РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



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

2 723 970⁽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

G02B 6/00 (2020.01); G02F 1/00 (2020.01)

 (21)(22) Заявка: 2019127402, 30.08.2019 (24) Дата начала отсчета срока действия патента: 30.08.2019 Дата регистрации: 18.06.2020 	 (72) Автор(ы): Сайгин Михаил Юрьевич (RU), Дьяконов Иван Викторович (RU), Страупе Станислав Сергеевич (RU), Кондратьев Илья Викторович (RU), Кулик Сергей Павлович (RU)
Приоритет(ы): (22) Дата подачи заявки: 30.08.2019 (45) Опубликовано: 18.06.2020 Бюл. № 17 Адрес для переписки: 119234, Москва, ул. Ломоносовский проспект, 27, стр. 1, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Фонд "Национальное интеллектуальное развитие"	 (73) Патентообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова" (МГУ) (RU) (56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2621605 C2, 06.06.2017. RU 2381628 C2, 10.02.2010. US 6507733 B1, 14.01.2003. CN 109477938 A, 15.03.2019.

(54) N-КАНАЛЬНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ И СПОСОБ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНОГО ЛИНЕЙНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

(57) Реферат:

C

0

~

ດ

က

2

N

2

R

Изобретение относится к способам создания устройств, осуществляющих линейные преобразования электромагнитных сигналов между большим числом каналов. Достигаемым техническим результатом изобретения является уменьшение плотности расположения перестраиваемых элементов, приводящих к снижению влияния нежелательных перекрестных взаимодействий. Изобретение представляет собой линейный преобразователь N-канальный электромагнитных сигналов. гле N>2. включающий N каналов для сигналов и М блоков смешения сигналов, каждый из которых включает N входов и N выходов и характеризуется передаточной матрицей комплексными с

элементами, по модулю меньшими 1, при этом блоки смешения соединены последовательно, и, по меньшей мере, на одном входе и на одном выходе, по меньшей мере, одного блока смешения размещен элемент сдвига фазы, при этом блоки смешения выполнены с передаточными матрицами, для которых отношение, по крайней двух соответствующих мере, элементов передаточных матриц, по крайней мере, двух блоков смешения отлично от 1, а на входе, по крайней мере, одного блока смешения количество элементов сдвига фазы не превышает N-2 и способ преобразования сигнала, используемый преобразователем. 2 н. и 13 з.п. ф-лы, 1 табл., 12 ил.

Σ

N





U 2723970 C1

R

RUSSIAN FEDERATION







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

FEDERAL SERVICE FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC

G02B 6/00 (2020.01); G02F 1/00 (2020.01)

 (21)(22) Application: 2019127402, 30.08.2019 (24) Effective date for property rights: 30.08.2019 Registration date: 18.06.2020 	 (72) Inventor(s): Sajgin Mikhail Yurevich (RU), Dyakonov Ivan Viktorovich (RU), Straupe Stanislav Sergeevich (RU), Kondratev Ilya Viktorovich (RU), Kulik Sergej Pavlovich (RU) 	
 Priority: (22) Date of filing: 30.08.2019 (45) Date of publication: 18.06.2020 Bull. № 17 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) 	2723970

(54) N-CHANNEL LINEAR CONVERTER OF ELECTROMAGNETIC SIGNALS AND METHOD OF REALIZING MULTICHANNEL LINEAR CONVERSION

(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: invention relates to methods of creating devices which perform linear conversion of electromagnetic signals between a large number of channels. Invention is an N-channel linear converter of electromagnetic signals, where N>2, comprising N channels for signals and M signal mixing units, each of which includes N inputs and N outputs and is characterized by a transfer matrix with complex elements of modulus less than 1, wherein mixing units are connected in series, and at least one input and one output of at least one mixing unit comprises a phase

shift element, wherein the mixing units are made with transfer matrices, for which the ratio of at least two corresponding elements of the transfer matrices of at least two mixing units is different from 1, and at the input of at least one mixing unit the number of phase shift elements does not exceed N-2 and the signal conversion method used by the converter.

EFFECT: reduced density of arrangement of tunable elements, leading to reduced effect of undesirable crossinteractions.

15 cl, 1 tbl, 12 dwg

0





U 2723970 C1

2

RU 2723970C1

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 при изготовлении отдельных элементов

- 5 коммуникационных и вычислительных сетей, обслуживающих большое число абонентов и вычислительных узлов; эти сети могут быть как классическими, так и квантовыми. Также изобретение может быть использовано для создания устройств анализа и синтеза пространственных многомодовых световых полей.
 - Уровень техники
- Линейные преобразования электромагнитных сигналов используют в фундаментальных исследованиях, и они также незаменимы при создании прикладных устройств. Они играют большую роль в реализациях многих прикладных подходов по обработке, получению и передаче информации. Линейные преобразования между двумя сигналами могут быть реализованы с помощью одного делителя и двух элементов
- *15* фазового сдвига основных базовых операций, для которых существуют практические реализации в разных типах систем.

Из уровня техники известен способ реализации линейных преобразований между двумя каналами, конфигурацию которого можно менять произвольным образом, таким образом, получая все возможные преобразования данной размерности. Такой способ

- 20 использует двухканальный интерферометр, состоящий из двух последовательно соединенных сбалансированных статических элементов делителей и двух элементов фазовых сдвигов, которые можно варьировать для получения нужного преобразования (М. Рэк с соавторами, «Экспериментальная реализация любого дискретного унитарного оператора» // Phys. Rev. Lett. T. 73, №1, C. 58 (1994)).
- 25 Недостатком такого способа является высокая чувствительность качества преобразования к отклонениям статических элементов делителей от сбалансированных значений, типично возникающих при реализации этих элементов на практике. Результатом отклонений является невозможность осуществить любое двухканальное преобразование, что связано с потерей универсальности устройства.
- 30 Известен универсальный способ осуществления многоканальных линейных преобразований с помощью объединения друг с другом двухканальных преобразований, раскрытый в работах М. Рэка с соавторами, «Экспериментальная реализация любого дискретного унитарного оператора» // Phys. Rev. Lett. Т. 73, №1, С. 58 (1994) и В.Р. Клеменса с соавторами, «Оптимальный дизайн универсальных многопортовых
- 35 интерферометров» // Орtica, Т. 3, №12, С. 1460 (2016). Этот способ позволяет конструировать произвольные линейные преобразования, соединяя друг с другом двухканальные преобразования, упомянутые выше, и надлежащим выбором параметров этих двухканальных преобразований. Суть способа заключается в соединении друг за другом множества слоев преобразований, каждый из которых содержит множество
- 40 двухканальных преобразований, действующих независимо друг от друга. Фиг. 1 иллюстрирует схему планарного массива для случаев четного числа каналов N(а) и нечетного числа каналов N(6), предложенного в работе В.Р. Клеменса с соавторами, «Оптимальный дизайн универсальных многопортовых интерферометров» // Optica, Т. 3, №12, С. 1460 (2016). В схеме можно выделить N слоев (1), каждый из которых составлен
- 45 из нескольких 2-канальных блоков (2), осуществляющих одновременное преобразование. Число 2-канальных блоков (2) в каждом слое зависит от общего числа каналов схемы N и от порядкового индекса слоя. При четном N, число 2-канальных блоков в каждом слое одинаково и равно (N-1)/2. При нечетном N, число 2-канальных блоков в слое

