

Раздел II. Анализ данных, моделирование и управление

УДК 621.376

DOI 10.18522/2311-3103-2026-1-65-77

К.Е. Румянцев, Д.А. Цыщорин

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ КЛЮЧЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ В КОГЕРЕНТНОЙ ДВУХПОЛОСНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С МОДУЛЯЦИЕЙ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫМИ РАДИОСИГНАЛАМИ

Когерентная оптическая связь с использованием квадратурной фазовой манипуляции (QPSK) обеспечивает высокую скорость передачи данных синфазными и квадратурными (IQ) форматами модуляции на большие расстояния. Квадратурный оптический модулятор с двумя интерферометрами Маха-Цендера в двухтактной конфигурации при одновременном фазовом сдвиге в его плечах позволяет существенно улучшить технические характеристики и обеспечить электромагнитную совместимость трактов передачи цифровых сигналов. Двухтактная конфигурация оптического модулятора является основой для организации высокоскоростной и помехозащищённой передачи данных. Результаты исследований доказывают, что после определённой коррекции известных структур когерентной оптической передачи система может быть использована для распределения ключа. Представлена структура передающей станции когерентной двухполосной оптической системы формирования ключевой последовательности. Модель формирования оптического излучения с модуляцией фазоманипулированным радиосигналом осуществляется на основе квадратурного оптического модулятора на двух параллельно включённых интерферометрах Маха-Цендера с постоянными напряжениями смещения на всех плечах управляющих электродов. Формирование ключевой последовательности реализуется посредством модуляции синфазной и квадратурной составляющих радиосигналов на поднесущей частоте. Набор двух коэффициентов умножения амплитуд для каждого бита задаётся электронным устройством кодирования. Коэффициенты представляют сигналы, модулирующие по амплитуде соответственно синфазную и квадратурную составляющие поднесущей частоты. Формируемое оптическое излучение на выходе модулятора обеспечивает распределение ключа (задание значений нулевого «0» и единичного «1» битов в двоичной системе счисления) по протоколу с четырьмя состояниями фазы в прямоугольном и диагональном базисах. Предложен модуль управления кодированием синфазной и квадратурной составляющих радиосигнала на поднесущей частоте. Применение квадратурной фазовой манипуляции (QPSK) обеспечивает помехоустойчивость к внешним воздействиям при высокой скорости передачи данных.

Распределение ключа; когерентное излучение; конфигурация двух интерферометров Маха-Цендера; формирование двухполосного оптического излучения; квадратурный фазоманипулированный радиосигнал; поднесущая частота.

K.Y. Rumyantsev, D.A. Tsytsorin

MODEL OF KEY SEQUENCE GENERATION IN A COHERENT DUAL-BAND OPTICAL SYSTEM WITH PHASE-SHIFT KEYED RADIO SIGNAL MODULATION

Coherent optical communication using quadrature phase-shift keying (QPSK) provides high-speed data transmission using in-phase and quadrature (IQ) modulation formats over long distances. A quadrature optical modulator with two Mach-Zehnder interferometers in a two-way configuration with simultaneous phase shift in its arms significantly improves the technical characteristics and ensures the electromagnetic compatibility of digital signal transmission paths. The two-cycle configuration of an optical modulator is the basis for high-speed and noise-resistant data transmission. The research results prove that, after certain

corrections to the known coherent optical transmission structures, the system can be used for key distribution. The structure of a coherent two-band optical key sequence formation system is presented. The model for generating optical radiation with modulation by a phase-shifted radio signal is based on a quadrature optical modulator with two parallel Mach-Zehnder interferometers with constant bias voltages on all control electrode arms. Key sequence formation is implemented by modulating the in-phase and quadrature components of radio signals at the subcarrier frequency. A set of two amplitude multiplication coefficients for each bit is specified by the electronic encoding device. The coefficients represent the signals that modulate the amplitude of the in-phase and quadrature components of the subcarrier frequency, respectively. The optical radiation generated at the modulator output provides key distribution (setting the values of zero "0" and one "1" bits in the binary number system) according to a protocol with four phase states in the rectangular and diagonal bases. A module for controlling the encoding of the in-phase and quadrature components of a radio signal at a subcarrier frequency is proposed. The use of quadrature phase shift keying (QPSK) provides noise immunity to external influences at high data transfer rates.

Key distribution, coherent radiation; configuration of two Mach-Zehnder interferometers; formation of dual-band optical radiation; quadrature phase-shift keyed radio signal; subcarrier frequency.

Введение. Технология когерентной оптической связи позволяет обеспечить передачу информации на большие расстояния с высокой пропускной способностью [1, 2]. В частности, применение квадратурной фазовой манипуляции (QPSK – quadrature phase-shift keying или 4-PSK) обеспечивает высокую скорость передачи данных простым, надёжным и экономичным способом [3]. Передача нескольких бит, как символа, реализуется простыми синфазными и квадратурными (IQ) форматами модуляции [4–8].

Для увеличения пропускной способности в когерентных оптических системах используется мультиплексирование [9–11], когда манипулированные разными потоками данных радиосигналы на нескольких поднесущих частотах модулируют излучение одного оптического квантового генератора (ОКГ). Одно из преимуществ мультиплексирования на поднесущих частотах (SCM – Subcarrier Multiplexing) состоит в том, что устройства СВЧ для формирования и обработки радиосигналов более стабильны, чем их оптические аналоги [12].

Перенос процесса модуляции во внешний оптический модулятор позволяет снизить влияние амплитудного шума лазерного источника и повысить скорость переключения. Применение интерферометра Маха-Цендера (ИМЦ) [13, 14] в качестве внешнего модулятора позволяет обеспечить фазовую модуляцию в высокоскоростных оптических системах передачи.

Интерферометр Маха-Цендера в интегральном исполнении включает оптический ответвитель Y-типа (делитель) и оптический сумматор Y-типа, соединённые прямолинейными участками волноводов (плечами ИМЦ) на монокристалле [15, 16]. Интерферометр изготавливается из титана, который диффундируется в слой подложки из монокристалла ниобата лития (LiNbO_3) Z-срезы. Кристалл обладает сильным электрооптическим эффектом, так что если к нему приложить напряжение, то показатель преломления будет изменён [17]. Изменение показателя преломления под действием эффекта Поккельса при приложении к монокристаллу напряжения приводит к изменению оптической длины и к фазовому сдвигу [18].

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 [19]. Дополнительные возможности даёт применение двух параллельно включённых интерферометров Маха-Цендера [20].

Квадратурный оптический модулятор с двумя интерферометрами Маха-Цендера в двухтактной конфигурации является основным элементом для организации высокоскоростной и помехозащищённой передачи данных [21].

