РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



$^{(19)}$ RII $^{(11)}$

2 734 454⁽¹³⁾ C1

(51) ΜΠΚ *G02F 1/00* (2006.01) *G02B 6/00* (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

G02F 1/00 (2020.02); G02B 6/00 (2020.02)

(21)(22) Заявка: 2019132796, 16.10.2019	(72) Автор(ы):
(24) Дата начала отсчета срока действия патента:16.10.2019	Сайгин Михаил Юрьевич (RU), Флджян Сурен Артакович (RU), Дьяконов Иван Викторович (RU),
Дата регистрации: 16.10.2020	Страупе Станислав Сергеевич (RU), Кулик Сергей Павлович (RU)
Приоритет(ы):	(73) Патентообладатель(и):
(22) Дата подачи заявки: 16.10.2019	Федеральное государственное бюджетное
 (45) Опубликовано: 16.10.2020 Бюл. № 29 Адрес для переписки: 119234, Москва, ул. Ломоносовский проспект, 	образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова" (МГУ) (RU)
27, стр. 1, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Фонд "Национальное интеллектуальное развитие"	 (56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2381628 C2, 10.02.2010. "Integrated reconfigurable unitary optical mode converter using MMI couplers", IEEE Photonics Technology Letters, May 2017. CN 106301595 B, 27.11.2018. "Reconfigurable Integrated Optoelectronics", Advances in OptoElectronics, мая 2011 г.

(54) N-КАНАЛЬНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ

(57) Реферат:

Изобретение относится к способам создания устройств, осуществляющих линейные преобразования электромагнитных сигналов между большим числом каналов. Изобретение может быть использовано в качестве элемента оптических вычислительных устройств, при отдельных реализации элементов коммуникационных и вычислительных сетей, обслуживающих большое число абонентов и вычислительных узлов; эти элементы и сети могут быть как классическими, так и квантовыми. Помимо этого, изобретение может быть использовано для создания устройств. осуществляющих анализ и синтез многомодовых электромагнитных полей. N-канальный линейный преобразователь электромагнитных сигналов включает N каналов, образованных N входами и

N выходами линейного преобразователя и М каскадно соединенных модулей, где М≥N+1, предпочтительно M=2N, каждый из которых включает N входов модуля, N выходов модуля и двухканальные блоки преобразования, обеспечивающие преобразование сигналов из входов модуля В выходы модуля И расположенные параллельно внутри модуля, и включающие по одному статическому делителю, содержащему два входа делителя и два выхода делителя, и одному элементу сдвига фазы, расположенному на одном из входов или на одном из выходов статического делителя; входы первого модуля являются входами линейного преобразователя, выходы модуля М являются выходами линейного преобразователя; при этом в случае нечетного N в каждом слое содержится

Ľ

C

λ

(N-l)/2 блоков преобразования, а также один свободный канал слоя, осуществляющий передачу сигнала из входа слоя в его соответствующий выход без преобразования и расположенный либо перед первым блоком преобразования, если в соседнем слое он располагался после последнего блока преобразования, либо после последнего блока преобразования, если в соседнем слое он расположен перед первым блоком преобразования; в случае четного N модули характеризуются чередующимся количеством блоков преобразования: в модуле содержится либо N/2 блоков преобразования, если в соседнем модуле содержится (N/2)-1 блоков преобразования, либо в модуле содержится (N/2) -1 блоков преобразования, если в соседнем модуле содержится N/2 блоков преобразования; при этом содержащий блоков модуль, (N/2)-1преобразования, также включает 2 свободных канала модуля, осуществляющих передачу сигнала из входа модуля в его соответствующий выход без преобразования, один из которых соединяет первый вход модуля с первым выходом модуля, а другой соединяет вход и выход последнего модуля; где статические делители для блоков преобразования выбраны произвольными с коэффициентом пропускания по мощности от 1/2 до 4/5, а элементы сдвига фазы выбраны с линейного возможностью реализации преобразования, заданного заранее с помощью определенной передаточной матрицы. Техническим результатом при реализации заявленного решения выступает уменьшение влияния ошибок, возникающих на этапе изготовления схем многоканальных линейных преобразователей, а также повышение числа каналов универсальных линейных преобразователей с сохранением высокого качества преобразований по сравнению с известными решениями. 4 з.п. ф-лы, 7 ил., 4 табл.



RU 2734454 C1

U 2734454 C1

フ

RUSSIAN FEDERATION





2 734 454⁽¹³⁾ C1

(51) Int. Cl. G02F 1/00 (2006.01) G02B 6/00 (2006.01)

FEDERAL SERVICE FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC

G02F 1/00 (2020.02); G02B 6/00 (2020.02)

 (21)(22) Application: 2019132796, 16.10.2019 (24) Effective date for property rights: 16.10.2019 Registration date: 16.10.2020 	 (72) Inventor(s): Sajgin Mikhail Yurevich (RU), Fldzhyan Suren Artakovich (RU), Dyakonov Ivan Viktorovich (RU), Straupe Stanislav Sergeevich (RU), Kulik Sergej Pavlovich (RU)
 Priority: (22) Date of filing: 16.10.2019 (45) Date of publication: 16.10.2020 Bull. № 29 Mail address: 119234, Moskva, ul. Lomonosovskij prospekt, 27, str. 1, Moskovskij gosudarstvennyj universitet imeni M.V. Lomonosova, Fond "Natsionalnoe intellektualnoe razvitie" 	 (73) Proprietor(s): Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Moskovskij gosudarstvennyj universitet imeni M.V. Lomonosova" (MGU) (RU) Konometrik

(54) N-CHANNEL LINEAR CONVERTER OF ELECTROMAGNETIC SIGNALS

(57) Abstract:

0

4

S

4

4

က

2

Ľ

FIELD: physics.

SUBSTANCE: invention relates to methods of creating devices which perform linear conversion of electromagnetic signals between a large number of channels. Invention can be used as an element of optical computing devices, when implementing separate elements of communication and computer networks serving a large number of subscribers and computing nodes; these elements and networks can be both classical and quantum. In addition, the invention can be used to design devices which perform analysis and synthesis of multimode electromagnetic fields. Nchannel linear converter of electromagnetic signals includes N channels formed by N inputs and N outputs of a linear converter and M cascade-connected modules, where $M \ge N + 1$, preferably M = 2N, each of which includes N module inputs, N module outputs and twochannel conversion units, providing conversion of signals from module inputs to module outputs and arranged in parallel inside module, and including one static divider comprising two divider inputs and two divider outputs, and one phase shift element located at one of the inputs or at one of the outputs of the static divider; inputs of the first module are inputs of the linear converter, outputs of the module M are outputs of the linear converter; wherein in case of odd N in each layer there is (NI)/2 conversion units, as well as one free layer channel, which carries out signal from layer input to its corresponding output without conversion and located either before the first transformation unit, if in the adjacent layer it was located after the last conversion unit, or after the last conversion unit, if in the adjacent layer it is located before the first conversion unit; in case of even N, modules are characterized by alternating number of conversion units: module contains either N/2 conversion units if adjacent module contains (N/2)-1 conversion units, or in module contains (N/2)-1 conversion units, if adjacent module contains N/2 conversion units; wherein module containing (N/2)-1 conversion units, also includes 2 free channels of module, performing signal transfer from module input to its corresponding output without conversion, one of which connects first input of module with first output of module, and other connects input and output of last

module; where static dividers for conversion units are selected arbitrary with power transmission coefficient from 1/2 to 4/5, and phase shift elements are selected to implement a linear transformation given in advance using a certain transfer matrix.

occurring at the stage of manufacturing circuits of multichannel linear converters, as well as increase in the number of channels of universal linear converters with preservation of high quality of transformations in comparison with known solutions.

EFFECT: technical result when implementing the disclosed solution is reducing the effect of errors

5 cl, 7 dwg, 4 tbl



U 2734454 C1

λ

RU 2734454 C

Стр.: 4

Область техники, к которой относится изобретение

Изобретение относится к способам создания устройств, осуществляющих линейные преобразования электромагнитных сигналов между большим числом каналов.

- Изобретение может быть использовано в качестве элемента оптических вычислительных устройств, при реализации отдельных элементов коммуникационных и вычислительных сетей, обслуживающих большое число абонентов и вычислительных узлов; эти элементы и сети могут быть как классическими, так и квантовыми. Помимо этого, изобретение может быть использовано для создания устройств, осуществляющих анализ и синтез многомодовых электромагнитных полей.
- 10 Уровень техники

Линейные преобразования электромагнитных сигналов используют в фундаментальных исследованиях, и они также незаменимы при создании прикладных устройств. Они играют важную роль в решении многих прикладных задач по обработке, получению и передаче информации.

