

5. Taboury J., Wang J. M., Chavel P. et al. Optical cellular processor architecture // *Appl. Opt.*—1988.—27, N 9.—P. 1643.
6. Nudd G. R., Grinberg J., Eichelss R. D., Little M. The application of three-dimensional microelectronics to image analysis // *Integrated Technology for Parallel Image Processing*.—N. Y.: Academic Press, 1985.—P. 167.
7. Егоров В. М., Косцов Э. Г. Перспективы создания цифровых высокопроизводительных вычислительных устройств // *Автометрия*.—1985.—№ 1.
8. Egorov V. M., Kostsov E. G. Integral optical digital computers // *Appl. Opt.*—1990.—29, N 8.—P. 1178.
9. Методы параллельного микропрограммирования /П. А. Анишев, С. М. Ачасова, О. Л. Бандман и др.—Новосибирск: Наука, 1981.
10. Bandman O. L., Piskunov S. V. Parallel substitution algorithm as a model for distributed computations // *J. New Generat. Comput. Syst.*—1991.—4, N 1.—P. 3.
11. Погодин Ю. М. СиМ-расширение языка Си для микропрограммных приложений // *Информатика и программирование* /Под ред. И. В. Поттосина.—Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1989.
12. Маркова В. П., Пискунов С. В. Универсальная процедура построения структурных схем специализированных параллельных вычислителей // *Математическое и архитектурное обеспечение параллельных вычислений*.—Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1989.
13. Бандман О. Л. Синтез асинхронного управления параллельными процессорами // *Кибернетика*.—1980.—№ 1.
14. Миллер Р. Теория переключаемых схем.—М.: Наука, 1970.—Т. 1.

*Поступила в редакцию 22 июля 1991 г.*

УДК 681.323.535

**В. П. Торчигин**

*(Москва)*

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ**

Рассматриваются различные варианты внедрения оптических средств дискретной обработки и передачи информации в вычислительных системах с массовым параллелизмом. Показано, что специфика оптической обработки информации удачно сочетается со спецификой подобных систем и ведет к автоматическому мультиплицированию во времени всех устройств. Возможность настройки оптической ВС практически без накладных расходов на специфику решаемой задачи позволяет дополнительно значительно повысить их общую производительность.

**Введение.** В настоящее время общепризнано, что возможности повышения производительности электронных вычислительных систем (ВС) за счет увеличения скорости переключения логических элементов практически исчерпаны. Объясняется это тем, что при достигнутых скоростях переключения и плотности упаковки элементов производительность ВС определяется главным образом временем распространения сигналов между удаленными элементами. Уменьшение этого времени за счет повышения степени интеграции связано с большими трудностями по отводу тепла, которые пропорционально увеличиваются при повышении скорости работы элементов.

Магистральным направлением повышения производительности ВС в настоящее время является распараллеливание процесса вычислений. Созданы ВС, состоящие из тысяч одинаковых процессорных элементов (ПЭ), для которых разработаны эффективные методы распараллеливания различных классов задач, требующих больших объемов вычислений.

Наиболее показательной в этом отношении является коммерчески доступная ЭВМ "Connection Machine" фирмы "Thinking Machine", содержащая более 65000 ( $2^{16}$  штук) ПЭ, связанных между собой специальной коммуникационной сетью (КС) [1]. Имеется сообщение, что в настоящее время создается СМ, содержащая более миллиона ПЭ ( $2^{20}$  штук) [2].

С другой стороны, при анализе возможностей использования большой широкополосности оптических логических элементов и линий связи между ними было выявлено, что при создании некоторого физического устройства на таких элементах автоматически получается  $N$  одинаковых виртуальных устройств, где  $N$  — отношение времени распространения сигналов между элементами к периоду следования поступающих на них логических оптических импульсов. Для каждого из таких виртуальных устройств выделяется один из  $N$  временных интервалов, в котором это устройство обрабатывает поступающие на него в этом интервале логические оптические сигналы.