В [22] проанализирована система когерентной оптической передачи с одной боковой полосой при модуляции оптического излучения фазоманипулированным радиосигналом с использованием оптического квадратурного модулятора и формированием импульсов с M-ричной радиочастотой. Генератор псевдослучайных битовых последова-

тельностью генерирует модулирующий сигнал со скоростью передачи до 10 Гбит/с. Битовая последовательность преобразуется в M-ричную последовательность символов из двоичных сигналов с использованием фазовой манипуляции (PSK). Генератор формирует многоуровневые импульсы в соответствии с последовательностью M-ричных входных символов. Электрические импульсы подаются на управляющие электроды электрооптического модулятора на основе интерферометра Маха–Цендера (ИМЦ). Напряжения смещения обеспечивают работу интерферометра в квадратурной точке. Лазером излучается непрерывная оптическая волна с длиной волны 1550 нм.

Представленные ниже результаты исследований доказывают, что после определённой коррекции описанной ранее структуры когерентной оптической передачи система может быть использована для распределения ключа.

Формирование оптического излучения с модуляцией фазоманипулированным радиосигналом на основе двух параллельно включённых интерферометров Маха–Цендера. Проанализируем структуру квадратурного оптического модулятора на двух параллельно включённых интерферометров Маха–Цендера ИМЦ1 и ИМЦ2, как показано на рис. 1. Здесь постоянные напряжения смещения подаются на кристаллы соответственно в верхних $U_{см11}$, $U_{см12}$ и нижних $U_{см21}$, $U_{см22}$ плечах интерферометров ИМЦ1 и ИМЦ2.

Пусть оптический квантовый генератор (ОКГ) генерирует непрерывное немодулированное монохроматическое излучение с мощностью $P_{опт}$, частотой $f_{опт}$, начальной фазой $\varphi_{опт}$ и мгновенной фазой $\theta_{опт} = 2\pi f_{опт}t + \varphi_{опт}$.

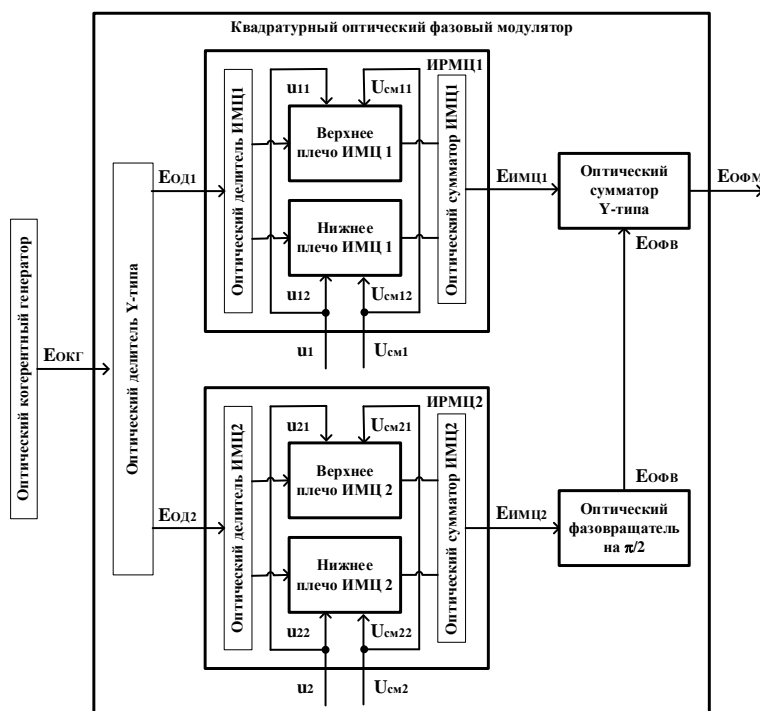


Рис. 1. Квадратурный оптический модулятор на двух интерферометрах

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

$$E_{ОКГ}(t) = E_{опт} \cdot \cos(\theta_{опт}) = \sqrt{2 \cdot P_{опт}} \cdot \cos(\theta_{опт}). \quad (1)$$

В формуле учтено, что мгновенное значение мощности ОКГ (лазера, лазерного диода) определяется квадратом поля оптического излучения. Усреднение по периоду оптического колебания $P_{ОКГ}(t)$ даёт среднюю мощность оптического поля лазера $P_{опт}$.

Непрерывное монохроматическое излучение ОКГ (1) посредством оптического делителя (ОД, оптического разветвителя Y-типа) разделяется на две оптические волны $E_{ОД1}(t)$ и $E_{ОД2}(t)$.

$$E_{ОД1}(t) = E_{ОД2}(t) = E_{ОД}(t) = \frac{E_{ОКГ}(t)}{2} = \sqrt{\frac{P_{опт}}{2}} \cdot \cos(\theta_{опт}) \quad (2)$$

с равными амплитудами $\sqrt{P_{опт}/2}$ на входах первого (ИМЦ1) и второго (ИМЦ2) интерферометров Маха–Цендера.

Отметим, что электромагнитные поля $E_{ОД1}(t)$ и $E_{ОД2}(t)$ с выходов оптического делителя дополнительно делятся поровну между нижними и верхними плечами (кристаллами) интерферометров Маха–Цендера благодаря оптическим делителям. Таким образом, амплитуды электромагнитных полей на входах в каждое плечо интерферометров $\sqrt{P_{опт}/8}$ в четыре раза меньше амплитуды оптического колебания ОКГ.

Первый верхний интерферометр Маха–Цендера ИМЦ1 содержит в каждом плече пары отдельных верхних и нижних управляющих электродов, на которые подаются напряжения $u_{ИМЦ11}(t) = u_{11}(t) + U_{см11}$ и $u_{ИМЦ12}(t) = u_{12}(t) + U_{см12}$, которые управляют электрическими полями в плечах интерферометра. Выбор рабочей точки модулятора достигается посредством приложения к электродам напряжений смещения $U_{см11}$ и $U_{см12}$, которые обеспечивают заданный сдвиг фаз между оптическими волнами в плечах интерферометра.

На выходе первого интерферометра Маха–Цендера происходит интерференция сдвинутых по фазе оптических волн. Выходная оптическая волна верхнего первого интерферометра ИМЦ1 с коэффициентами передачи мощности в каждом плече $K_{р.ИМЦ1}$ описывается формулой

$$E_{ИМЦ1}(t) = \sqrt{K_{р.ИМЦ1}} \cdot \frac{E_{ОКГ}(t)}{4} \cdot \left\{ \exp \left[j\pi \frac{u_{11}(t) + U_{см11}}{U_{\pi}} \right] + \exp \left[j\pi \frac{u_{12}(t) + U_{см12}}{U_{\pi}} \right] \right\},$$

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

Деление на 4 в формуле возникает из-за того, что амплитуда оптического излучения лазера делится поровну последовательно сначала в оптическом делителе, а затем между верхним и нижним плечами интерферометра.

