

20. Yoon J.H., Wang Z., Kim K.M., Wu H., Ravichandran V., Xia Q., Yang J.J. An artificial nociceptor based on a diffusive memristor, *Nature communications*, 2018, Vol. 9, No. 1, pp. 417.
21. Filatov D.O., Antonov D.A., Antonov I.N., Belov A.I., Baranova V.N., Shenina M.E., Gorshkov O.N. Rezistivnoe pereklyuchenie memristorov na osnove stabilizirovannogo dioksida tsirkoniya slozhnymi signalami [Resistive switching of memristors based on stabilized zirconium dioxide by complex signals], *Fizika tverdogo tela* [Solid State Physics], 2020, Vol. 62, No. 4, pp. 556-561.
22. Tominov R.V., Vakulov Z.E., Polupanov N.V., Saenko A.V., Avilov V.I., Ageev O.A., Smirnov V.A. Nanoscale-Resistive Switching in Forming-Free Zinc Oxide Memristive Structures, *Nanomaterials*, 2022, No. 3 (12), pp. 455.

**Томинов Роман Викторович** – Южный федеральный университет; e-mail: tominov@sfnu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371767; к.т.н.; с.н.с.

**Вакулов Захар Евгеньевич** – Южный федеральный университет; e-mail: zvakulov@sfnu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371767; к.т.н.; с.н.с.

**Варганов Вадим Ильич** – Южный федеральный университет; e-mail: varganov@sfnu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371767; аспирант.

**Игнатьева Ирина Олеговна** – Южный федеральный университет; e-mail: iignatieva@sfnu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371767; к.т.н.

**Смирнов Владимир Александрович** – Южный федеральный университет; e-mail: vasmirnov@sfnu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371767; к.т.н.; в.н.с.

**Tominov Roman Viktorovich** – Southern Federal University; e-mail: tominov@sfnu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371767; cand. of eng. sc.; senior researcher.

**Vakulov Zakhar Evgenievich** – Southern Federal University; e-mail: zvakulov@sfnu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371767; cand. of eng. sc.; senior researcher.

**Varganov Vadim Ilyich** – Southern Federal University; e-mail: varganov@sfnu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371767; postgraduate student.

**Ignatieva Irina Olegovna** – Southern Federal University; e-mail: iignatieva@sfnu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371767; cand. of eng. sc.

**Smirnov Vladimir Aleksandrovich** – Southern Federal University; e-mail: vasmirnov@sfnu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371767; cand. of eng. sc.; leading researcher.

УДК 621.376

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-207-220

**А.С. Мамитов, К.Е. Румянцев**

### **ФОРМИРОВАНИЕ КОГЕРЕНТНОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С МОДУЛЯЦИЕЙ КВАДРАТУРНЫМ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫМ РАДИОСИГНАЛОМ**

*Применение широкополосного оптического усиления, волнового мультиплексирования, компенсации дисперсии оптического излучения, дифференциальной фазовой манипуляции позволяет обеспечить передачу данных со скоростью до 40 Гбит/с. Перспектива дальнейшего увеличения скорости передачи данных до 100 Гбит/с связана с применением многоуровневого формата модуляции радиосигналов на нескольких поднесущих частотах, модуляции излучения одного оптического квантового генератора радиосигналами на нескольких поднесущих частотах, балансного гомодинного детектирования когерентного оптического излучения и цифровой обработки радиосигналов. Символьная передача посредством квадратурной фазовой манипуляции (QPSK) обеспечивает высокую скорость передачи данных. Известны исследования, где обосновано применение алгоритма генерации когерентного оптического излучения с одной боковой полосой с модуляцией радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией. За счёт аппаратных нестабильностей возможно возникновение амплитудных и фазовых погрешностей, которые приводят к разбалансу квадратур. Эти неточности вызывают дополнительные ошибки при демодуляции принимаемого сигнала, которые могут значительно ухудшить помехоустойчивость приёма. Целью настоящего исследования является анализ процесса формирования однополосного оптиче-*

ского излучения, модулированного радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией с помощью двух параллельно включённых интерферометров Маха-Цендера. Отличительная особенность состоит в том, что математические соотношения позволяют в дальнейшем оценить влияние на качество приёма амплитудных и фазовых погрешностей формирования квадратурных колебаний (разбаланса квадратур).

Когерентное оптическое излучение; интерферометр Маха-Цендера; формирование однополосного оптического излучения; квадратурный фазоманипулированный радиосигнал; разбаланс квадратур.

A.S. Mamitov, K.E. Rumyantsev

## GENERATION OF COHERENT OPTICAL RADIATION MODULATED BY A QUADRATURE PHASE-SHIFT KEYED RADIO SIGNAL

*The use of broadband optical amplification, wave division multiplexing, dispersion compensation of optical radiation, and differential phase-shift keying enables data transmission at rates of up to 40 Gbit/s. Prospects for further increasing transmission rates to 100 Gbit/s are associated with the use of multilevel modulation formats for radio signals on multiple subcarrier frequencies, modulation of the radiation from a single optical quantum generator by radio signals on multiple subcarriers, balanced homodyne detection of coherent optical radiation, and digital signal processing. Symbol-based transmission via quadrature phase-shift keying (QPSK) provides high data rates. Prior studies have substantiated the use of a single-sideband coherent optical radiation generation algorithm with subcarrier QPSK modulation. Due to hardware instabilities, amplitude and phase errors may arise, leading to quadrature imbalance. These inaccuracies introduce additional errors during demodulation of the received signal, which can significantly degrade reception interference immunity. The aim of this study is to analyze the process of generating single-sideband optical radiation modulated by a QPSK radio signal on a subcarrier frequency using two parallel Mach-Zehnder interferometers. A distinguishing feature of the proposed approach is that the derived mathematical relationships make it possible to subsequently assess the impact of amplitude and phase errors in quadrature signal generation (quadrature imbalance) on reception quality.*

*Coherent optical radiation; Mach-Zehnder interferometer; single-sideband optical radiation generation; quadrature phase-shift keyed radio signal; quadrature imbalance.*

**Введение.** Технология когерентной оптической связи позволяет создать систему передачи на большие расстояния с высокой пропускной способностью [1–4]. Применение широкополосного оптического усиления, волнового мультиплексирования (wavelength division multiplexing, WDM), компенсации дисперсии оптического излучения, дифференциальной фазовой манипуляции (Differential Phase Shift Keying, DPSK) позволяет увеличить скорость передачи данных до 40 Гбит/с [5]. Перспектива дальнейшего увеличения скорости передачи данных до 100 Гбит/с связана с применением многоуровневого формата модуляции и балансного гомодинного детектированием когерентного оптического излучения, с цифровой обработкой радиосигналов.

Для увеличения пропускной способности в когерентных оптических системах используется мультиплексирование [6], когда манипулированные разными потоками данных радиосигналы на нескольких поднесущих частотах модулируют излучение одного оптического квантового генератора (ОКГ). Одним из преимуществ мультиплексирования на поднесущих частотах (SCM – Subcarrier Multiplexing) является то, что устройства СВЧ для формирования и обработки радиосигналов более стабильны, чем их оптические аналоги [7–9].

Высокоскоростная связь с высокой пропускной способностью особенно важна для лазерных спутниковых систем [10]. В частности, применение квадратурной фазовой манипуляции (QPSK – quadrature phase-shift keying или 4-PSK) обеспечивает высокую скорость передачи данных простым, надёжным и экономичным способом. Передача нескольких бит, как символа, реализуется простыми синфазными и квадратурными форматами модуляции.