Более того, в следующей работе автора будет показано, что при создании на базе рассматриваемых оптических элементов связанного процессора (СП), осуществляющего передачу сигналов из одного временного интервала в другой, т. е. от одного виртуально ПЭ к другому, автоматически получается КС, состоящая из  $N$  виртуальных СП и линий связи между ними. Это обстоятельство открывает большие возможности в использовании оптических средств при реализации коммуникационных сетей в рассматриваемых ВС с массовым параллелизмом. При этом перетасовка данных в пространстве, которая имеет место в традиционных КС, в оптической КС заменяется на перетасовку во временных интервалах. Количество необходимых в КС линий связи сокращается в этом случае в  $N$  раз. Если считать, что период следования синхроимпульсов в электронных схемах составляет несколько десятков наносекунд, а в оптических — несколько десятков пикосекунд, то для реализации оптической КС требуется в 1000 раз меньше оборудования (но более быстродействующего).

В настоящей работе рассматривается архитектура подобных ВС с учетом того обстоятельства, что применение принципов конвейерной обработки, используемых в векторных ЭВМ, позволяет значительно повысить эффективность использования оборудования [4]. После анализа различных вариантов использования оптических средств в ВС с массовым параллелизмом рассматривается реализация оптическими средствами различных исполнительных устройств и оценивается ее эффективность.

Архитектура ВС с массовым параллелизмом. На рис. 1, *a — d* показано несколько вариантов реализации ВС с массовым параллелизмом с постепенным увеличением доли используемых оптических средств. На рис. 1, *a* представлена архитектура традиционной чисто электронной ВС с массовым параллелизмом. Здесь  $N$  одинаковых ПЭ 2, каждый из которых имеет свою локальную память в виде обычного запоминающего устройства с произвольной выборкой (ЗУПВ) 1, объединены между собой коммуникационной сетью, через которую может передаваться информация от одного ПЭ к другому с помощью специально для этих целей предназначенных СП 3.

Все ПЭ и СП работают под управлением обычной ЭВМ и одновременно выполняют выдаваемую этой ЭВМ одну и ту же команду. Выполняемая программа хранится в управляющей ЭВМ. Обрабатываемые данные хранятся в ЗУПВ каждого ПЭ. Таким образом, рассматриваемая ВС имеет SIMD-архитектуру. Оперативная память каждого ПЭ связана с общей внешней памятью, содержимое которой доступно также управляющей ЭВМ.

При определении места оптических средств в рассмотренной архитектуре ВС в первую очередь привлекает к себе внимание КС — наиболее трудоемкая и дорогостоящая часть ВС, занимающая основную часть ее объема и потребляющая большую часть мощности. При реализации КС оптическими средствами в наибольшей степени могут проявить себя основные достоинства оптики — широкополосность и широкоформатность каналов связи, миниатюрность, помехозащищенность оптических линий связи с практически полным отсутствием затухания в них сигналов.

На рис. 1, *b* показана структура ВС с оптической коммуникационной сетью. Здесь МПЛ 3 — мультиплексор, объединяющий относительно медленные потоки данных, поступающих от  $m$  ПЭ 2, в один оптический канал, где темп передачи данных в  $m$  раз выше. КС, задача которой сводится к перестановке данных в различных временных интервалах, может быть реализована

на основе оптоэлектронных [5] или полностью оптических логических элементов. В первом случае на логические элементы коммуникационной сети из управляющей ЭВМ поступают хранящиеся в ней сигналы управления. Во втором случае управляющая информация рассредоточена по ЗУПВ 1 каждого процессорного элемента и вместе с передаваемыми другим ПЭ данными поступает в КС.

Полученные на выходе КС в виде оптических сигналов перетасованные данные поступают на демультиплексор (ДМПЛ) 4, где они разветвляются на  $m$  каналов, преобразуются в электрические сигналы и каждый из них поступает в память соответствующего ПЭ.

На рис. 1, с показана структура ВС, в которой доля оптических средств увеличена (1 — ЗУПВ, 2 — МПЛ, 3 — ДМПЛ). Кроме КС, оптическими средствами реализованы все процессорные элементы. Как отмечалось во введении, достаточно реализовать на основе оптических логических элементов один ПЭ, чтобы получить  $N$  виртуальных ПЭ. Как показывает анализ, для реализации такого

процессорного элемента, какой имеется в СМ, достаточно нескольких сотен оптических вентилях. В какое из оптических устройств (СП или ПЭ) должны быть направлены данные из ЗУПВ, определяется выполняемой командой. В соответствии с этой командой из управляющей ЭВМ поступает соответствующий сигнал на коммутатор (КМ), действующий в течение всех временных интервалов.

