

УДК 621.314

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

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА ИНТЕНСИВНОСТИ  
В УСТРОЙСТВАХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ РАДИОСИГНАЛОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлено описание электрооптического модулятора на базе интерферометра Маха-Цандера и, выполненного на его основе, умножителя частоты СВЧ-сигнала на два. Приведены результаты экспериментальных исследований модуляционной характеристики модулятора. Исследованы выходные характеристики выполненного умножителя частоты.

*Ключевые слова:* умножители частоты, модулятор интенсивности, радиофотоника.

**Введение**

Большой интерес представляет такая задача радиоэлектроники, как разработка и изготовление источников СВЧ-колебаний (обладающих наилучшими характеристиками), которые применяются в спутниковой связи, информационно-измерительных системах, радиоастрономических исследованиях. Получить такие высокочастотные колебания можно применяя, например, сигналы опорных автогенераторов с последующим их преобразованием: умножением по частоте и усилением по мощности.

Умножителями частоты называются устройства, обеспечивающие кратное увеличение частоты входного сигнала. Важным качеством таких устройств является постоянство относительной нестабильности частоты колебаний при умножении. Наиболее широкое применение в настоящее время находят умножители частоты, выполненные на основе диодов, поскольку они обладают невысоким уровнем шумов при достаточно хорошем быстродействии.

Но существует и множество других типов умножителей частоты, которые выполняются на основе фазовращателей, действуют на базе плазменного механизма нелинейности или используют в качестве нелинейного рабочего элемента двумерную углеродную пленку–графен. Один из таких «неклассических» умножителей можно выполнить с применением принципов радиофотоники [1-4]. Тогда при определенном положении рабочей точки на модуляционной характеристике электрооптического модулятора удастся осуществить умножение частоты на два, на четыре.

**Радиофотонный блок и входящий в его состав электрооптический модулятор**

Рассмотрим радиофотонный блок, включающий в себя лазерный излучатель (ЛИ), модулятор интенсивности излучения (МИИ) и фотодиод (ФД). Структурная схема такого блока представлена на рис. 1, а. Принцип его работы следующий: непрерывное оптическое излучение с лазерного излучателя (ЛИ) поступает на оптический вход модулятора интенсивности излучения (МИИ). На управляющий вход модулятора поступает входной высокочастотный сигнал ( $P_{вч}$ ). С выхода модулятора промодулированное ВЧ-сигналом излучение через соединительное волокно поступает на вход фотоприемника, где происходит демодуляция этого сигнала [5-7].

Для экспериментального исследования был собран макет, состоящий из следующих элементов: лазерный излучатель EMCORE TTX1994 (управление осуществляется с помощью персонального компьютера), модулятор интенсивности излучения Optilab IM-1550, оптическое волокно Corning SMF-28e+ и фотоприемник EMCORE 2522 В. С помощью векторного анализатора цепей была получена зависимость коэффициента передачи радиофотонного

блока от частоты, которая имеет вид, приведенный на рис. 1, б. Из зависимости коэффициента передачи от частоты следует, что в рабочей полосе частот (до 20 ГГц) потери в таком блоке не превышают 52 дБ.

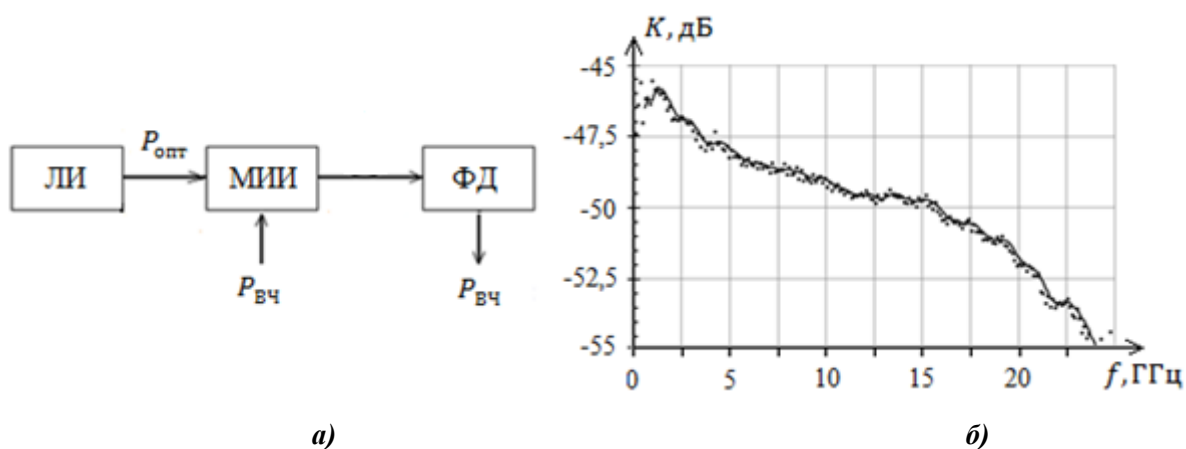


Рис. 1. Структурная схема радиофотонного блока (а) и его коэффициент передачи (б)