RU 2723970 C1

изменяется от слоя к слою и может принимать значения N/2 и N/2-1. Общее число блоков, составляющих многоканальную схему, во всех случаях равно N(N-1)/2. 2-канальный блок, использующийся в таких многоканальных схемах, изображен на фиг. 2 и представляет собой интерферометр Маха-Цандера, состоящий из двух статических сбалансированных делителей и двух варьируемых фазовых сдвигов - θ и φ.

- 5 сбалансированных делителей и двух варьируемых фазовых сдвигов θ и φ. 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 нельзя реализовать произвольные преобразования заданной размерности. На фиг. 3 представлена схема неидеального 2-канального элемента интерферометра Маха-Цандера со статическими делителями, характеризуемыми параметрами разбалансировки α и β.

Известен способ уменьшения влияния ошибок, возникающих в двухканальных преобразованиях, на качество преобразования, предложенный в работе Д.А.Б. Миллера, «Идеальная оптика с неидеальными компонентами» // Optica, Т. 2, №8, С. 747(2015). Такой способ основан на модификации двухканальных интерферометров, из которых составлены оптические схемы, сконструированными известными способами. При модификации в каждом из двухканальных интерферометров заменяют статические

20 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 способа 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.

Известен многоканальный линейный преобразователь и способ осуществления произвольного многоканального линейного преобразования, предложенный в работе

- 30 произвольного многоканального линейного преобразования, предложенный в работе J. Zhou, J. Wu, Q. Hu, «Tunable arbitrary unitary transformer based on multiple sections of multicore fibers with phase control)) // Optics Express, vol. 26, No. 3, 3020 (2018). Способ основан на использовании многоканальных блоков постоянных преобразований, представляющих собой области связанных друг с другом близко расположенных
- *з*⁵ волноводов, и слоев варьируемых фазовых набегов, располагаемых между блоками, перед первым и после последнего из них.

Недостатком известного решения является необходимость одновременного управления большим числом фаз в каждом фазовом слое, что приводит к необходимости размещения варьируемых фазовых элементов во всех каналах преобразования

40 параллельно друг другу. В результате этого геометрия схемы требует плотного размещения большого числа элементов фазовых сдвигов близко друг к другу, приводя к повышению нежелательного взаимного взаимодействия. Еще одним недостатком известного способа является сложность в изготовлении варьируемых фазовых элементов в трехмерных волноводных схемах, т.к. это предполагает размещение этих элементов под внешним слоем волноводов.

Известен способ осуществления многоканального линейного оптического преобразования, основанный на распространении многомодовых оптических полей через свободное пространство и их преобразование с помощью фазовых модуляторов

света, предложенный в работе Yu. Wang et al. ((Programmable holographic technique for implementing unitary and nonunitary transformations)) // Phys. Rev. A, vol. 95, 033827 (2017).

Недостатком этого способа является низкая эффективность многоканального преобразования, выражающаяся, в частности, в высоком уровне потерь. Также *медостатком является его непрактичность при реализации.*

Известен способ осуществления многоканального линейного преобразования, позволяющий сортировать оптические сигналы, поступающие на вход преобразования, в выходные каналы в соответствии с угловым моментом входного сигнала, который предложен в изобретении CN 106301595 В. Такой способ использует каскад

многоканальных преобразований, каждый этап которого может состоять из блоков преобразований меньшей размерности, действующих одновременно и независимо друг от друга.

Недостатком этого изобретения является возможность осуществления только узкого класса многоканальных преобразований, что делает его неспособным выполнить произвольное многоканальное преобразование.

Наиболее близким к заявляемому техническому решению является устройство и способ реализации произвольных преобразований, предложенный в работе R. Tang, T. Tanemura, Y. Nakano, Integrated reconfigurable unitary optical mode converter using MMI couplers, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 29, No 12, 971-974 (2017), который основан

20 на реализации постоянных многоканальных блоков преобразований в виде планарных интегральных оптических схем и варьируемых набегов фаз, располагаемых параллельно между постоянными блоками, а также перед первым и после последнего из них. Недостатком такого способа является использование только определенного вида

постоянных многоканальных блоков в виде планарных интегральных оптических

- 25 многомодовых интерференционных элементов и варьируемых слоев фаз в количестве на один меньше общего числа каналов преобразования. В результате фазовых ограничений геометрия схемы требует плотного размещения большого числа элементов фазовых сдвигов близко друг к другу, приводя к повышению нежелательного взаимного взаимодействия.
- 30 Технической проблемой, решаемой заявляемым изобретением, является высокая плотность расположения элементов фазового сдвига, которая приводит к негативному эффекту взаимного воздействия между близко расположенными элементами в системах на основе пространственного кодирования каналов. В таких системах большое число элементов фазового сдвига приводит к высокой концентрации выделяемой мощности,
- ³⁵ что налагает высокие требования на ее устойчивость к тепловым и/или электрическим воздействиям. В случае систем на основе временного или частотного кодирования каналов решаемой технической проблемой является необходимость одновременного использования большого числа компонентов, реализующих фазовые сдвиги, а также необходимую высокую частоту их последовательного использования, что
- 40 проблематично при большом числе каналов.

Раскрытие изобретения

15

Техническим результатом изобретения является уменьшение плотности расположения варьируемых фазовых элементов в схемах с пространственным кодированием и за счет этого снижение взаимного воздействия, которое возникает в виде теплового,

45 электрического воздействия или воздействия механических напряжений между близко расположенными элементами при использовании для осуществления фазовых сдвигов термо-оптического, электро-оптическиго или пьезо-электрического эффектов, соответственно. Помимо этого, снижение плотности элементов позволяет снизить максимальные концентрации тепловой и/или электрической энергии и/или энергии механических напряжений в схеме. Данное обстоятельство позволяет увеличить максимально возможное число каналов линейного преобразователя, которое можно осуществить используемой технологией. Следствием снижения концентрации энергии

в схеме является также увеличение срока службы устройств многоканальных линейных 5 преобразователей.