Исследования, результаты которых описаны в [11], обосновывают применение алгоритма генерации когерентного оптического излучения с одной боковой полосой с модуляцией радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK). Алгоритм реализуется на двух параллельно включённых интерферометрах Маха-Цендера (Mach-Zehnder, ИМЦ) на кристалле из ниобата лития в двухтактной конфигурации с постоянным напряжением смещения на всех плечах интерферометров с включением преобразования Гильберта радиосигнала. Последова-

тельность бит, генерируемая со скоростью 10 Гбит/с, преобразуется в последовательность символов с использованием фазовой манипуляции (PSK). Электрические импульсы подаются на электроды электрооптического модулятора по схеме интерферометра Маха–Цендера. Квадратурный модулятор с двумя параллельно включёнными интерферометрами Маха–Цендера работает в квадратурной рабочей точке как в синфазном, так и в квадратурном плечах. Оптическая волна излучается лазером непрерывного действия с длиной волны 1550 нм. Результаты моделирования показывают, что благодаря введению операции преобразования Гильберта для радиосигнала с поднесущей частотой 10 ГГц обеспечивается скорость передачи данных 10 Гбит/с.

В [12, 13] проанализирован канал спутниковой связи в условиях атмосферной турбулентности, где использовано однополосное оптическое излучение с модуляцией радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией. Разработана модель канала связи, учитывающая как атмосферную турбулентность, так и основные параметры передающей станции и приёмной антенны. Численные результаты, представленные в исследовании лазерной спутниковой связи, основаны на атмосферной высотной модели структурной характеристики флуктуаций показателя преломления Хафнагеля-Валли. Проведённый анализ позволяет оценить влияние на принимаемую мощность оптического излучения атмосферной турбулентности, ошибки наведения и диаметра приёмной апертуры телескопов при передаче лазерного сигнала между наземной станцией и спутником для системы лазерной связи.

В то же время за счёт аппаратурных нестабильностей возможно возникновение амплитудных и фазовых погрешностей, которые приводят к разбалансу квадратур. Эти неточности вызывают дополнительные ошибки при демодуляции принимаемого сигнала, которые могут значительно ухудшить помехоустойчивость приёма [14, 15]. Полученные ранее соотношения не позволяют оценить влияние на качество приёма амплитудных и фазовых погрешностей формирования квадратурных колебаний (разбаланса квадратур). Актуальным направлением следует считать получение зависимостей вероятности битовой ошибки (BER) не только от отношения сигнал/шум (ОСШ), но и от уровня амплитудного разбаланса и фазовой погрешности формирования квадратур.

Используемая ранее модель формирования однополосного оптического излучения, модулированного радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией, не позволяет сформулировать требования к стабильности оптического квантового генератора и электронного генератора поднесущей частоты.

Целью настоящего исследования является получение аналитических выражений для описания процесса формирования и спектрального анализа радиосигналов и оптического излучения на выходах функциональных устройств передающей станции с учётом амплитудных и фазовых погрешностей формирования квадратурных колебаний

**Структура передающей станции когерентной оптической системы.** Применение технологии когерентной оптической связи позволяет передавать информацию на большие расстояния с высокой пропускной способностью. Квадратурная фазовая манипуляция (QPSK) обеспечивает помехоустойчивость к внешним воздействиям при высокой скорости передачи данных [16–19]. Преимущества каждого из этих подходов предполагаются реализуются в предлагаемой когерентной оптической системе.

На рис. 1 приведена структурная схема передающей станции когерентной системы с амплитудной модуляцией оптического излучения радиосигналом. Для распределения ключа используется квадратурная фазовая манипуляция радиосигнала на поднесущей частоте.

**Формирование синфазного и квадратурного гармонических колебаний.** При квадратурной фазовой манипуляции радиосигнала необходимы два колебания  $u_{рч, I}(t)$  и  $u_{рч, Q}(t)$  с одинаковой поднесущей радиочастотой  $f_{рч}$ , но сдвинутые по фазе на  $90^\circ$ . В схеме на рис. 1 это достигается использованием блока формирования квадратурных гармонических колебаний поднесущей радиочастоты  $f_{рч}$  [14, 15]. На его первом выходе генерируется синфазное ( $I$ ) гармоническое колебание

$$u_{рч, I} = U_{рч} \cdot \cos(\theta_{рч}) \quad (1)$$

с амплитудой  $U_{рч}$ , поднесущей частотой  $f_{рч}$ , начальной фазой  $\varphi_{рч}$  и мгновенной фазой  $\theta_{рч} = 2\pi f_{рч}t + \varphi_{рч}$ .

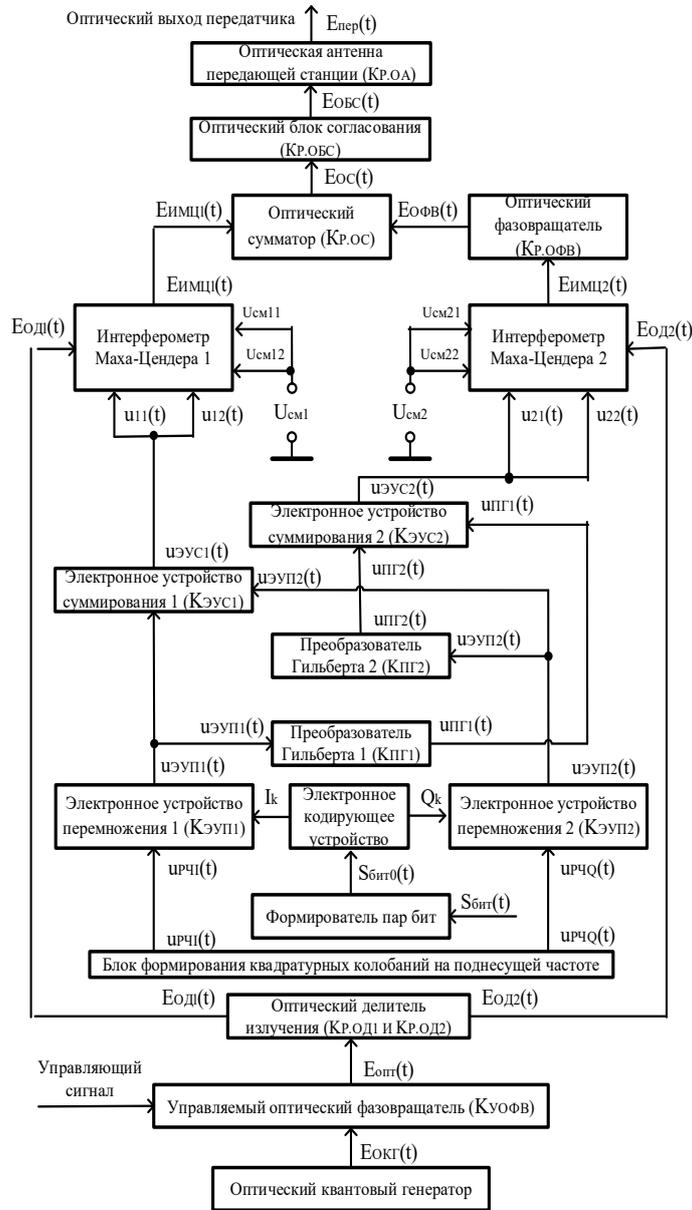


Рис. 1. Структурная схема передающей станции когерентной оптической системы передачи однополосного оптического излучения, модулированного радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией

На втором выходе блока формирования квадратурных ( $Q$ ) гармонических колебаний формируется квадратурное синусоидальное колебание

$$u_{рч,Q}(t) = -\delta_{Uрч} \cdot U_{рч} \cdot \sin(\theta_{рч} + \delta_{\thetaрч}). \quad (2)$$

Наличие амплитудного и фазового разбалансов квадратур опорных колебаний учтены введением коэффициента амплитудного разбаланса  $\delta_{Uрч}$  и дополнительного фазового сдвига  $\delta_{\thetaрч}$  в формуле (2). При отсутствии разбалансов квадратур  $\delta_{Uрч} = 1$  и  $\delta_{\thetaрч} = 0$ .