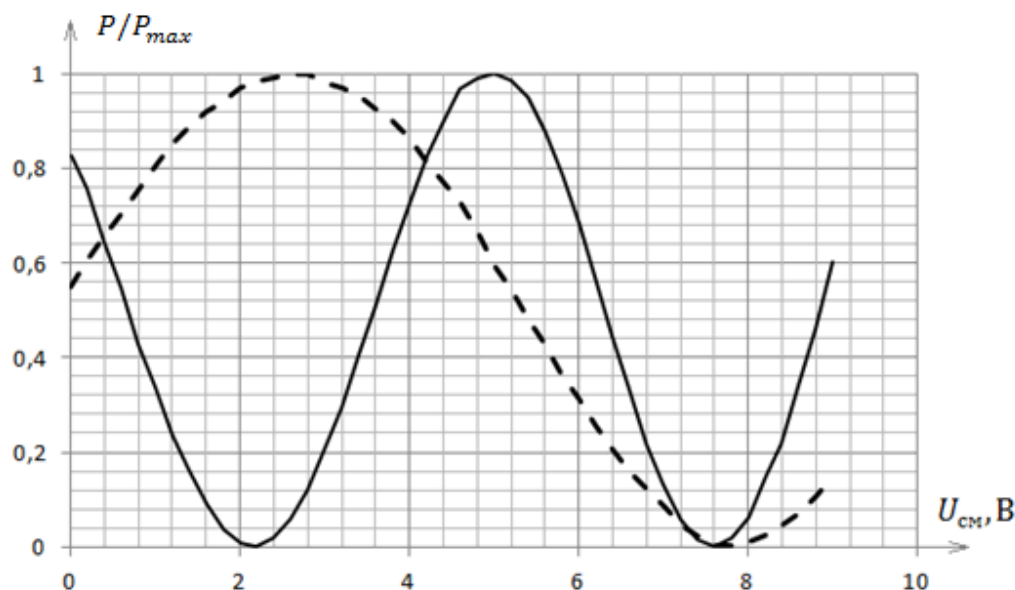
На основе таких радиофотонных блоков выполняются умножители частоты. Основным элементом радиофотонного умножителя частоты ВЧ-сигналов, является модулятор. В данной работе приводятся результаты исследования модуляционной характеристики модулятора интенсивности излучения, выполненного на базе интерферометра Маха-Цандера, OptilabIM-1550-20-а. Причем получить эту характеристику можно двумя путями: с помощью непосредственного и косвенного измерений.

Для непосредственного измерения модуляционной характеристики электрооптического модулятора нужно на его вход подать стабильный уровень оптической мощности, а на выходе подключить измеритель оптической мощности и, изменяя напряжение смещения, поданного на модулятор от источника питания, наблюдать, как изменяется уровень выходной мощности оптического излучения.

В результате проведения такого эксперимента была получена модуляционная характеристика исследуемого модулятора, которая приведена на рис. 2 (штриховая линия). Преимущества данного метода: можно сразу определить потери оптической мощности в модуляторе и как они будут изменяться при изменении управляющего напряжения, можно определить, какой встроенный сдвиг фаз у исследуемого модулятора и напряжение полуволнового смещения, которое в данном случае равно 5,1 В.

