

Анализ радиофотонных схем обработки радиолокационных сигналов

© С.А. Покотило

Федеральное государственное автономное учреждение «Военный инновационный
технополис «ЭРА»

Рассмотрены схемы последовательного, параллельного и смешанного соединения электрооптических модуляторов, используемых в радиофотонных устройствах, с точки зрения оценки погрешности измерений разности фаз радиолокационных сигналов и пропускания оптического излучения. Получены математические выражения коэффициента пропускания для каждой из используемых схем и выходного сигнала радиофотонной схемы со смешанным соединением электрооптических модуляторов, несущего информацию о разности фаз радиолокационных сигналов соседних приемных элементов фазированной антенной решетки.

Ключевые слова: электрооптический модулятор, последовательное соединение, параллельное соединение, смешанное соединение, коэффициент пропускания, амплитуда входного сигнала, разность фаз.

Введение. В системах радиолокации и радиосвязи получили широкое распространение радиофотонные приемные устройства, являющиеся входными по отношению к приемно-усилительному каналу, с выхода которого информационный сигнал поступает в аналого-цифровой преобразователь для дальнейшей обработки в цифровом процессоре. Основу радиофотонных приемных устройств составляют лазер и электрооптический модулятор (ЭОМ), на модулирующий вход которого подается, например, сигнал с выхода приемного элемента фазированной антенной решетки (ФАР) радиолокационной станции [1, 2]. В опубликованных работах [3–5] и запатентованных схемных решениях [6, 7] теоретически исследованы и аппаратно реализованы радиофотонные устройства обработки радиолокационных (РЛ) сигналов, в основе которых лежат схемы с параллельным и последовательным соединением ЭОМ. Определенный интерес представляет и радиофотонная схема со смешанным соединением ЭОМ.

Цель данной работы — оценить энергетические потери различных схем включения ЭОМ путем расчета их коэффициентов пропускания, погрешности измерений разности фаз принимаемых РЛ-сигналов и исследовать схему со смешанным соединением ЭОМ с определением ее выходного сигнала как функции разности фаз принимаемых ФАР РЛ-сигналов.

ЭОМ соединены параллельно. Поток излучения $\Phi_{\text{вых}}$ на выходе схемы параллельного соединения n ЭОМ (рис. 1) будет

$$\Phi_{\text{вых}} = \frac{\Phi_{\text{вх}}}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i, \quad (1)$$

где $\Phi_{\text{вх}}$ — поток излучения на входе схемы; τ_i — коэффициент пропускания ЭОМ на длине волны излучения лазера, $i = 1, 2, \dots, n$.

Из выражения (1) найдем коэффициент пропускания $\tau_{\text{пар}}$ схемы параллельного соединения n ЭОМ:

$$\tau_{\text{пар}} = \Phi_{\text{вых}} / \Phi_{\text{вх}} = n^{-1} \sum_{i=1}^n \tau_i. \quad (2)$$

Таким образом, при $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_n$ $\tau_{\text{пар}} = \tau_1$.

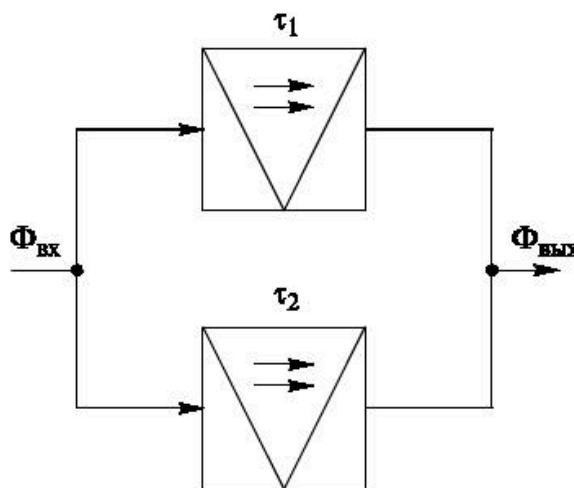


Рис. 1. Схема приема сигналов с параллельным соединением двух электрооптических модуляторов