**Кодирование синфазной и квадратурной составляющих.** Применяемая квадратурная фазовая манипуляция QPSK кодирует два бита передаваемой информации одним символом. Причём длительность двоичного бита  $\tau_b$  в 2 раза меньше длительности символа  $\tau_s$ , т.е.  $\tau_s = 2 \cdot \tau_{бит}$ . При этом символьная скорость в два раза ниже скорости передачи информации.

Из исходного потока данных (бит)  $S_{бит}(t)$  выделяется поток пар бит  $S_{бит0}(t)$ . Сформированный поток пар бит  $S_{бит0}(t)$  преобразуется в электронном кодирующем устройстве в поток символов для умножения (модуляции) синфазного гармонического колебания на коэффициент умножения  $I_j$ , а квадратурного колебания – на коэффициент  $Q_j$  в соответствии с принципами квадратурной фазовой манипуляции QPSK. Причём сигнал  $I_j$  кодирует первый, а сигнал  $Q_j$  – второй бит пары.

Из табл. 1 следует, что формирование на передающей станции  $j$ -го бита в ключевой последовательности во временном интервале  $t \in [t_j; t_j + \tau_{бит}]$  предусматривает генерацию в момент  $t = t_j$  двух чисел  $I_{kj}$  и  $Q_{kj}$  для синфазных и квадратурных составляющих радиосигнала, значения которых могут принимать только два значения «-1» или «+1».

Таблица 1

**Соответствие между символами QPSK, значениями коэффициентов умножения  $I_i$  синфазного и  $Q_i$  квадратурного колебаний**

| Символ QPSK k | Коэффициент умножения      |                               |
|---------------|----------------------------|-------------------------------|
|               | синфазного колебания $I_k$ | квадратурного колебания $Q_k$ |
| 11            | 1                          | 1                             |
| 01            | -1                         | 1                             |
| 00            | -1                         | -1                            |
| 10            | 1                          | -1                            |

Набор коэффициентов умножения амплитуд  $I_{kj}$  и  $Q_{kj}$  радиосигналов для каждого  $j$ -го бита задаётся электронным устройством кодирования. Поскольку последующий анализ проводится применительно к формированию одного  $j$ -го бита, то, для упрощения записи, полагается  $I_{kj} = I_k$  и  $Q_{kj} = Q_k$ .

**Формирование модулирующих напряжений для оптического фазового модулятора.** На выходах первого и второго электронных устройств перемножения (ЭУП) с равными коэффициентами передачи напряжения  $K_{ЭУП}$  будут действовать радиосигналы с одинаковыми амплитудами  $K_{ЭУП}U_{рч}$  и мгновенными фазами  $\theta_{рч}$ :

$$\begin{aligned} u_{ЭУП1}(t) &= K_{ЭУП}I_k u_{рчI}(t) = K_{ЭУП}U_{рч}I_k \cos(\theta_{рч}); \\ u_{ЭУП2}(t) &= K_{ЭУП}Q_k u_{рчQ}(t) = -K_{ЭУП}\delta_{Урч}U_{рч}Q_k \sin(\theta_{рч} + \delta_{\theta_{рч}}). \end{aligned} \quad (3)$$

В отсутствие амплитудного разбаланса квадратур опорных колебаний ( $\delta_{Урч} = 1$ ) амплитуды радиосигналов на выходе электронных устройств перемножения одинаковы и равны  $K_{ЭУП}U_{рч}$ .

На выходе первого аналогового электронного устройства суммирования (ЭУС) с коэффициентом передачи напряжения  $K_{ЭУС1}$  формируется радиосигнал

$$u_{ЭУС1}(t) = K_{ЭУС1}[u_{ЭУП1}(t) + u_{ЭУП2}(t)]$$

для управления первым фазовым модулятором на оптическом интерферометре Маха-Цендера. Причём

$$u_{ЭУС1}(t) = K_{ЭУС1}K_{ЭУП}U_{рч}[I_k \cos(\theta_{рч}) - \delta_{Урч}Q_k \sin(\theta_{рч} + \delta_{\theta_{рч}})]. \quad (4)$$

Для формирования сигнала с однополосной модуляцией используется преобразование Гильберта. Аналитический выходной сигнал преобразователя Гильберта является обобщением комплексного представления узкополосного сигнала. Применение преобразования Гильберта и аналитического сигнала позволяют выполнять квадратурную модуляцию радиосигналов. Здесь в каждой текущей координате модулированных сигналов производится определение огибающей, мгновенной фазы и частоты радиосигналов.

Преобразователь Гильберта осуществляет поворот начальных фаз всех спектральных составляющих входного сигнала на один и тот же угол  $-\pi/2$ .

Используя кусочно-постоянную функцию Кронекера

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0; \\ 0, & x = 0; \\ -1, & x < 0, \end{cases}$$

функция  $\cos(\theta_{pч})$  в (3) после преобразования Гильберта в первом преобразователе Гильберта (ПГ1) приобретает вид

$$\operatorname{sgn}(f_{pч}) \cdot \cos\left(\theta_{pч} - \frac{\pi}{2}\right) = \operatorname{sgn}(f_{pч}) \cdot \sin(\theta_{pч}).$$

Аналогично функция  $\sin(\theta_{pч})$  после преобразования Гильберта во втором преобразователе (ПГ2) преобразуется в

$$\operatorname{sgn}(f_{pч}) \cdot \sin\left(\theta_{pч} + \delta_{\theta pч} - \frac{\pi}{2}\right) = -\operatorname{sgn}(f_{pч}) \cdot \cos(\theta_{pч} + \delta_{\theta pч}).$$

Следовательно, на выходах преобразователей Гильберта с коэффициентами передачи  $K_{ПГ1}$  и  $K_{ПГ2}$  формируются сигналы

$$\begin{aligned} u_{ПГ1}(t) &= K_{ПГ1} K_{ЭУП} U_{pч} I_k \sin(\theta_{pч}); \\ u_{ПГ2}(t) &= K_{ПГ2} K_{ЭУП} U_{pч} \delta_{U pч} Q_k \cos(\theta_{pч} + \delta_{\theta pч}). \end{aligned} \quad (5)$$

На выходе второго аналогового электронного устройства суммирования (ЭУС2) с коэффициентом передачи  $K_{ЭУС2}$  формируется радиосигнал

$$u_{ЭУС2}(t) = K_{ЭУС2} [u_{ПГ2}(t) + u_{ПГ1}(t)]$$

для управления вторым фазовым модулятором на оптическом интерферометре Маха-Цендера.

С учётом (5) при равенстве коэффициентов передачи  $K_{ПГ1} = K_{ПГ2} = K_{ПГ}$  преобразователей Гильберта имеем

$$u_{ЭУС2}(t) = K_{ЭУС2} K_{ПГ} K_{ЭУП} U_{pч} [I_k \sin(\theta_{pч}) + \delta_{U pч} Q_k \cos(\theta_{pч} + \delta_{\theta pч})]. \quad (6)$$

Радиосигнал (4) с выхода первого  $u_{ЭВУ1}(t)$  и сигнал (6) с выхода второго  $u_{ЭУС2}(t)$  аналоговых электронных устройств суммирования подаются на отдельные управляющие (верхние) электрические электроды соответственно первого и второго оптических фазовых модуляторов в составе интерферометра Маха-Цендера (рис. 2).