Второй подход к получению модуляционной характеристики является косвенным. В этом случае собирается радиофотонный блок (рис. 1, а), а к выходу фотоприемника подключается анализатор спектра. При этом на управляющие входы модулятора подаются напряжение смещения (для изменения положения рабочей точки на модуляционной характеристике) от источника питания и высокочастотный сигнал от генератора ВЧ-сигналов. Изменяя напряжение смещения, необходимо отслеживать уровень первой гармоники на экране анализатора спектра. Если рабочая точка находится в области квадратуры модуляционной характеристики, то уровень первой гармоники на выходе радиофотонного блока достигает своего максимального значения. Если же рабочая точка находится в максимуме или минимуме модуляционной характеристики, наблюдаем минимальные значения выходной мощности СВЧ-сигнала на выходе радиофотонного блока. Это хорошо видно из рис. 2, где сплошной линией изображена зависимость, полученная в результате косвенного измерения, а штриховой линией показан результат непосредственного измерения модуляционной характеристики. Именно при работе на нелинейных участках модуляционной характеристики и можно реализовать умножение частоты. При косвенном измерении можно также определить полуволновое напряжение модулятора, потери на электрооптическое преобразование (если знать ха-

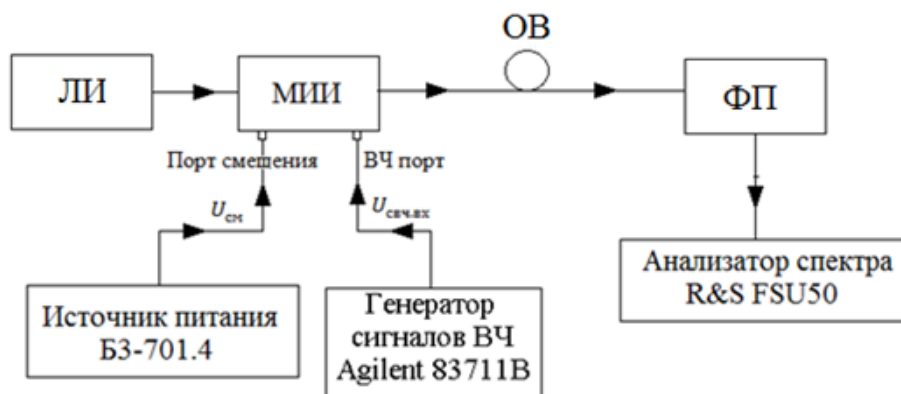
рактеристики используемого фотоприемника), а встроенный сдвиг фаз можно определить с точность до  $\pi$ .



**Рис. 2. Модуляционная характеристика модулятора:**  
штриховая линия—результат непосредственного измерения;  
сплошная — результат косвенного измерения

### Исследование спектрального состава на выходе фотоприемника

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



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

Как следует из экспериментально определенной модуляционной характеристики модулятора интенсивности излучения, для осуществления умножения частоты входного ВЧ-сигнала нужно подать на вход постоянное смещение 2,3 В. Если при этом модулировать оптическое излучение гармоническим сигналом с частотой 1 ГГц, уровень мощности которого варьируется от -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 с 1 дБм мощности модулирующего ВЧ-сигнала (пороговый эффект).

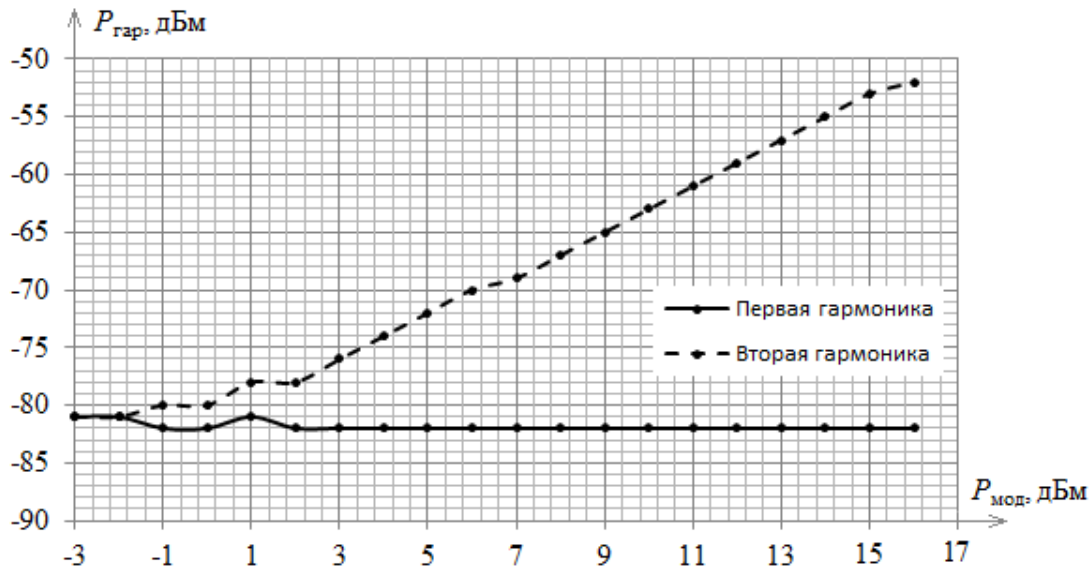


Рис. 4. Зависимость уровней первых двух гармоник от входной мощности СВЧ-сигнала при  $U_{\text{см}} \approx 2,3 \text{ В}$  и при  $P_{\text{опт}} = 6 \text{ дБм}$