Согласно представленной на рис. 1 схеме квадратурного оптического фазового модулятора на электроды кристаллов, определяющих плечи интерферометра, подаются напряжения одинаковой полярности, причём

$$u_{11}(t) = u_{12}(t) = u_1(t); \\ U_{см11} = U_{см12} = U_{см1}.$$

При этом на выходе верхнего интерферометра ИМЦ1 формируется оптическая волна

$$E_{ИМЦ1}(t) = \sqrt{K_{р.ИМЦ1}} \cdot \frac{E_{ОКГ}(t)}{2} \cdot \exp \left[j \frac{\pi}{U_{\pi}} u_1(t) + j \frac{\pi}{U_{\pi}} U_{см1} \right]. \quad (3)$$

На выходе первого интерферометра имеем созвездие сигналов бинарной фазовой манипуляции BPSK.

Аналогично, оптическая волна на выходе нижнего интерферометра Маха–Цендера ИМЦ2 с равными коэффициентами передачи мощности в каждом плече $K_{р.ИМЦ2}$ и при выполнении условий

$$u_{21}(t) = u_{22}(t) = u_2(t) \\ U_{см21} = U_{см22} = U_{см2}$$

описывается формулой

$$E_{ИМЦ2}(t) = \sqrt{K_{р.ИМЦ2}} \cdot \frac{E_{ОКГ}(t)}{2} \cdot \exp \left[j \frac{\pi}{U_{\pi}} u_2(t) + j \frac{\pi}{U_{\pi}} U_{см2} \right]. \quad (4)$$

Видно, что на выходе второго (нижнего) интерферометра также формируется созвездие сигналов бинарной фазовой манипуляции BPSK.

К выходу нижнего интерферометра ИМЦ2 подключается оптический фазовращатель (ОФВ) на $\pi/2$ с коэффициентом передачи мощности $K_{P,ОФВ}$. С учётом (4) на выходе оптического фазовращателя формируется оптическая волна

$$E_{ОФВ}(t) = j \cdot \sqrt{K_{P,ОФВ}K_{P,ИМЦ2}} \cdot \frac{E_{ОКГ}(t)}{2} \cdot \exp \left[j \frac{\pi}{U_{\pi}} u_2(t) + j \frac{\pi}{U_{\pi}} U_{см2} \right]. \quad (5)$$

Сравнение формул (4) и (5) показывает, что благодаря фазовому сдвигу на $\pi/2$ излучения, поступающие на входные порты оптического сумматора с коэффициентом передачи мощности $K_{P,ОС}$, будут повернуты относительно друг друга на $\pi/2$.

На выходе оптического сумматора (ОС), который является выходом квадратурного оптического фазового модулятора (ОФМ), оптическая волна описывается формулой

$$E_{ОФМ}(t) = \sqrt{K_{P,ОС}} \cdot [E_{ИМЦ1}(t) + E_{ОФВ}(t)].$$

На практике обеспечивается равенство коэффициентов передачи мощности в плечах интерферометров Маха-Цендера $K_{P,ИМЦ1} = K_{P,ИМЦ2} = K_{P,ИМЦ}$. Потери в оптических фазовращателях обладают очень низкими значениями (не превышают 1 дБ), что позволяет принять $K_{P,ОС} = 1$.

С учётом (3) и (5) при $K_{P,ОС} = 1$ и равенстве коэффициентов передачи мощности $K_{P,ИМЦ1} = K_{P,ИМЦ2} = K_{P,ИМЦ}$ находим

$$E_{ОФМ}(t) = \sqrt{K_{P,ОС}K_{P,ИМЦ}} \cdot \frac{E_{ОКГ}(t)}{2} \cdot \left\{ \exp \left[j \frac{\pi}{U_{\pi}} u_1(t) + j \frac{\pi}{U_{\pi}} U_{см1} \right] + j \cdot \exp \left[j \frac{\pi}{U_{\pi}} u_2(t) + j \frac{\pi}{U_{\pi}} U_{см2} \right] \right\}.$$

В качестве рабочей точки выбирается квадратурная точка передаточной функции мощности фазового модулятора на интерферометре Маха-Цендера, обеспечивающая контролируемый сдвиг фаз на $-\pi/2$ между оптическими волнами в плечах интерферометра посредством приложения к электродам напряжений смещения $U_{см1} = U_{см2} = -U_{\pi}/2$. Это обеспечивает работу фазового модулятора на линейном участке передаточной функции мощности, представляющей зависимость мощности излучения на выходе идеального, симметричного модулятора от разности фаз волн в плечах интерферометра [15]. Причём рост напряжения на кристалле интерферометра влечёт увеличение фазового сдвига оптического излучения.

При $U_{см1} = U_{см2} = -U_{\pi}/2$ колебания оптической волны на выходе квадратурного оптического фазового модулятора описываются формулой

$$E_{ОФМ}(t) = \sqrt{K_{P,ОС}K_{P,ИМЦ}} \cdot \frac{E_{вх}(t)}{2} \cdot \left\{ -j \cdot \exp \left[j \frac{\pi}{U_{\pi}} u_1(t) \right] + \exp \left[j \frac{\pi}{U_{\pi}} u_2(t) \right] \right\}. \quad (6)$$

Из формулы (6) видно, что генерируется сигнал с квадратурной фазовой манипуляцией QPSK.

Формирование ключевой последовательности посредством модуляции синфазной и квадратурной составляющих радиосигнала. Пусть передающая станция включает задающий электронный генератор гармонического колебания на поднесущей радиочастоте (РЧ) $f_{рч}$ с амплитудой $U_{рч}$, начальной фазой $\varphi_{рч}$ и мгновенной фазой $\theta_{рч} = 2\pi f_{рч}t + \varphi_{рч}$:

$$u_{рч}(t) = U_{рч} \cos(2\pi f_{рч}t + \varphi_{рч}) = U_{рч} \cos(\theta_{рч}). \quad (7)$$

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 $x_1(t_j)$ и $x_2(t_j)$, значения которых могут случайным образом принимать только два значения «-1» или «+1». Величина $\tau_{бит}$ определяет длительность двоичного бита.

Предлагаемый протокол формирования ключевой последовательности использует радиосигналы в двух базисах – в прямоугольном «+» ($k=1$) и диагональном «×» ($k=2$). Во время формирования j -го бита радиосигналы на поднесущей радиочастоте $f_{рч}$ задаются набором коэффициентов умножения амплитуд

$$I_{kj} = x_1(t_j), t \in [t_j; t_j + \tau_{\text{бит}}], k = 1; 2;$$

$$Q_{kj} = x_2(t_j), t \in [t_j; t_j + \tau_{\text{бит}}], k = 1; 2$$

соответственно для синфазных и квадратурных составляющих радиосигнала.