Из уровня техники известен двухканальный интерферометр Маха-Цендера, способный реализовывать линейные преобразования между двумя каналами (А.Н. Матвеев «Оптика» М.: Высш. шк., 1985. - 351 с.). Этот интерферометр состоит из двух статических элементов сбалансированных делителей и одного варьируемого элемента сдвига фазы. Этот элемент может выполнять роль делителя, у которого коэффициент деления можно
 менять заданием конкретного значения фазового сдвига.

Недостатком интерферометра Маха-Цендера является требование сбалансированности статических делителей, которое делает качество двухканальных преобразований чувствительным к ошибкам, возникающим на этапе его реализации. Наличие ошибок делает статические делители несбалансированными и уменьшает

- 25 доступный диапазон коэффициентов деления. Отклонения от сбалансированных значений, возникающих при практических реализациях таких устройств, снижают класс доступных преобразований. Еще одним недостатком данного решения является малое число каналов преобразования (равное двум), что делает невозможным его непосредственное использование в сложных схемах.
- 30 Известен способ и устройство уменьшения влияния ошибок, возникающих в двухканальных преобразованиях, на качество преобразования, предложенный в работе Д.А.Б. Миллера, «Идеальная оптика с неидеальными компонентами» // Optica, T. 2, №8, С. 747 (2015). Такой способ основан на модификации двухканальных интерферометров, из которых составлены оптические схемы. При модификации в
- 35 каждом из двухканальных интерферометров заменяют статические элементы делителей на двухканальные интерферометры. В результате схема интерферометра содержит дополнительные элементы, и глубина схемы возрастает в 2 раза, а вместе с этим в 2 раза увеличивается число варьируемых элементов.
- Недостатком этого решения является необходимость использования дополнительных
 элементов преобразований, в результате чего число элементов и глубина схемы
 возрастает, усложняя практическую реализацию всего преобразования. С увеличением
 глубины схемы возрастают потери и занимаемая ею площадь. Помимо этого,
 реконфигурация таких схем требует варьирования большего числа элементов, что
 делает контроль за схемой сложным.
- 45 Из уровня техники известен преобразователь электромагнитных сигналов и способ реализации произвольных линейных преобразований между множеством каналом, раскрытый в работе М. Рэка с соавторами, «Экспериментальная реализация любого дискретного унитарного оператора» // Phys. Rev. Lett. Т. 73, №1, С. 58 (1994).

Предложенное решение позволяет изменять произвольным образом конфигурацию преобразований, таким образом, получая все возможные преобразования данной размерности. Многоканальный преобразователь выполнен в виде треугольного массива соединенных друг с другом двухканальных блоков. Схема N-канального преобразования

- ⁵ состоит из N(N-1)/2 двухканальных блоков и N-1 независимых фазовых сдвигов, которые располагаются на входах или выходах преобразования. Двухканальные блоки представляют собой интерферометры Маха-Цендера с дополнительным элементом варьируемого сдвига фазы, располагаемого на одном из входных или выходных каналах интерферометра. Требуемое многоканальное линейное преобразование в такой N-
- и канальной схеме осуществляется выставлением значений фаз элементов варьируемых фазовых сдвигов.

Недостатком данного решения является высокая чувствительность качества преобразования многоканальной схемы к отклонениям параметров статических элементов делителей, составляющих интерферометры Маха-Цендера, от

- 15 сбалансированных значений, что приводит к потере возможности схемы реализовать произвольное линейное преобразование заданной размерности. Данное обстоятельство налагает высокие требования к качеству изготовления схем и ограничивает максимальное число каналов универсальной схемы, которое может быть создано при сохранении требуемого качества преобразования. Еще одним недостатком этого
- 20 решения является асимметрия схемы, которая заключается в том, что при распространении через схему сигналы проходят через разное число блоков, зависящее от канала входа и выхода. Учитывая, что все блоки вносят одинаковые потери, различие в потерях при распространении сигналов по разным путям в схеме, приводит к разбалансировке преобразования, что, в свою очередь, снижает качество
- 25 преобразования.

Из уровня техники известен многоканальный интерферометр и способ осуществления многоканального линейного преобразования, предложенный в работе А. Креспи с соавторами «Андерсеновская локализация перепутанных фотонов в интегральных квантовых блужданиях», Nature Photonics, vol. 7, р. 322 (2013). N-канальный

30 преобразователь представляет собой N последовательно соединенных слоев, каждый из которых состоит из двухканальных статических элементов направленных делителей. Сдвиги фаз между статическими делителями в этом преобразователе задаются на этапе изготовления в виде отрезков волноводов разной длины.

Недостатком данного решения является невозможность осуществления
 произвольного N-канального линейного преобразования по причине недостаточного количества слоев преобразования. Еще одним недостатком способа является невозможность изменения конфигурации многоканальной схемы после этапа ее изготовления. Таким образом, данный преобразователь не позволяет реализовать реконфигурируемые преобразования.

- 40 Наиболее близким к заявляемому техническому решению является устройство и способ реализации произвольных линейных преобразований, раскрытый в работе И.В. Дьяконова с соавторами «Перестраиваемая фотоника на стеклянном чипе» // Phys. Rev. Applied, vol. 10, 044048 (2018). Аналогично описанным выше преобразователям, в качестве составляющего блока в схемах используют двухканальные блоки,
- 45 представляющие собой интерферометры Маха-Цендера. Отличие данного решения от предыдущего состоит в прямоугольном расположении блоков. Число блоков в Nканальной схема равно N(N-1)/2. В схеме также используют N-1 независимых фазовых сдвигов Ф. Многоканальные схемы с прямоугольным размещением блоков, используют,

в частности при реализации квантового алгоритма бозонного сэмплинга, например, рассмотренный в работе Х.-Л. Хуанг, В.-С. Бао, Ч. Гуо, «Симуляция динамики одиночных фотонов в устройствах, реализующих бозонный сэмплинг, с помощью матриц плотности в форме произведений состояний», arxiv.1812.0661 (2019).

⁵ Недостатком такого универсального способа является высокая чувствительность качества многоканального преобразования к отклонениям в параметрах, составляющих двухканальные преобразования. Результатом этого являются повышенные требования к качеству изготовления схем и уменьшение класса доступных многоканальных преобразований, в результате чего реализовать произвольные преобразования заданной
 10 размерности не представляется возможным.

Технической проблемой, решаемой заявляемым изобретением, является снижение чувствительности многоканальных универсальных преобразователей к ошибкам в статических делителях, приводящих к снижению качества реализуемых преобразований. Такие ошибки могут возникать в результате неидеальной реализации и/или они могут

15 быть вызваны частотной дисперсией при использовании сигналов с несущими частотами, отличающимися от значения, которое подразумевалось на этапе изготовления устройства многоканального преобразования.

Раскрытие изобретения

Технические результатом изобретения является уменьшение влияния ошибок,

- 20 возникающих на этапе изготовления схем многоканальных линейных преобразователей. В изобретении предложена новая схема универсального многоканального линейного преобразователя, который допускает широкий диапазон коэффициентов пропускания делителей, при этом не теряя своей универсальности - возможности реализовать произвольное преобразование заданной размерности. Следствием этого является
- 25 повышенный уровень допустимых ошибок, при котором преобразователь может функционировать без потери качества преобразования. Помимо этого, предложенное изобретение позволяет повысить число каналов универсальных линейных преобразователей с сохранением высокого качества преобразований по сравнению с известными решениями.
- 30 Технический результат достигается за счет реализации N-канального линейного преобразователя электромагнитных сигналов, включающего N каналов, образованных N входами и N выходами линейного преобразователя и M каскадно соединенных модулей (слоев), где M≥N+1, предпочтительно, M=2N, каждый из которых включает N входов модуля (слоя), N выходов модуля (слоя) и двухканальные блоки
- 35 преобразования, обеспечивающие преобразование сигналов из входов модуля (слоя) в выходы модуля (слоя), расположенные параллельно внутри модуля (слоя), и включающие по одному статическому делителю, содержащему два входа делителя и два выхода делителя, и одному элементу сдвига фазы (фазового сдвига), расположенному на одном из входов или на одном из выходов статического делителя;
- 40 входы первого модуля (слоя) являются входами линейного преобразователя, выходы модуля (слоя) М являются выходами линейного преобразователя; при этом, в случае нечетного N, каждый слой содержит (N-1)/2 блоков преобразования, а также один свободный канал слоя, выполненный с возможностью передачи сигнала

