


УДК 004.724.2 + 004.272.43

 10.25209/2079-3316-2024-15-2-3-19

Распределенная арифметика в оптическом канале на основе фотонных коммутаторов

Виктор Сергеевич **Подлазов**[✉]

Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

[✉] podlazov@ipu.ru

Аннотация. В статье рассматривается фотонная сеть с распределенным управлением, состоящая из нескольких узлов, связанных общим каналом, в котором за время передачи одного числа выполняется единая операция над числами, которые параллельно передаются всеми узлами. Рассматриваются такие операции как суммирование или нахождение максимума (минимума) чисел, передаваемых последовательно по двоичным разрядам. Предполагается, что разряды чисел передаются парафазными оптическими сигналами, а общий канал строится из фотонных коммутаторов этих сигналов.

Ключевые слова и фразы: общий канал, распределенное управление, фотонный коммутатор, фотонные мультиплексор и демультиплексор, вычисление в общем канале, последовательные числа

Для цитирования: Подлазов В. С. *Распределенная арифметика в оптическом канале на основе фотонных коммутаторов* // Программные системы: теория и приложения. 2024. Т. 15. № 2(61). С. 3–19. https://psta.psiras.ru/read/psta2024_2_3-19.pdf

Введение

Развитие компьютерной элементной базы привело к появлению проектов фотонных компьютеров и фотонных элементов для них [1, 2]. Продолжением этой тенденции стало развитие проектов систем на основе локальных сетей, в которых данные передаются вместе с командами, образуя spatial data flow структуры [3]. Их частным случаем являются структуры с распределенной параллельной обработкой данных во время и в процессе их передачи по сети – *вычисления в общем канале* (ВОК) [4].

При ВОК выполняется групповая операция над множеством чисел, передаваемых узлами параллельно, за время передачи по общему каналу сети одного числа (результата операции). При этом эта операция выполняется без промежуточных буферизаций промежуточных значений результата. Последнее свойство обеспечивает превосходство ВОК по быстродействию над традиционным сетевыми реализациям распределенных вычислений, которые требуют последовательных передач нескольких чисел и последовательного выполнения нескольких операций над ними.

Операция ВОК выполняется на аппаратном уровне за время пересылки по каналу сети только одного числа – формирующегося результата операции. Эта операция выполняется без тактовых задержек в функциональных блоках при узлах сети, состоящих из нескольких фотонных коммутаторов выбранного вида.

Традиционное выполнение распределенных операций складывается из нескольких последовательных передач чисел между узлами сети и арифметических операций над ними. Конкретно: распределенная операция над N числами может быть выполнена одним из двух крайних способов. Во-первых, это последовательная пересылка $(N - 1)$ числа с промежуточными $(N - 1)$ операцией над ними. Во-вторых, это парные передачи чисел, выполняемые параллельно за $\log_2 N$ последовательных их передач и за такое же количество операций в узлах. При этом указанные действия выполняются программным образом, что многократно увеличивает время их исполнения.

Ниже рассматривается реализация операций ВОК в оптическом канале с фотонными коммутаторами для использования таких широко известных его преимуществ как малое энергопотребление, высокая помехозащищенность и более высокие частоты передачи, связанные с независимостью параметров оптических сигналов от свойств окружающей среды.

Далее рассматриваются реализации операций ВОК на вынесенных из узлов функциональных блоках, составленных из выбранных фотонных

коммутаторов, и способ выполнения операций в них, который не использует обратной связи с узлами в процессе выполнения операций.

Для выполнения операций ВОК значение каждой логической переменной передается по каналу в парафазном виде, т.е. по двум линиям 0 и 1. Значение 0 передается сигналом в линии 0 при отсутствии сигнала в линии 1, а значение 1 – сигналом в линии 1 при отсутствии сигнала в линии 0. Линии 0 и 1 проходят через конвертер C_i каждого i -го узла сети (рисунок 1). Каждый конвертер выполняет унарную операцию O_i преобразования входной переменной x_i в выходную логическую переменную $y_i = O_i x_i$.

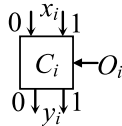
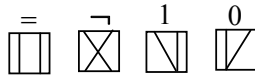


Рисунок 1. Конвертер фотонных переменных

Операция O_i выполняет следующие преобразования: повторения $y_i = x_i$ (« \Rightarrow »), отрицания $y_i = \neg x_i$ (« \neg »), перевода в значение $y_i = 0$ (« 0 ») и перевода в значение $y_i = 1$ (« 1 »). Состояния конвертера C_i при выполнении операции O_i представлены на рисунке 2.



