

## Особенности построения радиопотонных приемопередающих каналов бортовых систем связи, радиолокации и радиомониторинга

И. В. Унченко✉, А. А. Емельянов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

✉ [unchenkoivan@gmail.com](mailto:unchenkoivan@gmail.com)

### Аннотация

**Введение.** При проектировании современных бортовых систем связи, радиолокации и радиомониторинга остро стоит проблема улучшения качественных характеристик, таких, как увеличение рабочей частоты, расширение мгновенной полосы пропускания и повышения чувствительности приемника, улучшение электромагнитной совместимости. Кроме того, необходимо уменьшать размер системы, ее массу, мощность и стоимость. При этом полупроводниковая сверхвысокочастотная (СВЧ) электроника подошла к границам достижимых частотных и динамических характеристик. Одним из оптимальных решений данной проблемы является использование радиопотонной передающей линии при построении бортовых систем связи, радиолокации и радиомониторинга, в основе которой лежит модуляция лазерного излучения посредством электроабсорбции.

**Цель работы.** Основная цель данной статьи – исследование передаточных характеристик и коэффициента шума радиопотонной передающей линии, в основе которой лежит модуляция лазерного излучения посредством электроабсорбции, сопоставление теоретических расчетов и практических результатов.

**Материалы и методы.** Метод внешней модуляции с использованием электроабсорбционного модулятора (ЭАМ), математическое представление коэффициента передачи, коэффициента шума при использовании ЭАМ, метод сопоставления практических результатов в части коэффициента передачи, коэффициента шума и теоретических.

**Результаты.** Получены теоретические значения коэффициента передачи и коэффициента шума для радиопотонной передающей линии, в основу которой положен метод внешней модуляции с использованием ЭАМ. Представлены экспериментальные результаты исследования коэффициента передачи и коэффициента шума для радиопотонной линии в диапазоне частот от 100 МГц до 16 ГГц и сопоставлены с результатами как для наиболее близких серийно выпускаемых изделий зарубежного производства, так и отечественных исследований радиопотонных линий передачи сигнала.

**Заключение.** За счет использования ЭАМ и его главного достоинства в части возможности интеграции с лазерным излучателем был спроектирован и изготовлен малогабаритный промышленный образец радиопотонного приемопередатчика, способный передавать радиосигнал на десятки километров в диапазоне частот от 100 МГц до 12 ГГц с значением коэффициента передачи не менее –3 дБ и коэффициента шума не более 36 дБ на верхней рабочей частоте. При этом наиболее близкий аналог, изготавливаемый фирмой "Emcore", при схожих габаритах имеет коэффициент передачи на уровне –30 дБ и в качестве способа передачи использует непосредственную модуляцию лазерного излучения, что значительно снижает дальность передачи СВЧ-сигнала.

**Ключевые слова:** бортовые системы, радиофотоника, приемопередающий канал, коэффициент шума, внешняя модуляция, ЭАМ

**Для цитирования:** Унченко И. В., Емельянов А. А. Особенности построения радиопотонных приемопередающих каналов бортовых систем связи, радиолокации и радиомониторинга // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 1. С. 58–67. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-1-58-67

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 09.06.2022; принята к публикации после рецензирования 10.01.2023; опубликована онлайн 28.02.2023

## Specific Features of Designing Microwave Photonic Receiving and Transmitting Channels of Onboard Systems for Communication, Radar and Radio Monitoring

Ivan V. Unchenko✉, Andrey A. Emelyanov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

✉ unchenkoivan@gmail.com

### Abstract

**Introduction.** Designers of modern on-board systems for communication, radar, and radio monitoring face the problem of improving their qualitative characteristics, including the operating frequency, instantaneous bandwidth, receiver sensitivity, and electromagnetic compatibility. In addition, the dimensions, weight, and power of such systems, as well their cost, should be minimized. However, the current semiconductor microwave electronics has reached its limits in terms of frequency and dynamic characteristics. A possible solution consists in the implementation of microwave photonic transmission lines in the design of on-board systems for communication, radar, and radio monitoring on the basis of modulation of laser radiation by means of electro-absorption.

**Aim.** To study the transfer characteristics and noise figure of a microwave photonic transmission line realized based on the modulation of laser radiation by means of electro-absorption. To compare the results of theoretical calculations and experimental investigations.

**Materials and methods.** The research methodology involved external modulation using an electro-absorption modulator (EAM), mathematical representation of the transmission coefficient, as well as comparison of the theoretical and practical results.

**Results.** Theoretical values of the transmission coefficient and noise figure for a microwave photonic transmission line based on the external modulation method using an EAM were obtained. Experimental values of the transmission coefficient and noise figure for a microwave photonic line in the frequency range from 100 MHz to 16 GHz were presented. The obtained data were compared with those of the nearest mass-produced products of foreign production and those presented in domestic publications on microwave photonic signal transmission lines.

**Conclusion.** The use of an EAM, whose main advantage consists in the possibility of integration with a laser emitter, allowed the authors to design and manufacture a small-sized industrial prototype of a radio-photonic transceiver, capable of transmitting a radio signal over tens of kilometers in the frequency range from 100 MHz to 12 GHz with a transmission coefficient of at least  $-3$  dB and a noise figure no more than 36 dB at the upper operating frequency. At the same time, the closest analogue manufactured by Emcore with similar dimensions has a transmission coefficient of  $-30$  dB and uses direct modulation of laser radiation as a transmission method, which significantly reduces the transmission range of the microwave signal.