На рис. 1, d показана структура ВС, в которой оптическими средствами реализована однородная среда из оптических элементов с настраиваемыми связями между ними с помощью сигналов, поступающих от управляющей ЭВМ (обозначения те же, что и на рис. 1, c). Связь между оптическими элементами устанавливается на время выполнения одной операции всеми виртуальными ПЭ. По мере завершения операции и освобождения оптических вентилях производится перенастройка связей между ними в соответствии со следующей выполняемой операцией.

**Конструкция оптической части ВС.** На рис. 2 показана в схематическом виде конструкция оптической части ВС, соответствующая архитектуре, представленной на рис. 1, d. В зависимости от типа используемых логических элементов устройство 1 на рис. 2 может быть реализовано в виде пластины, на которой расположены некоторым регулярным образом оптические логические элементы (например, матрица нелинейных резонаторов Фабри — Перо). Это устройство может быть также реализовано в виде набора пластин, на каждой из которых имеется линейка волноводных оптических элементов в интеграль-

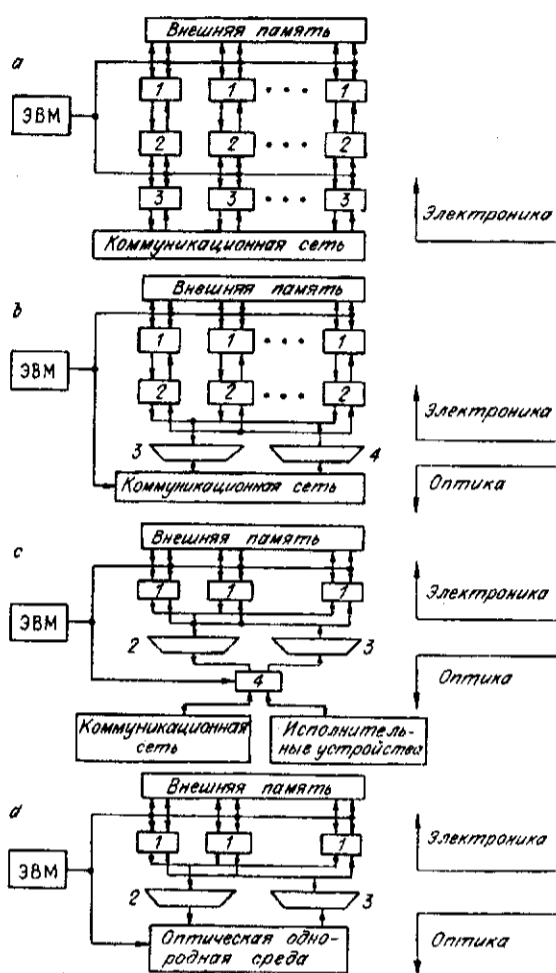


Рис. 1

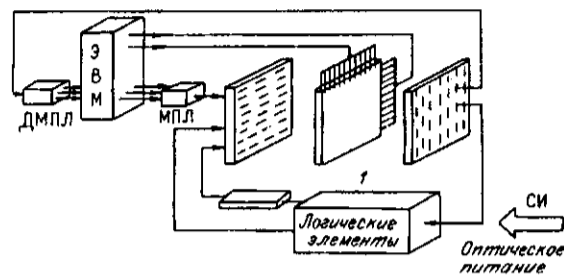


Рис. 2

ном исполнении, либо в виде набора оптических нелинейных волокон, торцы которых находятся в одной плоскости и образуют регулярную структуру [3]. В любом случае все элементы изолированы друг от друга и связь между ними осуществляется с помощью внешних дополнительных оптических средств.

На каждый логический элемент поступает питание в виде периодической последовательности оптических синхроимпульсов (СИ). Эти же импульсы используются для синхронизации во времени логических сигналов на выходах элементов. Таким образом, в рассматриваемой конструкции системы синхронизации и питания оказываются совмещенными.

Для реализации СП выходные сигналы с части логических элементов поступают на массив линий задержек различной величины. Оставшиеся сигналы и сигналы с выходов линий задержек поступают на электрически управляемый коммутатор оптических сигналов, представляющий собой матрицу из элементарных классических устройств для булевого умножения вектора на матрицу. Такое элементарное устройство эквивалентно матричному коммутатору (cross bar), позволяющему передавать сигнал из любого места входной горизонтальной строки в любое место выходной вертикальной. Закон коммутации определяется электрически управляемым от ЭВМ пространственно-временным модулятором света (ПВМС).