$O_i: \{ \langle \Rightarrow \rangle, \langle \neg \rangle, \langle 1 \rangle, \langle 0 \rangle \}$

Рисунок 2. Состояния операции O_i конвертера C_i

Операция O_i в свою очередь задается по значению управляющей логической переменной u_i , выдаваемой i -м узлом сети. В результате конвертер C_i выполняет бинарную операцию $y_i = x_i \aleph u_i$, которая может быть любой из 16 бинарных логических операций. В таблицах 1а– 2б приводятся таблицы истинности ряда используемых логических операций.

ТАБЛИЦА 1. Таблицы истинности операций \vee и \wedge

(а) функция «И» ($\aleph = \wedge$)

(б) функция «ИЛИ» ($\aleph = \vee$)

x	u	O	y
0	0	«0»	0
0	1	« \Rightarrow »	0
1	0	«0»	0
1	1	« \Rightarrow »	1

x	u	O	y
0	0	« \Rightarrow »	0
0	1	«1»	1
1	0	« \Rightarrow »	1
1	1	«1»	1

ТАБЛИЦА 2. Таблицы истинности операций \oplus и ∇ (a) функция «Сложение по mod2» ($\text{N} = \oplus$)

x	u	O	y
0	0	«=»	0
0	1	«¬»	1
1	0	«=»	1
1	1	«¬»	0

(b) функция «Начальный запуск» ($\text{N} = \nabla$)

x	u	O	y
0	0	«=»	0
0	1	«0»	0
1	0	«=»	1
1	1	«0»	0

При линейном размещении N узлов сети и последовательном размещении их конвертеров можно за время передачи по общему каналу одного числа образовать в нем сумму размещенных по узлам чисел или выделить из них максимальное число [4]. Для этого числа передаются как двоичные числа последовательно по разрядам. Для суммирования они передаются младшими разрядами вперед и используются операции \oplus и \wedge для образования двоичной суммы и значения переноса в следующий разряд соответственно. Для нахождения максимального числа все числа передаются старшими разрядами вперед, и в ней используется операция \vee .

Представленная схема позволяет выполнять арифметические и логические операции над значениями, представленными фотонными сигналами, на базе коммутаторов без использования специальных фотонных арифметико-логических устройств типа [1]. Саму сеть можно образовать из двух ветвей (восходящей и нисходящей) с подключением каждого узла к обеим ветвям. Восходящая ветвь используется для образования результата, а нисходящая ветвь – для оповещения всех о нем. Можно также использовать кольцевую сегментированную сеть с двукратной передачей чисел – для образования результата и оповещения о нем.

Сеть для ВОК можно построить из оптоэлектронных переключателей на базе интерферометров Маха-Зандера [5]. Их более практичная форма представлена в [6]. Из таких переключателей можно собрать оптоэлектронный коммутатор 4×4 , в котором передача данных через коммутатор ведется оптическими сигналами, а управление коммутатором осуществляется узлом сети электронным образом [7]. В настоящее время быстродействие таких переключателей доходит до 100 Гбит/сек [8] и они имеют достаточно высокую плотность упаковки [9].

Однако построение ВОК на оптоэлектронных переключателях имеет своим недостатком необходимость преобразования значений разрядов между оптической и электронной формами в процессе выработки управляющих воздействий в каждом разряде на основе результата из предыдущего разряда. Этот недостаток, во-первых: снижает быстродействие фотонных коммутаторов до быстродействия электронных коммутаторов и, во-вторых, увеличивает их энергопотребление.

В статье рассматривается возможность выполнения операций ВОК на базе разных фотонных элементов без использования внешних оптоэлектронных преобразований. В качестве базовых фотонных элементов можно использовать фотонные демультиплексор $D 1 \times 4$ и мультиплексор $M 4 \times 1$, собираемые из нескольких слоев тонких пленок с электрооптическими или магнитооптическими свойствами (рисунок 3) [10, 11].

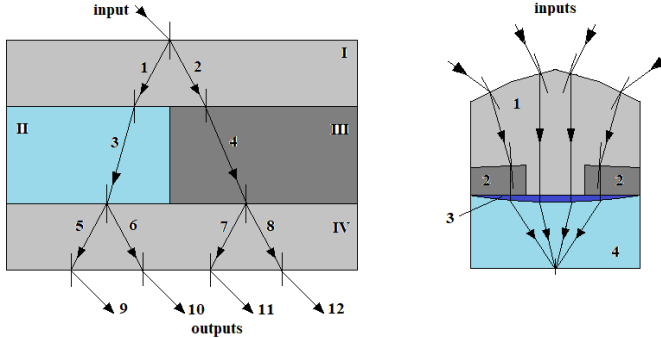


Рисунок 3. Структура коммутационных ячеек (демультиплексор и мультиплексор), основанных на оптически прозрачных метаматериальных и ферритовых пленках

Особенность их применения состоит в том, что для управления коммутацией используется два оптических сигнала на разных частотах λ_1 и λ_2 . В демультиплексоре они преобразуются в 4 управляющих сигнала электронной или магнитной природы и подаются на два направляющих слоя, каждый из которых задает два направления распространения информационного сигнала, поступившего на его оптический вход. В результате входной оптический сигнал направляется на один из 4-х оптических выходов.