ЭОМ соединены последовательно. При последовательном соединении n ЭОМ (рис. 2) их коэффициенты пропускания перемножаются, поэтому поток излучения $\Phi_{\text{вых}}$ на выходе схемы последовательного соединения n ЭОМ будет

$$\Phi_{\text{вых}} = \Phi_{\text{вх}} \prod_{i=1}^m \tau_i, \quad (3)$$

где $\Phi_{\text{вх}}$ — поток излучения на входе схемы; τ_i — коэффициент пропускания ЭОМ на длине волны излучения лазера; коэффициент пропускания m ЭОМ, соединенных последовательно, равен

$$\tau_{\text{посл}} = \Phi_{\text{вых}} / \Phi_{\text{вх}} = \prod_{i=1}^m \tau_i, \quad (4)$$

где $i = 1, 2, \dots, m$.

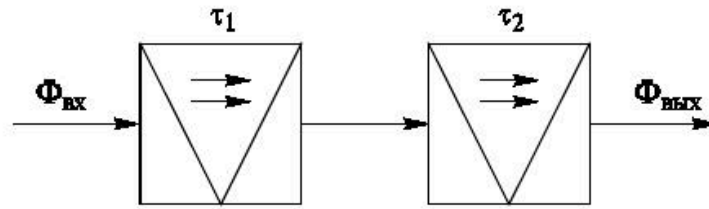


Рис. 2. Схема приема сигналов с последовательным соединением двух электрооптических модуляторов

На рис. 3 представлены графики зависимости коэффициента пропускания $\tau_{\text{ЭОМ}}(n)$ от количества n последовательно соединенных ЭОМ для разных значений коэффициента пропускания одного ЭОМ $\tau_{\text{ЭОМ}}$: 0,9; 0,8; 0,6. Из графиков следует, что даже при самом большом пропускании одного ЭОМ (0,9) применение более пяти последовательно соединенных ЭОМ нецелесообразно по причине потери порядка половины мощности входного потока излучения.

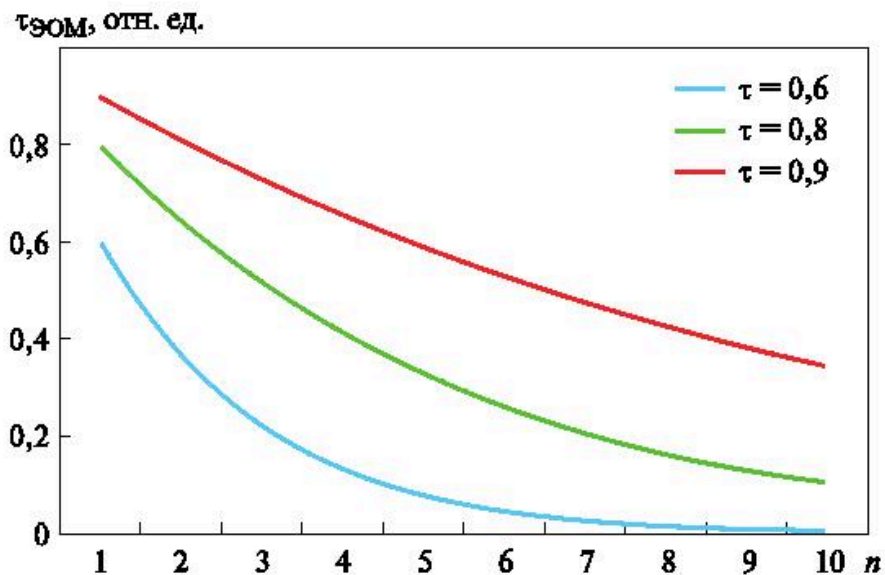


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента пропускания $\tau_{\text{ЭОМ}}(n)$ от количества n последовательно соединенных ЭОМ для разных значений коэффициента τ пропускания одного ЭОМ