из входа слоя в его соответствующий выход без преобразования, и расположенный

45 либо перед первым блоком преобразования, если в соседнем слое он расположен после последнего блока преобразования, либо после последнего блока преобразования, если в соседнем слое он расположен перед первым блоком преобразования;

в случае четного N модули (слои) характеризуются чередующимся количеством

блоков преобразования: в модуле (слое) содержится либо N/2 блоков преобразования, если в соседнем модуле (слое) содержится (N/2)-1 боков преобразования, либо в модуле (слое) содержится (N/2)-1 блоков преобразования, если в соседнем модуле (слое) содержится N/2 блоков преобразования; при этом модуль (слой), содержащий (N/2)-1

- ⁵ блоков преобразования также включает 2 свободных канала модуля (слоя), выполненных с возможностью передачи сигнала из входа модуля (слоя) в его соответствующий выход без преобразования, один из которых соединяет первый вход модуля (слоя) с первым выходом модуля (слоя), а другой соединяет вход N модуля (слоя) с выходом N модуля (слоя);
- где статические делители для блоков преобразования выбраны произвольными с коэффициентом пропускания по мощности от 1/2 до 4/5, а элементы сдвига фазы выбраны с возможностью реализации линейного преобразования, заданного заранее с помощью определенной передаточной матрицы.

Взаимное расположение и соединение элемента сдвига фазы и статического делителя *в* блоке преобразования предпочтительно выбрано идентичным для всех блоков преобразования N-канального линейного преобразователя.

N-канальный линейный преобразователь может содержать N-1 дополнительные элементы сдвига фазы, расположенные по одному на входах блоков преобразования первого модуля (слоя), если элемент сдвига фазы в соответствующем блоке

20 преобразования расположен на выходе статического делителя, или на выходах блоков преобразования последнего модуля (слоя), если элемент сдвига фазы в соответствующем блоке преобразования расположен на входе статического делителя.

Краткое описание чертежей

На фиг. 1-7 приведены рисунки, поясняющие заявляемое изобретения:

- 25 На фиг. 1 представлена схема N-канального линейного преобразователя для случая нечетного числа каналов (а) и четного числа каналов (б). Для случая (а) на схеме обозначены два последовательных слоя преобразования 1 и 2 с разным размещением двухканальных блоков 3. Отдельно выделен слой независимых фазовых сдвигов 4 на выходе схемы. Для случая (б) также выделены два последовательных слоя 5 и 6 с 30 разным числом и размещением блоков 3.
 - На фиг. 2а-г приведены возможные схемы реализации двухканального блока 3, состоящего из варьируемого элемента сдвига фазы 7 и статического элемента делителя 8, отличающиеся расположением элемента сдвига фазы. В случае реализации N-канального преобразователя с дополнительными элементами сдвига фаз 4,
- 35 расположенными на выходе преобразователя, в последнем слое (модуле), как правило, используют блоки, показанные на фиг. 2а и фиг. 2б; В случае реализации N-канального преобразователя с дополнительными элементами сдвига фаз 4, расположенными на входе преобразователя, в первом слое (модуле), как правило, используют блоки, показанные на фиг. 2в и фиг. 2г;
- Фиг. 3 схематически иллюстрирует множество блоков, вовлеченных в операцию маршрутизации между 1-ми 6-м каналами 6-канального линейного преобразователя, изготовленного согласно заявляемому (а) и известному (б) решению. На фиг. За и фиг. Зб пунктирной линией выделены соответствующие двухканальные блоки 3 и 9.

Фиг. 4 иллюстрирует влияние когерентных ошибок на качество многоканального 45 преобразования, осуществляемого заявляемым преобразователем и известным из

уровня техники преобразователем Клементса. На фиг. 4а и фиг. 4б приведены графики зависимостей величины инфиделити 1-F в зависимости от параметра когерентной ошибки α для случаев 5-канальных и 10-канальных преобразователей, соответственно.

Фиг. 5 иллюстрирует влияние некогерентных ошибок на качество многоканального преобразования, осуществляемого заявляемым преобразователем и известным из уровня техники преобразователем Клементса. Гистограммы инфиделити 1-F, изображенные на фиг. 5а и фиг. 5б, демонстрируют ошибки в многоканальных

5 преобразованиях, вызванные разным уровнем некогерентных ошибок: a) Δ=5 градусов и б) Δ=10 градусов.

На фиг. 6а схематически представлен перестраиваемый 4-канальный оптический преобразователь, который был реализован для демонстрации конкретного выполнения заявляемого изобретения методом фемтосекундной лазерной печати. На фиг. 6б

10 схематически представлен перестраиваемый 4-канальный оптический преобразователь Клементса, созданный известным из уровня техники способом, который был использован для сравнения с преобразователем, предлагаемым в настоящем изобретении. На рисунках элементы варьируемых сдвигов фаз, основанные на термооптическом эффекте, обозначены 10. На фиг. 6в представлен чертеж направленного делителя 11,

использованный в интерферометрах в качестве статического делителя 8. На фиг. 7 представлена схема конкретной реализации 4-х канального преобразователя, где позициями 12 - вход заявляемого устройства, 13 - вход модуля (слоя), 14 - вход блока, 15 - вход делителя, 16-19 - выходы упомянутых элементов, соответственно.

20 Осуществление изобретения

В изобретении речь идет о преобразователях электромагнитных полей, которые могут принадлежать к разным диапазонам длин волн - от радио- до оптического.

Для более однозначного понимания сущности заявленного изобретения ниже представлены основные термины и определения, используемые в рамках настоящего *25* описания.

Каналом преобразования называют любую степень свободы электромагнитного поля, которой можно однозначно поставить в соответствие независимый сигнал, характеризуемый комплексной амплитудой. Для большей ясности выделим отдельно следующие степени свободы, которые могут являться каналом преобразования: 1)

- 30 пространственной степенью свободы поля может являться мода одномодового волновода, по которому может распространяться электромагнитный сигнал. В таком случае несколько одномодовых волноводов образуют множество каналов. Также пространственным каналом может выступать пространственная одна мода многомодового волновода или одна мода свободного пространства. В этом случае
- 35 несколько пространственных мод одного многомодового волновода или несколько мод свободного пространства формируют множество независимых каналов. 2) Частотной степенью свободы поля выступают отдельные линии частотного спектра. Набор неперекрывающихся спектральных линий образует множество каналов. 3) Временной степенью свободы является заданный отрезок времени, характеризуемый
- 40 временным отчетом его начала и конца. Наличие электромагнитного сигнала в этом отрезке времени трактуется как наличие сигнала в этом канале. Таким образом набор отрезков времени образует множество каналов. В соответствии с тем, какая из обозначенных степеней свободы электромагнитного поля используется для кодирования информации, говорят о пространственном, частотном и временном каналах.
- 45 Линейным N-канальным преобразованием называют преобразование, осуществляемое между N каналами, действие которого можно описать линейным законом:

$$a_{k}^{(out)} = \sum_{j=1}^{N} U_{kj} a_{j}^{(in)}, \qquad (1.1)$$

где N - число каналов преобразования, $a_j^{(in)}$ - комплексные амплитуды на входе преобразования, $a_k^{(out)}$ - комплексные амплитуды на выходе преобразования. Здесь индексы ј и k принимают значения от 1 до N. В (1.1) комплексные коэффициенты U_{kj}

5 формируют матрицу U размерности N×N, которая и определяет конкретное линейное преобразование. Выражение (1.1) может быть представлено в матричном виде:

 $\vec{a}^{(out)} = U\vec{a}^{(in)}$

(1.2)

где *ā*^(*in*) и *ā*^(out) - столбцы, составленные из амплитуд сигналов на входе и выходе преобразования, соответственно. Число каналов преобразования N характеризует ¹⁰ размерность преобразования. Изобретение относится к случаю, когда число каналов преобразования N≥3.

Передаточной матрицей преобразования или просто матрицей преобразования называют матрицу U, которая связывает друг с другом столбец амплитуд на выходе преобразования со столбцом на его входе (см. выражение (1.2)).