Заметим, что эти элементы в совокупности с одноразрядными фотонными линиями задержки были использованы для построения фотонных неблокируемых системных сетей [12, 13].

1. Набор необходимых фотонных элементов

Управляемый фотонный конвертер C_0 собирается из двух демультиплексоров D и двух мультиплексоров M (рисунок 4а). В каждом демультиплексоре используется 4 управляющих сигнала, определяющих для конвертера значение управляющей операции O и задающих выходы демультиплексора. Например, значения «0» и «1» подаются на первый направляющий слой, а значения «=» и « \neg » – на второй слой.

В дальнейшем наряду с конвертером C_0 используются управляемые демультиплексор D_0 (рисунок 4б) и мультиплексор M_0 (рисунок 4в), построенные аналогичным образом.

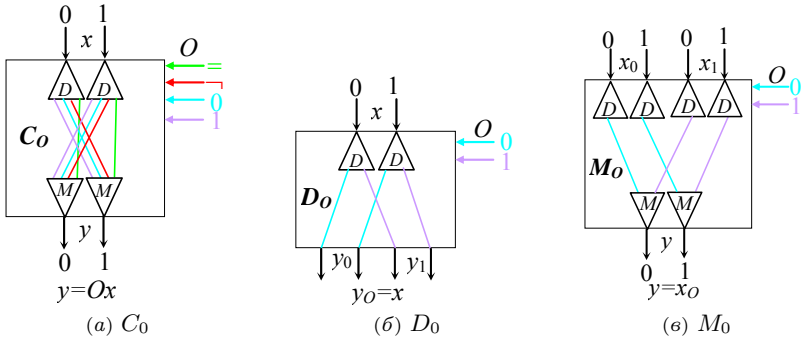


РИСУНОК 4. Схемы управляемых фотонного конвертера C_0 , демультиплектора D_0 и мультиплектора M_0

Образование значений операции O из значений управляющей фотонной переменной u задается схемами на рисунке 5. Эти схемы можно заменить

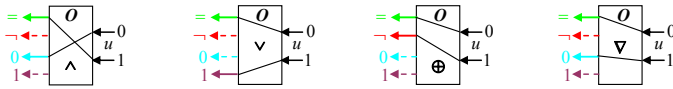


РИСУНОК 5. Схема образования значений операции O

на одну универсальную с использованием коммутатора с электронным управлением [7] от узла сети. Однако для простоты в данной работе используются разные неуправляемые схемы реализации операции O .

Как результат соединения схем рисунка 4а и схемы рисунка 5 управляемый конвертер будет обозначаться как 2-входовая схема с передаваемой переменной x , управляющей переменной u и реализуемой логической функцией $C(u, \aleph)$ (рисунко 6). При этом переменная x обозначается стрел-

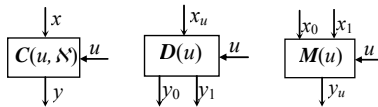


РИСУНОК 6. Окончательное обозначение управляемых конвертера $C(u, \aleph)$, демультиплектора $D(u)$ и мультиплектора $M(u)$

кой «ласточкин хвост», а переменная u – прямой стрелкой. Аналогично, управляемые демультиплексор и мультиплексор, полученные объединением схем рисунка 4, будут обозначаться как $D(u)$ и $M(u)$ (рисунко 6).

2. Распределенный фотонный сумматор

Для выполнения фотонной операции ВОК «сумма» при каждом узле сети формируется свой исполнительный блок U , состоящий из ранее определенных конвертеров и мультиплекторов, который осуществляет преобразования значений разрядов передаваемых чисел.

в один разряд, образует переменную δ_2^{i+1} , задающую значение переноса в следующий разряд. Через мультиплексор $M(s^i)$ пропускается значение δ_2^1 в первом разряде и δ_2^{i+1} в любом другом разряде. Через конвертер $C(s^i, \nabla)$ проходят переменные δ_2^1 и δ_2^{i+1} . Конвертер обнуляет первую из них и пропускает вторую без изменения (таблица 2b) для остальных разрядов. Конвертер $C(\delta_2^i, \oplus)$ образует окончательный результат поразрядных вычислений в виде переменных y_2^i , составляющих слот Y_2 .