**Формирование оптического излучения.** На оптические входы интерферометров Маха-Цендера подаются непрерывные оптические излучения. Пусть оптический квантовый генератор (ОКГ) генерирует непрерывное немодулированное монохроматическое излучение с мощностью  $P_{ОКГ}$ , частотой  $f_{опт}$ , начальной фазой  $\varphi_{опт}$  и мгновенной фазой  $\theta_{опт} = 2\pi f_{опт} t + \varphi_{опт}$ .

Мгновенное значение электромагнитного поля оптического колебания ОКГ с амплитудой  $E_{mОКГ} = \sqrt{2 \cdot P_{ОКГ}}$  описывается формулой

$$E_{ОКГ}(t) = E_{mОКГ} \cdot \cos(\theta_{опт}) = \sqrt{2 \cdot P_{ОКГ}} \cdot \cos(\theta_{опт}). \quad (7)$$

В формуле (7) учтено, что мгновенное значение мощности ОКГ (лазера) определяется квадратом поля оптического излучения

$$P_{ОКГ}(t) = E_{ОКГ}^2(t) = 2 \cdot P_{ОКГ} \cdot \cos^2(\theta_{опт}).$$

Усреднение по периоду оптического колебания  $P_{ОКГ}(t)$  даёт среднюю мощность оптического поля ОКГ  $P_{опт}$ .

Непрерывное монохроматическое излучение ОКГ (7) пропускается через управляемый оптический фазовращатель с коэффициентом передачи мощности  $K_{р,уофв}$ , вносящий приращение (сдвиг) мгновенной фазы  $\theta_{опт}$  на  $\Delta_{опт1}$ . Введение в рассмотрение управляемого оптического фазовращателя, по мнению авторов статьи, полезно с позиций определения уровня шумов в приёмной станции на этапе настройки приёмо-передающей аппа-

ратуры. Кроме того, это позволит сформулировать требования к стабильности параметров оптического квантового генератора на передающей стороне и местного лазерного гетеродина при гомодинном приёме на приёмной стороне.

Непрерывное монохроматическое излучение с выхода управляемого оптического фазовращателя

$$E_{\text{опт}}(t) = \sqrt{2 \cdot K_{P, \text{УОФВ}} P_{\text{ОКГ}}} \cdot \cos(\theta_{\text{опт}} + \Delta_{\text{опт1}}) = E_{m\text{опт}} \cos(\theta_{\text{опт}} + \Delta_{\text{опт1}}) \quad (8)$$

посредством оптического делителя (ОД, разветвителя Y-типа) разделяется на две идентичные оптические волны  $E_{\text{ОД1}}(t)$  и  $E_{\text{ОД2}}(t)$  с равными амплитудами  $E_{m\text{опт}}/2 = \sqrt{K_{P, \text{УОФВ}} \cdot P_{\text{ОКГ}}}/2$ . Причём

$$E_{\text{ОД1}}(t) = E_{\text{ОД2}}(t) = E_{\text{ОД}}(t) = \frac{E_{\text{опт}}(t)}{2} = \sqrt{\frac{K_{P, \text{УОФВ}} P_{\text{ОКГ}}}{2}} \cos(\theta_{\text{опт}} + \Delta_{\text{опт1}}). \quad (9)$$

**Фазовая модуляция оптического излучения в первом интерферометре Маха-Цендера.** Применение интерферометра Маха Цендера [20] в качестве внешнего модулятора позволяет формировать различные форматы модуляции в высокоскоростных оптических системах передачи.

Электрооптический модулятор на основе интерферометра Маха-Цендера гарантирует максимальный электрооптический эффект. Внешняя модуляция, в отличие от прямой, позволяет модулировать оптическое излучение в более широкой полосе частот. Кроме того, на основе интерферометра Маха-Цендера возможна модуляция фазы оптической несущей, что увеличивает скорость передачи данных.

Интерферометр изготавливается из титана, который диффундируется в слой подложки из кристалла ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) Z-среза. Кристалл обладает сильным электрооптическим эффектом, так что если к нему приложить напряжение, то показатель преломления будет изменён. Изменение показателя преломления приводит к изменению оптической длины, и, таким образом, к дополнительному сдвигу фазы оптической несущей.

Использование интерферометра Маха-Цендера при одновременном фазовом сдвиге в его двух плечах позволяет существенно улучшить технические характеристики и обеспечить электромагнитную совместимость трактов передачи цифровых сигналов. В связи с этим целесообразно проанализировать процесс модуляции излучения лазера в одном интерферометре Маха-Цендера [21], структура которого представлена на рис. 2.

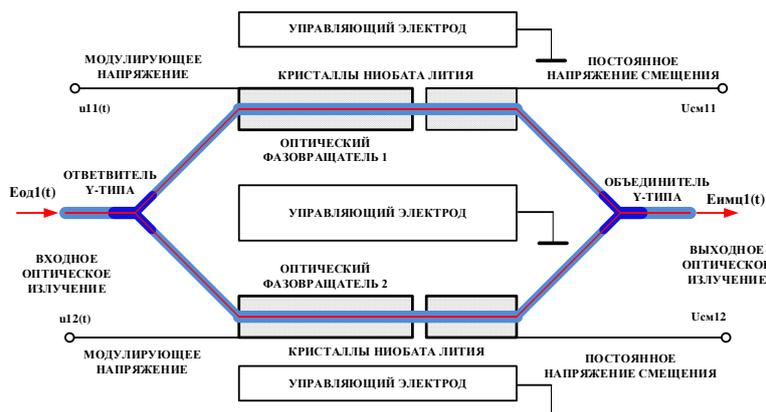


Рис. 2. Схема интерферометра Маха-Цендера с двумя управляющими электродами

Входное излучения интерферометра  $E_{\text{ОД1}}(t)$  посредством оптического разветвителя Y-типа разделяется на две идентичные оптические волны с равными амплитудами  $0,5\sqrt{K_{P, \text{УОФВ}} P_{\text{ОКГ}}}/2$ .

Излучения в верхнем и нижнем плечах интерферометра Маха–Цендера с разветвителя Y-типа подаются на оптические фазовращатели из монокристаллического материала с линейным электрооптическим эффектом. На данном этапе полагаем, что постоянные напряжения смещения равны нулю ( $U_{см11} = U_{см12} = 0$ ).

В верхнем плече интерферометра оптическое излучение распространяется через первый оптический фазовращатель ИМЦ (ОФВ1), где волна приобретает сдвиг фазы  $\varphi_{ОФВ1}$  за счёт изменения показателя преломления кристалла под действием приложенного управляющего электрического напряжения  $u_{11}$ .

