор радиочастотного диапазона с накачкой квантоворазмерным лазерным диодом: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2014. 404 с.
3. Белкин М.Е. Разработка модели оптоэлектронного генератора СВЧ-диапазона // Материалы международной НТК «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» ИНТЕРМАТИК 2008. М.: Энергоатомиздат, 2008. с. 289–297.

4. Signature analysis of microwave signal generator with a fiber optic delay line in a feedback loop / V.V. Biryukov [et al.] // Proc. of SPIE. Optical Technologies for Telecommunications. 2015. Vol. 9807. P. 980712-1-6.
5. Белоусов А.А., Вольхин Ю.Н., Дубровская А.А. Обзор и исследование возможных вариантов реализации сверхширокополосных детекторов, смесителей и других аналоговых процессоров диапазона СВЧ // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: материалы V юбилейной общерос. науч.-техн. конф. 7-8 октября 2014.
6. Bulmer C.H., Burns W.K., Hiser S.C. Pyroelectric effects in LiNbO<sub>3</sub> channel-waveguide devices // Appl. Phys. Lett. 1986. Vol. 48. № 16. P. 1036-1038.
7. Investigation of the characteristics of fiber optic delay lines with different types of optical emission intensity modulation / A.S. Raevskii [et al.] // Proc. of SPIE. Optical Technologies for Telecommunications. 2016. Vol. 10342. P. 103420K-1-6.
8. О применении методов и средств радиофотоники для обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн / А.А. Белоусов [и др.] // Прикладная фотоника. 2014. № 1. С. 65-86.
9. Радиотонные 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.
10. Manka M.E. Microwave photonics for electronic warfare applications // Microwave Photonics. Jointly Held with the 2008 Asia-Pacific Microwave Photonics Conference. 2008. P. 275-278.
11. Данилин А.А., Лавренко Н.С. Приборы и техника радиоизмерений: уч. пос. СПб.: ГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 202 с.
12. Сверхширокополосный радиотонный смеситель / А.А. Белоусов [и др.] // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2016. № 1. С. 328-332.

---

## Radiophotons methods of generating and processing radio frequency signals

*V.V. Biryukov, V.A. Grachev, S.A. Kapustin,  
S.G. Lobin, M.A. Palachev, A.S. Raevskii*

In this paper, we present the results of theoretical and experimental studies of devices for generating and converting radio signals realized in accordance with the principles of radiophotonics. Various variants of construction of fiber-optic delay lines, low-noise broadband optoelectronic generators, multipliers and mixers of radio-frequency signals are presented.

*Keywords:* radio-photonics, electro-optical modulator, optoelectronic generator, frequency converters.

---