На рисунке 8 (верхняя половина) представлена временная диаграмма

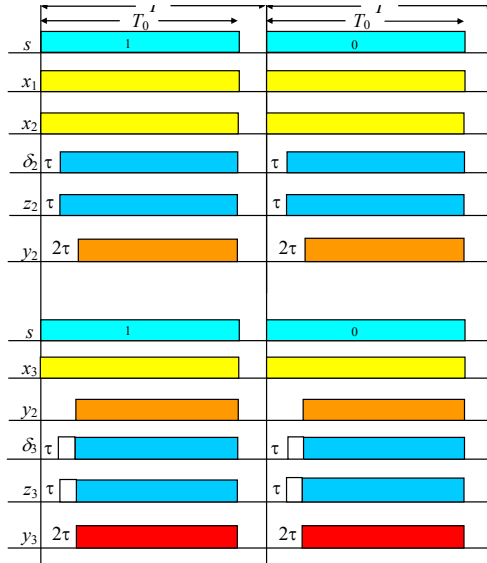


Рисунок 8. Временная диаграмма распределенного сумматора

работы блока U_2 в первых двух разрядах с использованием следующих обозначений.

Период разряда задается как T , длительность активных сигналов в нем – как T_0 , а время настройки конвертера или мультиплексора по управляющей переменной u – как τ . Необходимо отметить, что переменная δ_2^i проходит устройства $M(s^i)$ и $C(s^i, \nabla)$ без задержки, так как они уже настроились к моменту ее появления. Как результат выходная переменная y_2^i во всех разрядах появляется с задержкой на 2τ и задается сигналами длительности $T_0 - 2\tau$.

На рисунке 9 представлена схема N -узловой распределенного фотонного сумматора. На входы блока U_k ($k > 2$) подаются слот S и слоты Y_{k-1} и X_k , а на выходе образуется слот Y_k . Работ всех блоков синхронизируется слотом S , и все операции в блоках выполняются параллельно относительно 1-го разряда слота S .

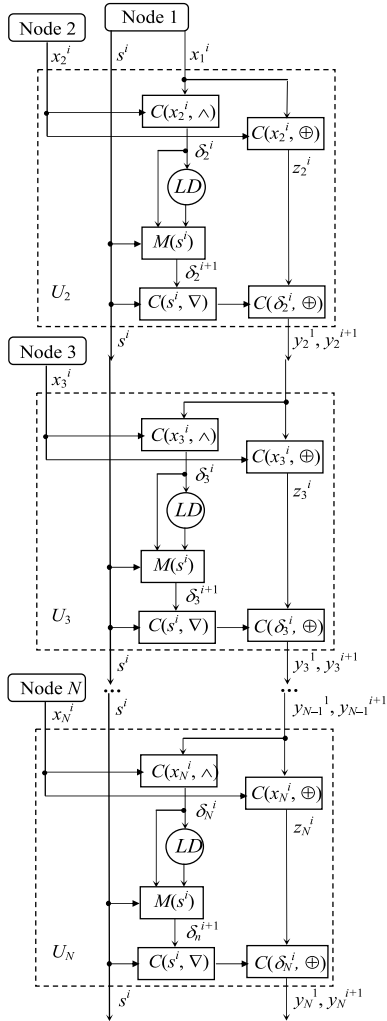


Рисунок 9. N -узловой распределенный сумматор

На рисунке 8 представлена также (нижняя половина) временная диаграмма работы блоков U_2 и U_3 сумматора в первых двух разрядах и в тех же обозначениях. Следует отметить, что нижняя половина диаграммы справедлива для любого блока U_k при $k > 2$. Это означает, что выходная переменная y_k^i появляется с задержкой на 2τ относительно начала синхросигналов s_i при любых k и i , т.е. при любом числе узлов и во всех разрядах чисел и задается сигналами длительности $T_0 - 2\tau$.

3. Распределенный фотонный «максимизатор»

Для выполнения фотонной операции ВОК «максимум» при каждом узле сети формируется свой исполнительный блок U , который осуществляет преобразования значений разрядов передаваемых чисел.

Первый узел сети по парафазной линии значений выдает в свой блок U слот X_1 , содержащий двоичное многоразрядное число, начиная со старших разрядов, а по парафазной синхролинии – слот S той же разрядности. Любой другой узел k сети ($1 < k \leq N$) передает по линии значений в свой блок U_k слот X_k , содержащий переменные x_k^i , начиная со старшего разряда. Кроме того, в этот блок поступает слот S , прошедший через исполнительный блок предыдущего узла.

На рисунке 10 представлена схема блока U_2 , подсоединяемого к первому и второму сетевым узлам распределенного «максимизатора». На его входы подаются слот S и слоты X_1 и X_2 , а на выходе образуется слот Y_2 , содержащий максимальное число из слотов X_1 и X_2 .