**Keywords:** airborne systems, microwave photonics, receiving and transmitting channel, noise figure, external modulation, EAM

**For citation:** Unchenko I. V., Emelyanov A. A. Specific Features of Designing Microwave Photonic Receiving and Transmitting Channels of Onboard Systems for Communication, Radar and Radio Monitoring. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 1, pp. 58–67. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-1-58-67

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 09.06.2022; accepted 10.01.2023; published online 28.02.2023

**Введение.** Современные тенденции развития бортовых систем связи, радиолокации и радиомониторинга требуют существенного улучшения нескольких ключевых рабочих параметров, включая увеличение рабочей частоты, расширение мгновенной полосы пропускания. Кроме того, необходимо уменьшать размер

системы, ее массу, мощность и стоимость. Применение радиофотонных компонентов в таких приемопередатчиках может привести к значительному улучшению этих рабочих параметров. Радиофотонные компоненты работают на высоких частотах с очень широкой полосой пропускания и могут эффективно передавать

Достоинства и недостатки типов модуляций оптического излучения  
Advantages and disadvantages of optical emitting modulation types

Тип модуляции	Достоинства	Недостатки
Непосредственная модуляция	Малые габариты [10] Простота реализации [10]	Ограничение по рабочему диапазону частот [10] Ограничение по длине линии передачи сигнала до десятка метров [10]
ММЦ	Широкий диапазон рабочих частот (до 110 ГГц) [11] Большая дальность передачи сигнала (сотни километров) Высокий уровень входного сигнала (1...2 Вт) [11]; Линейность частотной характеристики [11]	Большие габариты Наличие внешнего лазера Высокая стоимость технического решения
ЭАМ	Широкий диапазон рабочих частот (до 110 ГГц) [12] Большая дальность передачи сигнала (десятки километров) [13] Линейность частотной характеристики [14] Интегральное исполнение ЭАМ и лазера [15] Низкая стоимость	Динамический диапазон, меньший по сравнению с ММЦ [12] Небольшой коэффициент передачи из-за малой мощности лазеров, интегрируемых с модулятором [15]

сигналы из радиочастотной области в оптическую и обратно. Наконец, использование оптического волокна для передачи сигналов СВЧ-диапазона снижает радиочастотные потери, значительно уменьшает размер и массу кабеля, способствует улучшению электромагнитной совместимости в зоне прокладки линии передачи сигнала [1–6].

Передача СВЧ-сигнала по оптоволокну реализуется модуляцией оптического излучения двумя основными способами: непосредственной модуляцией, внешней модуляцией [7]. При непосредственной модуляции происходит процесс прямого управления условиями генерации излучения [8]. При внешней модуляции используется электрооптический преобразователь (ЭОП), функцию которого может выполнять модулятор Маха–Цендера (ММЦ) или электроабсорбционный модулятор (ЭАМ) [9]. Достоинства и недостатки приведенных способов представлены в таблице.

При проектировании радиофотонного приемопередатчика (РФПП) с учетом его планируемого применения в бортовых системах связи, радиолокации и радиомониторинга были учтены приведенные достоинства и недостатки способов передачи СВЧ-сигнала по оптоволокну и выбрана внешняя модуляция на основе ЭАМ ввиду следующих причин: отсут-

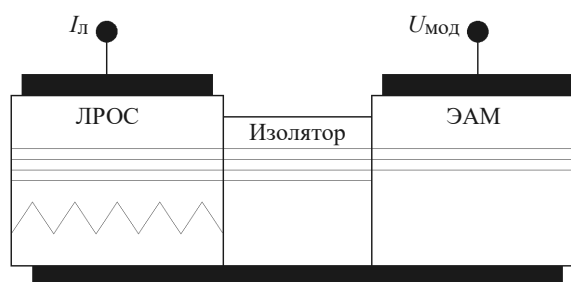


Рис. 1. Схематичное представление лазера с распределенной обратной связью, интегрированного с ЭАМ

Fig. 1. Schematic representation of a distributed feedback laser integrated with an EAM

ствия длинных линий связи на борту, возможности дальнейшего расширения диапазона частот до 110 ГГц, малых габаритов из-за интегрального исполнения ЭАМ и лазера, низкой стоимости.

**Методы.** ЭАМ представляет собой полупроводниковое устройство, которое можно использовать для модуляции интенсивности лазерного луча с помощью электрического напряжения. Как правило, данный модулятор изготавливается в интегральном исполнении с лазером (рис. 1) [16].

Схема состоит из трех секций: лазера с распределенной обратной связью (ЛРОС), ЭАМ и секции изоляции электродов.

Механизмы электроабсорбции бывают двух типов: эффект Франца–Келдыша, наблюдаемый в обычных объемных полупроводниках; квантово-размерный эффект Штарка структуры с квантовыми ямами. Оба эффекта заметны вблизи запрещенной зоны полупроводников.

Эффект Франца–Келдыша – изменение оптического поглощения полупроводника при приложении к нему электрического поля. При отсутствии электрического поля наблюдается минимальное поглощение для эффективного оптического модулятора и большое поглощение – при приложении электрического поля. Когда приложено электрическое поле, энергетические зоны наклоняются, и эффективная ширина запрещенной зоны становится меньше, чем ширина запрещенной зоны при нулевом электрическом поле. Таким образом, электроны переходят из валентной зоны в зону проводимости [17].