15

N-канальным линейным преобразователем или линейным N-канальным устройством или линейным N-канальным интерферометром называют любое устройство, осуществляющее линейное N-канальное преобразование электромагнитных сигналов. Двухканальным блоком преобразования, или независимым двухканальным блоком,

или просто блоком преобразования называют двухканальный элемент, из которых
 ²⁰ составлен преобразователь с помощью соединения этих блоков друг с другом. В настоящем изобретении блок преобразования состоит из одного статического элемента делителя и варьируемого элемента сдвига фазы.

Интерферометром Маха-Цендера называют двухканальный элемент, состоящий из двух последовательно соединенных статических элементов делителей со

- ²⁵ сбалансированным коэффициентом деления и одного варьируемого элемента сдвига фазы, располагаемого в одном из каналом между делителями. Интерферометр Маха-Цендера выполняет роль перестраиваемого делителя, в котором коэффициент деления можно изменять варьированием сдвига фазы, и он служит основной частью блоков преобразования в известных способах реализации универсальных и неуниверсальных
- ³⁰ преобразователей. Произвольный коэффициент деления в интерферометре может быть получен только при точном выполнении условий сбалансированности составляющих статических делителей.

Слоем N-канального преобразования или просто слоем преобразования называют часть схемы преобразователя, которая составлена из блоков преобразования, которые

³⁵ действуют независимо друг от друга. Слой преобразования в рамках настоящего изобретения также называют модулем преобразования. Слой (модуль) преобразования может содержать свободный канал (или два канала). Свободный канал (или каналы) осуществляет соединение выхода предыдущего слоя или входа преобразователя с каналом последующего слоя или выходом. Число двухканальных блоков в слое и

⁴⁰ свободных каналов в слое (модуле) таково, что число каналов преобразования слоя (модуля) равно числу каналов преобразования N.

Глубиной схемы преобразователя или просто глубиной схемы называют максимальное число статических элементов делителей, через которые проходят сигналы при распространении от входов до выходов схемы.

45 Если в преобразовании нет потерь, что его матрица является унитарной, т.е. для нее

справедливы соотношения $\sum_{j=1}^{N} U_{jm}^{*} U_{jn} = \delta_{mn}$. В матричном виде они принимают вид:

$$UU^* = U^*U = I, \tag{1.3}$$

где «*» означает операцию комплексного сопряжения матрицы, І - единичная матрица.

Из условия (1.3) вытекает равенство: $\sum_{j=1}^{N} |a_{j}^{(in)}|^{2} = \sum_{j=1}^{N} |a_{j}^{(out)}|^{2}$, отражающее сохранение

энергии при осуществлении преобразования. В общем случае в преобразовании имеются потери и соотношение (1.3) не выполняется. Вместо этого справедливо используют

более общее представление
$$\sum_{j=1}^{N} U_{jm}^{*} U_{jn} \leq 1$$
.

Для сравнения двух преобразований, которые описываются матрицами U₁ и U₂, используют следующую меру соответствия:

10

 $F^{(loss)} = \left| \frac{Tr(U_1^* U_2)}{\sqrt{Tr(U_1^* U_1)Tr(U_2^* U_2)}} \right|^2,$ (1.4)

где Tr(A) обозначает операцию взятия следа матрицы А. Для преобразования без потерь (его матрица унитарная) справедливо Tr(U*U)=N. Максимальное значение F ^(loss)=1 соответствует идеальному соответствию двух матриц. Минимальное значение т^(loss) о *Б*

20 F^(loss)=0. Более общие случаи не унитарных матриц (линейные преобразования с потерями) могут рассматриваться как схемы, являющиеся частью более крупных унитарных схем.

При использовании меры соответствия (1.4) идеальное значение F^(loss)=1 можно получить для двух матриц, которые, вообще говоря, не равны друг другу U₁≠U₂, но между ними справедливо соотношение U₂=tU₁, где t - произвольное комплексное число. Модуль ltl имеет смысл общего коэффициента пропускания (по амплитудам) преобразования и при ltl<1 соответствует преобразованию со сбалансированными потерями - при распространении сигнала, поданного на любой вход, в любой из выходов

- 30 он испытывает одинаковые потери, т.е. данная ситуация отвечает сбалансированным потерям. Наличие фазы у t приводит к нечувствительности меры (1.4) к общей фазе преобразования. Таким образом (1.4) не зависит от потерь, если они сбалансированы и общая фаза сравниваемого преобразования также не важна. Таким образом, потери в схеме считаются сбалансироваными (его матрица U=tU₀, где U₀ унитарная, a ltl<1).
- ³⁵ Линейный N-канальный преобразователь, предлагаемый в настоящем изобретении, состоит из М каскадно (последовательно) соединенных слоев (модулей) (выход предыдущего слоя соединен с входом последующего), которые составлены из двухканальных блоков, действующие независимо друг от друга. Фиг. 1а и фиг. 1б иллюстрируют схемы N-канального преобразователя для случая нечетного и четного
- ⁴⁰ числа каналов N, соответственно, при M=2N. При нечетном N соседние слои содержат одинаковое число блоков, равное (N-1)/2. Для примера на фиг. 1а выделена одна пара соседних слоев - 1 и 2, а также выделен отдельно двухканальный блок 3. Блоки в двух соседних слоях сдвинуты друг относительно друга на один канал. По этой причине в каждом слое присутствует сквозной канал (с индексом 1 или N), который соединяет
- ⁴⁵ выходной канал предыдущего слоя (или входной канал преобразователя, если текущий слой первый по счету) с входным каналом последующего слоя (или выходной канал преобразователя, если текущий канал последний по счету).

Для случая четного N, число блоков в соседних слоях отличается на один и принимает

значения N/2 или N/2-1. На фиг. 1б для иллюстрации выделена одна пара соседних слоев - 5 и 6 - содержащих, соответственно, N/2-1 и N/2 блоков 3. В отличие случая нечетного N, слой может как содержать сквозные каналы в количестве двух штук, так и не содержать их вообще.

- ⁵ На фиг. 2а-г приведены четыре возможные конфигурации независимых двухканальных блоков 3, из которых сконструирован предлагаемый линейный преобразователь и которые отличаются расположением элемента фазового сдвига относительно статического делителя. Блоки 3 сформированы одним варьируемым элементом сдвига фазы 7, характеризуемого параметром сдвига фазы ф, который может
- принимать значения в диапазоне от 0 до 2 π радиан, и одним статическим делителем 8, описываемым параметром θ. Параметр θ характеризует коэффициент деления статического делителя, который задается на этапе проектирования преобразователя и включает в себя влияние ошибок, возникших на этапе реализации устройства преобразователя. Для описания преобразования амплитуд электромагнитных полей
- 15 блоком можно использовать формализм передаточных матриц. В таком случае передаточная матрица одного двухканального блока имеет размерность 2×2. Например, для схемы блока, изображенной на фиг. 2a, передаточная матрица принимает следующий вид:

20
$$T(\varphi;\theta) = \begin{pmatrix} \exp(i\varphi)\cos\theta & \sin\theta \\ -\exp(i\varphi)\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}.$$
 (1.5)

Таким образом, при поступлении на вход блока с передаточной матрицей (1.5)

амплитуд электромагнитного поля, представленных в форме столбца $\vec{b}^{(in)} = \begin{pmatrix} b_1^{(in)} \\ b_2^{(in)} \end{pmatrix}$,

амплитуды на выходе блока $\vec{b}^{(out)} = \begin{pmatrix} b_1^{(out)} \\ b_2^{(out)} \end{pmatrix}$ рассчитываются по формуле:

$$\vec{b}^{(out)} = T \cdot \vec{b}^{(in)}.$$

(1.6)

30 Коэффициент пропускания делителя взаимно однозначно связан с параметром в соотношением $\tau = \sin^2 \theta$. При $\theta = \pi/4$ делитель является сбалансированным.