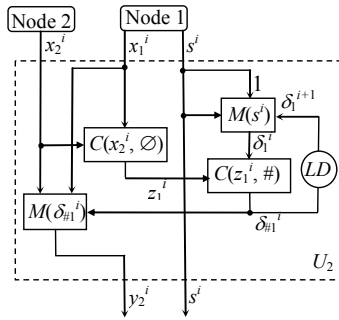


Рисунок 10. 2-узловой распределенный «максимизатор»

По значениям синхросигнала s^i посредством мультиплексора $M(s^i)$ формируется начальное значение переменной $\delta_1^1 = 1$, которая играет роль переменной состояния «максимизатора» во всех разрядах $i \geq 1$. Переменная δ_1^i должна находиться в значении $\delta_1^i = 1$ для всех разрядов $i < j$, для которых $x_1^i \geq x_2^i$, и находиться в значении $\delta_1^i = 0$ для всех разрядов $i > j$ после разряда j , для которого $x_1^j < x_2^j$. Такую последовательность значений δ_1 формируют конвертеры $C(x_2^i, \emptyset)$ и $C(z_1^i, \#)$ совместно с мультиплексором $M(s^i)$ и линией задержки LD на один разряд. Первый конвертер по значениям переменных x_1^i и x_2^i формирует значение промежуточной переменной z_1^i , реализуя логическую функцию «Переключение» по таблице 3а при $k \geq 2$. Второй конвертер формирует значение переменной $\delta_{\#1}^i$, реализуя логическую функцию «Повторение» по таблице 3б при $k \geq 2$.

Мультиплексор $M(s^i)$ и линия задержки LD образуют значения переменной $\delta_1^{i+1} = \delta_{\#1}^i$ для следующего разряда. При этом схема об-

ТАБЛИЦА 3. Таблицы истинности для блока U_k ($k \geq 2$)

(а) функция «Переключение» ($N = \emptyset$) (б) функция «Повторение» ($N = \#$)

x_{k-1}	x_k	O	z_{k-1}
0	0	«0»	1
0	1	«=>»	0
1	0	«0»	1
1	1	«=>»	1

z_{k-1}	δ_{k-1}	O	$\delta_{\#(k-1)}$
0	0	«=>»	0
0	1	«1»	0
1	0	«=>»	0
1	1	«1»	1

разования значений операции O (см. Введение) задается рисунком 11 (аналогом рисунка 5). Для тех разрядов $i < j$, для которых сохраняется

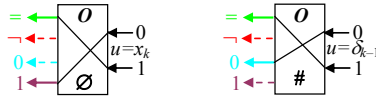


Рисунок 11. Схема образования значений операции O

значение $\delta 1 = 1$, через мультиплексор $M(\delta_{\#1}^i)$ формируется значение выходной переменной $y_2^i = x_1^i$. Однако, для тех разрядов $i > j$, для которых сохраняется значение $\delta 1 = 0$, через мультиплексор $M(\delta_{\#1}^i)$ формируется значение выходной переменной $y_2^i = x_2^i$. При этом для разряда j формируется значение $y_2^j = x_2^j = 1$.

На рисунке 12 приводится временная диаграмма формирования разных переменных для разрядов j и $j + 1$, где τ обозначает время настройки конвертеров и мультиплексора, а T и T_0 – длительности разряда и активного сигнала в нем. Видно, что активный сигнал укорачивается

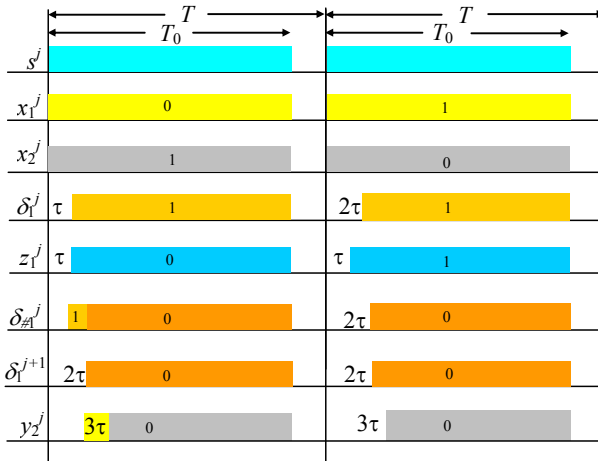


Рисунок 12. Временная диаграмма 2-узловой «максимизатора» для j -го разряда

на время не больше 3τ , которое не зависит от значения j .