Перекоммутированные оптические сигналы поступают на входы матрицы из логических элементов, где над ними производится следующий этап логических преобразований. Часть перекоммутированных сигналов соответствует полученным результатам. Эти сигналы поступают на демультиплексор, откуда после разветвления на  $m$  каналов с соответствующим понижением частоты следования и преобразованием в электрическую форму они поступают в ЭВМ. С другой стороны, поступающие от ЭВМ сигналы преобразуются в мультиплексоре в оптическую форму, мультиплексируются и подаются на коммутатор, пройдя через который оказываются поданными на соответствующие логические элементы.

Рассмотренная конструкция во многом совпадает с традиционной. Отличие состоит лишь в наличии дополнительного блока из линий задержек. Однако принятый в [3] метод организации многопроцессорных комплексов приводит к тому, что при этом получается не одно синтезируемое устройство, а  $N$ , где  $N$  — отношение общего времени прохождения оптических сигналов по цепи обратной связи от входов одного логического элемента до входов другого к периоду следования оптических импульсов питания.

Нетрудно убедиться, что в первом приближении величина задержки в цепи обратной связи не сказывается на общей производительности ВС. Действительно, при увеличении задержки, например, в 2 раза снижается в 2 раза производительность каждого виртуального ПЭ, но количество таких процессорных элементов увеличивается в 2 раза.

**Методы выполнения операций.** При выполнении операций в конвейерном режиме в исполнительных устройствах отсутствуют какие-либо запоминающие элементы и общая схема исполнительного устройства имеет вид, показанный на рис. 3, а (К — коммутатор, Э — элемент). Необходимая синхронизация логических сигналов, обеспечивающая одновременное их поступление на входы логических элементов, осуществляется на каждом этапе логических преобразований, поскольку выходные сигналы определяются положением во времени СИ, а не поступающих входных сигналов.

Имея в виду конструкцию оптической части ВС, показанную на рис. 2, реализация исполнительного устройства конвейерного типа может быть осуществлена в виде, показанном на рис. 3, *b*.

Одно конвейерное исполнительное устройство отличается от другого законом коммутации элементов в элементарных коммутирующих матрицах. Наличие электрически перестраиваемых коммутаторов позволяет реализовать требуемые законы коммутации и, следовательно, получать требуемые исполнительные устройства.

Не представляет исключения из этого правила и реализация связанных процессоров. При этом необходимо лишь иметь в виду, что с выходов некоторых логических элементов сигналы поступают на линии задержки различной величины. Такие логические элементы должны использоваться в качестве логических элементов с нестандартной задержкой для передачи сигналов из одного временного интервала в другой.

Наиболее просто перестраиваемый коммутатор может быть реализован при помощи перестраиваемого магнитооптического транспаранта, запись информации в который осуществляется путем подачи токов в соответствующие вертикальные и горизонтальные проводники, проходящие около каждой строки и столбца матрицы.

Возможен также гибридный оптоэлектронный вариант, при котором записанная информация хранится в матрице электронных триггеров, каждый из которых управляет связанным с ним модулятором света.

Еще одним вариантом реализации подобных коммутаторов является голографический коммутатор, в котором перестройка от одного графа связей к другому производится включением различных опорных лучей.

Тех же целей, но с большими ограничениями можно добиться более простыми средствами, если иметь несколько постоянных коммутаторов, соответствующих различным исполнительным устройствам, и дефлектор (акустооптический или электрооптический), который отклоняет двумерный сигнал с выходов логических элементов на тот или иной постоянный коммутатор.

Нетрудно убедиться, что перестройка коммутаторов может осуществляться в конвейерном режиме. Действительно, если в конвейерное устройство, осуществляющее векторную операцию, например, по сложению двух потоков операндов, поступила последняя группа операндов и промежуточные результаты достигли второй элементарной матрицы логических элементов, то коммуникационные средства между первой и второй матрицами для заканчивающейся операции оказываются больше ненужными. Если следующая операция будет, например, умножение, то можно начинать перестраивать связи между элементами в соответствии с таблицей коммутации элементов в устройстве умножения. Время, через которое освобождается очередная элементарная матрица коммутации, равно  $T$ , где  $T$  — общая задержка в логических элементах и в цепях коммутации между ними, т. е. полная задержка в петле обратной связи (см. рис. 3).