Влияние электрического поля на спектр поглощения или излучения света квантовой ямы описывает эффект Штарка. В отсутствие электрического поля электроны и дырки находятся внутри квантовой ямы и занимают состояния в пределах дискретного набора энергетических подзон. Таким образом, система может поглощать или излучать только дискретный набор частот света. При приложении внешнего электрического поля состояния электронов смещаются в сторону более низких энергий, а состояния дырок – в сторону более высоких энергий. Это снижает допустимые частоты поглощения или излучения света. За счет приложения внешнего электрического поля электроны и дырки смещаются в противоположные стороны ямы. Таким образом, перекрытие уменьшается, что, в свою очередь, снижает эффективность рекомбинации системы [18].

При внешней модуляции посредством ЭАМ в обобщенном виде коэффициент передачи  $g$  и коэффициент шума  $F_N$  с учетом потерь в оптоволоконном тракте записываются соответственно [19, 20]:

$$g = \left( \frac{p_L t_{\text{ВХ}} t_{\text{ВЫХ}} T_{\text{ОПТ}} R_{\text{ФД}} \pi}{2V_{\text{СМ}}} \right)^2 R_{\text{ФД}} R_{\text{ВХ}} \left[ \frac{4R_{\text{ИСТ}} R_{\text{ВХ}}}{(R_{\text{ВХ}} + R_{\text{ИСТ}})^2} \right] \times$$

$$\times \left[ \frac{1}{1 + \frac{p_L t_{\text{ВХ}} \eta_M}{2V_{\text{СМ}}} \left( R_M + \frac{R_{\text{ВХ}} R_{\text{ИСТ}}}{R_{\text{ВХ}} + R_{\text{ИСТ}}} \right)} \right]^2; \quad (1)$$

$$F_N = 1 + \frac{f_{\text{пр}}}{g} + \frac{2q p_L t_{\text{ВХ}} t_{\text{СМ}} t_{\text{ВЫХ}} \eta_{\text{ФД}} R_{\text{ФД}}}{g k T} + \frac{q p_L t_{\text{ВХ}} \eta_M (1 - t_{\text{СМ}}) R_{\text{ИСТ}} \left[ 1 + \frac{R_M (R_{\text{ИСТ}} + R_{\text{ВХ}})}{R_{\text{ИСТ}} R_{\text{ВХ}}} \right]^2}{2kT}, \quad (2)$$

где  $p_L$  – мощность лазера;  $t_{\text{ВХ}}$  – потери оптического сигнала при вводе излучения в ЭАМ;  $t_{\text{ВЫХ}}$  – потери оптического сигнала при выводе излучения после процесса;  $T_{\text{ОПТ}}$  – потери в оптоволоконном тракте;  $R_{\text{ФД}}$  – выходное сопротивление фотодиода;  $V_{\text{СМ}}$  – напряжение смещения;  $R_{\text{ВХ}}$  – сопротивление входа СВЧ-сигнала;  $R_{\text{ИСТ}}$  – выходное сопротивление источника сигнала;  $\eta_M$  – чувствительность модулятора в точке смещения;  $R_M$  – входное сопротивление ЭАМ;  $f_{\text{пр}}$  – коэффициент шума приемника;  $q$  – элементарный заряд;  $t_{\text{СМ}}$  – точка приложения напряжения смещения;  $\eta_{\text{ФД}}$  – чувствительность фотодиода;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

**Выбор расчетных параметров.** При проектировании РФПП в целях уменьшения габаритов был выбран лазер с распределенной обратной связью (РОС) с встроенным ЭАМ. Типичная характеристика чувствительности модулятора в точке смещения для данного устройства приведена на рис. 2 [21]. С учетом

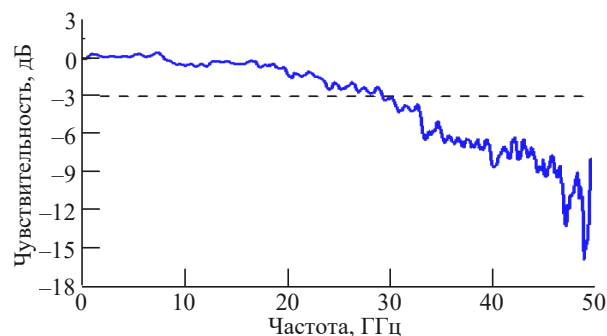


Рис. 2. Частотная характеристика чувствительности ЭАМ с интегрированным лазером с РОС [21]

Fig. 2. Frequency response of the sensitivity of an EAM integrated with a DFB laser [21]

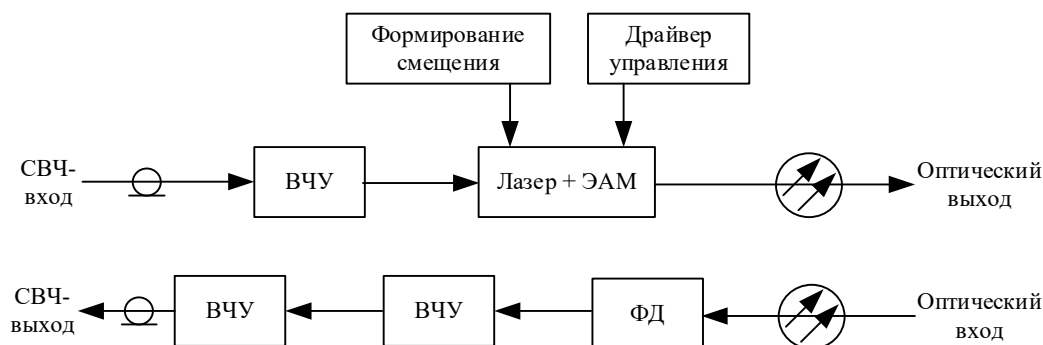


Рис. 3. Структурная схема РФПП

Fig. 3. Block diagram of a microwave photonics transceiver

рабочего диапазона частот от 100 МГц до 12 ГГц, исходя из рис. 2, для дальнейших расчетов значение чувствительности модулятора в точке смещения было принято 0 дБ.