На рисунке 13 приводится схема N -узловой распределенного «максимизатора». Каждый блок U_k ($k > 2$) повторяет блок U_2 с заменой

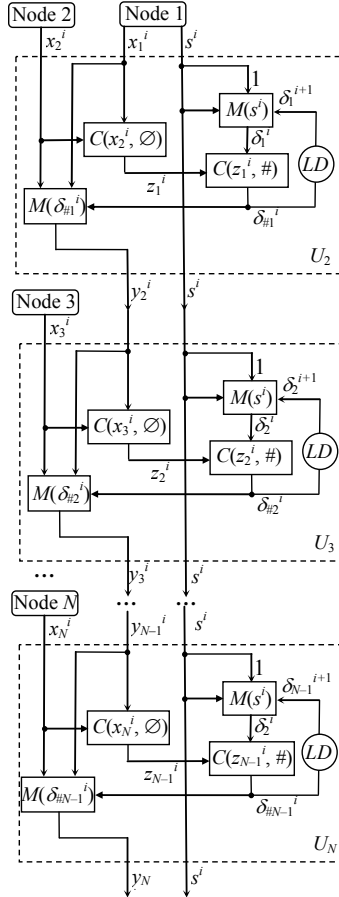


Рисунок 13. N -узловой распределенный «максимизатор»

x_1 на y_{k-1} и заменой индекса 2 на индекс k . При этом длительность активного сигнала $T_0 - 3\tau$ не зависит от значения k .

Заключение

В статье показана принципиальная реализуемость распределенных операций ВОК «максимум» и «сумма» на основе фотонных коммутаторов с парафазным представлением значений логических переменных. Также на основе этих операций можно осуществлять в сети [4] сортировку

массива чисел за время передачи N чисел; умножение чисел за время передачи одного числа; скалярное произведение N чисел за время передачи двух чисел и ряд других операций. Все они являются операциями магистрального (трубопроводного) типа.

В неблокируемых сетях с прямыми каналами [15, 16] можно организовывать множество таких операций, дополнительно размещая в слотах данных адреса узлов и коды операций, реализуемые в них. Способы построения таких сетей и способы реализации в них множества магистральных операций это тема отдельной работы.

Список литературы

- [1] Stepanenko S. *Structure and Implementation Principles of a Photonic Computer* // EPJ Web of Conferences.– 2019.– Vol. **224**.– id. 04002.– 7 pp. doi ↑4, 6
- [2] Степаненко С. А. *Оптический логический элемент (варианты)*, Патент № 2 723 906 С1.– 18.06.2020.– ид. 06. ↑4
- [3] Абрамов С. М., Степаненко С. А. *О подходах к разработке программного обеспечения для фотонной вычислительной машины*, Национальный Суперкомпьютерный Форум (НСКФ-2023) (Россия, Переславль-Залесский, ИПС имени А.К. Айламазяна РАН, 28 ноября–01 декабря 2023 года). URL ↑4
- [4] Прагишвили И. В., Подлазов В. С., Стецюра Г. Г. *Локальные микропроцессорные вычислительные сети*, Глава 6.– М.: Наука.– 1984.– 175 с. ↑4, 6, 14
- [5] Stanley A. I., Singh G., Eke J., Tsuda H. *Mach-Zehnder interferometer: A review of a perfect all optical switching structure* // *Proceedings of the International Conference on Recent Cognizance in Wireless Communication & Image Processing*, eds. Afzalpulkar N., Srivastava V., Singh G., Bhatnagar D., New Delhi: Springer.– 2016.– ISBN 978-81-322-2638-3.– Pp. 415–425. doi ↑6
- [6] Sacher W. D., Green W. M. J., Gill D. M., Assefa S., Barwicz T., Khater M., Kiewra Ed., Reinholm C., Shank S. M., Vlasov Yu. A., Poon J. K. S. *Binary phase-shift keying by coupling modulation of microrings* // *Optics Express*.– 2014.– Vol. **22**.– No. 17.– Pp. 20252–20259. doi ↑6
- [7] Green W. M. J., Yang M., Assefa S., Van Campenhout J., Lee B. G., Jahnes C. V., Doany F. E., Schow C. L., Kash J. A., Vlasov Y. A. *Silicon electro-optic 4×4 non-blocking switch array for on-chip photonic networks* // *Los Angeles, California United States, 6–10 March 2011, OSA/OFC/NFOEC 2011*.– ISBN 978-1-55752-906-0.– id. OThM1. doi ↑6, 8
- [8] Yen T.-H., Hung Y.-J. *Fabrication-insensitive CWDM (de)multiplexer based on cascaded Mach-Zehnder interferometers on silicon-on-insulator* // *Journal of Lightwave Technology*.– 2020.– Vol. **39**.– No. 1.– Pp. 146–153. doi ↑6
- [9] Gui Y., Nouri B. M., Miscuglio M., Amin R., Wang H., Khurgin J. B., Dalir H., Sorger V. J. *100 GHz micrometer-compact broadband monolithic ITO Mach-Zehnder interferometer modulator enabling 3500 times higher packing density* // *Nanophotonics*.– 2022.– Vol. **11**.– No. 17.– Pp. 4001–4009. doi ↑6
- [10] Vytovtov K., Barabanova E., Zouhdi S. *Optical switching cell based on metamaterials and ferrite films*, 12th International Congress on Artificial Materials