Из колебания (7) формируются два радиосигнала с синфазными $u_{\text{рч},I}(t)$ и квадратурными $u_{\text{рч},Q}(t)$ колебаниями, причём:

$$u_{\text{рч},I}(t) = U_{\text{рч}} \cos(\theta_{\text{рч}}),$$

$$u_{\text{рч},Q}(t) = U_{\text{рч}} \sin(\theta_{\text{рч}}).$$

Набор коэффициентов умножения амплитуд I_{kj} и Q_{kj} для каждого j -го бита задаётся электронным устройством кодирования. Компоненты I_{kj} и Q_{kj} представляют сигналы, модулирующие по амплитуде соответственно синфазную $u_{\text{рч},I}(t) = U_{\text{рч}} \cos(\theta_{\text{рч}})$ и квадратурную $u_{\text{рч},Q}(t) = U_{\text{рч}} \sin(\theta_{\text{рч}})$ составляющие поднесущей частоты.

Поскольку последующий анализ проводится применительно к формированию одного j -го бита, то, для упрощения записи, полагается $I_{kj} = I_k$ и $Q_{kj} = Q_k$. Тогда после кодирования для математического описания двух радиосигналов во время формирования j -го бита в интервале $t \in [t_j; t_j + \tau_{\text{бит}}]$ справедливы формулы

$$\begin{aligned} u_{k1}(t) &= I_k \cdot U_{\text{рч}} \cdot \cos(\theta_{\text{рч}}) - Q_k \cdot U_{\text{рч}} \cdot \sin(\theta_{\text{рч}}); \\ u_{k2}(t) &= I_k \cdot U_{\text{рч}} \cdot \cos(\theta_{\text{рч}}) + Q_k \cdot U_{\text{рч}} \cdot \sin(\theta_{\text{рч}}). \end{aligned} \quad (8)$$

Значения нулевого «0» и единичного «1» битов в двоичной системе счисления задаются в прямоугольном базисе генерации (индекс «+») соответственно наборами значений коэффициентов умножения амплитуд радиосигналов

$$\begin{aligned} "0_+" &\rightarrow \{I_1; Q_1\} = \{+1; +1\}; \\ "1_+" &\rightarrow \{I_1; Q_1\} = \{-1; -1\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Значения нулевого «0» и единичного «1» битов задаются в диагональном базисе генерации (индекс «×») другим набором значений коэффициентов умножения амплитуд радиосигналов

$$\begin{aligned} "0_×" &\rightarrow \{I_2; Q_2\} = \{+1; -1\}; \\ "1_×" &\rightarrow \{I_2; Q_2\} = \{-1; +1\}. \end{aligned} \quad (10)$$

Формулы (6), (9) и (10) 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. Причём формируемое оптическое излучение на выходе модулятора обеспечивает распределение ключа по протоколу с четырьмя состояниями фазы в прямоугольном и диагональном базисах (рис. 2).

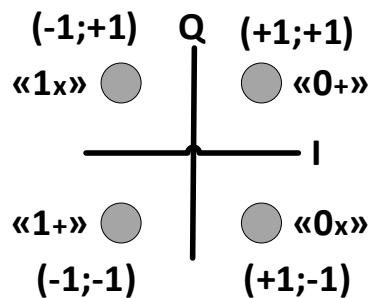


Рис. 2. Сигнальные созвездия фаз на выходе квадратурного модулятора

Кодирование синфазной и квадратурной составляющих. Остановимся на процессе формирования на передающей станции j -го бита в ключевой последовательности во временном интервале $t \in [t_j; t_j + \tau_{\text{бит}}]$. Для этого передающая станция должна включать модуль управления кодированием синфазной и квадратурной составляющих радиосигнала на поднесущей частоте. Возможный вариант модуля управления представлен на рис. 3.

Формирование j -го бита в ключевой последовательности в интервале $t \in [t_j; t_j + \tau_{\text{бит}}]$ предусматривает генерацию двумя генераторами случайных чисел (ГСЧ) в момент $t = t_j$ двух чисел $x_1(t_j)$ и $x_2(t_j)$, значения которых случайным образом принимают одно из двух значений «-1» или «+1».

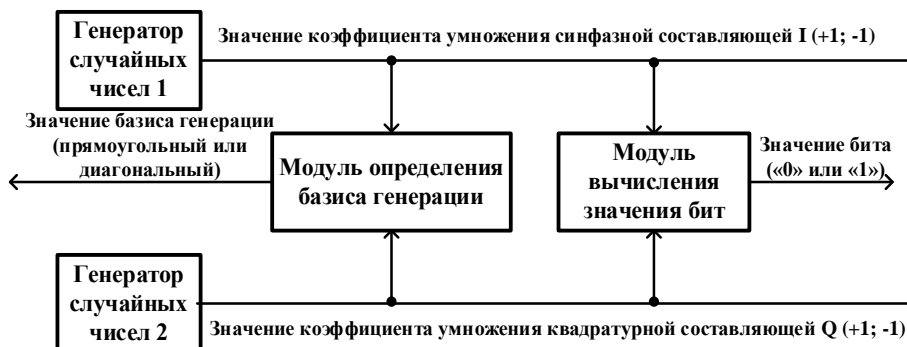


Рис. 3. Структурная схема электронного устройства кодирования синфазной и квадратурной составляющих радиосигнала на поднесущей частоте

Модуль определения базиса генерации на основании формул (9) и (10) вычисляет, какой базис генерации использован для кодирования состояния фазы радиосигнала. Эта информация необходима для получения просеянной ключевой последовательности из сырой последовательности.

Формулы (9) и (10) позволяют модулю вычисления значения бит определить значение (логического «0» или логической «1») бита генерируемого передающей станцией бита. Информация заносится в сырую ключевую последовательность передающей станции.

Структура передающей станции когерентной оптической системы распределения ключа символами. На рис. 4 приведена структурная схема передающей станции когерентной системы с амплитудной модуляцией оптического излучения радиосигналом. Для распределения ключа символами используется квадратурная фазовая манипуляция радиосигнала на поднесущей частоте.

При квадратурной фазовой манипуляции необходимы два колебания $u_{рч, I}(t)$ и $u_{рч, Q}(t)$ с одинаковой поднесущей радиочастотой $f_{рч}$, но сдвинутые по фазе на 90° .