Схемы преобразователей, изображенные на фиг. 1, содержат также элементы варьируемых сдвигов фаз 4, располагаемые на выходных каналах, которые вносят сдвиги фаз независимо друг от друга. Количество элементов сдвигов фаз равно N-1, а

- ³⁵ их размещение может быть произвольным. Элементы сдвигов фаз 4 следует располагать на входе преобразователя, а не на выходе, если в качестве блоков 3 в схеме используются конфигурации, изображенные на фиг. 2в и фиг. 2г. Следует отметить, что возможны частные случаи реализации изобретения без размещения дополнительных элементов сдвигов фаз 4 на входе и/или выходе преобразователя.
- ⁴⁰ В каждом блоке параметр сдвига фазы ф можно изменять независимо от других фазовых параметров, таким образом, достигая программируемости всего преобразователя. В свою очередь, параметры статических делителей изменять нельзя после реализации схемы, или это сделать затруднительно после реализации схемы преобразователя.
- ⁴⁵ Передаточная матрица преобразователя может быть записана в виде произведения передаточных матриц 2N слоев $V^{(m)}$ и слоя независимых фазовых сдвигов Φ (4):

$$U = \Phi V^{(2N)} \cdot \dots \cdot V^{(2)} V^{(1)}.$$
(1.7)

Общее число двухканальных блоков в преобразователе, содержащих по одному элементу варьируемой фазы, равно N(N-1), что вместе с N-1 независимых фазовых сдвигов дает N²-l независимых параметров, которые используют для изменения

конфигурации преобразователя. Это число в точности соответствует необходимому числу независимых параметров, требуемого для полного задания любой унитарной передаточной матрицы размерности N×N. Очевидно, что глубина схемы

преобразователя, определение которой дано выше, равно 2N.

Передаточная матрица заявляемого преобразователя (1.7), определяется двум

¹⁰ набором фазовых параметров - { ϕ_j } и { θ_j }. Набор фаз { θ_j } ($j = \overline{1, N^2 - N}$) характеризует коэффициенты пропускания статических делителей. Конкретные значения этих величин задаются на этапе проектирования. После реализации схемы преобразователя значения θ_j элементов статических делителей, полученных в итоге, содержат ошибки, вызванные

¹⁵ неидеальной реализацией. Набором фаз φ_j ($j = \overline{1, N^2 - 1}$), в который включены помимо фаз, состоящих в блоках 3, также и фазы Φ , располагаемые на входе или выходе преобразователя, можно управлять после реализации схемы. Анализ диапазона, в котором могут лежать параметры θ_j статических делителей, сохраняя при этом возможность реализации преобразователем произвольное линейное преобразование заданной размерности, приведен ниже.

В качестве простейшего примера рассмотрим линейную операцию маршрутизации, в результате которой, сигнал, поступающий на один из входов преобразователя, выходит из другого канала преобразователя. На фиг. За схематически продемонстрирован 6канальный преобразователь, выполняющий маршрутизацию между 1-м и 6-м каналом,

²⁵ и элементы, которые могут принимать участие в осуществлении этой операции (они выделены жирным). На рисунке составляющие схему блоки 3 изображены в виде перекрестий каналов, а элементы варьируемых фазовых сдвигов на схеме не показаны.

При анализе качества предлагаемых преобразователей и их устойчивости к ошибкам целесообразно проводить сравнение с известными многоканальными универсальными схемами. Наиболее широко используемым типом универсального преобразователя является перестраиваемый преобразователь, предложенный В.Р. Клеменса с соавторами, «Оптимальный дизайн универсальных многопортовых интерферометров» // Optica, Т. 3, №12, С. 1460 (2016) и реализованный в работе И.В. Дьяконова с соавторами «Перестраиваемая фотоника на стеклянном чипе» // Phys. Rev. Applied, vol. 10, 044048

- ³⁵ (2018). В качестве блока преобразования в преобразователях Клементса выступают двухканальные интерферометры Маха-Цендера с дополнительными фазами. Таким образом, блок этих схем содержит в 2 раза больше статических и варьируемых элементов, при этом число блоков в схеме - N(N-1)/2 - в 2 раза меньше, чем в схеме предлагаемого преобразователя. При наличии в схеме интерферометра Клементса
- ⁴⁰ фазовых сдвигов на входе или выходе интерферометра, общее число варьируемых фаз в схеме N²-1, как и в предлагаемом преобразователе. Аналогично фиг. За для предлагаемого преобразователя, фиг. Зб схематически иллюстрирует операцию маршрутизации между 1-ми 6-м каналами 6-канального преобразователя, составленного
- из блоков (9) на основе интерферометров Маха-Цендера. Как видно из рисунка,
 реализация операции маршрутизации между крайними каналами преобразователя
 вовлекает только по одном блоку в каждом слое, что делает появление ошибок хотя
 бы в одном из них критическим для всего преобразования. Действительно, для
 осуществления идеальной маршрутизации необходимо, чтобы все блоки (9) со 100%

эффективностью пропускали поступающие сигналы. Однако для этого необходимо, чтобы в соответствующих интерферометрах Маха-Цендера статические делители были сбалансированными. Отклонения от этого условия, вызванное ошибками при реализации, приводит к неидеальной эффективности маршрутизации. Для

5 преобразователей Клементса требование сбалансированности статических делителей является также необходимым и для осуществления произвольных преобразований.

Анализ устойчивости к ошибкам заявляемого преобразователя, приведенный ниже, а также техническая реализация этого преобразователя, свидетельствуют о наличии широкого диапазона возможных значений параметром статических делителей, при

которых преобразователь не испытывает снижения в качестве многоканальных преобразований.

Можно выделить два типа ошибок, возникающих в статических элементах преобразователя, анализ устойчивости к которым представлен ниже. При ошибках первого типа коэффициенты пропускания всех статических делителей одинаковы, но

15 они систематически смещены относительно значений, заданных на этапе проектирования. В этом случае имеем следующие соотношения для угловых параметров статических делителей: $\theta_i = \theta_0 + \alpha$ (1.8)

(j=1,N²-N), где θ₀ - параметр, отвечающий делителям, заданным на этапе
 проектирования, α - угловой параметр отклонения, характеризующий ошибку. Такие ошибки мы называем когерентными. Как будет показано ниже, диапазон возможных значений параметра θ₀, определяющего пропускание статических делителей в предлагаемом преобразователе, который можно выбирать на этапе проектирования схемы, достаточно широк (см. ниже). Здесь мы считаем статические делители в
 преобразователе сбалансированными при проектировании, т.е. θ₀=π/4.

Систематическое смещение параметров статических делителей (1.8) может появляться, например, в интегрально-оптических схемах, как результат несоответствия геометрических характеристик этих элементов и/или оптических свойств материалов, из которых они изготовлены, предполагаемых изначально на этапе их проектирования.

- ³⁰ В свою очередь, эти характеристики изменяются медленно в масштабе размеров одной интегрально-оптической схемы, что является обоснованием выбора модели ошибки (1.8) с постоянным смещением.
- Для количественного анализа качества преобразования, которое могут выполнять преобразователи в заявляемом изобретении, при когерентных ошибках (1.8) было исследовано поведение параметра (1.4). Для этой цели при числе каналов требуемого преобразования N генерировался набор из 1000 передаточных матриц $U_0^{(m)}$ ($m = \overline{1,1000}$), каждая из которых была $U_2 = U_0^{(m)}$ в (1.8). Эти матрицы генерировались из равномерного распределения согласно мере Хаара (М. Лундберг и Л. Свенсен «Мера Хаара и генерация случайных унитарных матриц», IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop, 114, 2004). Для нахождения набора варьируемых фаз преобразователя ϕ_j (j=

1, N² -1), при которых преобразователь (при заданной величине когерентной ошибки α) оптимальным образом воспроизводит требуемую передаточную матрицу $U_2 = U_0^{(m)}$,

⁴⁵ был использован численный алгоритм глобальной оптимизации basinhopping, на основе алгоритма BFGS. Для заданного значения ошибки α и сгенерированной случайно матрицы $U_2 = U_0^{(m)}$ алгоритм оптимизации находил максимум меры соответствия (1.4)

с матрицей U₁=U, где U - передаточная матрица преобразователя (1.7), зависящая от варьируемых фаз φ_j ($j = \overline{1, N^2 - 1}$) как от переменных. Таким образом, мера соответствия (1.4) выступает в роли оптимизируемой функции от многих переменных $F(\{\varphi_i\})$,

максимум которой необходимо найти.