Потери в оптоволоконном тракте в данном случае складываются из потерь, вызванных неоднородностью среды передачи сигнала при соединении патчкордов (0.5 дБ) [22], и потерь в самом оптоволокне длиной 1 км (1 дБ). Таким образом, общее значение составит 1.5 дБ.

DFB-1550-EAM-12 имеет следующие характеристики: напряжение смещения –1 В, оптическая выходная мощность 3 мВт, входное волновое сопротивление 50 Ом. С учетом того, что потери на ввод и вывод излучения равны и составляют 3 дБ [15], мощность лазера на входе ЭАМ составит  $\approx 10$  мВт.

В качестве фотодиода использован фотодиод типа 2522 производства фирмы "Emcore" с чувствительностью 0.7 А/Вт, выходным волновым сопротивлением 50 Ом и рабочим диапазоном от 10 МГц до 20 ГГц [24]. Применение данного диода обусловлено дальнейшим планируемым расширением диапазона рабочих частот РФПП до 20 ГГц.

Таким образом, подставив приведенные параметры в (1) и (2) получили значения:  $g \approx 0.094$  (–20 дБ);  $F_N \approx 263$  (24 дБ).

После предварительных расчетов был разработан и изготовлен промышленный образец РФПП (рис. 3). Здесь ВЧУ – высокочастотный усилитель; лазер + ЭАМ – интегрированная фотонная интегральная схема, состоящая из непрерывного лазера и ЭАМ; ФД – фотодиод.

В данной схеме для компенсации потерь электрооптического, оптоэлектронного преобра-

зования и снижения коэффициента шума были применены малошумящие ВЧУ, перекрывающие диапазон рабочих частот от 100 МГц до 12 ГГц, с коэффициентом шума не более 3 дБ и коэффициентом передачи 14 дБ.

Внешний вид изготовленного РФПП со снятой крышкой представлен на рис. 4.

Для проведения экспериментальных исследований в части измерений коэффициента передачи и коэффициента шума изготовленного РФПП было собрано 2 рабочих стенда, структурные схемы которых представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

В состав стенда для измерения коэффициента передачи входят анализатор цепей, источник питания, РФПП, оптоволоконный кабель длиной 1 км. Стенд для измерения коэффициента шума состоит из анализатора коэффициента шума, источника питания, РФПП, оптоволоконного кабеля длиной 1 км. Все измерения проводились после предварительной калибровки в диапазоне частот от 100 МГц до 12 ГГц.