С учётом (9) оптическое излучение на выходе идеального первого оптического фазовращателя интерферометра, в котором отсутствуют потери, описывается формулой

$$E_{ОФВ1}(t) = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{K_{р.уОФВ} P_{ОКГ}}{2}} \cdot \cos(\theta_{опт} + \Delta_{опт1} + \varphi_{ОФВ1}). \quad (10)$$

Аналогично, под действием управляющего электрического напряжения  $u_{12}(t)$ , приложенного ко второму оптическому фазовращателю ИМЦ (ОФВ2), проходящее через него излучение приобретает сдвиг фазы на  $\varphi_{ОФВ2}(t)$ . При  $U_{см12} = 0$  излучение на выходе второго оптического фазовращателя описывается формулой

$$E_{ОФВ2}(t) = \sqrt{\frac{K_{р.уОФВ} P_{ОКГ}}{8}} \cdot \cos(\theta_{опт} + \Delta_{опт1} + \varphi_{ОФВ2}). \quad (11)$$

Модулированные по фазе оптические излучения с выходов оптических фазовращателей интерферируют в оптическом сумматоре (ОС), роль которого может выполнять объединитель Y-типа (см. рисунок 2). На выходе объединитель Y-типа, который является выходом интерферометра Маха-Цендера, формируется оптическое излучение

$$E_{ИМЦ1}(t) = E_{ОФВ1}(t) + E_{ОФВ2}(t).$$

С учётом (10) и (11) находим

$$E_{ИМЦ1}(t) = \sqrt{\frac{K_{р.уОФВ} P_{ОКГ}}{8}} \cdot [\cos(\theta_{опт} + \Delta_{опт1} + \varphi_{ОФВ1}) + \cos(\theta_{опт} + \Delta_{опт1} + \varphi_{ОФВ2})]$$

или

$$E_{ИМЦ1}(t) = \sqrt{\frac{K_{р.уОФВ} P_{ОКГ}}{8}} \cdot \cos\left(\theta_{опт} + \Delta_{опт1} + \frac{\varphi_{ОФВ1} + \varphi_{ОФВ2}}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\varphi_{ОФВ1} - \varphi_{ОФВ2}}{2}\right). \quad (12)$$

Из (12) видно, что в режиме, когда в обоих плечах интерферометра задаются одинаковые фазовые сдвиги  $\varphi_{ОФВ1} = \varphi_{ОФВ2} = \varphi_{ОФВ}$ , реализуется требуемая фазовая модуляция оптического излучения

$$E_{ИМЦ1}(t) = \sqrt{\frac{K_{р.уОФВ} P_{ОКГ}}{8}} \cdot \cos(\theta_{опт} + \Delta_{опт1} + \varphi_{ОФВ}).$$

**Фазовая модуляция оптического излучения в первом интерферометре Маха-Цендера в интегральном исполнении.** Поскольку оптическое излучение с фазовой модуляцией более устойчиво к воздействию внешних помех, то остановимся на анализе типовой схемы фазового электрооптического модулятора Маха-Цендера в интегральном исполнении на рис. 2 [12]. В качестве материала для его создания используется ниобат лития ( $\text{LiNbO}_3$ ). На поверхности этого материала создают необходимую волоконно-оптическую конфигурацию. Непрерывное излучение лазера посредством Y-разветвителя направляется по двум каналам (плечам интерферометра). На световоды напыляются управляющие электроды.

Выбор рабочей точки модулятора достигается с помощью постоянных напряжений смещения  $U_{см11}$  и  $U_{см12}$ , которые вносят дополнительные контролируемые сдвиги фаз между оптическими волнами в плечах интерферометра. Для обеспечения смещения излучений обычно используется отдельная система электродов.



Рис. 3. Передаточная функция мощности электрооптического модулятора на интерферометре Маха-Цендера

В качестве рабочей точки фазового модулятора на интерферометре Маха-Цендера выбирается одна из трёх квадратурных точек передаточной функции мощности модулятора, обеспечивающая контролируемый сдвиг фаз на  $-\pi/2$  (точка 1),  $+\pi/2$  (точка 2) или  $+3\pi/2$  (точка 3 на рис. 3). Это обеспечивает работу электрооптического фазового модулятора на линейном участке передаточной функции мощности, представляющей зависимость мощности излучения на выходе идеального, симметричного модулятора от разности фаз волн в плечах интерферометра [22].

На отдельные верхние и нижние управляющие электроды подаются сигнальные напряжения  $u_{11}(t)$  и  $u_{12}(t)$  и напряжения смещения  $U_{см11}$  и  $U_{см12}$ , что позволяет управлять полями в плечах интерферометра независимо друг от друга. Следовательно, на верхние и нижние электроды первого интерферометра Маха-Цендера подаются управляющие напряжения

$$\begin{aligned} u_{ИМЦ11}(t) &= u_{11}(t) + U_{см11}; \\ u_{ИМЦ12}(t) &= u_{12}(t) + U_{см12}. \end{aligned} \quad (13)$$

Пусть на вход анализируемого первого интерферометра Маха-Цендера подаётся непрерывное оптическое излучение (9) с первого выхода оптического делителя  $E_{ОД1}(t)$ . На выходе интерферометра сдвинутые по фазе оптические волны суммируются в процессе интерференции [23]. Выходная оптическая волна интерферометра с коэффициентом передачи мощности  $K_{р.ИМЦ1}$  описывается формулой

$$E_{ИМЦ1}(t) = \sqrt{K_{р.ИМЦ1}} \cdot \frac{E_{ОД1}(t)}{2} \cdot \rightarrow\leftarrow \cdot \left\{ \exp \left[ j\pi \frac{u_{ИМЦ11}(t)}{U_{\pi}} \right] + \exp \left[ j\pi \frac{u_{ИМЦ12}(t)}{U_{\pi}} \right] \right\}, \quad (14)$$

где  $U_{\pi}$  – полуволновое напряжение, необходимое для сдвига фазы оптического колебания на  $\pi$ .

Деление на 2 возникает из-за того, что входное оптическое излучение интерферометра (амплитуда) делится поровну между двумя его плечами.

При  $U_{см11} = U_{см12} = U_{см1}$  и  $u_{11}(t) = u_{12}(t) = u_{ЭУС1}(t)$  согласно (4), (13) и (14) находим

$$E_{ИМЦ1}(t) = \sqrt{K_{р.ИМЦ1}} \cdot E_{ОД1}(t) \cdot \exp \left[ j\pi \frac{u_{ЭУС1}(t)}{U_{\pi}} \right] \cdot \exp \left[ j\pi \frac{U_{см1}}{U_{\pi}} \right]. \quad (15)$$

Видно, что при подаче напряжений одинаковой полярности на электроды кристалла интерферометр выполняет роль оптического фазового модулятора. Причём при  $U_{см1} = -U_{\pi}/2$  находим, что  $\exp[j\pi U_{см1}/U_{\pi}] = \exp[-j\pi/2] = -j$ . Следовательно, обеспечивая контролируемый сдвиг фаз на  $-\pi/2$ , гарантируется работа электрооптического модулятора на линейном участке передаточной функции мощности (точка 1 на рис. 3).

С учётом (4) и  $U_{см1} = -U_{\pi}/2$  преобразуем (15) к виду

$$E_{имц1}(t) = -j \cdot \sqrt{K_{р.имц1}} \cdot E_{од1}(t) \cdot \exp \left[ j\pi \frac{K_{эус1} K_{эуп} U_{рч} [I_k \cos(\theta_{рч}) - \delta_{урч} Q_k \sin(\theta_{рч} + \delta_{\theta_{рч}})]}{U_{\pi}} \right] \quad (16)$$

На выходе первого интерферометра формируется созвездие сигналов бинарной фазовой манипуляции BPSK (рис. 4,а).

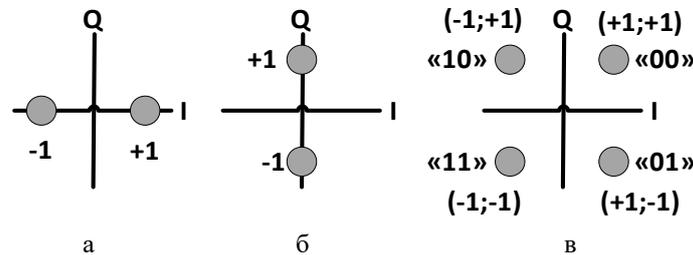


Рис. 4. Сигнальные созвездия фаз на выходах первого и второго интерферометров (а), фазовращателя (б) и оптического сумматора (в)

**Фазовая модуляция оптического излучения во втором интерферометре Маха-Цендера.** Второй интерферометр Маха-Цендера имеет пары отдельных верхних и нижних управляющих электродов, на которые подаются напряжения с выхода второго электронного устройства суммирования (см. рисунок 1). С учётом (6)

$$u_{21}(t) = u_{22}(t) = u_{эус2}(t) = K_{эус2} K_{пг} K_{эуп} U_{рч} [I_k \sin(\theta_{рч}) + \delta_{урч} Q_k \cos(\theta_{рч} + \delta_{\theta_{рч}})].$$

Выбор рабочей точки электрооптического модулятора достигается посредством приложения к электродам напряжений смещения

$$U_{см21} = U_{см22} = -U_{\pi}/2,$$

что обеспечивает заданный сдвиг фаз на  $-\pi/2$  между оптическими волнами в плечах интерферометра, гарантируя работу модулятора на линейном участке передаточной функции мощности (точка 1 на рисунке 3).