Смешанное соединение ЭОМ. Смешанное соединение ЭОМ в общем виде показано на рис. 4. При смешанном соединении ЭОМ, когда n ЭОМ соединены параллельно, а m ЭОМ соединены последовательно, используя выражения (1), (3), получим формулу расчета выходного потока излучения для этой схемы:

$$\Phi_{\text{вых}} = \Phi_{\text{вх}} \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n} \prod_{j=1}^m \tau_j. \quad (5)$$

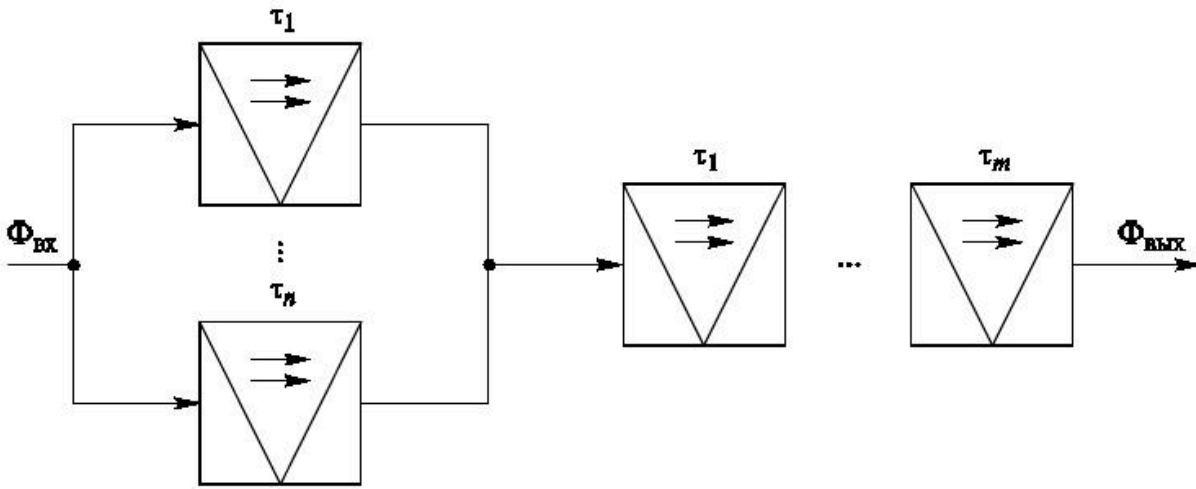


Рис. 4. Схема приема сигналов со смешанным соединением электрооптических модуляторов

Из выражения (5) найдем коэффициент пропускания $\tau_{\text{см}}$ схемы смешанного соединения ЭОМ:

$$\tau_{\text{см}} = \tau_1 \tau_1^m = \tau^{m+1}. \quad (6)$$

В случае равенства коэффициентов пропускания последовательно соединенных ЭОМ $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_m$ формула (6) примет следующий вид:

$$\tau_{\text{см}} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n} \tau_1^m,$$

а при равенстве коэффициентов пропускания ЭОМ, соединенных параллельно: $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_n \tau_{\text{пар}} = \tau_1$, выражение (6) примет следующий вид:

$$\tau_{\text{см}} = \tau_1 \tau_1^m = \tau^{m+1}. \quad (7)$$

Для схем, изображенных на рис. 1, 2 и 4, коэффициенты пропускания соответственно равны: $\tau_{\text{пар}} = \tau$; $\tau_{\text{посл}} = \tau^2$; $\tau_{\text{см}} = \tau^2$.