Это достигается использованием электронного генератора синусоидальных сигналов поднесущей радиочастоты. На его выходе генерируется гармоническое колебание

$$u_{рч, I} = U_{рч} \cos(\theta_{рч}) \quad (11)$$

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

На выходе электронного фазовращателя (ЭФВ) с коэффициентом передачи $K_{ЭФВ} = 1$ формируется гармоническое колебание

$$u_{рч, Q}(t) = U_{рч} \sin(\theta_{рч}). \quad (12)$$

На выходах первого и второго электронных устройств перемножения (ЭУП) с равными коэффициентами передачи напряжения $K_{ЭУП}$ будут действовать радиосигналы с одинаковыми амплитудами $K_{ЭУП} U_{рч}$:

$$\begin{cases} u_{ЭУП1}(t) = K_{ЭУП} I_k u_{рч, I} = K_{ЭУП} U_{рч} I_k \cos(\theta_{рч}); \\ u_{ЭУП2}(t) = K_{ЭУП} Q_k u_{рч, Q} = K_{ЭУП} U_{рч} Q_k \sin(\theta_{рч}). \end{cases} \quad (13)$$

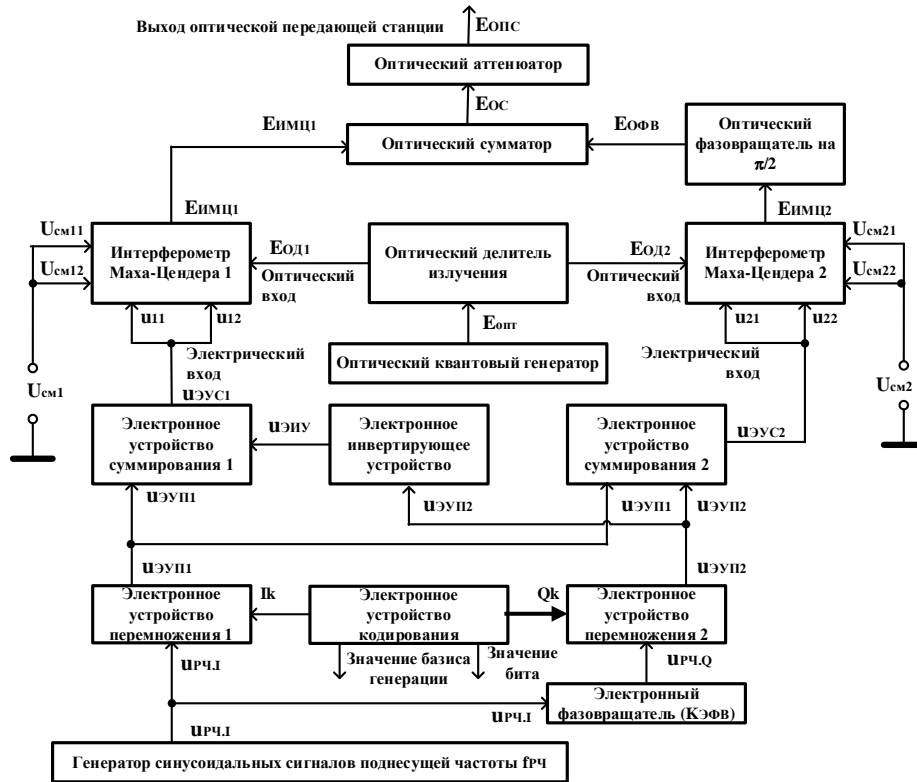


Рис. 4. Структурная схема передающей станции когерентной системы распределения ключа символами с амплитудной модуляцией оптического излучения радиосигналом

Отметим, что случайные значения коэффициентов I_k и Q_k , генерируемых электронным устройством кодирования, однозначно определяют базис генерации и значение бита согласно условий (9) и (10).

На выходе электронного инвертирующего устройства (ЭИУ) с коэффициентом передачи напряжения $K_{ЭИУ}$ действует радиосигнал $u_{ЭИУ}(t) = -u_{ЭУП2}(t) = -K_{ЭУП}Q_k u_{рч, Q}$ с амплитудой $K_{ЭИУ}K_{ЭУП}U_{рч}$:

$$u_{ЭИУ}(t) = -K_{ЭИУ}K_{ЭУП}U_{рч}Q_k \sin(\theta_{рч}). \quad (14)$$

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

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

Поскольку электронное инвертирующее устройство легко может быть реализовано с коэффициентом передачи напряжения $K_{ЭИУ} \cong 1$, то

$$u_{ЭУС1}(t) = K_{ЭУС1}K_{ЭУП}U_{рч}[I_k \cos(\theta_{рч}) - Q_k \sin(\theta_{рч})]. \quad (15)$$

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

$$u_{ЭУС2}(t) = K_{ЭУС2}[u_{ЭУП1}(t) + u_{ЭУП2}(t)].$$

С учётом (13) находим

$$u_{ЭУС2}(t) = K_{ЭУС2}K_{ЭУП}U_{рч}[I_k \cos(\theta_{рч}) + Q_k \sin(\theta_{рч})]. \quad (16)$$

Сигналы с выходов аналоговых электронных устройств суммирования (ЭУС1) $u_{ЭУС1}(t)$ и (ЭУС2) $u_{ЭУС2}(t)$ с равными коэффициентами передачи напряжения $K_{ЭУС1} = K_{ЭУС2} = K_{ЭУС}$ подаются на электрические входы соответственно первого и второ-

го интерферометров Маха-Цендера с равными коэффициентами передачи мощности в каждом плече интерферометра $K_{P,ИМЦ1} = K_{P,ИМЦ2} = K_{P,ИМЦ}$. На оптические входы интерферометров подаётся непрерывное лазерное излучение с постоянной мощностью $P_{\text{опт}}(t) = P_{\text{опт}}$. Напряжённость электрического поля лазерного источника определяется формулой (1).

Оптический делитель излучения с равными коэффициентами деления обеспечивает подачу в каждое плечо интерферометра Маха-Цендера излучений с одинаковой напряжённостью (2).