На выходе второго интерферометра с коэффициентом передачи мощности  $K_{р.имц2}$  сдвинутые по фазе оптические волны суммируются в процессе интерференции, формируя выходную оптическую волну интерферометра

$$E_{имц2}(t) = -j \cdot \sqrt{K_{р.имц2}} \cdot E_{од2}(t) \cdot \exp \left[ j\pi \frac{K_{эус2} K_{пг} K_{эуп} U_{рч} [I_k \sin(\theta_{рч}) + \delta_{урч} Q_k \cos(\theta_{рч} + \delta_{\theta_{рч}})]}{U_{\pi}} \right] \quad (17)$$

Из (17) видно, что на выходе второго (нижнего) интерферометра также формируется созвездие сигналов бинарной фазовой манипуляции BPSK (рисунок 4, а).

**Объединение оптических излучений с выходов интерферометров.** К выходу второго интерферометра Маха-Цендера подключается оптический фазовращатель на  $\pi/2$  с коэффициентом передачи мощности  $K_{р.офв}$ . С учётом (17) на выходе оптического фазовращателя формируется волна

$$\leftarrow \exp \left[ j\pi \frac{K_{\text{ЭУС2}} K_{\text{ПГ}} K_{\text{ЭУП}} U_{\text{РЧ}} [I_k \sin(\theta_{\text{РЧ}}) + \delta_{U_{\text{РЧ}}} Q_k \cos(\theta_{\text{РЧ}} + \delta_{\theta_{\text{РЧ}}})]}{U_{\pi}} \right] \cdot E_{\text{ОФВ}}(t) = \sqrt{K_{\text{Р.ИМЦ2}} K_{\text{Р.ОФВ}}} \cdot E_{\text{ОД2}}(t) \cdot \rightarrow \quad (18)$$

Сравнение формул (16) и (18) показывает, что благодаря сдвига по фазе на  $+\pi/2$  в оптическом фазовращателе излучения, поступающие на входные порты оптического сумматора, будут повернуты относительно друг друга на  $\pi/2$  (сравните рисунки 4а и 4б).

Оптическая волна на выходе оптического сумматора с коэффициентом передачи мощности  $K_{\text{Р.ОС}}$  описывается формулой

$$E_{\text{ОС}}(t) = \sqrt{K_{\text{Р.ОС}}} \cdot [E_{\text{ИМЦ1}}(t) + E_{\text{ОФВ}}(t)].$$

На практике обеспечивается равенство коэффициентов передачи мощности  $K_{\text{Р.ИМЦ1}} = K_{\text{Р.ИМЦ2}} = K_{\text{Р.ИМЦ}}$  в плечах интерферометров Маха-Цендера и коэффициентов передачи напряжения аналоговых электронных устройств суммирования  $K_{\text{ЭУС1}} = K_{\text{ЭУС2}} = K_{\text{ЭУС}}$ . Передача напряжения в электронных преобразователях Гильберта может быть обеспечена с коэффициентами  $K_{\text{ПГ1}} = K_{\text{ПГ2}} = K_{\text{ПГ}} \approx 1$ . Это позволяет для упрощения записи формул ввести в рассмотрение обозначения для коэффициента фазовой модуляции радиосигнала

$$\alpha_{\text{РЧ}} = \pi \cdot K_{\text{ЭУС}} \cdot K_{\text{ЭУП}} \cdot \frac{U_{\text{РЧ}}}{U_{\pi}} \quad (19)$$

и для параметров модуляции

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= I_k \alpha_{\text{РЧ}} \cos(\theta_{\text{РЧ}}) - \delta_{U_{\text{РЧ}}} Q_k \alpha_{\text{РЧ}} \sin(\theta_{\text{РЧ}} + \delta_{\theta_{\text{РЧ}}}), \\ \alpha_2 &= I_k \alpha_{\text{РЧ}} \sin(\theta_{\text{РЧ}}) + \delta_{U_{\text{РЧ}}} Q_k \alpha_{\text{РЧ}} \cos(\theta_{\text{РЧ}} + \delta_{\theta_{\text{РЧ}}}). \end{aligned} \quad (20)$$

На практике коэффициент передачи оптических фазовращателей близок к единице. Так, например, оптоволоконные вращатели фазы OM-FPS вносят потери мощности до 0,1 дБ на рабочих длинах волн 780, 1060, 1310 и 1550 нм. Это позволяет в дальнейшем принять  $K_{\text{Р.ОФВ}} = 1$ .

С учётом (9), (16), (18) – (20) находим

$$E_{\text{ОС}}(t) = E_{\text{МОС}} \cdot [-j \cdot \exp[j\alpha_1] + \exp[j\alpha_2]] \cdot \cos(\theta_{\text{ОПТ}} + \Delta_{\text{ОПТ1}}). \quad (21)$$

где амплитуды двух суммируемых оптических волн в оптическом сумматоре равны

$$E_{\text{МОС}} = \sqrt{\frac{K_{\text{Р.ОС}} K_{\text{Р.ИМЦ}} K_{\text{Р.УОФВ}}}{2}} P_{\text{ОКГ}}. \quad (22)$$

Из формулы (21) видно, что генерируется сигнал с манипуляцией QPSK, созвездие которого показано на рис. 4,в.

**Формирование выходного оптического поля передающей станции.** Оптическая волна с выхода оптического сумматора последовательно проходит через оптический блок согласования (ОБС), включающий оптическую направляющую среду, с коэффициентом передачи мощности  $K_{\text{Р.ОБС}}$  и передающую оптическую антенну (ПОА) с коэффициентом передачи мощности  $K_{\text{Р.ПОА}}$ . Отметим, что оптический блок согласования помимо оптической направляющей среды с коэффициентом усиления мощности  $K_{\text{Р.ОНС}}$ , может включать оптический усилитель (ОУ) с коэффициентом усиления мощности  $K_{\text{Р.ОУ}}$ . В некоторых случаях вместо оптического усилителя может включаться оптический аттенюатор (ОА) с коэффициентом передачи мощности  $K_{\text{Р.ОА}}$ . Последнее возможно в случае передачи вместо потока данных ключевой последовательности символов, затрудняя злоумышленнику перехват информации.

С учётом (21) и (22) оптическая волна передающей станции описывается формулой

$$E_{\text{пер}}(t) = E_{\text{мпер}} \cdot [-j \cdot \exp[j\alpha_1] + \exp[j\alpha_2]] \cdot \cos(\theta_{\text{ОПТ}} + \Delta_{\text{ОПТ1}}), \quad (23)$$

где

$$E_{\text{тпер}} = \sqrt{\frac{K_{P,\text{ПОА}}K_{P,\text{ОБС}}K_{P,\text{ОС}}K_{P,\text{ИМЦ}}K_{P,\text{УОФВ}}}{2}} P_{\text{ОКГ}}. \quad (24)$$

Формулы (23) и (24) показывают, что структура оптического квадратурного модулятора на двух параллельно включённых интерферометрах Маха-Цендера с постоянными напряжениями смещения на всех плечах управляющих электродах, представленная на рис. 1, обеспечивает формирование оптического излучения с модуляцией фазоманипулированным радиосигналом на поднесущей частоте.