Расчет выходного сигнала радиопотонной схемы со смешанным соединением ЭОМ. Расчет выходных сигналов радиопотонных схем с последовательным и параллельным соединением ЭОМ приведен в работах [2–5]. Здесь приведем расчет выходного оптического сигнала радиопотонной схемы обработки радиолокационных сигналов со смешанным соединением ЭОМ, формируемого на выходе радиопотонного устройства обработки сигналов (РфУОС), модулированного широкополосными радиосигналами, поступающими с приемных элементов ФАР для фотон-электронного преобразования, цифровой обработки и последующей передачи с помощью волоконно-оптических или атмосферно-оптических систем связи, в схеме со смешанным соединением ЭОМ, как показано на рис. 5, а именно: два ЭОМ соединены последовательно, а третий ЭОМ включен параллельно последовательному соединению первых двух.

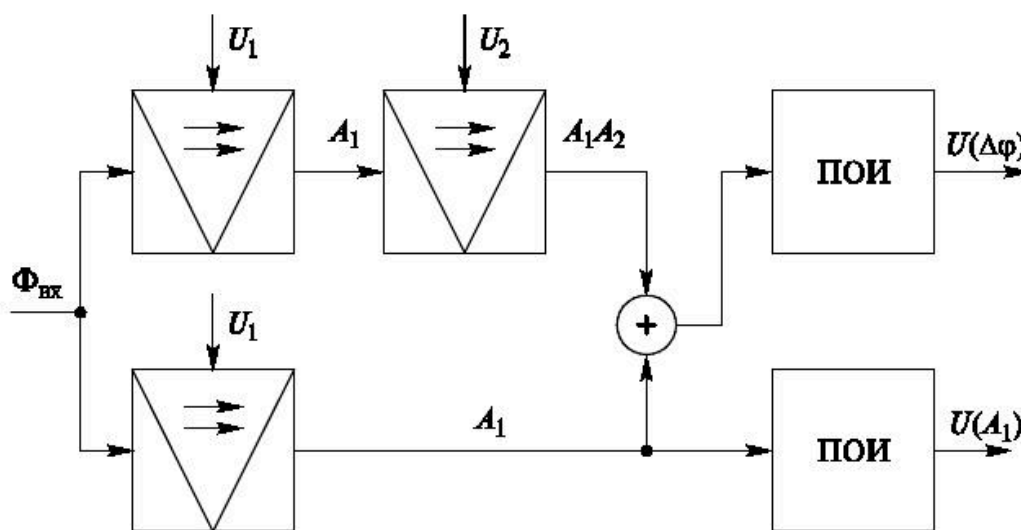


Рис. 5. К расчету выходного сигнала радиопотонной схемы со смешанным соединением ЭОМ:

U_1, U_2 — модулирующие сигналы

Исходные выражения сигналов $A_1(t)$, $A_2(t)$, $A_3(t)$ (при условии $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = \varphi$) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} A_1(t) &= \sin \omega t; \\ A_2(t) &= \sin(\omega t) \sin(\omega t + \varphi); \\ A_3(t) &= A_1(t) + A_1(t)A_2(t). \end{aligned} \tag{8}$$

Требуется найти выражение $A'_3(t)$ вида:

$$A'_3(t) = \int_{\omega t_0}^{\omega t_k} \left\{ [A_1(t) + A_1(t) A_2(t)]^2 + C^{0,5} \right\} d(\omega t). \quad (9)$$

Принимаем, что в выражениях (8) $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, а при $\varphi_1 = 0$ $\varphi_2 = \varphi$ и $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \varphi$. Поскольку действие, выражаемое формулой (9), осуществляется с оптическими сигналами, имеющими постоянную составляющую, она введена в подынтегральное выражение в виде слагаемого и условно обозначена символом $C \geq 1$.