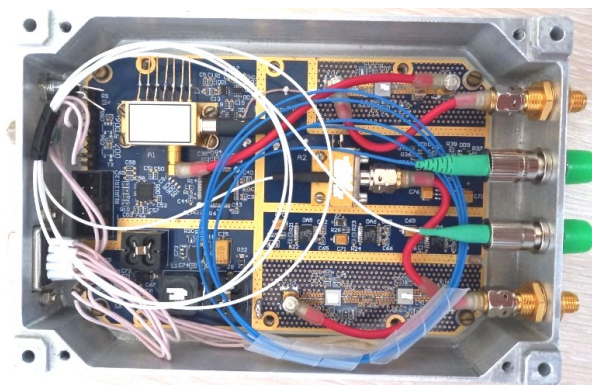


Рис. 4. Образец РФПП

Fig. 4. Microwave photonic transceiver – receiver

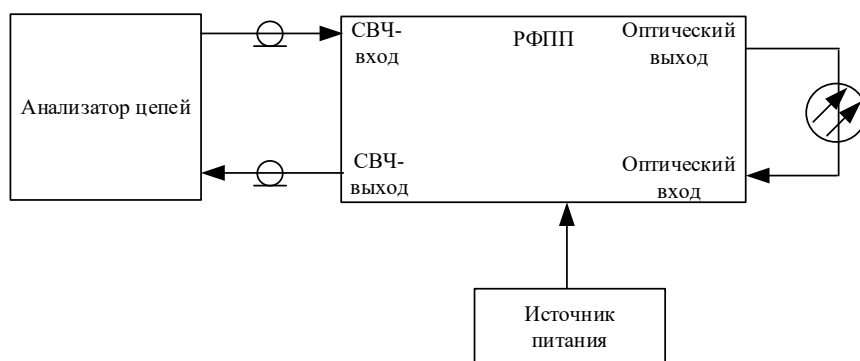


Рис. 5. Структурная схема стенда для измерения коэффициента передачи

Fig. 5. Block diagram of a setup for measuring the transmission coefficient

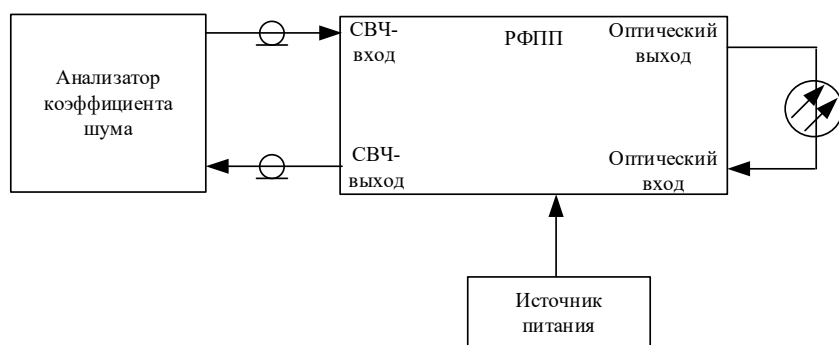


Рис. 6. Структурная схема стенда для измерения коэффициента шума

Fig. 6. Block diagram of setup for measurement of the noise figure

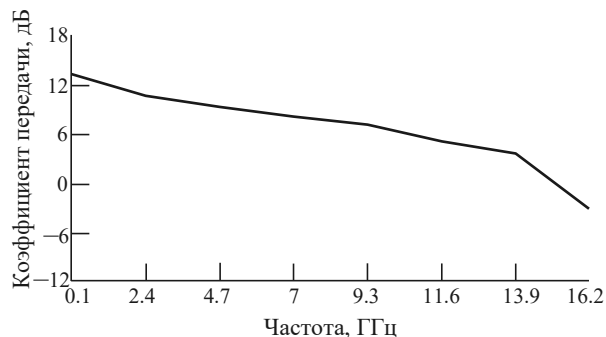


Рис. 7. Частотная характеристика коэффициента передачи

Fig. 7. Frequency characteristic of transmission coefficient

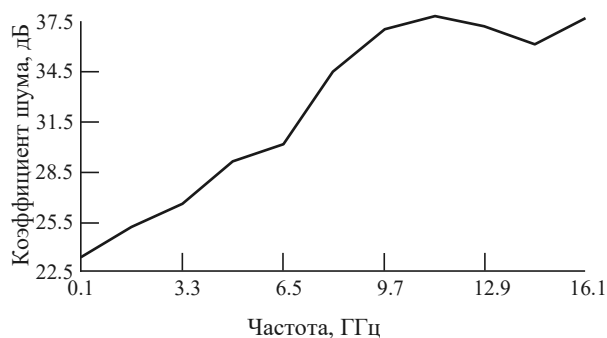


Рис. 8. Частотная характеристика коэффициента шума

Fig. 8. Frequency characteristic of noise figure

Результаты измерений коэффициента передачи и коэффициента шума приведены на рис. 7 и 8 соответственно.

Как видно из рис. 8, значение измеренного коэффициента передачи составляет не более 13 дБ и при этом спадает до –3 дБ на частоте 12 ГГц. При вычитании коэффициента усиления применяемых усилителей коэффициент передачи РФПП составит –30 дБ на частоте 100 МГц и –45 дБ на частоте 12 ГГц. При этом коэффициент шума принимает значение 24 дБ и с увеличением частоты повышается до 38 дБ.

Результаты измерения немного отклоняются от теоретических расчетов на высоких частотах, что вызвано частотной зависимостью от потерь при соединении высокочастотных кабелей, потерями в самих кабелях, нелинейностью фотодиода и самого ЭАМ, нелинейностью установленных усилителей. В частности, если расчетные значения коэффициента шума и передачи составляли –20 и –24 дБ соответственно, то полученные значения коэффициента шу-

ма и передачи составят  $-30$  и  $-24$  дБ соответственно на частоте  $100$  МГц,  $-40$  и  $-38$  дБ на частоте  $12$  ГГц.

Сравнивая изготовленный образец РФПП с наиболее близким аналогом фирмы "Emcore" отметим, что последний при схожих габаритах имеет коэффициент передачи на уровне  $-30$  дБ и в качестве способа передачи использует непосредственную модуляцию лазерного излучения, что значительно снижает дальность передачи СВЧ-сигнала.

Аналогичные исследования проводились в [3–6], объектом исследований выступала радиофотонная линия передач, где в качестве элемента модуляции оптического излучения выступал ММЦ. Результаты данных исследований показали высокую равномерность коэффициента передачи радиофотонной линии (неравномерность коэффициента передачи примерно  $\pm 3$  дБ в диапазоне частот до  $20$  ГГц). Тем не менее радиофотонная линия передачи с применением ММЦ обладает такими недостатками, как большие габариты, наличие внешнего лазера, высокая стоимость технического решения, что затрудняет ее применение при построении бортовых систем связи, радиолокации и радиомониторинга. В то время как предлагаемое решение с использованием ЭАМ имеет несколько худшие показатели в части равномерности коэффициента передачи (неравномерность коэффициента передачи примерно  $\pm 5$  дБ в диапазоне частот до  $12$  ГГц), за счет интегрального исполнения ЭАМ и лазера значительно упрощается схемная реализация радиофотонной линии. Данный фактор положительно сказывается на габаритах бортовых систем связи, радиолокации и радиомониторинга [23].

**Выводы.** При построении РФПП из состава современных широкополосных и высокочастотных систем связи, радиолокации и радиомониторинга наиболее оптимальной будет внешняя модуляция с ММЦ и ЭАМ, поскольку данные типы модуляторов обладают большим рабочим диапазоном частот, равномерной ампли-

тудно-частотной характеристикой, большим динамическим диапазоном. Кроме того, для ЭАМ отдельным преимуществом является интегральное исполнение с лазером, что положительно влияет на массогабаритные характеристики бортовых систем связи, радиолокации и радиомониторинга. При этом в процессе проектирования необходимо учитывать высокие потери при электрооптическом преобразовании даже на низких частотах и применять методы их компенсации.

При сравнении теоретических и практических результатов отмечены небольшие расхождения. В частности, если расчетные значения коэффициента шума и передачи составляли  $-20$  и  $-24$  дБ соответственно, то полученные значения коэффициента шума и передачи составят  $-30$  и  $-24$  дБ соответственно на частоте  $100$  МГц,  $-40$  и  $-38$  дБ на частоте  $12$  ГГц. Это вызвано частотной зависимостью от потерь при соединении высокочастотных кабелей, потерями в самих кабелях, нелинейностью фотодиода и самого ЭАМ, нелинейностью установленных усилителей.