В системах с временным и частотным кодированием заявляемое решение позволяет уменьшить число одновременно работающих компонентов фазовых сдвигов, что дает возможность уменьшить их используемое число. Помимо этого, для таких систем

- изобретение позволяет снизить частоты работы компонентов фазовых сдвигов, снижая 10 тем самым предъявляемые к ним требования и увеличивая максимально возможное число каналов линейного преобразователя, которое можно осуществить используемой технологией. Следствием снижения частоты использования оптических элементов является также увеличение срока службы устройств многоканальных линейных
- преобразователей. 15

Технический результат достигается за счет использования N-канального линейного преобразователя электромагнитных сигналов, где N>2, включающий N каналов для сигналов и М блоков смешения сигналов, каждый из которых включает N входов и N выходов и характеризуется передаточной матрицей (или матрицей рассеяния) с

- комплексными элементами, по модулю меньшими 1, при этом блоки смешения 20 соединены последовательно, и, по меньшей мере, на одном входе и на одном выходе, по меньшей мере, одного блока смешения размещен элемент сдвига фазы, при этом блоки смешения выполнены с передаточными матрицами, для которых отношение, по крайней мере, двух соответствующих элементов передаточных матриц, по крайней
- мере, двух блоков смешения отлично от 1, а на входе, по крайней мере, одного блока 25 смешения количество элементов сдвига фазы не превышает N-2.

Количество каналов и блоков смешения могут быть выбраны исходя их соотношения:

N≤M≤N²-2. Количество каналов и блоков смешения в одном из возможных вариантов

осуществления N-канального линейного преобразователя составляет N²-2, при этом 30 все сдвиги фаз размещены на одном канале.

Блок смешения может быть выбран с передаточной матрицей, в которой сумма квадратов модулей элементов в каждом столбце не превышает 1 и в каждой строке не превышает 1. В качестве передаточной матрицы может быть выбрана унитарная

матрица. Наилучший результат достигается, когда по крайней мере в одной 35 передаточной матрице столбцы попарно ортогональны и строки попарно ортогональны. Блоки смешения могут характеризоваться передаточными матрицами со случайно распределенными элементами.

N-канальный линейный преобразователь может быть выполнен в виде планарной или объемной интегральной оптической схемы, где в качестве каналов выбраны 10 оптические волноводы, а в качестве элементов сдвига фазы выбраны термооптические или электрооптические или пьезооптические фазосдвигающие элементы. В качестве каналов могут быть использованы частотные или временные каналы. Каналы могут быть реализованы в виде волноводов или приемо-передающих устройств в свободном

пространстве. В качестве волноводов могут быть использованы оптоволокно, или 45 коаксиальные кабели, или полые волноводы.

Технический результат достигается также в способе выполнения N-канального линейного преобразования, заданного матрицей линейного преобразования U₀, над электромагнитным сигналом, включающий:

А. Выбор М блоков смешения, характеризующихся матрицами передачи с элементами,

модуль которых лежит в интервале от $\frac{1}{N}$ до $\sqrt{\frac{N-1}{N}}$;

В. Последовательное соединение выбранных блоков в произвольном порядке;

С. Выбор элементов сдвига фазы в количестве, не превышающим (N-2)(M+1);

D. Размещение элементов сдвига фазы на входе и/или выходе блоков смешения на одном или нескольких каналах (не более N-2), выбранных произвольным образом;

Е. Определение передаточной матрицы U₁ каскадного соединения блоков смешения с элементами сдвига фазы;

5

10

25

F. Определение значений сдвигов фаз на каждом из элементов сдвига фазы посредством вычисления координат глобального максимума функции

$$F = \left| \frac{Tr(U_0^*U_1)}{\sqrt{Tr(U_0^*U_0)Tr(U_1^*U_1)}} \right|^2,$$

требующего определение передаточной матрицы U₁ из шага Е несколько раз, где Tr

(А) обозначает операцию взятия следа матрицы А;

G. Обеспечение сдвига фаз на элементах сдвига фазы полученного каскадного 20 соединения блоков смешения в соответствии с полученными значениями;

Н. Подачу электромагнитного сигнала на вход полученного каскадного соединения с заданными значениями сдвига фаз с получением на выходе преобразованного электромагнитного сигнала в соответствии с заданной матрицей линейного преобразования U₀

Передаточную матрицу U_1 , каскадного соединения блоков смешения с элементами сдвига фазы определяют по формуле:

 $U_{1} = \Phi^{(M+1)} V_{M} \Phi^{(M)} V_{M-1} \cdot \dots \cdot V_{2} \Phi^{(2)} V_{1} \Phi^{(1)},$

где V_m - передаточная матрица блока с индексом m, $\Phi^{(m)}$ - передаточная матрица 30 фазового слоя с индексом m, имеющая диагональный вид

 $\Phi^{(m)} = diag(\exp(i\varphi_1^{(m)}), \exp(i\varphi_2^{(m)}), ..., \exp(i\varphi_N^{(m)})),$ где $\varphi_j^{(m)}$ - фаза, внесенная в j-й канал слоя с индексом т.

Передаточную матрицу U₁ каскадного соединения блоков смешения с элементами 35 сдвига фазы определяют путем измерения - подачи тестовых сигналов на вход каскадного соединения и измерения сигналов на выходе.

Сдвиг фаз на элементах сдвига фазы обеспечивают посредством подачи управляющего напряжения на элементы сдвига фазы, вызывающего локальное 40 изменение показателя преломления в области расположения этого элемента за счет термооптического, электрооптического или пьезоэлектрического эффекта.