Первый интерферометр Маха-Цендера имеет отдельные верхние и нижние электроды, на которые подаются напряжения $u_{ИМЦ11}(t)$ и $u_{ИМЦ12}(t)$, которые управляют электрическими полями в плечах интерферометра, причём

$$\begin{aligned} u_{ИМЦ11}(t) &= u_{11}(t) + U_{см11} = u_{ЭУС1}(t) - U_{\pi}/2, \\ u_{ИМЦ12}(t) &= u_{12}(t) + U_{см12} = u_{ЭУС1}(t) - U_{\pi}/2. \end{aligned}$$

С учётом (15)

$$u_{ИМЦ11}(t) = u_{ИМЦ12}(t) = K_{ЭУС}K_{ЭУП}U_{РЧ}[I_k \cos(\theta_{РЧ}) - Q_k \sin(\theta_{РЧ})] - U_{\pi}/2.$$

Выходная оптическая волна первого интерферометра Маха-Цендера с коэффициентом передачи мощности $K_{P,ИМЦ}$ описывается формулой

$$E_{ИМЦ1}(t) = -j \cdot \sqrt{K_{P,ИМЦ}} \cdot \frac{E_{\text{ОКГ}}(t)}{2} \cdot \rightarrow \leftarrow \cdot \exp \left[j\pi K_{ЭУС1} K_{ЭУП} \frac{U_{РЧ}}{U_{\pi}} [I_k \cos(\theta_{RF}) - Q_k \sin(\theta_{RF})] \right]. \quad (17)$$

Второй интерферометр Маха-Цендера имеет отдельные верхние и нижние электроды, на которые подаются напряжения $u_{ИМЦ21}(t)$ и $u_{ИМЦ22}(t)$, причём

$$\begin{aligned} u_{ИМЦ21}(t) &= u_{21}(t) + U_{см21} = u_{ЭУС2}(t) - U_{\pi}/2, \\ u_{ИМЦ22}(t) &= u_{22}(t) + U_{см22} = u_{ЭУС2}(t) - U_{\pi}/2. \end{aligned}$$

С учётом (16) находим

$$u_{ИМЦ21}(t) = u_{ИМЦ22}(t) = K_{ЭУС}K_{ЭУП}U_{РЧ}[I_k \cos(\theta_{РЧ}) + Q_k \sin(\theta_{РЧ})] - U_{\pi}/2.$$

Выходная оптическая волна на выходе второго интерферометра Маха-Цендера с коэффициентом передачи мощности $K_{P,ИМЦ}$ описывается формулой

$$E_{ИМЦ2}(t) = -j \cdot \sqrt{K_{P,ИМЦ}} \cdot \frac{E_{\text{ОКГ}}(t)}{2} \cdot \rightarrow \leftarrow \cdot \exp \left[j\pi K_{ЭУС} K_{ЭУП} \frac{U_{РЧ}}{U_{\pi}} [I_k \cos(\theta_{РЧ}) + Q_k \sin(\theta_{РЧ})] \right]. \quad (18)$$

После оптического фазовращателя (ОФВ) на $\pi/2$ с коэффициентом передачи мощности $K_{P,ОФВ}$ будет сформировано излучение с напряжённостью

$$E_{\text{ОФВ}}(t) = \sqrt{K_{P,ОФВ}K_{P,ИМЦ}} \cdot \frac{E_{\text{ОКГ}}(t)}{2} \cdot \rightarrow \leftarrow \cdot \exp \left[j\pi K_{РЧ} \frac{U_{РЧ}}{U_{\pi}} [I_k \cos(\theta_{РЧ}) + Q_k \sin(\theta_{РЧ})] \right], \quad (19)$$

где $K_{РЧ} = K_{ЭУС}K_{ЭУП}$ – результирующий коэффициент передачи напряжения электронных устройств передающей аппаратуры.

На выходе оптического сумматора (ОС) с коэффициентом передачи мощности $K_{P,ОС}$ действует оптическое поле с напряжённостью

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

Для распределения ключа используется оптический аттенюатор (ОА) с коэффициентом передачи мощности $K_{P,ОА}$, который обеспечивает на выходе оптической передающей станции оптическое поле с напряжённостью

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

С учётом (17) и (19) находим

$$E_{\text{ОПС}}(t) = -j \cdot \sqrt{K_{P,OA} K_{P,OC} K_{P,ИМЦ}} \cdot \frac{E_{\text{ОКГ}}(t)}{2} \cdot \exp \left[j\pi K_{PЧ} \frac{U_{RF}}{U_{\pi}} [I_k \cos(\theta_{RF}) - Q_k \sin(\theta_{RF})] \right] + \rightarrow \\ \leftarrow + \sqrt{K_{P,OA} K_{P,OC} K_{P,ИМЦ} K_{P,OFB}} \cdot \frac{E_{\text{ОКГ}}(t)}{2} \cdot \exp \left[j\pi K_{PЧ} \frac{U_{PЧ}}{U_{\pi}} [I_k \cos(\theta_{PЧ}) + Q_k \sin(\theta_{PЧ})] \right].$$

Для упрощения записи формул введём обозначения для коэффициента фазовой модуляции радиосигнала

$$\alpha_{PЧ} = \pi K_{PЧ} U_{PЧ} / U_{\pi}. \quad (20)$$

и для параметров модуляции

$$\alpha_1 = \alpha_{PЧ} [I_k \cos(\theta_{PЧ}) - Q_k \sin(\theta_{PЧ})], \quad (21) \\ \alpha_2 = \alpha_{PЧ} [I_k \cos(\theta_{PЧ}) + Q_k \sin(\theta_{PЧ})].$$

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 $K_{P,OFB} = 1$. Тогда

$$E_{\text{ОПС}}(t) = \frac{\sqrt{K_{P,OA} K_{P,OC} K_{P,ИМЦ}}}{2} \cdot E_{\text{ОКГ}}(t) \cdot \{-j \cdot \exp(j\alpha_1) + \exp(j\alpha_2)\}. \quad (22)$$

Выводы. Представлена структура оптического квадратурного модулятора на двух параллельно включённых интерферометрах Маха-Цендера с постоянными напряжениями смещения на всех плечах управляющих электродов для формирования оптического излучения с модуляцией фазоманипулированным радиосигналом на поднесущей частоте. Применение технологии когерентной оптической связи позволит распространять ключи с высокой скоростью на большие расстояния. Применение квадратурной фазовой манипуляции (QPSK) обеспечивает помехоустойчивость к внешним воздействиям при высокой скорости передачи данных. Преимущества каждого из этих подходов реализуется в предлагаемой когерентной оптической системе распределения ключа. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку структуры приёмной станции и организационных мер по обеспечению информационной безопасности формируемого ключа для симметричного шифрования потока данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Былина М.С., Глаголев С.Ф., Дюбов А.С. Сравнительный анализ методов энергетического и когерентного приёма цифровых информационных оптических сигналов. Ч. 1. Энергетический приём // Тр. учебных заведений связи. – 2017. – Т. 3, № 3. – С. 12-20.
2. Былина М.С., Глаголев С.Ф., Дюбов А.С. Сравнительный анализ методов энергетического и когерентного приёма цифровых информационных оптических сигналов. Ч. 2. Когерентный приём // Тр. учебных заведений связи. – 2017. – Т. 3, № 4. – С. 21-28.
3. 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. – С. 209-220. – DOI: 10.18522/2311-3103-2022-5-209-220.
4. 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. – С. 174-191. – DOI: 10.18522/2311-3103-2023-4-174-191.
5. 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.
6. Величко М.А., Наний О.Е., Сусьян А.А. Новые форматы модуляции в оптических системах связи // Lightwave Russian Edition. – 2005. – № 4. – С. 21-30.
7. Топчий П.Н., Елишев В.В., Румянцев Д.В. Применение квадратурной амплитудной манипуляции для повышения скорости передачи цифровой информации // 79-я научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова. – 2024. – С. 89-91.