Изготовленный образец РФПП в сравнении с наиболее близким аналогом, изготавливаемым фирмой "Emcore", имеет больший коэффициент передачи и может использоваться для передачи СВЧ-сигнала на расстояние до  $25$  км. В то же время аналог, ввиду использования непосредственной модуляции лазерного излучения, может применяться для передачи СВЧ-сигнала на расстояние не более  $100$  м.

По сравнению с аналогичными исследованиями радиофотонных линий с применением ММЦ, РФПП имеет несколько худшие показатели в части равномерности коэффициента передачи (неравномерность коэффициента передачи примерно  $\pm 5$  дБ в диапазоне частот до  $12$  ГГц), но при этом является законченным функциональным устройством.

Образец РФПП реализован в рамках проекта "Разработка, изготовление и испытания прототипа радиофотонного приемопередатчика" и может быть использован при построении модульных когерентных систем [23].

### Список литературы

1. Особенности построения бортовой волоконно-оптической синхросети / А. А. Емельянов, М. Е. Белкин, Н. В. Топорков, В. А. Масной // Радиотехника. 2017. № 8. С. 121–125.

2. Белкин М. Е., Сигов А. С. Новое направление фотоники – сверхвысокочастотная оптоэлектроника // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 8. С. 901–914.



3. All-optical RF amplification toward Gpbs communications and millimeter-waves applications / A. L. Muniz, D. F. Noque, R. M. Borges, A. Bogoni, M. Hirano, A. S. Cerqueira // *Microwave and Optical Technology Let.* 2017. Vol. 59, № 9. P. 2185–2189. doi: 10.1002/mop.30704
4. Повышение коэффициента передачи радиочастотной волоконно-оптической линии за счет управления рабочей точкой внешнего модулятора / А. Н. Петров, А. В. Тронеv, В. В. Лебедев, И. В. Ильичев, Е. Н. Величко, А. В. Шамрай // *Журн. техн. физики.* 2015. Т. 85, № 5. С. 131–136.
5. Универсальный радиофотонный приемный канал микроволнового диапазона / В. В. Валуев, Ю. В. Гуляев, С. М. Конторов, В. В. Кулагин, Д. А. Прохоров, В. А. Черепенин // *Радиотехника и электроника.* 2018. Т. 63, № 9. С. 1020–1028. doi: 10.1134/S0033849418090218
6. Исследование характеристик фотодетектора с высоким фототоком при передаче сверхвысокочастотного радиосигнала по оптоволокну / И. Ю. Таценко, Т. К. Легкова, А. В. Иванов, А. Б. Устинов // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника.* 2020. Т. 23, № 4. С. 48–56. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-48-56
7. Белкин М. Е., Кудж С. А., Сигов А. С. Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиофотонной технологии // *Russian Technological J.* 2016. Т. 4, № 1. С. 4–20. doi: 10.32362/2500-316X-2016-4-1-4-20
8. Shcherbakov V. V., Solodkov A. F., Zadernovsky A. A. Transmission Of Light Intensity Modulation Signals In Analog Fiber-Optic Links // *RENSIT.* 2016. Vol. 8, № 1. P. 9–24. doi: 10.17725/rensit.2016.08.009
9. A Performance Based Comparative Analysis of High Speed Electro Absorption and Mach-Zehnder Modulators to Mitigate Chromatic Dispersion at 140 GHz Millimeter Wave / A. Latif, A. Hussain, F. Khan, A. Hussain, Y. Khan, A. Munir // *Advances in Information Sciences and Service Sciences.* 2012. Vol. 4. P. 368–377. doi: 10.4156/aiss.vol4.issue20.44
10. Hunsperger R. Direct Modulation of Semiconductor Lasers // *Integrated Optics.* New York: Springer, 2009. P. 325–344. doi: 10.1007/b98730\_16
11. Афанасьев В. М., Пономарев Р. С. Электрооптические амплитудные модуляторы Маха–Цендера на основе ниобата лития, их модификации и форматы модуляции // *Прикладная фотоника.* 2017. № 4. С. 337–360. doi:10.15593/2411-4367/2017.04.08
12. Ultra-compact silicon modulator with 110 GHz bandwidth / C. Han, M. Jin, Y. Tao, B. Shen, H. Shu, X. Wang // *Optical Fiber Communications Conf. and Exhibition (OFC).* Diego, USA, 06–10 March 2022. IEEE, 2022. Paper Th4C.5.
13. Prasad S., Ghatol A., Patil M. A. V. Radio over fiber technology using electro-absorption modulation. Intern // *J. of Engineering Science and Technology.* 2010. Vol. 2, № 10. P. 5663–5671.
14. Cox III C., Ackerman E. I. Fiber-Optic Analog Radio Frequency Links // *Broadband Optical Modulators / ed. by A. Chen, E. Murphy.* Boca Raton, Florida: CRC Press, 2016. P. 64–73. doi: 10.1201/b11444-5
15. Optoelectronic Frequency Conversion Employing an Electro-Absorption Modulated Laser for a Cube Satellite Earth Station / S. Fukushima, T. Uezono, S. Ohshima, T. Watanabe, T. Nagayama // *Progress in Electromagnetics Research Symp., Toyama, Japan, 01–04 Aug. 2018.* IEEE, 2018. P. 257–261. doi: 10.23919/PIERS.2018.8598042
16. Hazra P., Bhattacharya S., Pal S. Effect of noise on Electro Absorption Modulator (EAM) and optimization – Used for optical communication // *1<sup>st</sup> Intern. Conf. on Emerging Trends and Applications in Computer Science, Shillong, India, 13–14 Sept. 2013.* IEEE, 2013. P. 52–56. doi: 10.1109/ICETACS.2013.6691394
17. Duque-Gomez F., Sipe, J. E. The Franz-Keldysh effect revisited: Electroabsorption including interband coupling and excitonic effects // *J. of Physics and Chemistry of Solids.* 2015. Vol. 76. P. 138–152. doi: 10.1016/j.jpcs.2014.07.023
18. Pedersen T. G., Cornean H. D. Enhanced Stark Effect in Dirac Materials // *J. of Physics: Condensed Matter.* 2022. Vol. 34, № 43. P. 435301. doi: 10.1088/1361-648X/ac8a34
19. Gain Limit in Analog Links Using Electroabsorption Modulators / G. E. Betts, X. B. Xie, I. Shubin, W. S. C. Chang, P. K. L. Yu // *Photonics Technology Let.* 2006. Vol. 18, № 19. P. 2065–2067. doi: 10.1109/LPT.2006.883292
20. Shin D.-S. Gain-bandwidth relation of electroabsorption-modulated analogue fibre link: Effect of photocurrent resistance // *Electronics Let.* 2012. Vol. 48, № 7. P. 387–389. doi: 10.1049/el.2012.0057
21. 50 Gb/s Electro-Absorption Modulator Integrated with a Distributed Feedback Laser for Passive Optical Network Systems / D. Zhou, S. Liang, R. Zhang, Q. Yang, X. Zhu, D. Lu, L. Zhao, W. Wang // *Photonics.* 2022. Vol. 9, № 10. P. 780. doi: 10.3390/photonics9100780
22. Оптические разъемы: типы, отличия, применение. URL: <https://skomplekt.com/opticheskie-gazemy-connectors/> (дата обращения 24.05.2022)
23. Унченко И. В., Емельянов А. А. Модульная многопозиционная когерентная цифровая радиофотонная система // *Russian Technological J.* 2022. Т. 10, № 4. С. 27–37. doi: 10.32362/2500-316X-2022-10-4-27-37