Одним из существенных недостатков интегрального модулятора на основе интерферометра Маха-Цандера является изменение положения рабочей точки, которое приводит к медленному изменению напряжения [8]. 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 значения напряжения смещения от уровня мощности ВЧ-сигнала имеет вид, приведенный на рис. 5.

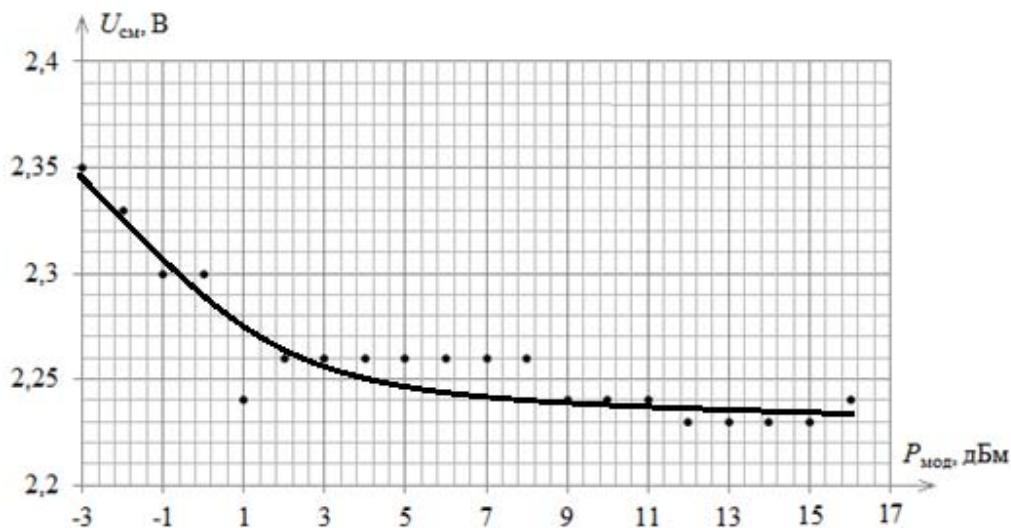


Рис. 5. Зависимость напряжения смещения от мощности входного ВЧ-сигнала

При повышении мощности входного сигнала от -3 до 1 дБм напряжение смещения изменяется достаточно ощутимо – в пределах 0,1 В. При дальнейшем увеличении мощности эти изменения уже значительно меньше – в пределах трех сотых вольта.

С использованием той же экспериментальной установки, но зафиксировав уровень модулирующего сигнала на уровне 16 дБм, а оптическую мощность на уровне 15 дБм и 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.