Для вычисления интегрального выражения (9) воспользуемся табличным интегралом вида:

$$\int \sqrt{x^2 + a^2} dx = \frac{1}{2} \left(x \sqrt{x^2 + a^2} + a^2 \ln(x + \sqrt{x^2 + a^2}) \right) + C. \quad (10)$$

Тогда интеграл (9) с учетом выражений (8) и табличного интеграла (10) представим в виде

$$A'_3(t) = \int_{\omega t_0}^{\omega t_k} \left\{ [\sin(\omega t) + \sin(\omega t) \sin(\omega t + \varphi)]^2 + C^2 \right\}^{0,5} \times \\ \times d[\sin(\omega t) + \sin(\omega t) \sin(\omega t + \varphi)] \quad (11)$$

и найдем его окончательное выражение для максимального изменения значения фазы, принимая для этого значения пределы интегрирования $\omega T_0 = 0$, $\omega T_k = \pi/2$:

$$A'_3(\varphi) = \frac{1}{2} \left\{ \left[1 + \sin\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) \right] \sqrt{\left[1 + \sin\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) \right]^2 + C^2} + \right. \\ \left. + \ln \left[1 + \sin\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) + \sqrt{\left[1 + \sin\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) \right]^2 + C^2} \right] \right\}. \quad (12)$$

График зависимости сигнала $A'_3(\varphi)$ на входе фотоприемника в условных единицах при $C = 1$ (рис. 6) представляет собой положительно определенную кривую вида синусоиды, расположенную над осью ωt , максимум которой достигается при $\varphi = \pi/2$. Интегрирование выражения (12) проводилось по $d[\sin(\omega t) + \sin(\omega t) \sin(\omega t + \varphi)]$. Интегрирование выражения (11) по $d(\omega t)$ дает такой же результат, как формула (12).

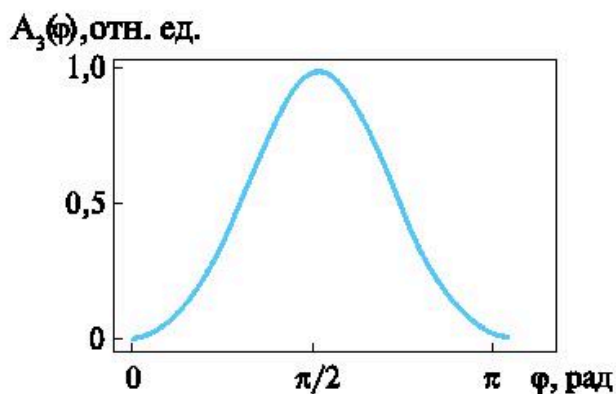


Рис. 6. Зависимость сигнала $A_3'(\varphi)$ на выходе схемы со смешанным соединением электрооптических модуляторов от разности фаз φ ($\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = \varphi$, $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \varphi$)

Практическое применение смешанного соединения ЭОМ в радиопотонных устройствах обработки сигналов еще предстоит исследовать и оценить. В настоящее время в Технополисе «ЭРА» выполняются исследования вариантов смешанного соединения ЭОМ для определения целесообразности их использования в РфУОС систем радиосвязи и радиолокации.

Оценка уровня погрешностей измерений разности фаз. Оценим уровень погрешностей измерений разности фаз (далее — фазы) принимаемых радиолокационных сигналов, вносимых электрооптическими модуляторами при их последовательном, параллельном и смешанном соединении.

Воспользовавшись широко применяемым в технике геометрическим суммированием погрешностей, получим следующие выражения суммарной абсолютной погрешности (при условии $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \Delta\varphi$):

– при последовательном соединении двух ЭОМ:

$$\Delta\varphi_{\text{послед}} = \sqrt{(\Delta\varphi_1)^2 + (\Delta\varphi_2)^2} = \Delta\varphi\sqrt{2}; \quad (13)$$

– при параллельном соединении двух ЭОМ:

$$\Delta\varphi_{\text{пар}} = \sqrt{\frac{(\Delta\varphi_1)^2(\Delta\varphi_2)^2}{[(\Delta\varphi_1) + (\Delta\varphi_2)]^2}} = \frac{\Delta\varphi_1\Delta\varphi_2}{\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2} = \frac{1}{2}\Delta\varphi; \quad (14)$$

– при смешанном соединении ЭОМ:

в случае параллельного соединения двух ЭОМ и его последовательного соединения с третьим ЭОМ:

$$\Delta\varphi_{\text{см1}} = \sqrt{\frac{(\Delta\varphi_1)^2(\Delta\varphi_2)^2}{[(\Delta\varphi_1) + (\Delta\varphi_2)]^2} + (\Delta\varphi_3)^2} = \sqrt{\frac{(\Delta\varphi)^4}{[2(\Delta\varphi)]^2} + (\Delta\varphi)^2} = \frac{\sqrt{5}}{2}\Delta\varphi; \quad (15)$$

в случае последовательного соединения двух ЭОМ и его параллельного соединения с третьим ЭОМ:

$$\Delta\varphi_{\text{см2}} = \frac{(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2)\Delta\varphi_3}{\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_3} = \frac{2}{3}\Delta\varphi,$$

где $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \Delta\varphi_3 = \Delta\varphi$ — абсолютные погрешности измерений разности фаз радиолокационных сигналов, вносимые в процесс измерений первым (индекс «1»), вторым (индекс «2») и третьим (индекс «3») ЭОМ соответственно.

В качестве примера рассчитаем суммарные погрешности измерений фазы радиолокационного сигнала, модулирующего лазерное излучение несущей частоты. Примем, что абсолютные погрешности, вносимые ЭОМ в процесс определения разности фаз радиолокационных сигналов, одинаковы и равны, к примеру: $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \Delta\varphi_3 = 0,1$. Тогда в результате расчета по формулам (13)–(15) получим:

$$\Delta\varphi_{\text{посл}} = 0,141; \Delta\varphi_{\text{пар}} = 0,050; \Delta\varphi_{\text{см1}} = 0,12; \Delta\varphi_{\text{см2}} = 0,06(6),$$

из чего можно сделать следующие выводы:

- 1) при последовательном соединении ЭОМ суммарная погрешность измерений фазы возрастает в $\sqrt{2}$ раз;
- 2) при параллельном соединении ЭОМ суммарная погрешность измерений фазы уменьшается в 2 раза;
- 3) при смешанном соединении ЭОМ суммарная погрешность измерений фазы по сравнению со схемой с последовательным соединением ЭОМ увеличивается незначительно (по сравнению с погрешностью, вносимой одним ЭОМ), несмотря на наличие третьего ЭОМ.

Результаты. Сравним радиотонные схемы с параллельным и последовательным соединениями ЭОМ с точки зрения их сложности и вносимой погрешности измерений разности фаз РЛ-сигналов. Источниками погрешности измерений разности фаз РЛ-сигналов в этих схемах являются квантовый шум полупроводникового лазера и шумы ЭОМ, обусловленные влиянием нелинейности их статических характеристик. Как правило, ЭОМ работают на линейных участках статических характеристик, поэтому их нелинейностью, а следовательно, и связанными с ней шумами можно пренебречь. Таким образом, погрешности, вносимые квантовым шумом лазера, в обеих схемах будут одинаковы.

Приведенные результаты расчетов погрешностей получены в предположении, что в общем случае допускается работа ЭОМ на нелинейных участках их статических характеристик и, соответственно, допус-

кается внесение ими погрешностей в процесс измерений разности фаз. Следует отметить, что схема с последовательным соединением ЭОМ является более простой, но требует большей мощности лазерного излучения на входе, так как сигнал, несущий информацию о разности фаз, ослабляется дважды в результате последовательного прохождения двух ЭОМ, по сравнению со схемой с параллельным соединением ЭОМ (например, при $\tau_1 = 0,9$ — в 1,23 раза; при $\tau_1 = 0,8$ — в 1,56 раза; при $\tau_1 = 0,7$ — в 2 раза).

В схему с параллельным соединением ЭОМ является более сложной в связи с необходимостью обеспечения синфазности при когерентном суммировании оптических сигналов в оптическом объединителе.

В схеме со смешанным соединением ЭОМ «объединяются» достоинства и недостатки двух предыдущих схем, однако она ослабляет входной сигнал в такой же степени, как и схема с последовательным включением ЭОМ.