## Информация об авторах

**Унченко Иван Владимирович** – старший преподаватель кафедры инженерной экологии техносферы Института радиоэлектроники и информатики, начальник отдела по разработке аппаратных средств Отделения инновации и разработки Научно-технологического центра "Наука", МИРЭА – Российский технологиче-



ский университет. Автор 12 научных работ. Сфера научных интересов – радиофотоника, радиолокация, радиоэлектронная борьба.

Адрес: МИРЭА – Российский технологический университет, пр. Вернадского, д. 78, Москва, 119454, Россия

E-mail: unchenkoivan@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6048-3476>

**Емельянов Андрей Александрович** – старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории Отделения инновации и разработки Научно-технологического центра "Наука", МИРЭА – Российский технологический университет. Автор 17 научных работ. Сфера научных интересов – радиофотоника, радиолокация, радиоэлектронная борьба.

Адрес: МИРЭА – Российский технологический университет, пр. Вернадского, д. 78, Москва, 119454, Россия

E-mail: nd1794@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0839-7853>

## References

1. Emelyanov A. A., Belkin M. E., Toporkov N. V., Masnoy V. A. The Features of Designing Onboard Fiber-Optics Synchronetwork. Radiotekhnika. 2017, no. 8, pp. 121–125. (In Russ.)
2. Belkin M. E., Sigov A. S. Some Trend in Super-High Frequency Optoelectronics. J. of Communications Technology and Electronics. 2009, vol. 54, no. 8, pp. 855–868.
3. Muniz A. L., Noque D. F., Borges R. M., Bogoni A., Hirano M., Cerqueira A. S. All-Optical RF Amplification Towards Gpbs Communications and Millimeter-Waves Applications. Microwave and Optical Technology Let. 2017, vol. 59, no. 9, pp. 2185–2189. doi: 10.1002/mop.30704
4. Petrov A. N., Tronev A. V., Lebedev V. V., Ilyichev I. V., Velichko E. N., Shamray A. V. An Increase in the Transmission Efficiency of an RF Fiber-Optic Line Using the Working Point of an External Modulator. Technical Physics. 2015, vol. 60, no. 5, pp. 761–766.
5. Valuev V. V., Gulyaev Yu. V., Kontorov S. M., Kulagin V. V., Prokhorov D. A., Cherepenin V. A. A Universal Microwave Photonic Receiving Channel. J. of Communications Technology and Electronics. 2018, vol. 63, no. 9, pp. 1080–1088. doi: 10.1134/S0033849418090218
6. Tatsenko I. Yu., Legkova T. K., Ivanov A. V., Ustinov A. B. Investigation of the Characteristics of a Photodetector with a High Photocurrent when Transmitting Microwave Radio Signals Through an Optical Fiber. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 4, pp. 48–56. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-48-56 (In Russ.)
7. Belkin M. E., Kudzh S. A., Sigov A. S. Novel Principles of Microwave Band Radioelectronic Devices Design with the Use of Microwave Photonics Technology. Russian Technological J. 2016, vol. 4, no. 1, pp. 4–20. doi: 10.32362/2500-316X-2016-4-1-4-20 (In Russ.)
8. Shcherbakov V. V., Solodkov A. F., Zadernovsky A. A. Transmission Of Light Intensity Modulation Signals In Analog Fiber-Optic Links. RENSIT. 2016, vol. 8, no. 1, pp. 9–24. doi: 10.17725/rensit.2016.08.009
9. Latif A., Hussain A., Khan F., Hussain A., Khan Y., Munir A. A Performance Based Comparative Analysis of High Speed Electro Absorption and Mach-Zehnder Modulators to Mitigate Chromatic Dispersion at 140 GHz Millimeter Wave. Advances in Information Sciences and Service Sciences. 2012, vol. 4, pp. 368–377. doi: 10.4156/aiss.vol4.issue20.44
10. Hunsperger R. Direct Modulation of Semiconductor Lasers. Integrated Optics. New York, Springer, 2009, pp. 325–344. doi: 10.1007/b98730\_16
11. Afanas'ev V. M., Ponomarev R. S. Electrooptical Amplitude Modulator Mach-Zehnder Based Lithium Niobate, Their Modifications and Modulation Formats. Applied Photonics. 2017, no. 4, pp. 337–360. doi: 10.15593/2411-4367/2017.04.08 (In Russ.)