- for Novel Wave Phenomena (Metamaterials) (Espoo, Finland, August 2018–01 September 2018).– 2018.– Pp. 424–426. [doi](#) ↑7
- [11] Barabanova E. A., Vytovtov K. A. *The control system elements of the new generation optical switching cell* // Journal of Physics: Conference Series.– 2019.– Vol. **1368**.– No. 2.– id. 022002.– 9 pp. [doi](#) ↑7
- [12] Vytovtov K. A., Barabanova E. A., Podlazov V. S. *Model of next-generation optical switching system* // *Distributed Computer and Communication Networks, DCCN 2018, Communications in Computer and Information Science.*– vol. **919**, Cham: Springer.– ISBN 978-3-319-99447-5.– Pp. 377–386. [doi](#) ↑7
- [13] Barabanova E. A., Vytovtov K. A., Vishnevskiy V. M., Podlazov V. S. *High-capacity strictly non-blocking optical switches based on new dual principle*, 5th International Scientific Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT-2021) (Astrakhan, Russian Federation, 4–7 October 2021) // Journal of Physics: Conference Series.– 2021.– Vol. **2091**.– id. 012040.– 17 pp. [doi](#) ↑7
- [14] Roelkens G., Raz O., Green W. M. J., Assefa S., Tassaert M., Keyvaninia S., Vandoorne K., Van Thourhout D., Baets R., Vlasov Y. *Towards a low-power nanophotonic semiconductor amplifier heterogeneously integrated with SOI waveguides*, 7th IEEE International Conference on Group IV Photonics (Beijing, China, 01–03 September 2010).– Pp. 16–18. [doi](#) ↑9
- [15] Подлазов В. С. *Самомаршрутизируемая неблокируемая системная сеть с прямыми каналами: сложность и быстрдействие* // Программные системы: теория и приложения.– 2022.– Т. **13**.– № 4(55).– С. 47–76. [doi](#) [URL](#) ↑15
- [16] Подлазов В. С. *Разные неблокируемые самомаршрутизируемые системные сети с прямыми каналами* // Программные системы: теория и приложения.– 2023.– Т. **14**.– № 3.– С. 115–138. [doi](#) [URL](#) ↑15

Поступила в редакцию 30.10.2023;
 одобрена после рецензирования 15.01.2024;
 принята к публикации 16.01.2024;
 опубликована онлайн 05.04.2024.

Рекомендовал к публикации

к.ф.-м.н. С. А. Романенко

Информация об авторе:



Виктор Сергеевич Подлазов

Д. т. н., гл.н.с. Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, научные интересы: архитектуры интерконнекта и маршрутизация в суперкомпьютерных системах

[ID](#) 0000-0002-9175-1138
 e-mail: podlazov@ipu.ru
podlazov@gmail.com

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

UDC 004.724.2 + 004.272.43

 10.25209/2079-3316-2024-15-2-3-19

Distributed ALUs based on photonic switches

Viktor Sergeevich **Podlazov**

V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Russia

 podlazov@ipu.ru

Abstract. The article examines a photonic network with distributed control, consisting of several nodes connected by a common channel, in which, during the transmission of one number, a single operation is performed on numbers that are transmitted in parallel by all nodes. Such operations as summing or finding the maximum (minimum) of numbers transmitted sequentially across binary bits are considered. It is assumed that the bits of numbers are transmitted by paraphase optical signals, and the common channel is built from photonic switches of these signals. (*In Russian*).





Key words and phrases: common channel, distributed control, photonic switch, photonic multiplexer and demultiplexer. calculation in a common channel, sequential numbers

2020 *Mathematics Subject Classification:* 65Y05; 68Q10

For citation: Viktor S. Podlazov. *Distributed ALUs based on photonic switches*. Program Systems: Theory and Applications, 2024, **15**:2(61), pp. 3–19. (*In Russ.*). https://psta.psiras.ru/read/psta2024_2_3-19.pdf