5

Количественная характеристика степени универсальности многоканального преобразователя при разных значениях когерентной ошибки α задается распределением меры соответствия F, полученной в результате численного моделирования по набору

- 10 случайно сгенерированных матриц $U_0^{(m)}$ ($m = \overline{1,1000}$). На фиг. 4 представлены графики зависимости среднего значения параметра $\varepsilon = 1 - \langle F \rangle$ ($\langle f \rangle$ означает статистическое среднее величины f) и ширины распределения от значения углового параметра
- когерентной ошибки α для числа каналов N=5 (а) и N=10 (б). На графиках обозначены ¹⁵ интервалы ошибок, которые обозначают стандартное отклонение распределений F. Для сравнения на графиках также представлены аналогичные зависимости для преобразователя Клементса, в котором ошибка α также характеризует отклонение статических делителей от сбалансированных значений. Случай идеального
- преобразователя, способного реализовать произвольную передаточную матрицу данной 20 размерности, отвечает значению є=0. В таком случае стандартное отклонение
- распределений также равно нулю. Как видно из графиков, при отрицательных значениях α оба преобразователя ведут себя одинаковым образом - качество их преобразования быстро падает с ростом абсолютной величины α. Разительно отличается поведение при положительных α. Преобразователи Клементса быстро теряют универсальность,
- 25 как и при отрицательных α. Предлагаемый преобразователь не теряет качество преобразования при больших значениях α, достигающих больше значений ~20 градусов. Известно, что α=0 является идеальным случаем для преобразователя Клементса, при котором должно быть ε=0. Однако приведенные на графиках малые ненулевые значения

ε ~ 10⁻¹⁰-10⁻⁸ связаны с конечной точностью численного алгоритма оптимизации.

- ³⁰ Графики, изображенные на фиг. 4, свидетельствуют о высокой устойчивости к ошибкам предлагаемого интерферометра. Преобразователь сохраняет универсальность при больших значениях когерентных ошибок (если они лежат в области положительных α). Следует отметить, что представленные на графиках результаты численного моделирования свидетельствуют о существовании диапазона коэффициентов
- ³⁵ пропускания статических делителей, выбираемых на этапе проектирования параметр θ₀ может принимать величины выше π/4. Выбор параметра θ₀ при практических реализациях обусловлен ожидаемым распределением ошибок, возникающих в конкретном случае используемого технологического процесса. В частности, если ожидаемые вероятности появления положительных и отрицательных значений α
- ⁴⁰ одинаковы, то θ₀ целесообразно выбирать лежащим в середине допустимого диапазона значений.

Второй тип ошибок, который возникает в реальных преобразователях, проявляется в форме случайных отклонений α_j . Такие ошибки называют некогерентными. В таком

45 случае каждый статический делитель обладает отличающимся коэффициентом пропускания, поэтому для угловых параметров θj имеет место соотношение более общего вида, нежели чем (1.8):

$$\theta_j = \theta_0 + \alpha_j. \tag{1.9}$$

Численное моделирование влияния некогерентных ошибок на качество многоканального преобразования производилось с использованием поиска глобального максимума меры соответствия (1.4) аналогично анализу когерентных ошибок. Используя результаты анализа влияния когерентных ошибок, представленные на фиг. 4, статические делители устанавливались с параметром θ₀=π/3 (эти значению приблизительно отвечают центру плато малых значений ε). Параметры отклонений (ошибки) α_j генерировались из распределения вероятностей, имеющего гауссов профиль:

$$p(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\Delta}} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\Delta^2}\right),$$
 (1.10)

10

где Δ имеет смысл ширины распределения вероятностей и является степенью ошибок. Для достоверного статистического анализа качества преобразователя также использовался набор из 1000 случайно сгенерированных матриц $U_0^{(m)}$. Далее для каждой

¹⁵ матрицы $U_0^{(m)}$ ($m = \overline{1,1000}$) при заданном значении Δ генерировался новый набор параметров отклонений α_j ($j = \overline{1, N^2 - N}$) и производился численный поиск глобального максимума меры соответствия (1.4) в пространстве варьируемых фаз φ_i ($j = \overline{1, N^2 - 1}$).

Одновременно для сравнения проводился такой же численный анализ и для
 преобразователя Клементса, в котором статические делители в составе интерферометров
 Маха-Цендера содержали ошибки α_i как и в заявляемом преобразователе.

На фиг. 5 представлены гистограммы распределения меры соответствия для 5канальных преобразователей для разных ширин распределения (1.10): а) Δ=5 градусов, б) Δ=10 градусов. Как видно из гистограмм преобразователь обладает повышенной

25 устойчивостью к ошибкам и сохраняет универсальность с высокой степенью точностью даже при очень большом уровне ошибок, как, например, в случае фиг. 56.

Таким образом, заявляемый преобразователь характеризуется повышенной устойчивостью как к когерентным, так и к некогерентным ошибкам. При проведении исследований был использован преобразователь, содержащий столько же статических и варьируемых элементов, сколько и известные аналоги, в частности, преобразователь

- Клементса, изложенный в работе В.Р. Клеменса с соавторами, «Оптимальный дизайн универсальных многопортовых интерферометров» // Optica, Т. 3, №12, С. 1460 (2016), что позволило сделать вывод о том, что значительные улучшения достигаются за счет новой схемы размещения этих элементов в преобразователе.
- ³⁵ Количество слоев (модулей) М в преобразователе может отличаться от рассмотренного выше случая для M=2N. В случае, когда число слоев M<2N качество многоканального преобразования не может достигать идеальных значений для произвольных линейных преобразований, т.к. в этом случае набор варьируемых фаз будет состоять из недостаточного числа параметров, чтобы реализовать произвольное 40</p>
- ⁴⁰ линейное N-канальное преобразование с идеальной точностью, для которого необходимо N²-1 фаз. С уменьшением числа слоев М (при M<2N) ожидаемое качество реализации произвольной передаточной матрицы будет падать. Вместе с тем, использование таких преобразователей может быть оправданно в случаях, когда не
- 45 требуется большая точность преобразования (характеризуемая, например, параметром соответствия F (1.4)) и/или когда необходимо реализовать узкий набор передаточных матриц, которые можно осуществить в преобразователе с M<2N.

В случае, когда M>2N число варьируемых фаз может быть больше или равно N²-1 -

необходимое для произвольного преобразования. Заявляемый в изобретении эффект устойчивости к ошибкам при этом сохраняется, однако глубина схемы увеличивается и, как следствие, потери на распространение повышаются. Ограничения на число слоев схемы М зависят как от возможностей используемой технологии для реализации схем

- ⁵ (см. ниже), так и от допустимого уровня потерь. Оценка максимального значения М представлена на примере реализации преобразователя в виде интегрально оптической схемы. Предполагая, что один слой вносит потери δ (в дБ), общие потери в схеме из М слоев есть δМ. В частности, если один слой вносит 10⁻³ дБ (для оценки мы использовали значения минимально возможного на сегодняшний день уровень погонных потерь в
- ¹⁰ интегральных оптических схемах ~0.1 дБ/см и длину слоя L=100 мкм), то зависимость потерь в схеме из М слоев есть 10⁻³ М дБ. Полагая допустимые потери в схеме на уровне

10 дБ, общее число слоев в схеме может быть $M \sim 10^4$.

- Предложенный способ создания универсального многоканального преобразования можно реализовать в системах с пространственным кодированием. В таких системах в качестве канала может выступать волновод или пространственная мода свободного пространства. В оптике волноводные структуры, формирующие схемы с пространственным кодированием, могут быть выполнены в виде интегральной оптической схемы, которую можно изготовить по планарной технологии литографии
- (L. Chrostowski, M. Hochberg, Silicon Photonics design: from devices to systems // Cambridge Univ. Press, 2015) или по трехмерной технологии, например, лазерной печатью (I.V. Dyakonov et al., Reconfigurable photonics on a glass chip // Phys. Rev. Applied, vol. 10, 044048 (2018)). В качестве элементов фазового сдвига в таких схемах могут применяться 1) термо-оптические элементы, которые меняют набег фазы участка волновода при
- 25 пропускании через них электрического тока за счет его нагрева, 2) электро-оптические элементы, которые меняют набег фазы при приложении напряжения за счет изменения концентрации электронов и/или дырок на участке волновода, и 3) пьезо-оптического элемента, изменяющего набег фазы распространяющегося в волноводе сигнала под действием электрического напряжения, которое вызывает напряжение механическое на участке волновода, что меняет его показатель преломления.
- Эли участке волновода, что меняет его показатель преломления. Заявляемое изобретение может быть также реализовано в физических системах с частотным кодированием каналов. В таком случае в качестве дискретных каналов выступают неперекрывающиеся частотные линии спектра электромагнитного поля. Каждой из линии ставят в соответствие номер канала, таким образом, набор из N линий
- 35 образует множество каналов всего преобразования. В качестве амплитуды сигнала, распространяющегося по частотному каналу, выступает комплексная амплитуда соответствующей частотной компоненты. Стоит заметить, что использование частотной кодировки каналов многоканального преобразования позволяет использовать для передачи и преобразования один пространственный канал - один волновод, одну
- 40 пространственную моду свободного пространства. Для осуществления взаимодействия между частотными каналами предложено использовать набор преобразований модуляции частотных каналов, которая наводит на каналы зависящую от времени фазу, профиль которой можно подбирать, и формирователь импульсов.
- Наиболее широкое распространение многоканальные системы с частотными 45 каналами получили в оптике, в частности, в квантовой. Заявляемое изобретение может быть реализовано по аналогии с системой, описанной в работе H.-H. Lu et al., Electrooptic frequency beam splitters and fritters for high-fidelity photonic quantum information processing // Phys. Rev. Lett., vol. 120, 030502, 2018), в которой продемонстрировано на практике