Таким образом, технический результат достигается за счет снижения числа элементов сдвигов фазы, располагаемых в одном фазовом слое, и произвольного их расположения в нем, что сопровождается уменьшением плотности выделяемой мощности в схеме с

45 пространственным способом кодирования каналов или частоты использования активных элементов в схемах с временным и частотным кодированием. Технический результат достигается также за счет возможности выбора статических блоков смешения из большого набора, характеризуемого бесконечным набором передаточных матриц,

используя критерий минимума потерь или другой характеристики. Краткое описание чертежей На фиг. 1-6 приведены поясняющие уровень техники изображения и схемы, а именно:

- На фиг. 1 изображены известные из уровня техники планарные схемы универсального ⁵ многоканального линейного преобразования для случая N каналов, состоящие из N слоев (1), каждый из которых состоит из независимых блоков преобразований (2), осуществляющих преобразования между двумя каналами. На фиг. 1а представлена схема с четным числом каналов N, а на фиг. 1б - с нечетным числом каналов N. Позициями на чертежах обозначены: 1 - слой схемы многоканального линейного
- преобразования, 2 блок двухканального преобразования из слоя 1.
 На фиг. 2 схематически представлен вариант реализации блока преобразования

(элементарного двухканального) 2(а). На фиг. 2(б) представлен блок преобразования, включающий делитель 4, характеризуемый угловым параметром θ , который определяет коэффициент деления, и элемент 3 фазового сдвига ϕ в одном из каналов. На фиг. 2 (в)

15 представлен известный из уровня техники вариант реализации реконфигурируемого преобразования с использованием интерферометра (5), использующий два постоянных элемента сбалансированного делителя 4 и два варьируемых элемента фазового сдвига 3, с помощью которых можно управлять параметрами преобразования θ и φ.

На фиг. 3 представлен известный из уровня техники вариант реализации блока преобразования в виде реконфигурируемого интерферометра Маха-Цандера (5) с постоянными элементами делителей 4, являющегося элементом (2) многоканальных схем, созданным известными методами. В реальной ситуации элементы делителей не являются сбалансированными, как требуют известные методы. Степень дисбаланса

- этих элементов обозначены параметрами α и β.
 25 На фиг. 4 представлены гистограммы распределения степени соответствия преобразования 8-канального интерферометра, построенного по известной схеме, изображенной на фиг. 1, составленного из двухканальных блоков 6 с внесенными дисбалансами. Гистограммы получены с помощью генерации 1000 произвольных
- унитарных матриц и численного поиска параметров варьируемых фаз у каждого из 2-30 канальных блоков, которые отвечают максимальной мере соответствия. Использовались 3 модели дисбалансов (см. текст далее).

На фиг. 5 изображена известная многоканальная оптическая схема, использующая в качестве постоянных многоканальных блоков смешения области связи между близко расположенными волноводами (6) и фазовые слои (7), содержащие N-1 фаз, где N - число каналов преобразования.

На фиг. 6 изображена архитектура многоканальных схем, использующая постоянные блоки смешения V_i (8), в общем случае осуществляющие преобразования между всеми

N каналами, и слои сдвигов фаз $\Phi^{(m)}$ (7), которые могут варьировать N-1 фаз.

35

40 Постоянные многоканальные блоки и варьируемые фазовые слои располагаются попеременно.

На фиг. 7-12 приведены рисунки, поясняющие заявляемое изобретения:

На фиг. 7 изображена архитектура многоканальных схем, использующая постоянные блоки смешения V_i (8), в общем случае осуществляющие преобразования между всеми

⁴⁵ N каналами, и слои сдвигов фаз Ф^(m) (9), которые могут варьировать N-2 фаз. Постоянные многоканальные блоки и варьируемые фазовые слои располагаются попеременно.

На фиг. 8 изображена многоканальная схема с постоянными блоками смешения 8,

в которой число варьируемых фаз в фазовом слое (10) и их размещение в каждом слое может быть произвольным. Число многоканальных блоков 8 в этой схеме равно N+K, а число фазовых слоев N+K+1, где К определяется числом варьируемых фазовых параметров, необходимых для универсальности схемы.

5 На фиг. 9 изображена многоканальная схема с постоянными блоками 8, в которой число варьируемых фаз в каждом фазовом слое (11) равно 1, а число таких слоев N² - 1.

На фиг. 10 представлены гистограммы распределения параметра качества преобразования интерферометров, изображенных на фиг. 5, составленных из постоянных

¹⁰ многоканальных блоков, взятых случайным образом. Гистограммы получены численной оптимизацией варьируемых фазовых слоев для набора из 1000 случайных унитарных матриц, для каждой из которых постоянные блоки генерировались также случайным образом. Число каналов преобразований выбиралось N=10 (а) и N=30 (б).

На фиг. 11 представлены гистограммы параметра качества преобразования ¹⁵ многоканального интерферометра, изображенного на фиг. 9 для N=10 и N=20 с числом

фазовых слоев N² - 1.

20

На фиг. 12 а, б и в представлены три типа схем перестраиваемых трехканальных интерферометров, соответствующие общим схемам, изображенным на фиг. 7, фиг. 8 и фиг. 9, соответственно, которые были реализованы авторами методом фемтосекундной лазерной печати.

Осуществление изобретения

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

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

Каналом преобразования называют любую степень свободы электромагнитного поля, которой можно однозначно поставить в соответствие независимый сигнал,

- 30 характеризуемый комплексной амплитудой. Для большей ясности выделим отдельно следующие степени свободы, которые могут являться каналом преобразования: 1) 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
- ³⁵ пространственным каналом может выступать пространственная одна мода многомодового волновода или одна мода свободного пространства. В этом случае 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.
- 40 Набор неперекрывающихся спектральных линий образует множество каналов. 3) Временной степенью свободы является заданный отрезок времени, характеризуемый 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
- 45 обозначенных степеней свободы электромагнитного поля используется для кодирования информации, говорят о пространственном, частотном и временном каналах.

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

⁵ преобразования, a_k^(out) - комплексные амплитуды на выходе преобразования. Здесь индексы ј и k принимают значения от 1 до N. B(1.1) комплексные коэффициенты U_{kj} формируют матрицу U размерности N×N, которая и определяет конкретное линейное преобразование. Выражение (1.1) может быть представлено в матричном виде:

 $\vec{a}^{(oul)} = U\vec{a}^{(in)} \tag{1.2}$

где $\vec{a}^{(m)}$ и $\vec{a}^{(oul)}$ - столбцы, составленные из амплитуд сигналов на входе и выходе преобразования, соответственно. Число каналов преобразования N характеризует размерность преобразования. Изобретение относится к случаю, когда число каналов преобразования N \geq 3.

15

10

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)).

N-канальным линейным преобразователем или линейным N-канальным устройством или линейным N-канальным интерферометром называют любое устройство, осуществляющее линейное N-канальное преобразование электромагнитных сигналов.

²⁰ Многоканальным блоком смешения преобразования называют N-канальный статический элемент в составе N-канального интерферометра, матрица которого имеет не менее N-1 ненулевых элементов в каждой строке и столбце. Два последовательно соединенных друг с другом многоканальных блока смешения, между которыми нет ни одного варьируемого элемента фазового сдвига, в рамках настоящего изобретения считают одним блоком смешения.