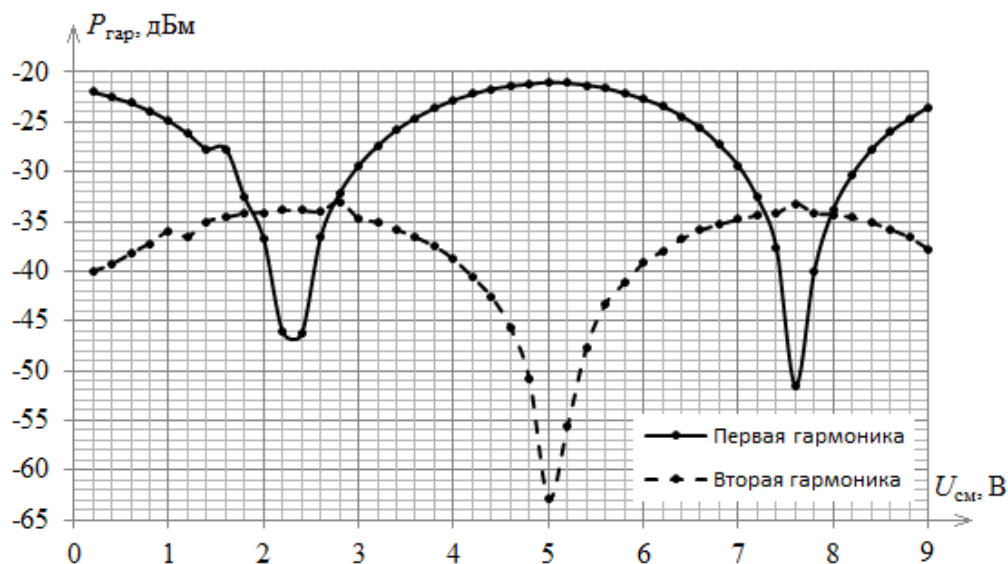


Рис. 6. Зависимость уровня первых двух гармоник от напряжения смещения (экспериментальная)

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 полуволнового напряжения смещения (рис. 7).

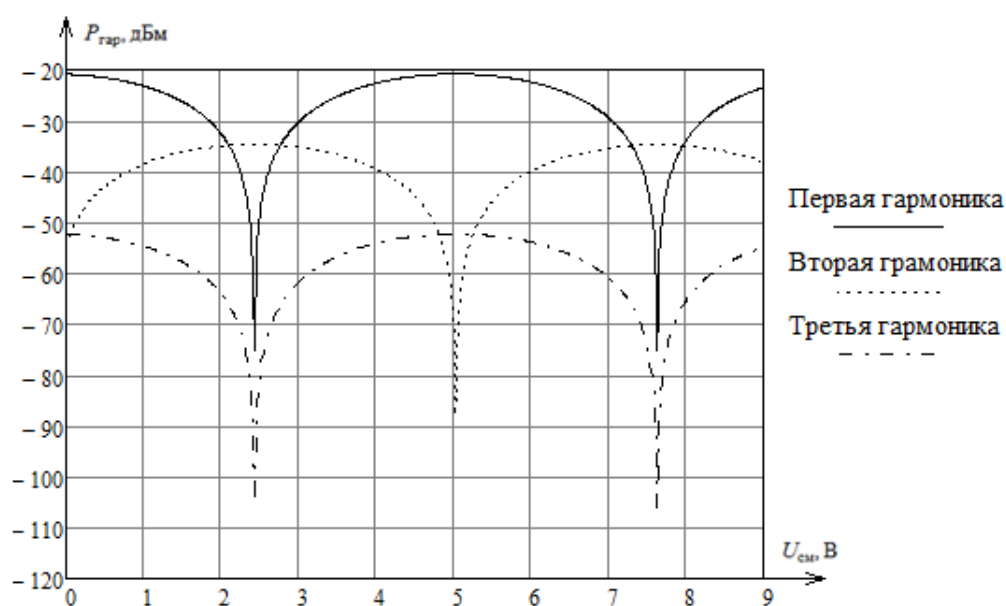


Рис. 7. Зависимость уровня первых трех гармоник от напряжения смещения (теоретическая)

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

В ходе работы экспериментально была получена частотная зависимость уровня второй гармоники (рис. 8), которая показывает, что в рабочей полосе частот модулятора и фотоприемника (верхняя граничная частота 20 ГГц) уровень второй гармоники изменяется монотонно, что является основным преимуществом рассматриваемого множителя частоты.

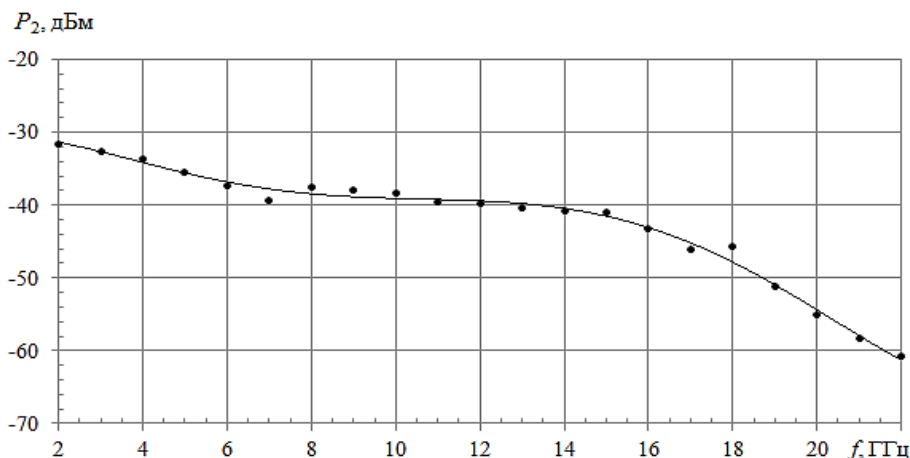


Рис. 7. Частотная зависимость уровня второй гармоники

### Выводы

Использование средств радиофотоники является перспективным для развития таких устройств, как преобразователи частоты. В статье рассматриваются умножители на два, но возможно осуществить умножение и на четыре, если включить в схему режекторный фильтр для подавления оптической несущей.