осуществление преобразований Адамара для одного частотного канала и преобразование триттера для трех частотных каналов. Для реализации изобретения может быть использовано оптоволоконное оборудование, которое является стандартным для телекоммуникационного диапазона длин волн в районе 1550 нм. Для

- ⁵ осуществления модуляции могут быть применены электрооптические модуляторы и формирователь импульсов, которые являются стандартными компонентами телекоммуникационного оборудования. Помимо оптоволоконных телекоммуникационных компонент, весь их набор можно также реализовать с помощью интегрально-оптических схем, т.к. все необходимые элементы были
- продемонстрированы. Например, интегрально-оптический формировать импульсов продемонстрирован в работе К.А. McKinzie et al. InP integrated pulse shaper with 48 channel, 50 GHz spacing amplitude and phase control, 2017 IEEE Photonics Conference (IPC), 197-198 (2017). Интегрально-оптические модуляторы на протяжении долгого времени являются доступными для изготовления в интегрально-оптическом исполнении (К. Ogawa,
- 15 Integrated silicon-based optical modulators: 100Gb/s and beyond, SPIE Press, ISBN: 9781510625815, 2019).

Заявляемое изобретение может быть также реализовано в системах, использующих временное кодирование. В этом случае, в качестве дискретных каналов выступают неперекрывающиеся между собой временные отрезки. Каждому временному отрезку

- 20 ставят в соответствие номер канала. Импульс электромагнитного сигнала, находящийся во временном отрезке с некоторым индексом m, интерпретируется как сигнал в канале m, а амплитуда импульса интерпретируется как амплитуда сигнала в канале с этим индексом. Как и в случае с частотным кодированием, при временном кодировании используют одиночный пространственный канал, который может представлять собой
- 25 волновод или пространственную моду свободного пространства. Для осуществления взаимодействия между каналами в этой схеме необходимы линии задержки и динамически варьируемые делители.

В частности заявляемое изобретение может быть реализовано по аналогии с многоканальной схемой с временным кодированием, представленной в работе K.R.

- 30 Motes et al., Scalable boson sampling with time-bin encoding using a loop-based architecture // Phys. Rev. A, vol. 113, 120501 (2014), в которой предложена универсальная многоканальная схема, которая основана на волоконных петлях задержки и реконфигурируемых двухканальных делителей - это стандартные компоненты, находящие применение, например, в телекоммуникации. Многоканальные блоки
- 35 преобразования могут быть реализованы с помощью нескольких вложенных друг в друга петель задержки и постоянных делителей, тогда как варьируемые сдвиги фаз можно реализовать с помощью динамически программируемых фазовых модуляторов или фазовых сдвигов.

Для нахождения набора значений варьируемых фаз, которые оптимальным образом 40 (т.е. с наибольшим соответствием (1.4)) реализуют заданную передаточную матрицу U₀, можно воспользоваться оптимизационной процедурой, включающую множество итераций. В рамках этой процедуры на каждой итерации находят глобальный максимум параметра соответствия (1.4), полученный из экспериментальных измерений. На каждой итерации производят восстановление передаточной матрицы U устройства

⁴⁵ преобразователя, которая зависит от набора фаз {*φ*_j⁽ⁿ⁾}, установленных на данной итерации с индексом п. В рамках этого способа для заданного U₀ на вход(-ы) преобразователя подают один или несколько электромагнитных сигналов с заданными

мощностью и разностями фаз. Подавая поочередно на каждый входной канал по один пробный сигнал и измеряя мощности на всех выходных каналах, можно получить информацию об абсолютных значениях передаточной матрицы преобразователя |U_{jk}|.

Для извлечения информации об аргументах элементов передаточной матрицы U

- ⁵ используют два пробных сигнала, которые подают на два входных канала преобразователя. Варьируя разность фаз между входными сигналами и измеряя мощности на входных каналах, можно восстановить информацию об аргументах элементов U_{ik}. Детальное описание экспериментальной процедуры восстановления
- ¹⁰ передаточной матрицы многоканальных преобразователей приведено, например, в paбote M. Tillmann, C. Schmidt, P. Walther, «On unitary reconstruction of linear optical networks)), Journal of Optics, vol. 18, 114002 (2016). По восстановленной в эксперименте матрице U рассчитывают параметр соответствия (1.4) - F_n . Используя полученное

значение F_n производят изменения значений фаз $\{ {m arphi}_i^{(n+1)} \}$, которые используют на

¹⁵ следующей (n+1-й по счету) итерации. Итерационная процедура прекращается на итерации к как только полученная последовательность F_k сходится к глобальному максимуму.

Примеры конкретного выполнения

Для реализации предложенного в изобретения преобразователя была использована технология фемтосекундной лазерной печати, которая позволяет создать как планарные, так и трехмерные интегрально-оптические схемы. С помощью этой технологии были реализованы оптические схемы с числом каналов N=4 и N=5.

Для создания интегрального чипа оптической схемы использовалась кварцевая заготовка в форме прямоугольника с длиной 10 см, шириной 5 см и толщиной 5 мм. Для осуществления 4-канальных перестраиваемых интерферометров на первом этапе в объеме заготовки создавались пассивные волноводные структуры, формирующие статическую оптическую схему, состоящую из статических делителей, соединяющих и подводящих волноводов, позволяющие вводить и выходить оптические сигналы через

- 30 торцы чипа. На фиг. 6 представлены оптические схемы интерферометров, изготовленные согласно заявляемому изобретению (а) и известному из уровня техники способу Клементса (б). Последние были необходимы для проведения сравнения устойчивости к ошибкам известного прототипа с заявляемым. Рабочий принцип элементов фазового сдвига, с помощью которых осуществлялась реконфигурация интерферометров, основан из известно прототира с заявляемы от разления и проведения и проведения и проведения с двига.
- на использовании термооптического эффекта. Элементы фазового сдвига представляли собой металлические полоски (10), располагаемые над участками волноводов. При подаче напряжения на полоски происходил их нагрев и нагрев близлежащего объема стекла, включающего отрезок волновода, в результате чего коэффициент преломления стекла в этой области менялся, вызывая таким образом фазовый сдвиг относительно
- не нагретых участков. Детали технологии изготовления можно найти в работе I.V.
 Dyakonov et al., Reconfigurable photonics on a glass chip // Phys. Rev. Applied, vol. 10, 044048 (2018).

Статическим делителем в схемах интерферометров выступал направленный делитель, сформированный парой подведенных близко друг к другу волноводов, который

45 изображен на фиг. 6в. Параметры деления θ_j в таких элементах задаются областью связи близко расположенных участков волноводов. В эксперименте задание конкретных значений θ_j осуществлялось выставлением длины области связи L при фиксированном для всех делителей расстоянии между волноводами. Для экспериментальной демонстрации устойчивости предложенного преобразователя к когерентным ошибкам были изготовлены три перестраиваемых интерферометра с параметрами θ=5π/18+α (5π/18 радиан=50 градусов), соответствующие трем значениям а: 0, +15 градусов и -15 градусов. Также для сравнения были изготовлены три перестраиваемых интерферометра с дизайном Клементса с θ=π/4+α, со значениями а как и для предлагаемого преобразователя.