**Выводы.** Проанализирован процесс формирования однополосного оптического излучения, модулированного радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией с помощью двух параллельно включённых интерферометрах Маха-Цендера. Получены соотношения, описывающие оптическое излучение и радиосигналы на выходе всех функциональных устройств оптического передатчика. Отличительная особенность математических соотношений состоит в том, что в них учтены амплитудные и фазовые погрешности формирования квадратурных колебаний (разбаланс квадратур). Последнее позволит в дальнейшем оценить влияние разбаланса квадратур на качество приёма когерентного оптического излучения с модуляцией квадратурным фазоманипулированным радиосигналом на поднесущей частоте.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Аничкин А.Д., Оленев В.Л.* Применение лазерных систем связи для передачи данных в космическом пространстве // Системный анализ и логистика. – 2024. – № 3 (41). – С. 17-24. – DOI: 10.31799/2077 5687-2024-3-17-24.
2. *Ибрагимов Р.З., Фокин В.Г.* Проектирование современных оптических транспортных сетей связи. – СПб.: Лань, 2023. – 112 с. – ISBN 978-5-507-45199-9.
3. *Блаунштейн Н.Ш., Крук Е.А., Сергеев М.Б.* Оптическая связь: оптоволоконная, атмосферная: монография. – СПб.: ГУАП, 2016. – 286 с. – ISBN: 978-5-8088-1157-7.
4. *Kim Geuk-Nam, Park Sang-Young, Seong Sehyun, Lee Joohee, Choi Suyong, Kim Young-Eon, Ryu Han-Gyeol, Lee Sungmoon, Choi Jae-Young, Han Sang Kook.* The VISION – Concept of laser crosslink systems using nanosatellites in formation flying // Acta Astronautica. – 2023. – Vol. 211. – P. 877-897.
5. *Mahmood H.A.* 40 Gbps Laguerre-Gaussian and Hermite-Gaussian Optical Mode Division Multiplexing for Radio over Fiber System // Journal of Optical Communications. – 2021. – Vol. 42, No. 4. – P. 689-692. – DOI 10.1515/joc-2018-0161.
6. *Hui R., Zhu B., Huang R., Allen C., Demarest K. and Richards D.* Subcarrier multiplexing for high-speed optical transmission // IEEE Journal of Lightwave Technology. – March, 2002. – Vol. 20, No. 3. – P. 417-427.
7. *Hui R., Zhu B., Huang R., Allen C., Demarest K., and Richards D.* 10-Gb/s SCM fiber system using optical SSB modulation // IEEE Photonics Technology Letters. – August, 2001. – Vol. 13, No. 8. – P. 896-898.
8. *Mahmood H.A., Ahmed R.K.* Radio over fiber performance evaluation in optical communication system utilizing FBG under different DCF schemes for DPSK format // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2019. – Vol. 14, No. 4. – P. 1130-1137. – DOI 10.36478/jeasci.2019.1130.1137.
9. *Ahmed R.K., Mahmood H.A.* Performance analysis of PAM intensity modulation based on dispersion compensation fiber technique for optical transmission system // 2018 1st International Scientific Conference of Engineering Sciences-3rd Scientific Conference of Engineering Science (ISCES). – 2018. – P. 126-130. – DOI: 10.1109/ISCES.2018.8340540.
10. *Mahmood H.A., Rumyantsev R.K., Al-Karawi H.S.* Evolution of radio over free space optical communication utilizing subcarrier multiplexing / amplitude shift keying // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 5 (215). – С. 141-149. – DOI: 10.18522/2311-3103-2020-5-141-149.
11. *Махмуд Х.А.М., Румянцев К.Е.* Формирование однополосной квадратурной фазовой манипуляции радиосигналов на поднесущих частотах в когерентной оптической системе коммуникации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 5 (229). – С. 209-220. – DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-209-220. – Режим доступа: [https://izv-tn.tti.sfedu.ru/index.php/izv\\_tn/article/view/838/1024](https://izv-tn.tti.sfedu.ru/index.php/izv_tn/article/view/838/1024).
12. *Махмуд Х.А.М., Румянцев К.Е., Аль-Бегат А.Х.Ш.* Анализ восходящего лазерного канала спутниковой коммуникации в условиях атмосферной турбулентности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 4 (234). – С. 174-191. – DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-174-191.
13. *Mahmood H.A., Rumyantsev K.Y.* Effect of FBG Compensated Dispersion on SCM/ASK Radio over Fiber System // 12th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI). – 2019. – Art. No 8966032. – P. 1-5. – DOI 10.1109/CISP-BMEI48845.2019.8966032.

14. Куликов Г.В., Лелюх А.А. Влияние амплитудного и фазового разбаланса квадратур на помехоустойчивость когерентного приёма сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией // Российский технологический журнал. – 2021. – 9 (1). – С. 29-37. – <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-29-37>.
15. Куликов Г.В., Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приёма сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии гармонической помехи // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). – 2018. – 11.
16. Скляр Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Digital Communications: Fundamentals and Applications. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2007. – 1104 с. – ISBN 0-13-084788-7.
17. Берлин А.Н. Коммутация в системах и сетях связи. – М.: Эко-Трендз, 2006. – 344 с. – ISBN 5-88405-073-9.
18. Прохис, Дж. Цифровая связь. Digital Communications / под ред. Д.Д. Киевского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с. – ISBN 5-256-01434-X.
19. Варгаузин В.А., Цикин И.А. Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013.
20. Древо Д.Р., Зюрюкин Ю.А., Ушаков Н.М. Модификации электрооптического модулятора Маха–Цендера для управления лазерным излучением повышенной мощности // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: Матер. V конф. молодых учёных. – Саратов, 2010. – С. 18-19.
21. Слепов Н.Н. Оптические волоконные конверторы и модуляторы // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2000. – № 6. – С. 6-10.
22. Вобликов Е.Д., Волынцев А.Б., Журавлев А.А., Кичанов А.В., Пономарев Р.С., Шевцов Д.И. Интегрально-оптический модулятор на основе интерферометра Маха–Цендера с асимметричной топологией волноводов // Тр. МАИ. – 2011. – № 46.
23. Seimetz M. High-order modulation for optical fiber transmission. – Springer Science & Business Media, 2009. – 252 p.