Заключение. Из вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Наиболее высоким энергетическим потенциалом и наиболее низкой погрешностью измерений разности фаз модулирующих радиолокационных сигналов обладает радиофотонная схема с параллельным соединением ЭОМ за счет наиболее высокого пропускания, которое оценивается коэффициентом пропускания одного ЭОМ.

2. Наиболее низкий энергетический потенциал и наиболее высокая погрешность измерений разности фаз — у схемы с последовательным соединением ЭОМ.

3. Выходной сигнал схемы со смешанным соединением ЭОМ несет информацию о разности фаз принимаемых радиолокационных сигналов и занимает промежуточное положение между двумя предыдущими схемами: ее пропускание выше, чем у последовательного, и ниже, чем у параллельного соединения ЭОМ, а погрешность, вносимая в процесс определения разности фаз, выше, чем в схеме с параллельным соединением ЭОМ, и ниже, чем в схеме с их последовательным соединением.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Развитие фотоники в России и мире: публ. аналит. доклад.* Москва, Битуби, 2016, 432 с.
- [2] Гусеница Я.Н., Снегирев А.Л., Покотило С.А. Исследование характеристик радиофотонного устройства определения разности фаз радиолокационных сигналов. *Измерит. техника.* 2021, № 2, с. 38–42.

- [3] Покотило С.А., Гусеница Я.Н., Морозов А.В., Снегирев А.Л. Методы определения разности фаз выходных сигналов приемных элементов фазированной антенной решетки в радиофотонной схеме с параллельным и последовательным попарным соединением электрооптических модуляторов. *Науч.-техн. вестник ИТМО*. 2021, т. 21, № 6, с. 977–983.
- [4] Покотило С.А., Морозов А.В., Гусеница Я.Н., Снегирев А.Л. Методы формирования диаграмм направленности приемных элементов фазированной антенной решетки на основе радиофотонных технологий. *Вестник «ВИТ «ЭРА»*. 2022, т. 3, № 4, с. 407–412.
- [5] Покотило С.А. *Актуальные вопросы и результаты применения фотонных технологий: монография*. Азов, ООО «АзовПринт», 2022, 172 с.
- [6] Гусеница Я.Н., Снегирев А.Л., Покотило С.А. *Патент № 2751097*. Российская Федерация, МПК G01S 3/46. Устройство определения фазы радиолокационного сигнала: № 2019127588: заявл. 30.08.2019; опубл. 08.07.2021.
- [7] Снегирев А.Л., Покотило С.А., Гусеница Я.Н. *Патент № 2736543*. Российская Федерация, МПК H03J 5/00, G01S 3/46. Радиофотонный фазовый пеленгатор: № 2020117258: заявл. 12.05.2020; опубл. 18.11.2020.

Покотило Сергей Александрович — д-р техн. наук, старший научный сотрудник Федерального государственного автономного учреждения «Военный инновационный технополис «Эра». e-mail: era_otd4@mil.ru

Analysis of radio-photonic schemes for processing radar signal

© S.A. Pokotilo

Federal State Autonomous Institute “Military Innovative Technopolis “ERA”

The article considers the circuits of serial, parallel and mixed connection of electro-optical modulators used in radio-photonic devices from the point of view of the error assessment of the phase difference measurements of radar signals and optical radiation transmission. Mathematical expressions of the transmission coefficient for each of the circuits used and the output signal of the radio-photonic circuit with a mixed connection of electro-optical modulators, carrying information about the phase difference of radar signals of adjacent receiving elements of a phased antenna array, are obtained.

Keywords: *electro-optical modulator, serial connection, parallel connection, mixed connection, transmission coefficient, input signal amplitude, phase difference.*

Pokotilo S.A., Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Senior Researcher at the Federal State Autonomous Institute “Military Innovative Technopolis “ERA”.
e-mail: era_otd4@mil.ru