Слоем фазового преобразования или просто фазовым слоем называют N-канальное преобразование в составе N-канального интерферометра, матрица которого имеет диагональный вид:

30

$$\Phi(\vec{\varphi}) = diag(e^{i\varphi_1}, e^{i\varphi_2}, ..., e^{i\varphi_N}) = \begin{pmatrix} \exp(i\varphi_1) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \exp(i\varphi_2) & 0 \\ \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & \exp(i\varphi_N) \end{pmatrix},$$
(1.3)

т.е. он осуществляет независимый сдвиг фазы на величину ф_j в канале с индексом j.
 При этом не все N каналов фазового слоя могут содержать сдвиги фаз. В таком случае в диагональных элементах в (1.3), соответствующих каналам без фаз, стоят единицы.

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

40 справедливы соотношения $\sum_{j=1}^{N} U_{jm}^{*} U_{jn} = \delta_{mn}$. В матричном виде они принимают вид: $UU^{*} = U^{*}U = I$, (1.4)

где «*» означает операцию комплексного сопряжения матрицы, I - единичная матрица. 45 Из условия (1.4) 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 (1.4) не выполняется. Вместо этого справедливо используют более общее представление $\sum_{j=1}^{N} U_{jm}^{*} U_{jn} \leq 1.$

5

Для сравнения двух преобразований, которые описываются матрицами U_1 и U_2 , используют следующую меру соответствия:

$$F^{(loss)} = \left| \frac{Tr(U_1^*U_2)}{\sqrt{Tr(U_1^*U_1)Tr(U_2^*U_2)}} \right|^2,$$
(1.5)

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 F^(loss)=0. В дальнейшем будут рассматриваться случаи реализации унитарных передаточных матриц в схемах интерферометров. Более общие случаи не унитарных

15 матриц (линейные преобразования с потерями) могут рассматриваться как схемы, являющиеся частью более крупных унитарных схем.

При использовании меры соответствия (1.5) идеальное значение $F^{(loss)}=1$ можно получить для двух матриц, которые, вообще говоря, не равны друг другу $U_1 \neq U_2$, но

- 20 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 он испытывает одинаковые потери, т.е. данная ситуация отвечает сбалансированным
- ²⁵ потерям. Наличие фазы у t приводит к нечувствительности меры (1.5) к общей фазе преобразования. Таким образом (1.5) 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).</p>

В изобретении предложена иная схема универсального многоканального линейного *преобразования, которая отличается от известных схем, представленных на фиг. 5 и*

фиг. 6, тем, что число варьируемых элементов фаз в фазовом слое может быть любым, а их размещение по каналам может быть произвольным. Помимо этого, многоканальные блоки смешения можно выбирать из широкого класса, характеризуемого большим числом возможных передаточных матриц. Последнее обстоятельство позволяет

35 выбирать в качестве блоков смешения, исходя из соображений минимума потерь в этих элементах или оптимума другой важной характеристики.

Схематические представления возможных конфигураций схем, предложенных в настоящем изобретении, изображены на фиг. 7, фиг. 8 и фиг. 9. В отличие от схем, изображенных на фиг. 5 и фиг. 6, число фаз в каждом из фазовых слоев может быть меньше N-1, поэтому число постоянных многоканальных блоков (блоков смешения)

```
40 меньше N-1, по больше, чем N.
```

На фиг. 7 изображен вариант схемы многоканального преобразования, использующий в общем случае отличающиеся друг от друга блоки смешения V_m и N-2 фазы в каждом фазовом слое (9). На фиг. 8 изображен вариант схемы многоканального преобразования,

⁴⁵ в котором число фаз в каждом фазовом слое (10) может быть разным, как и их размещение в этом слое. На фиг. 9 изображена схема многоканального преобразования, использующая только одну фазу в каждом фазовом слое (11), таким образом, число блоков смешения в этом случае максимально возможное для заданного числа каналов N и равно N^2 - 2. Во всех этих вариантах предложенной архитектуры схем универсальных многоканальных интерферометров общее число параметров схемы N^2 - 1 необходимое для реализации произвольного унитарного преобразования достигается увеличением числа постоянных многоканальных блоков и фазовых слоев.

Передаточная матрица N-канального преобразования в данном случае принимает следующий вид:

$$U_{1} = \Phi^{(N+1+K)} V_{N+K} \Phi^{(N+K)} V_{N+K-1} \cdot \dots \cdot \Phi^{(N+1)} V_{N} \Phi^{(N)} \cdot \dots \cdot V_{2} \Phi^{(2)} V_{1} \Phi^{(1)},$$
(1.6)

10

5

- где V_m передаточная матрица блока смешения с индексом m, $\Phi^{(m)}$ матрица преобразования фазового слоя с индексом m, в которую входят фазовые элементы в количестве меньше, чем N-1. На фиг. 8 и в формуле (1.6) целое число K характеризует насколько полученная схема глубже (т.е. длиннее/состоит из большего числа слоев), чем схемы, представленные на фиг. 5 и фиг. 6.
- 15 Заметим, что матрица преобразования N-канального интерферометра, сконструированного согласно известным методам, изображенным на фиг. 5 и фиг. 6, выглядит следующим образом:

$$U_{1} = \Phi^{(N+1)} V_{N} \Phi^{(N)} V_{N-1} \cdot \dots \cdot V_{2} \Phi^{(2)} V_{1} \Phi^{(1)}, \qquad (1.7)$$

²⁰ где диагональная матрица каждого фазового слоя $\Phi^{(m)}$ содержит в точности N-1 фазовых сдвигов, а число блоков смешения в схеме в точности равно N.

Выбор преобразований постоянных многоканальных блоков V_m определяет возможность осуществления произвольных матриц. Действительно, не все V_m

- 25 предоставляют универсальность многоканальной схеме (1.6). Например, если все V_m имеют вид единичной матрицы, то никакого взаимодействия между каналами в (1.6) не будет и вся схема будет выполнять фазовое преобразование с диагональной матрицей diag (exp(iφ₁), exp(iφ₂),...,exp(iφ_N)).
- Ниже представлено обоснование возможности использования более широкого класса линейных преобразований при выборе многоканальных блоков смешения, чем было использовано в других методах создания универсальных многоканальных интерферометров.