#### REFERENCES

1. Anichkin A.D., Olenov V.L. Primenenie lazernykh sistem svyazi dlya peredachi dannykh v kosmicheskom prostranstve [Application of laser communication systems for data transmission in outer space], *Sistemnyy analiz i logistika* [System Analysis and Logistics], 2024, No. 3 (41), pp. 17-24. DOI: 10.31799/2077 5687-2024-3-17-24.
2. Ibragimov R.Z., Fokin V.G. Proektirovanie sovremennykh opticheskikh transportnykh setey svyazi [Design of modern optical transport communication networks]. Saint Petersburg: Lan', 2023, 112 p. ISBN 978-5-507-45199-9.
3. Blaunshteyn N.Sh., Kruk E.A., Sergeev M.B. Opticheskaya svyaz': optovolokonnaya, atmosfernaya: monografiya [Optical communication: fiber-optic and free-space systems: monograph]. Saint Petersburg: GUAP, 2016, 286 p. ISBN: 978-5-8088-1157-7.
4. Kim Geuk-Nam, Park Sang-Young, Seong Sehyun, Lee Joohee, Choi Suyong, Kim Young-Eon, Ryu Han-Gyeol, Lee Sungmoon, Choi Jae-Young, Han Sang Kook. The VISION – Concept of laser cross-link systems using nanosatellites in formation flying, *Acta Astronautica*, 2023, Vol. 211, pp. 877-897.
5. Mahmood H.A. 40 Gbps Laguerre-Gaussian and Hermite-Gaussian Optical Mode Division Multiplexing for Radio over Fiber System, *Journal of Optical Communications*, 2021, Vol. 42, No. 4, pp. 689-692. DOI 10.1515/joc-2018-0161.
6. Hui R., Zhu B., Huang R., Allen C., Demarest K. and Richards D. Subcarrier multiplexing for high-speed optical transmission, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, March, 2002, Vol. 20, No. 3, pp. 417-427.
7. Hui R., Zhu B., Huang R., Allen C., Demarest K., and Richards D. 10-Gb/s SCM fiber system using optical SSB modulation, *IEEE Photonics Technology Letters*, August, 2001, Vol. 13, No. 8, pp. 896-898.
8. Mahmood H.A., Ahmed R.K. Radio over fiber performance evaluation in optical communication system utilizing FBG under different DCF schemes for DPSK format, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2019, Vol. 14, No. 4, pp. 1130-1137. DOI 10.36478/jeasci.2019.1130.1137.
9. Ahmed R.K., Mahmood H.A. Performance analysis of PAM intensity modulation based on dispersion compensation fiber technique for optical transmission system, *2018 1st International Scientific Conference of Engineering Sciences-3rd Scientific Conference of Engineering Science (ISCES)*, 2018, pp. 126-130. DOI: 10.1109/ISCES.2018.8340540.
10. Mahmood H.A., Rumyantsev R.K., Al-Karawi H.S. Evolution of radio over free space optical communication utilizing subcarrier multiplexing / amplitude shift keying, *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 5 (215), pp. 141-149. DOI: 10.18522/2311-3103-2020-5-141-149.

11. *Makhmud Kh.A.M., Rumyantsev K.E.* Formirovanie odnopolosnoy kvadrurnoy fazovoy manipulyatsii radiosignalov na podnesushchikh chastotakh v kogerentnoy opticheskoy sisteme kommunikatsii [Generation of single-sideband quadrature phase-shift keyed radio signals on subcarrier frequencies in a coherent optical communication system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 5 (229), pp. 209-220. DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-209-220. – Rezhim dostupa: [https://izv-tn.tti.sfedu.ru/index.php/izv\\_tn/article/view/838/1024](https://izv-tn.tti.sfedu.ru/index.php/izv_tn/article/view/838/1024).
12. *Makhmud Kh.A.M., Rumyantsev K.E., Al'-Begat A.Kh.Sh.* Analiz voskhodyashchego lazernogo kanala sputnikovoy kommunikatsii v usloviyakh atmosfery turbulentsi [Analysis of the Uplink Laser Channel in Satellite Communication under Atmospheric Turbulence Conditions], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 4 (234), pp. 174-191. DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-174-191.
13. *Mahmood H.A., Rumyantsev K.Y.* Effect of FBG Compensated Dispersion on SCM/ASK Radio over Fiber System, *12th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI)*, 2019, Art. No 8966032, pp. 1-5. DOI 10.1109/CISP-BMEI48845.2019.8966032.
14. *Kulikov G.V., Lelyukh A.A.* Vliyaniye amplitudnogo i fazovogo razbalansa kvadratur na pomexhostoychivost' kogerentnogo priema signalov s kvadrurnoy amplitudnoy modulyatsiyey [Impact of amplitude and phase quadrature imbalance on the noise immunity of coherent reception of quadrature amplitude modulated signals], *Rossiyskiy tekhnologicheskyy zhurnal* [Russian Technological Journal], 2021, 9 (1), pp. 29-37. Available at: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-29-37>.
15. *Kulikov G.V., Nesterov A.V., Lelyukh A.A.* Pomexhostoychivost' priema signalov s kvadrurnoy amplitudnoy manipulyatsiyey v prisutstvii garmonicheskoy po mekhi [Noise Immunity of Quadrature Amplitude Modulated Signal Reception in the Presence of Harmonic Interference], *Zhurnal radioelektroniki (elektronnyy zhurnal)* [Journal of Radio Electronics (electronic journal)], 2018, 11.
16. *Sklyar Bernard.* TSifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye. Digital Communications: Fundamentals and Applications [Digital communications: fundamentals and applications]. 2nd ed. Moscow: Vil'yams, 2007, 1104 p. ISBN 0-13-084788-7.
17. *Berlin A.N.* Kommutatsiya v sistemakh i setyakh svyazi [Switching in communication systems and networks]. Moscow: Eko-Trendz, 2006, 344 p. ISBN 5-88405-073-9.
18. *Prokis, Dzh.* Tsifrovaya svyaz'. Digital Communications [Digital communications], ed.by D.D. Kievskogo. Moscow: Radio i svyaz', 2000, 800 p. ISBN 5-256-01434-X.
19. *Vargauzin V.A., Tsikin I.A.* Metody povysheniya energeticheskoy i spektral'noy effektivnosti tsifrovoy radiosvyazi [Methods for enhancing the energy and spectral efficiency of digital radio communication]. Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2013.
20. *Drevko D.R., Zyuryukin Yu.A., Ushakov N.M.* Modifikatsii elektroopticheskogo modulyatora Makha–Tsendera dlya upravleniya lazernym izlucheniym povyshennoy moshchnosti [Modifications of the mach–zehnder electro-optic modulator for high-power laser radiation control], *Nanoelektronika, nanofotonika i nelineynaya fizika: Mater. V konf. molodykh uchennykh* [Nanoelectronics, Nanophotonics and Nonlinear Physics: V Rising Scholars Conference Materials]. Saratov, 2010, pp. 18-19.
21. *Slepov N.N.* Opticheskie volokonnyye konvertory i modulyatory [Optical fiber converters and modulators], *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2000, No. 6, pp. 6-10.
22. *Voblikov E.D., Volyntsev A.B., Zhuravlev A.A., Kichanov A.V., Ponomarev R.S., Shevtsov D.I.* Integral'no-opticheskiy modulyator na osnove interferometra Makha–Tsendera s asimmetrichnoy topologiyey volnovodov [Integrated optical modulator based on a Mach–Zehnder interferometer with asymmetric waveguide topology], *Tr. MAI* [Trudy MAI], 2011, No. 46.
23. *Seimetz M.* High-order modulation for optical fiber transmission. Springer Science & Business Media, 2009, 252 p.

**Мамитов Александр Сергеевич** – 578 военное представительство Министерства обороны Российской Федерации; e-mail: [zander11@inbox.ru](mailto:zander11@inbox.ru); г. Москва, Россия; тел.: +79286207139; начальник.

**Румянцев Константин Евгеньевич** – Южный федеральный университет; e-mail: [rummyantsev@sfedu.ru](mailto:rummyantsev@sfedu.ru); г. Таганрог, Россия; тел.: +79281827209; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

**Mamitov Alexander Sergeevich** – 578 military representation of the Ministry of Defense Russian Federation; e-mail: [zander11@inbox.ru](mailto:zander11@inbox.ru); Moscow, Russia; phone: +79286207139; head.

**Rumyantsev Konstantin Yevgenievich** – Southern Federal University; e-mail: [rummyantsev@sfedu.ru](mailto:rummyantsev@sfedu.ru); Taganrog, Russia; phone: +79281827209; the Department of Information Security of Telecommunication Systems; head of department; dr. of eng. sc.; professor.