8. *Феер К.* Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. *Wireless Digital Communications: Modulation and Spread Spectrum Applications*. – М.: Радио и связь, 2000. – 552 с. – ISBN 5-256-01444-7.
9. *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*. – 2002. – Vol. 20, No. 3. – P. 417-427.
10. *Махмуд Х.А.М., Румянцев К.Е.* Спектральный анализ системы передачи с мультиплексированием оптических поднесущих, использующей формат модуляции QPSK // *Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: Матер. VII Всероссийской научно-технической конференции*. – 2021. – С. 77-81.
11. *Махмуд Х.А.М., Румянцев К.Е.* Моделирование мультиплексирования поднесущих Найквиста для оптической системы передачи // II Всероссийская научно-практическая конференция «Digital Era». – 2022. – С. 77-83.
12. *Hui R., Zhu B., Huang R., Allen C., Demarest K., Richards D.* 10-Gb/s SCM fiber system using optical SSB modulation // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2001. – Vol. 13, No. 8. – P. 896-898.
13. *Афанасьев В.М.* Электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха-Цендера // *Прикладная фотоника*. – 2016. – Т. 3, № 4. – С. 341-344.
14. *Древко 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 конференции молодых учёных*. – Саратов, 2010. – С. 18-19.
15. *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.
16. *Пономарев Р.С., Вобликов Е.Д.* Некоторые вопросы работы интегрально-оптических модуляторов интенсивности // *Вестник Пермского ун-та. Сер.: Физика*. – 2011. – Вып. 2 (17). – С. 65-68.
17. *Кузьминов Ю.С.* Электрооптический и нелинейно-оптический кристалл ниобата лития. – М.: Наука, 1987. – 264 с.
18. *Зюрюкин Ю.А., Павлова М.В., Древко Д.Р.* Волновые уравнения для описания эффекта Поккельса в кристаллах и их анализ на примере кристалла ниобата лития // *Известие вузов. Прикладная нелинейная динамика*. – 2010. – Т. 8, № 5. – С. 125-137.
19. *Величко М.А., Наний О.Е., Сусьян А.А.* Новые форматы модуляции в оптических системах связи // *Lightwave Russian Edition*. – 2005. – № 4. – С. 21-30.
20. *Афанасьев В.М.* Электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха-Цендера // *Прикладная фотоника*. – 2016. – Т. 3, № 4. – С. 341-369.
21. *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)*. – IEEE, 2019. – P. 1-5.
22. *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. – С. 209-220. – DOI: 10.18522/2311-3103-2022-5-209-220.

REFERENCES

1. *Bylina M.S., Glagolev S.F., Dyubov A.S.* Sravnitel'nyy analiz metodov energeticheskogo i kogerentnogo priema tsifrovyykh informatsionnykh opticheskikh signalov. Ch. 1. Energeticheskiy priem [Comparative analysis of methods of energy and coherent reception of digital information optical signals. Part 1. Energy reception], *Tr. uchebnykh zavedeniy svyazi* [Transactions of educational institutions of communication], 2017, Vol. 3, No. 3, pp. 12-20.
2. *Bylina M.S., Glagolev S.F., Dyubov A.S.* Sravnitel'nyy analiz metodov energeticheskogo i kogerentnogo priema tsifrovyykh informatsionnykh opticheskikh signalov. Ch. 2. Kogerentnyy priem [Comparative analysis of methods of energy and coherent reception of digital information optical signals. Part 2. Coherent reception], *Tr. uchebnykh zavedeniy svyazi* [Transactions of educational institutions of communication], 2017, Vol. 3, No. 4, pp. 21-28.
3. *Makhmud Kh.A.M., Rumyantsev K.E.* Formirovanie odnopolosnoy kvadraturnoy fazovoy manipulyatsii radiosignalov na podnesushchikh chastotakh v kogerentnoy opticheskoy sisteme kommunikatsii [Formation of single-sideband quadrature phase-shift keying of radio signals at subcarrier frequencies in a coherent optical communication system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 5, pp. 209-220. DOI: 10.18522/2311-3103-2022-5-209-220.