Для нахождения значений перестраиваемых фаз $\varphi_j^{(m)}$, которые при заданных

- ³⁵ передаточных матрицах блоков смешения $V_m (m = \overline{1, M}, \text{где M}=N+K)$ и размещении этих фаз в фазовых слоях наилучшим образом реализуют заданную матрицу U₀, использовался численный алгоритм, который находил максимум функции (1.5) с матрицей (1.6) и U₂=U₀ в пространстве всех фаз $\varphi_j^{(m)}$. При заданной размерности многоканальной схемы N генерировались унитарные матрицы U₀ случайным образом
- ⁴⁰ 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) в количестве 1000 штук. Для каждой матрицы U₀, которую необходимо было

реализовать в многоканальной схеме с помощью подбора надлежащих фаз $\varphi_i^{(m)}$,

⁴⁵ генерировались N матрицы V_m постоянных блоков также случайно согласно мере Хаара. Далее наборы фаз φ_j⁽ⁿ⁾ находились с помощью численного алгоритма поиска глобального максимума функции (1.5).

На фиг. 10 приведены полученные при численном анализе гистограммы меры соответствия (1.6), которые иллюстрируют качество преобразования многоканального интерферометра, схема которого изображена на фиг. 6 для случая случайных передаточных матриц V_m. Полученные гистограммы нарисованы для схем с числом

- ⁵ каналов N=10 (а) и N=30 (б). Распределения, изображенные на одном графике, отличаются числом фазовых слоев (и блоков постоянных преобразований), из которых состоит схема. Для случая N=10 число фазовых слоев - 2, 5, 8 и 11. Соответствующее число параметров схемы при этом - 18, 45, 56 и 99. Для случая N=30 число фазовых слоев - 7, 15, 26 и 31, что отвечает числу параметров 203, 435, 754 и 899, соответственно.
- ¹⁰ Как видно из графиков, если число слоев в схеме меньше N+1, то параметр качества преобразования не достигает идеального значения F=1. Однако если число слоев

достигает N+1, необходимого для полного числа параметров N²-1 качество преобразования схемы обеспечивается с высокой точностью F=1 (все полученные значения в численных расчетах F>0.99999).

¹⁵ Аналогичное численных расчетах 120.99999). Аналогичное численное исследование проводилось и для всех вариантов оптических схем интерферометров изображенных на фиг. 7, фиг. 8 и фиг. 9. На фиг. 11 представлен график, на котором приведены гистограммы параметра соответствия (1.5) для интерферометра с одной фазой в фазовом слое (фиг. 9) для размерностей N=10 и N=20.

 Как видно из графика, для большей доли матриц параметр соответствия F>0.999.
 Зависимости параметра соответствия (1.5) для двух других вариантов схем имеют аналогичный характер. Следует заметить, что полученные результаты с F<1 связаны с конечной точностью реализации численного алгоритма оптимизации.

Произвольные унитарные линейные преобразования, использующие постоянные многоканальные блоки преобразований могут быть реализованы в соответствии со схемой, представленной на фиг. 5. N-канальная схема состоит из постоянных многоканальных блоков 6, описываемых передаточными матрицами $V_m (m = \overline{1, N})$ и в общем случае осуществляющих преобразование между N каналами. В рассматриваемых многоканальных схемах постоянный блок преобразования может состоять из нескольких

³⁰ соединенных последовательно постоянных блоков, области соединения которых не содержат варьируемых фаз.

Заявляемое решение позволяет реализовать произвольные многоканальные линейнооптические преобразования, представленные на схеме фиг. 5, которые отличаются конкретным видом передаточных матриц постоянных блоков $V_m(m = \overline{1, N})$. В таких схемах каждый из фазовых слоев содержит в точности N-1 варьируемых фаз.

Частный случай блоков смешения 8 представляет собой передаточные матрицы 6, которые можно реализовать в виде создания областей сближения сердцевин близко друг к другу, таким образом, что между ними возникает связь (J. Zhou, J. Wu, Q. Hu, «Tunable arbitrary unitary transformer based on multiple sections of multicore fibers with phase control)) // Optics Express, vol. 26, No. 3, 3020 (2018)).

Взаимодействие амплитудами полей в области близко расположенных волноводов, которое имеет некоторую длину L может быть описано системой уравнений:

$$\frac{d\vec{a}}{dz} = iM\vec{a} , \qquad (1.8)$$

35

40

45

где $\vec{a}(z) = \begin{pmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \\ \vdots \\ a_N(z) \end{pmatrix}$ - вектор амплитуд полей в точке с координатой z, амплитуды

5

 $\vec{a}_0 = \vec{a}(0)$ отвечают значениям в начале области взаимодействия, М - матрица, описывающая связь между волноводами, конкретный вид которой зависит от размещения волноводов друг относительно друга. Например, при круговом размещении со связью между ближайшими соседями матрица М выглядит следующим образом:

10

	(0	C_{12}	0	•••	C_{1N}	
	C ₁₂	0	C_{23}		0	
M =	0	C_{23}	0		0	(1.9)
	1			·.	C_{N-1N}	
	C_{1N}	0	0	C_{N-1N}	0)	

15

где $C_{\rm mn}$ - коэффициенты связи между каналами-волноводами с индексами m и n. Таким образом, преобразование k-го многоканального блока можно записать в виде $V_{k}^{(cp)} = \exp(-iML_{k})$ и при заданной конфигурации взаимного расположения волноводов определяется длиной области связи L_k (k=1,2,...,N). Изменение конфигурации матрицы 20 преобразования всего интерферометра осуществляют с помощью слоев преобразований $\Phi^{(m)} = diag\left(\exp(i\varphi_1^{(m)}), \exp(i\varphi_2^{(m)}), ..., \exp(i\varphi_{N-1}^{(m)}), 1\right) \ (m=1,2,...,N+1), \ pachonaraembix между$

постоянными блоками $V_{\iota}^{(cp)}$.

- 25 Заявляемое решение позволяет устранять недостатки известных методов, связанные с необходимостью управления большим набором фаз в одном слое, минимальное число которых равно N-1, где N - число каналов преобразования которое трудно реализовать на практике.. В частности, при использовании кодирования в пространственные каналы (моды волноводов или открытого пространства) при трехмерном размещении каналов-
- 30 волноводов (см. J. Zhou, J. Wu, Q. Hu, «Tunable arbitrary unitary transformer based on multiple sections of multicore fibers with phase control» // Optics Express, vol. 26, No. 3, 3020, 2018), необходимо управлять сдвигами фаз каждого из каналов в отдельности, для чего необходимо размещать соответствующий элемент (термооптический, электрооптический или пьезооптический) в глубине схемы за внешним слоем волноводов. Данный
- 35 недостаток в заявляемом решении в одном из вариантов осуществления преодолевается посредством приведения геометрии размещения каналов к планарной геометрии в областях фазовых слоев, предоставляя таким образом доступ к каждому каналу, или же разнесение в пространстве волноводов. При этом данный вариант реализации сопряжен с увеличением размера схемы й при больших значениях N.
- 40 Другим преимуществом заявляемого изобретения является преодоление недостатка существующих аналогов, использующих схемы с N-1 элементами сдвигов фаз в одном слое, связанного с негативным влиянием кросс-взаимодействия между ними, при котором близко расположенные элементы сдвигов фаз не полностью изолированы друг от друга, что приводит к внесению сдвигов в канал от соседних с ним элементов. Данный
- 45 недостаток преодолн в заявленмом решении посредством разнесения в пространстве элементов сдвигов фаз.