Уровень и число спектральных составляющих на выходе модулятора зависит от мощностей СВЧ-сигнала и оптического излучения, а так же от местоположения рабочей точки на модуляционной характеристике модулятора. Из эксперимента видно, что при уровне СВЧ-сигнала более 2 дБм и напряжении смещения, необходимом для вывода рабочей точки на нелинейный участок модуляционной характеристики модулятора, можно наблюдать в выходном спектре лишь вторую гармонику, первая же будет находиться на уровне шумов измерительного прибора. Основным преимуществом радиофотонных умножителей частоты является широкая полоса рабочих частот, которая определяется граничными частотами работы модулятора и фотоприемника. А главным недостатком – малый коэффициент преобразования во вторую гармонику.

### Библиографический список

1. Белоусов, А.А. Обзор и исследование возможных вариантов реализации сверхширокополосных детекторов, смесителей и других аналоговых процессоров диапазона СВЧ / А.А. Белоусов, Ю.Н. Вольхин, А.А. Дубровская // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: материалы V юбилейной общерос. науч.-техн. конф. / ОАО «КТРВ», ОАО «ЦКБА», ОмГТУ. - Омск: Изд-во ОмГТУ, 7-8 октября 2014. – С. 37.
2. Biryukov, V.V. Influence of parasitic parameters of laser emitter on frequency response of analog fiber-optic link / V.V. Biryukov, V.A. Grachev, A.S. Raevskii // Optical Technologies for Telecommunications 2014. - Proc. of SPIE Vol. 9533, P. 953303-1 – 953303-9. doi: 10.1117/12.2180659.
3. Biryukov, V.V. Signature analysis of microwave signal generator with a fiber optic delay line in a feedback loop / V.V. Biryukov [et al.] // Optical Technologies for Telecommunications 2015. - Proc. of SPIE Vol. 9807, 980712-1 – 980712-6. doi: 10.1117/12.2234563.
4. Бирюков В.В. Влияние паразитных параметров лазерных излучателей на полосу пропуска-

- ния канала аналоговой ВОЛС / В.В. Бирюков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 3 (105). – С. 121–129.
5. **Белкин, М.Е.** Разработка модели оптоэлектронного генератора СВЧ-диапазона // Материалы международной НТК. – М.: Энергоатомиздат, октябрь 2008. – С. 289–297.
  6. **Raevskii, A.S.** Investigation of the characteristics of fiber optic delay lines with different types of optical emission intensity modulation / A.S. Raevskii [et al.] // Optical Technologies for Telecommunications 2016. - Proc. of SPIE Vol. 10342, 103420K-1 – 103420K-6. doi: 10.1117/12.2270386
  7. **Бирюков, В.В.** Исследование характеристик оптоэлектронного одноконтурного генератора СВЧ сигналов / В.В. Бирюков [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2015. – С. 39–42.
  8. **Bulmer, C.H.** Pyroelectric effects in LiNbO<sub>3</sub> channel-waveguide devices / C.H. Bulmer, W.K. Burns, S.C. Hiser // Appl. Phys. Lett. 1986. Vol. 48. № 16. P. 1036–1038.

*Дата поступления  
в редакцию 20.04.2017*

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

**APPLICATION OF ELECTRO-OPTICAL MODULATOR OF INTENSITY IN  
DEVICES FOR FREQUENCY OF RADIOSIGNAL FREQUENCY**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev

**Purpose:** The study of a frequency multiplier performed using the principles of radio-photonics.

**Design:** For the experimental study, a mock-up consisting of the following elements was assembled: a laser emitter, a radiation intensity modulator, an optical fiber and a photodetector.

**Findings:** Using the principles of radio-photonics, it is possible to perform a microwave frequency multiplier. The main advantage of such frequency multipliers is a wide band of operating frequencies, which is determined by the boundary frequencies of the modulator and photodetector.

*Key words:* frequency multipliers, intensity modulator, radio-photonics.