4. *Makhmud Kh.A.M., Rumyantsev K.E., Al'-Begat A.Kh.Sh.* Analiz voskhodyashchego lazernogo kanala sputnikovoy kommunikatsii v usloviyakh atmosfery turbulentsii [Analysis of the upward laser channel of satellite communication under atmospheric turbulence], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 4, pp. 174-191. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-4-174-191.
5. *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.
6. *Velichko M.A., Naniy O.E., Sus'yan A.A.* Novye formaty modulyatsii v opticheskikh sistemakh svyazi [New modulation formats in optical communication systems], *Lightwave Russian Edition*, 2005, No. 4, pp. 21-30.
7. *Topchiy P.N., Elishev V.V., Rumyantsev D.V.* Primeneniye kvadraturnoy amplitudnoy manipulyatsii dlya povysheniya skorosti peredachi tsifrovoy informatsii [Application of quadrature amplitude shift keying to increase the digital information transmission rate], *79-ya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya Sankt-Peterburgskogo NTO RES im. A.S. Popova* [79th scientific and technical conference of the St. Petersburg Scientific and Technical Association of Radio Electronic Systems named after A.S. Popov], 2024, pp. 89-91.
8. *Feer K.* Besprovodnaya tsifrovaya svyaz'. Metody modulyatsii i rasshireniya spektra. Wireless Digital Communications: Modulation and Spread Spectrum Applications [Wireless Digital Communications: Modulation and Spread Spectrum Applications]. Moscow: Radio i svyaz', 2000, 552 p. ISBN 5-256-01444-7.
9. *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*, 2002, Vol. 20, No. 3, pp. 417-427.
10. *Makhmud Kh.A.M., Rumyantsev K.E.* Spektral'nyy analiz sistemy peredachi s mul'tipleksirovaniem opticheskikh podnesushchikh, ispol'zuyushchey format modulyatsii QPSK [Spectral analysis of a transmission system with multiplexing of optical subcarriers using the QPSK modulation format], *Fundamental'nye i prikladnye aspekty komp'yuternykh tekhnologiy i informatsionnoy bezopasnosti: Mater. VII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Fundamental and applied aspects of computer technology and information security: Proceedings of the VII All-Russian scientific and technical conference], 2021, pp. 77-81.
11. *Makhmud Kh.A.M., Rumyantsev K.E.* Modelirovaniye mul'tipleksirovaniya podnesushchikh Naykvista dlya opticheskoy sistemy peredachi [Modeling of Nyquist subcarrier multiplexing for an optical transmission system], *II Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Digital Era»* [II All-Russian scientific and practical conference "Digital Era"], 2022, pp. 77-83.
12. *Hui R., Zhu B., Huang R., Allen C., Demarest K., Richards D.* 10-Gb/s SCM fiber system using optical SSB modulation, *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, Vol. 13, No. 8, pp. 896-898.
13. *Afnas'ev V.M.* Elektroopticheskiy modulyator po skheme interferometra Makha-Tsendera [Electro-optical modulator based on the Mach-Zehnder interferometer scheme], *Prikladnaya fotonika* [Applied Photonics], 2016, Vol. 3, No. 4, pp. 341-344.
14. *Drevko D.R., Zyuryukin Yu.A., Ushakov N.M.* Modifikatsii elektroopticheskogo modulyatora Makha-Tsendera dlya upravleniya lazernym izlucheniem povyshennoy moshchnosti [Modifications of the Mach-Zehnder electro-optical modulator for controlling high-power laser radiation], *Nanoelektronika, nanofotonika i nelineynaya fizika: Mater. V konferentsii molodykh uchenykh* [Nanoelectronics, nanophotonics and nonlinear physics: Proceedings of the V conference of young scientists]. Saratov, 2010, pp. 18-19.
15. *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 an asymmetric waveguide topology], *Tr. MAI* [Trudy MAI], 2011, No. 46.
16. *Ponomarev R.S., Voblikov E.D.* Nekotorye voprosy raboty integral'no-opticheskikh modulyatorov intensivnosti [Some aspects of operation of integrated-optical intensity modulators], *Vestnik Permskogo un-ta. Ser.: Fizika* [Bulletin of Perm University. Series: Physics], 2011, Issue 2 (17), pp. 65-68.
17. *Kuz'minov Yu.S.* Elektroopticheskiy i nelineyno-opticheskiy kristall niobata litiya [Electro-optical and nonlinear-optical crystal of lithium niobate]. Moscow: Nauka, 1987, 264 p.
18. *Zyuryukin Yu.A., Pavlova M.V., Drevko D.R.* Volnovye uravneniya dlya opisaniya efekta Pokkel'sa v kristallakh i ikh analiz na primere kristalla niobata litiya [Wave equations for describing the Pockels effect in crystals and their analysis using the example of a lithium niobate crystal], *Izvestie vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika* [News of universities. Applied nonlinear dynamics], 2010, Vol. 8, No. 5, pp. 125-137.
19. *Velichko M.A., Naniy O.E., Sus'yan A.A.* Novye formaty modulyatsii v opticheskikh sistemakh svyazi [New modulation formats in optical communication systems], *Lightwave Russian Edition*, 2005, No. 4, pp. 21-30.

20. Afanas'ev V.M. Elektroopticheskiy modulyator po skheme interferometra Makha–Tsendera [Electro-optical modulator based on the Mach-Zehnder interferometer scheme], *Prikladnaya fotonika* [Applied Photonics], 2016, Vol. 3, No. 4, pp. 341-369.
21. Mahmood H.A., Rummyantsev 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)*. IEEE, 2019, pp. 1-5.
22. Makhmud Kh.A.M., Rummyantsev K.E. Formirovanie odnopolosnoy kvadrurnoy fazovoy manipulyatsii radiosignalov na podnesushchikh chastotakh v kogerentnoy opticheskoy sisteme kommunikatsii [Formation of single-sideband quadrature phase shift keying of radio signals at subcarrier frequencies in a coherent optical communication system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 5, pp. 209-220. DOI: 10.18522/2311-3103-2022-5-209-220.

Румянцев Константин Евгеньевич – Южный федеральный университет; e-mail: rke2004@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79281827209. кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Цыцорин Дмитрий Александрович – Южный федеральный университет; e-mail: cicorinda@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79381543393; военный учебный центр; начальник цикла – старший преподаватель.

Rummyantsev Konstantin Yevgenievich – Southern Federal University; e-mail: rke2004@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79281827209; the Department of Information Security of Telecommunication Systems; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

Tsytsorin Dmitry Alexandrovich – Southern Federal University; e-mail: cicorinda@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79381543393; Military Training Center; head of the cycle – senior teacher.

УДК 681.5

DOI 10.18522/2311-3103-2026-1-77-86

А.Ю. Будко, Т.А. Гайда, З.А. Понимаш

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ БОРТОВОЙ КАМЕРЫ ПУТЕМ СОПОСТАВЛЕНИЯ АЭРОФОТОСНИМКОВ И ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Описан метод оценки пространственного положения бортовой камеры летательного аппарата, заключающийся в сопоставлении аэрофотоснимков и геопривязанных данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗ) путем обнаружения нейросетевым детектором устойчивых в пространстве и времени реперных точек в обоих наборах данных и дальнейшим решением известной задачи Perspective-n-Point (PnP) для оценки матриц поворота и перемещения, минимизирующих ошибку перепроецирования, исходя из соответствий точек 3D мирового пространства и 2D точек их проекций на матрицу бортовой камеры, что может быть использовано для решения актуальной задачи локализации летательных аппаратов в условиях отсутствия сигналов глобальной навигационной спутниковой системы. В качестве устойчивых реперных точек, хорошо выделяемых на данных ДДЗ и аэрофотоснимках, в работе выбраны перекрестки дорог, альтернативным выбором могут являться другие локальные семантические паттерны изображений, характерные для конкретной местности. Поскольку прямое сопоставление снимков ДДЗ и бортовых снимков затруднено вследствие существенной разницы условий съемки, предлагается применение устойчивых детекторов реперных точек на основе алгоритмов искусственных нейронных сетей (ИНС). Для обучения устойчивого детектора создан смешанный датасет на основе спутниковых снимков и данных бортовой съемки. При разметке данных смешанного датасета использована функция нормализованного к единице 3D гауссиана с вершиной в центре перекрестка, график которой проецируется на 2D маску обучающего набора. Параметры функции гауссиана рассчитываются на основе радиуса окружности, описывающей перекресток. Использование функции нормализованного гауссиана с вершиной в геометрическом центре проекции перекрестка позволяет обучить сеть предсказывать вероятность принадлежности каждого пикселя изображения к перекрестку, с максимумом в центре перекрестка, что увеличивает точность позиционирования за счет более точной геопривязки реперной точки мирового 3D набора. В качестве детектора перекрестков в работе обучена ИНС архитектуры типа U-Net, в качестве метрики качества