Произвольные многоканальные линейно-оптические преобразования, могут быть реализованы в планарных интегральных оптических структурах (см. R. Tang, T. Tanemura, Y. Nakano, Integrated reconfigurable unitary optical mode converter using MMI couplers, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 29, No 12, 971-974, 2017), с блоками смешения и варьируемых набегов фаз, располагаемых параллельно между постоянными блоками, а также перед первым и после последнего из них. В интегрально-оптическом исполнении

- 5 в качестве блоков постоянных многоканальных преобразований могут быть использованы многомодовые интерференционные элементы. Принцип действия таких блоков основан на интерференции между несколькими сигналами, которая протекает в волноводной структуре.
- Заявляемое техническое решение при использовании схемы с планарными многомодовыми интерференционными блоками также позволяет устранить описанные выше недостатки, присущие оптической системе, основанной на волокнах со многими сердцевинами, с использованием N-1 элементов сдвигов фаз в одном слое Заявляемое решение позволяет располагать элементы сдвигов фаз с исключением негативного влияния кросс-взаимодействия между ними.
- 15 Таким образом, 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
- 20 оптической схемы, которую можно изготовить по планарное 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)
- 25 термо-оптические элементы, которые меняют набег фазы участка волновода при 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
- *30* действием электрического напряжения, которое вызывает напряжение механическое на 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.

- 35 Каждой из линии ставят в соответствие номер канала, таким образом, набор из N линий 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
- 40 передачи и преобразования один пространственный канал один волновод, одну 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.
- 45 Наиболее широкое распространение многоканальные системы с частотными 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

RU 2723970C1

// 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

- ⁵ стандартным для телекоммуникационного диапазона длин волн в районе 1550 нм. Для 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
- *15* доступными для изготовления в интегрально-оптическом исполнении (K. Ogawa, 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

- 20 неперекрывающиеся между собой временные отрезки. Каждому временному отрезку ставят в соответствие номер канала. Импульс электромагнитного сигнала, находящийся во временном отрезке с некоторым индексом т, 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
- 25 используют одиночный пространственный канал, который может представлять собой 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

- 30 многоканальной схемой с временным кодированием, представленной в работе К.R. 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,
- ³⁵ находящие применение, например, в телекоммуникации. Многоканальные блоки преобразования могут быть реализованы с помощью нескольких вложенных друг в друга петель задержки и постоянных делителей, тогда как варьируемые набеги фаз можно реализовать с помощью динамически программируемых фазовых модуляторов или фазовых сдвигов.
- 40 Примеры конкретного выполнения

Для реализации предложенного изобретения авторами была использована технология фемтосекундной лазерной печати, которая позволяет создавать как планарные, так и трехмерные интегрально-оптические схемы. С помощью этой технологии были реализованы оптические схемы с числом каналов N=3. Для создания интегрального

45 чипа использовалась кварцевая заготовка в форме прямоугольника с длиной 10 см, шириной 5 см и толщиной 5 мм. На первом этапе в объеме заготовки создавались волноводные структуры, формирующие статическую оптическую схему, содержащую блоки смешения и участки волноводов, которые будут реализовывать фазовые элементы.

RU 2723970 C1

Блоки смешения реализовывались в виде трех попеременно соединенных элементов направленных делителей (см. фиг. 12). Коэффициент деления по мощности каждого делителя определялся выбором длины области взаимодействия и задавался случайным образом на этапе изготовления и лежал в интервале от 1/3 до 2/3.

⁵ Для изменения конфигурации оптических схем был использован традиционный способ, основанный на термо-оптическом эффекте - изменении показателя преломления вещества под действием температурных изменений. Для этой цели на поверхность кварцевого чипа над участками волноводов, в которых необходимо менять набег фазы сигналов, наносились металлические резистивные нагреватели. Под действием разности

10 потенциалов резистивные нагреватели разогревались. 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).

Было создано и экспериментально изучено три типа схем. На фиг. 12 схематически представлены изготовленные интегрально-оптические схемы: на фиг. 12а представлена

- 15 схема с 2 элементами сдвигов фаз в каждом фазовом слое и 3 блоками смешения; на фиг. 126 приведена схема с разным числом фаз в фазовом слое (1 или 2 фазы) и 5 блоками смешения; на фиг. 12в изображена схема с 1 фазой в каждом фазовом слое и 8 блоками смешения. Каждый тип схем был изготовлен в количестве 5 штук и над всеми ими проводилась одинаковая серия экспериментов. При этом фазовые элементы,
- 20 изображенные не выходных каналах на фиг. 12 не изготавливались, т.к. в конечном итоге измерялись мощности выходных сигналов.

Для проверки универсальности изготовленных интегрально-оптических схем и других их характеристик, имеющих отношение к заявляемому результату, проводились следующая последовательность экспериментов. Генерировалась случайным образом унитарная матрица U₀ размером 3×3, которую необходимы было реализовать в

- 25 унитарная матрица U₀ размером 3×3, которую необходимы было реализовать 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
- ³⁰ измерения мощности сигналов на выходе каждого канала. Таким образом 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 всего набора 3 пар входных каналов. Данные
- ³⁵ действия позволяли восстанавливать передаточную матрицу U₁, перестраиваемой схемы. Используя информацию о матрицах, рассчитывался параметр (1.5), значение которого служило значением целевой функции в алгоритме оптимизации. Алгоритм оптимизации корректировал значения фазовых сдвигов. Описанная процедура повторялась итеративно ~1000 раз до полного схождения в глобальный максимум,
- ⁴⁰ который характеризуется значением параметра (1.5) равный единице. 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).
- ⁴⁵ В таблице приведены средние значения (по 5 реализациям каждого типа схемы и 100 случайных матриц U₀) параметра (1.5) достигнутые в эксперименте, а также средние значения электрической мощности, приходящейся на один элемент фазового сдвига.