Для исследования качества преобразований полученных интерферометров проводились следующая последовательность экспериментов. Генерировалась случайным образом унитарная матрица U₀ размером 4×4, которую необходимы было реализовать

- ¹⁰ в изготовленных схемах с помощью подстройки варьируемых элементов фазовых сдвигов. Для этой цели при заданных значениях фазовых сдвигов (определяемых напряжениями на соответствующих нагревательных элементах) на каждый из входов интерферометра по-отдельности подавался оптический сигнал одинаковой мощности и проводились измерения мощности сигналов на выходе каждого канала. Таким образом
- ¹⁵ определялись модули элементов передаточной матрицы при заданных значениях фазового сдвига. Для определения аргументов комплексных элементов на вход подавались два сигнала одинаковой мощности с варьируемой задержкой фаз между ними. Процедура с парными входными сигналами повторялась для набора 6 различных пар входных каналов. Данные действия позволяли восстанавливать передаточную
- ²⁰ матрицу U₁ перестраиваемой схемы. Используя информацию о матрицах, рассчитывался параметр (1.4), значение которого служило значением целевой функции в алгоритме оптимизации. Алгоритм оптимизации корректировал значения фазовых сдвигов в соответствии с полученном на предыдущем шаге значением F. Описанная процедура
- ²⁵ повторялась итеративно ~500 раз до полного схождения в глобальный максимум, который характеризуется значением параметра (1.4) равный единице (насколько это позволял интерферометр). Детали используемого алгоритма, позволяющего восстанавливать передаточные матрицы многоканальных схем, можно найти в статье M. Tillmann, C. Schmidt, P. Walther, «On unitary reconstruction of linear optical networks», Journal of Optics, vol. 18, 114002 (2016).
- ³⁰ С целью получения верных оценок для статистических средних параметра соответствия (1.4) по всему пространству доступных передаточных матриц в эксперименте реализовывался набор из 100 случайно сгенерированных передаточных матриц. В Таблице 1 представлены результаты средних значений параметра F, полученные в экспериментах с изготовленными интерферометрами с разным уровнем
- ³⁵ когерентных ошибок α. Результаты свидетельствуют о повышенной устойчивости интерферометра, созданного по предложенному в изобретении способу, по сравнению со сравниваемым интерферометром, изготовленном по известному до этого способу.

40

5

Таблица 1. Средние значения параметра соответствия (1.4), полученные в эксперименте с 4-канальными оптическими интерферометрами с преднамеренно внесёнными когерентными ошибками, для набора из 100 случайной сгенерированных передаточных матриц.

Значение lpha (градусы)	200000000	F		
	Интерферометр, созданный предложенным в настоящем изобретении способом	Интерферометр Клементса, созданный по известному		
	0	0.997	0.992	
	-15	0.993	0.975	
	+15	0.995	0.96	

15

20

10

5

Для экспериментальной демонстрации устойчивости предложенного типа преобразователя к некогерентным ошибкам были изготовлены по три перестраиваемых 4-канальных интерферометра - по заявляемой схеме универсального преобразователя и по известной схеме преобразователя Клементса. Как и для интерферометров с когерентными ошибками параметры статических делителей в заявляемом

интерферометре θ_j=5π/18+α_j, тогда как для интерферометров Клементса θ_j=π/4+α_j. Параметр ошибок α_j каждого из статических делителей получался в результате генерации случайных чисел из распределения (1.10) с заданным уровнем ошибок Δ. При изготовлении интерферометров соответствующие ошибки вносились с помощью выбора

²⁵ соответствующей длины L направленных делителей (см. фиг. 6).

Таблица 2. Средние значения параметра соответствия (1.4), полученные в эксперименте с 4-канальными оптическими интерферометрами с преднамеренно внесёнными некогерентными ошибками, для набора из 100 случайной сгенерированных передаточных матриц.

Уровень некогерентных ошибок Δ (градусы)	F		
	Интерферометр, созданный предложенным в настоящем изобретении способом	Интерферометр созданный по способу	Клементса, известному
0	0.998	0.995	
5	0.995	0.984	
15	0.991	0.866	

40

35

30

Последовательность действий для получения среднего значения параметра соответствия преобразований оптических интерферометров полностью совпадает с действиями, описанными выше для экспериментов с интерферометрами с когерентными ошибками. Полученные результаты представлены в Таблице 2.

45 Аналогично 4-х канальному преобразователю были изготовлены 5-ти канальные преобразователи с разным типом и уровнем ошибок. В таблице 3 и таблице 4 представлены результаты экспериментов с преобразователями, в которые были внесены

когерентные и некогерентные ошибки, соответственно.

Таблица 3. Средние значения параметра соответствия (1.4), полученные в эксперименте с 5-канальными оптическими интерферометрами с преднамеренно внесёнными когерентными ошибками, для набора из 100 случайной сгенерированных передаточных матриц.

Значение α (градусы)	F		
	Интерферометр, созданный предложенным в настоящем изобретении способом	Интерферометр Клементса, созданный по известному способу	
0	0.999	0.994	
15	0.000	0.07	

15

20

35

10

5

 +15
 0.999
 0.97

 +15
 0.998
 0.985

Таблица 4. Средние значения параметра соответствия (1.4), полученные в эксперименте с 5-канальными оптическими интерферометрами с преднамеренно внесёнными некогерентными ошибками, для набора из 100 случайной сгенерированных передаточных матриц.

	Уровень	F		
25	ошибок Δ (градусы)	Интерферометр, созданный предложенным в настоящем изобретении способом	Интерферометр Клементса созданный по известному способу	, Y
	0	0.998	0.996	
30	5	0.998	0.974	
	15	0.995	0.89	

Как видно из результатов, представленных в Таблицах 1-4, заявляемые преобразователи проявляют более высокую устойчивость к ошибкам по сравнению с известными решениями.

(57) Формула изобретения

1. Линейный преобразователь электромагнитных сигналов, включающий N каналов, образованных N входами и N выходами линейного преобразователя и M каскадно соединенных модулей, где M≥N+1, каждый из которых включает N входов, N выходов

- ⁴⁰ и двухканальные блоки преобразования, выполненные с возможностью преобразования сигналов из входов модуля в выходы модуля и расположенные параллельно внутри модуля, и включающие по одному статическому делителю, содержащему два входа делителя и два выхода делителя, и одному элементу сдвига фазы, расположенному на одном из входов или на одном из выходов статического делителя; входы первого модуля 45
- ⁴⁵ являются входами линейного преобразователя, выходы модуля М являются выходами линейного преобразователя;

при этом в случае нечетного N каждый модуль содержит (N-1)/2 блоков преобразования, а также один свободный канал, выполненный с возможностью передачи

Стр.: 22

сигнала из входа модуля в его соответствующий выход без преобразования и расположенный либо перед первым блоком преобразования, если в соседнем слое он расположен после последнего блока преобразования, либо после последнего блока преобразования, если в соседнем слое он расположен перед первым блоком преобразования.

5 преобразования;

в случае четного N модули характеризуются чередующимся количеством блоков преобразования: модуль содержит либо N/2 блоков преобразования, если соседний модуль содержит (N/2)-1 блоков преобразования, либо модуль содержит (N/2)-1 блоков преобразования, пибо преобразования, если соседний модуль содержит N/2 блоков преобразования; при этом

- модуль, содержащий (N/2)-1 блоков преобразования, также включает 2 свободных канала модуля, выполненных с возможностью передачи сигнала из входа модуля в его соответствующий выход без преобразования, один из которых соединяет первый вход модуля с первым выходом модуля, а другой соединяет N-й вход модуля с N-м выходом модуля;
- 15 где статические делители для блоков преобразования выбраны произвольными с коэффициентом пропускания по мощности от 1/2 до 4/5, а элементы сдвига фазы выбраны с возможностью реализации линейного преобразования, заданного заранее с помощью определенной передаточной матрицы.
- Линейный преобразователь по п. 1, характеризующийся тем, что взаимное
 расположение и соединение элемента сдвига фазы и статического делителя в блоке преобразования выбрано идентичным для всех блоков преобразования N-канального линейного преобразователя.

3. Линейный преобразователь по п. 1, характеризующийся наличием N-1 дополнительных элементов сдвига фазы, расположенных по одному на входах блоков

- 25 преобразования первого модуля, если элемент сдвига фазы в соответствующем блоке преобразования расположен на выходе статического делителя, или на выходах блоков преобразования последнего модуля, если элемент сдвига фазы в соответствующем блоке преобразования расположен на входе статического делителя.
- 4. Линейный преобразователь по п. 1, характеризующийся тем, что канал 2 канального блока преобразования образован входом и выходом блока преобразования, а входы и выходы статического делителя связаны с соответствующими входами и выходами блока преобразования.

5. Линейный преобразователь по п. 1, характеризующийся тем, что M=2N.

35

40





Фиг. 1



Обозначения:

- канал

- θ элемент статического делителя с коэффициентом деления, характеризуемым параметром θ
 - φ ↓ - элемента фазового сдвига на угол φ





Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5





Фиг. 7