References

- [1] S. Stepanenko. “Structure and Implementation Principles of a Photonic Computer”, *EPJ Web of Conferences*, **224** (2019), id. 04002, 7 pp. [doi](#)
- [2] S. A. Stepanenko. *Optical logic element (options)*, Patent No 2 723 906 C1, 18.06.2020, id. 06 (In Russian). [URL](#)
- [3] S. M. Abramov, S. A. Stepanenko. “On approaches to developing software for a photonic computer”, Nacional’nyj Superkomp’yuternyj Forum (NSKF-2023) (Rossiya, Pereslavl’-Zalesskij, IPS imeni A.K. Ajlamazyana RAN, 28 noyabrya–01 dekabrya 2023 goda) (In Russian). [URL](#)
- [4] I. V. Prangishvili, V. S. Podlazov, G. G. Stecyura. *Local microprocessor computer networks*, Glava 6, Nauka, M., 1984 (In Russian), 175 pp.
- [5] A. I. Stanley, G. Singh, J. Eke, H. Tsuda. “Mach–Zehnder interferometer: A review of a perfect all optical switching structure”, *Proceedings of the International Conference on Recent Cognizance in Wireless Communication & Image Processing*, eds. Afzalpulkar N., Srivastava V., Singh G., Bhatnagar D., Springer, New Delhi, 2016, ISBN 978-81-322-2638-3, pp. 415–425. [doi](#)
- [6] W. D. Sacher, W. M. J. Green, D. M. Gill, S. Assefa, T. Barwicz, M. Khater, Ed. Kiewra, C. Reinholm, S. M. Shank, Yu. A. Vlasov, J. K. S. Poon. “Binary phase-shift keying by coupling modulation of microrings”, *Optics Express*, **22**:17 (2014), pp. 20252–20259. [doi](#)
- [7] W. M. J. Green, M. Yang, S. Assefa, Campenhout J. Van, B. G. Lee, C. V. Jahnnes, F. E. Doany, C. L. Schow, J. A. Kash, Y. A. Vlasov. “Silicon electro-optic 4×4 non-blocking switch array for on-chip photonic networks”, *Los Angeles, California United States, 6–10 March 2011*, OSA/OFC/NFOEC 2011, ISBN 978-1-55752-906-0, id. OThM1. [doi](#)
- [8] T.-H. Yen, Y.-J. Hung. “Fabrication-insensitive CWDM (de)multiplexer based on cascaded Mach-Zehnder interferometers on silicon-on-insulator”, *Journal of Lightwave Technology*, **39**:1 (2020), pp. 146–153. [doi](#)
- [9] Y. Gui, B. M. Nouri, M. Miscuglio, R. Amin, H. Wang, J. B. Khurgin, H. Dalir, Sorger V. J. . “100 GHz micrometer-compact broadband monolithic ITO Mach–Zehnder interferometer modulator enabling 3500 times higher packing density”, *Nanophotonics*, **11**:17 (2022), pp. 4001–4009. [doi](#)
- [10] K. Vytovtov, E. Barabanova, S. Zouhdi. “Optical switching cell based on metamaterials and ferrite films”, 12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials) (Espoo, Finland, August 2018–01 September 2018), 2018, pp. 424–426. [doi](#)
- [11] E. A. Barabanova, K. A. Vytovtov. “The control system elements of the new generation optical switching cell”, *Journal of Physics: Conference Series*, **1368**:2 (2019), id. 022002, 9 pp. [doi](#)
- [12] K. A. Vytovtov, E. A. Barabanova, V. S. Podlazov. “Model of next-generation optical switching system”, *Distributed Computer and Communication Networks, DCCN 2018*, Communications in Computer and Information Science, vol. **919**, Springer, Cham, ISBN 978-3-319-99447-5, pp. 377–386. [doi](#)
- [13] E. A. Barabanova, K. A. Vytovtov, V. M. Vishnevskiy, V. S. Podlazov. “High-capacity strictly non-blocking optical switches based on new dual principle”, 5th International Scientific Conference on Information, Control, and

- Communication Technologies (ICCT-2021) (Astrakhan, Russian Federation, 4–7 October 2021), *Journal of Physics: Conference Series*, **2091** (2021), id. 012040, 17 pp. 
- [14] G. Roelkens, O. Raz, W. M. J. Green, S. Assefa, M. Tassaert, S. Keyvaninia, K. Vandoorne, Thourhout D. Van, R. Baets, Y. Vlasov. “Towards a low-power nanophotonic semiconductor amplifier heterogeneously integrated with SOI waveguides”, 7th IEEE International Conference on Group IV Photonics (Beijing, China, 01–03 September 2010), pp. 16–18. 
- [15] V. S. Podlazov. “Multichannel non-blocking system area network with direct channels”, *Program Systems: Theory and Applications*, **13**:4(55) (2022), pp. 47–76 (In Russian).  
- [16] V. S. Podlazov. “Multichannel non-blocking system area network with direct channels”, *Program Systems: Theory and Applications*, **14**:3 (2023), pp. 115–138 (In Russian). 