тип схемы	среднее F	средняя мощность (Вт)	
a	0.995	0.55	
б	0.987	0.49	
В	0.991	0.47	

5

Как видно из таблицы, во всех случаях были получены высокие значения параметра F, что говорит об универсальности предложенных схем. Также заметим, что со снижением плотности расположения элементов сдвигов фаз (от а до в) средняя мощность, приходящаяся на один фазовых сдвиг, снижается, что может быть следствием уменьшения взаимного воздействия. Помимо этого, очевидно, что рассеиваемая тепловая мощность, приходящаяся на единицу площади схемы, уменьшается.

(57) Формула изобретения

15 1. N-канальный линейный преобразователь электромагнитных сигналов, где N>2, включающий N каналов для сигналов и M блоков смешения сигналов, каждый из которых включает N входов и N выходов и характеризуется передаточной матрицей (или матрицей рассеяния) с комплексными элементами, по модулю меньшими 1, при этом блоки смешения соединены последовательно, и, по меньшей мере, на одном входе

20 этом олоки смешения соединены последовательно, и, по меньшей мере, на одном входе и на одном выходе, по меньшей мере, одного блока смешения размещен элемент сдвига фазы, отличающийся тем, что блоки смешения выполнены с передаточными матрицами, для которых отношение, по крайней мере, двух соответствующих элементов передаточных матриц, по крайней мере, двух блоков смешения отлично от 1, а на входе, по крайней мере, одного блока смешения количество элементов сдвига фазы не

²⁵ превышает N-2.

2. N-канальный линейный преобразователь по п. 1, отличающийся тем, что количество

каналов и блоков смешения выбрано исходя из соотношения: N≤M≤N²-2. 3. N-канальный линейный преобразователь по п. 1, отличающийся тем, что количество

³⁰ каналов и блоков смешения составляет N²-2, при этом все сдвиги фаз размещены на одном канале.

4. N-канальный линейный преобразователь по п. 1, отличающийся тем, что блок смешения выбран с передаточной матрицей, в которой сумма квадратов модулей элементов в каждом столбце не превышает 1 и в каждой строке не превышает 1.

³⁵ 5. N-канальный линейный преобразователь по п. 1, отличающийся тем, что в качестве передаточной матрицы выбрана унитарная матрица.

6. N-канальный линейный преобразователь по п. 4, отличающийся тем, что, по крайней мере, в одной передаточной матрице столбцы попарно ортогональны и строки попарно ортогональны.

⁴⁰ 7. N-канальный линейный преобразователь по п. 1, отличающийся тем, что блоки смешения характеризуются передаточными матрицами со случайно распределенными элементами.

8. N-канальный линейный преобразователь по п. 1, отличающийся тем, что он выполнен в виде планарной или объемной интегральной оптической схемы, где в

⁴⁵ качестве каналов выбраны оптические волноводы, а в качестве элементов сдвига фазы выбраны термооптические или электрооптические или пьезооптические фазосдвигающие элементы.

9. N-канальный линейный преобразователь по п. 1, отличающийся тем, что в качестве

RU 2723970 C1

каналов выбраны частотные или временные каналы.

10. N-канальный линейный преобразователь по п. 9, отличающийся тем, что каналы реализованы в виде волноводов или приемо-передающих устройств в свободном пространстве.

5 11. N-канальный линейный преобразователь по п. 10, отличающийся тем, что в качестве волноводов использованы оптоволокно, или коаксиальные кабели, или полые волноводы.

12. Способ выполнения N-канального линейного преобразования, заданного матрицей линейного преобразования U₀, над электромагнитным сигналом, включающий:

¹⁰ а. выбор М блоков смешения, характеризующихся матрицами передачи с элементами,

модуль которых лежит в интервале от $\frac{1}{N}$ до $\sqrt{\frac{N-1}{N}}$;

b. последовательное соединение выбранных блоков в произвольном порядке;

с. выбор элементов сдвига фазы в количестве, не превышающем (N-2)(M+1);

15

d. размещение элементов сдвига фазы на входе и/или выходе блоков смешения на одном или нескольких каналах (не более N-2), выбранных произвольным образом;

е. определение элементов передаточной матрицы U₁, каскадного соединения блоков смешения с элементами сдвига фазы;

f. определение значений сдвигов фаз на каждом из элементов сдвига фазы посредством

20

$$F = \left| \frac{Tr(U_0^*U_1)}{\sqrt{Tr(U_0^*U_0)Tr(U_1^*U_1)}} \right|^2,$$

25

40

требующего определение передаточной матрицы U_1 из шага E несколько раз, где Tr

(А) обозначает операцию взятия следа матрицы А;

вычисления координат глобального максимума функции

g. обеспечение сдвига фаз на элементах сдвига фазы полученного каскадного соединения блоков смешения в соответствии с полученными значениями;

30 h. подачу электромагнитного сигнала на вход полученного каскадного соединения с заданными значениями сдвига фаз с получением на выходе преобразованного электромагнитного сигнала в соответствии с заданной матрицей линейного преобразования U0.

13. Способ по п. 12, отличающийся тем, что передаточную матрицу U₁ каскадного ³⁵ соединения блоков смешения с элементами сдвига фазы определяют по формуле:

$$U_1 = \Phi^{(M+1)} V_M \Phi^{(M)} V_{M-1} \cdot \dots \cdot V_2 \Phi^{(2)} V_1 \Phi^{(1)},$$

где V_m - передаточная матрица блока с индексом m, $\Phi^{(m)}$ - передаточная матрица фазового слоя с индексом m, имеющая диагональный вид

 $\Phi^{(m)} = diag(\exp(i\varphi_1^{(m)}), \exp(i\varphi_2^{(m)}), ..., \exp(i\varphi_N^{(m)})),$ где $\varphi_j^{(m)}$ - фаза, внесенная в j-й канал слоя с индексом m.

14. Способ по п. 12, отличающийся тем, что передаточную матрицу U1 каскадного соединения блоков смешения с элементами сдвига фазы определяют путем измерения

45 - подачи тестовых сигналов на вход каскадного соединения и измерения сигналов на выходе.

15. Способ по п. 12, отличающийся тем, что сдвиг фаз на элементах сдвига фазы обеспечивают посредством подачи управляющего напряжения на элементы сдвига

RU 2723970 C1

фазы, вызывающего локальное изменение показателя преломления в области расположения этого элемента за счет термооптического, электрооптического или пьезоэлектрического эффекта.







Фиг. 4



Фиг. 5







Фиг. 7



Фиг. 8



Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11



Фиг. 12