12. Han C., Jin M., Tao Y., Shen B., Shu H., Wang X. Ultra-Compact Silicon Modulator with 110 GHz Bandwidth. 2022 Optical Fiber Communications Conf. and Exhibition (OFC). Diego, USA, 06–10 March 2022. IEEE, 2022, paper Th4C.5.
13. Prasad S., Ghatol A., Patil M. A. V. Radio over Fiber Technology Using Electro-Absorption Modulation. Intern. J. of Engineering Science and Technology. 2010, vol. 2, no. 10, pp. 5663–5671.
14. Cox III C., Ackerman E. I. Fiber-Optic Analog Radio Frequency Links. Broadband Optical Modulators. Ed. by A. Chen, E. Murphy. Boca Raton, Florida, CRC Press, 2016, pp. 64–73. doi: 10.1201/b11444-5
15. Fukushima S., Uezono T., Ohshima S., Watanabe T., Nagayama T. Optoelectronic Frequency Conversion Employing an Electro-Absorption Modulated Laser for a Cube Satellite Earth Station. Progress in Electromagnetics Research Symp. Toyama, Japan. 01–04 Aug. 2018. IEEE, 2018, pp. 257–261. doi: 10.23919/PIERS.2018.8598042
16. Hazra P., Bhattacharya S., Pal S. Effect of Noise on Electro Absorption Modulator (EAM) and Optimization – Used for Optical Communication. 1<sup>st</sup> Intern. Conf. on Emerging Trends and Applications in Computer Science. Shillong, India, 13–14 Sept. 2013. IEEE, 2013, pp. 52–56. doi: 10.1109/ICETACS.2013.6691394
17. Duque-Gomez F., Sipe, J. E. The Franz-Keldysh Effect Revisited: Electroabsorption Including Interband Coupling and Excitonic Effects. J. of Physics

and Chemistry of Solids. 2015, vol. 76, pp. 138–152. doi: 10.1016/j.jpcs.2014.07.023

18. Pedersen T. G., Cornean H. D. Enhanced Stark Effect in Dirac Materials. J. of Physics: Condensed Matter. 2022, vol. 34, no. 43, p. 435301. doi: 10.1088/1361-648X/ac8a34

19. Betts G. E., Xie X. B., Shubin I., Chang W. S. C., Yu P. K. L. Gain Limit in Analog Links Using Electroabsorption Modulators. Photonics Technology Lett. 2006, vol. 18, no. 19, pp. 2065–2067. doi: 10.1109/LPT.2006.883292

20. Shin D.-S. Gain-Bandwidth Relation of Electroabsorption-Modulated Analogue Fibre Link: Effect of photocurrent resistance. Electronics Lett. 2012, vol. 48, no. 7, pp. 387–389. doi: 10.1049/el.2012.0057

21. Zhou D., Liang S., Zhang R., Yang Q., Zhu X., Lu D., Zhao L., Wang W. 50 Gb/s Electro-Absorption Modulator Integrated with a Distributed Feedback Laser for Passive Optical Network Systems. Photonics. 2022, vol. 9, no. 10, p. 780. doi: 10.3390/photonics9100780

22. Optical Connectors: Types, Differences, Application. *SvyazKomplekt*. Available at: <https://skomplekt.com/opticheskie-razemy-connectors/> (accessed 24.05.2022). (In Russ.)

23. Unchenko I. V., Emelyanov A. A. Photonics-Based Modular Multistate Digital Coherent System. Russian Technological J. 2022, vol. 10, no. 4, pp. 27–37. doi: 10.32362/2500-316X-2022-10-4-27-37

### Information about the authors

**Ivan V. Unchenko**, Senior Lecturer at the Department of Engineering Ecology of the Technosphere of the Institute of Radioelectronics and Informatics, Head of the Hardware Development Department of the Innovation and Development Department of the Science and Technology Center "Science", MIREA – Russian Technological University. The author of 12 scientific publications. Area of expertise: microwave photonic; radar; electronic warfare. Address: MIREA – Russian Technological University, 78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia  
E-mail: [unchenkoivan@gmail.com](mailto:unchenkoivan@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-6048-3476>

**Andrey A. Emelyanov**, Senior Researcher at the Research Laboratory of the Innovation and Development Department of the Science and Technology Center "Science", MIREA – Russian Technological University. The author of 17 scientific publications. Area of expertise: microwave photonic; radar; electronic warfare. Address: MIREA – Russian Technological University, 78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia  
E-mail: [nd1794@yandex.ru](mailto:nd1794@yandex.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-0839-7853>