Оценим скорость перепрограммирования элементарных матриц, если запись информации в одну строку общей матрицы размером  $n^2$  происходит за время  $T_w$ . Пусть общая матрица состоит из  $s^2$  элементарных. Для обновления  $s$  элементарных матриц необходимо произвести  $n/s$  записей, для которых

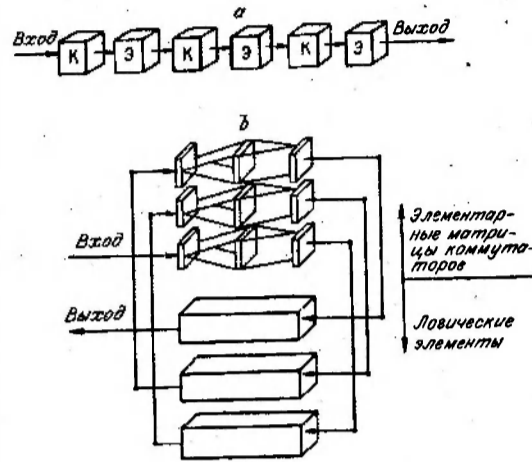


Рис. 3

потребуется время  $T_w n/s$ . Поскольку при этом обновилось  $n/s$  элементарных матриц, среднее время обновления одной элементарной матрицы равно  $T_w$ .

Для магнитоуправляемых транспарантов  $T_w$  может составлять около 10 нс. Приблизительно такое же значение имеет задержка  $T$  в цепи обратной связи. Если, например,  $s = 10$ , а длина конвейера равна  $s^2$ , то при конвейерном способе перекоммутации элементов время между соседними различными операциями может быть сокращено в 10 раз. Поскольку время выполнения одной операции над всеми элементами вектора обычно больше  $T_w s^2$ , то доля времени, занимаемого на перестройку конвейера, составляет менее 10 % от времени счета.

Если осуществить регулярные, постоянные во времени соединения первой элементарной матрицы со второй, второй с третьей и т. д., то, настраивая матрицы в соответствии с таблицей соединения элементов в соседних слоях, можно реализовать любую схему конвейерного типа, в которой количество элементов в слое не превосходит  $n/s$ .

Следует отметить, что связной процессор также реализуется путем динамической перестройки связей между слоями элементов.

Таким образом, рассматриваемый компьютер представляет собой регулярную структуру, состоящую из регулярного набора одинаковых оптических элементов и регулярного настраиваемого матричного транспаранта. Практически без потери эффективности связи между элементами могут динамически перестраиваться, образуя при этом требуемые исполнительные устройства. Такая возможность позволяет приблизительно на порядок сократить количество требуемых оптических элементов практически без снижения общей производительности реализуемых устройств.

Следует отметить одно очень существенное при реализации подобных ОВМ обстоятельство. Имея в однородной среде (ОС) некоторый запас логических элементов, можно использовать ОС, в которых не все элементы оказались годными при изготовлении. Если можно выбрать необходимое количество годных элементов, то и при помощи настраиваемого коммутатора можно организовать между ними необходимые межсоединения. Такими же свойствами обладает в такой же степени регулярный настраиваемый коммутатор. Это свойство ОВМ отсутствует в электронике. Любой дефектный элемент в интегральной схеме ведет к полной ее неработоспособности. Это обстоятельство резко снижает процент выхода годных схем и соответственно повышает требования к технологии изготовления.

Рассмотренный подход, который учитывает, что определенная группа расположенных по соседству в пространстве элементов может соединяться только с относительно небольшой группой таких же элементов, позволяет использовать методы локальной синхронизации, реализация которой несравнимо проще, чем глобальной.

В настоящее время общепризнано, что специализированные вычислительные средства превосходят универсальные при том же объеме оборудования в 100—1000 раз по производительности [6]. Поэтому, выбирая специализированные исполнительные устройства в соответствии со спецификой решаемой задачи, можно рассчитывать на повышение производительности в такое количество раз по сравнению с оптической ВС, имеющей фиксированные связи между элементами. Указанные возможности по перестройке связей между элементами являются несомненными преимуществами оптики перед электроникой, которые обычно не указываются при перечислении достоинств оптики. Не исключено, что это может сыграть решающую роль в судьбе оптического компьютера.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Turker L. W., Robertson G. G. Architecture and application of the connection machine // Computer.—1988.—N 8.—P. 26.
2. Supercomputers.—1989.—P. 2.
3. Торчигин В. П. Реализация чисто оптических многопроцессорных вычислительных комплексов // Вычислительные машины с нетрадиционной архитектурой.—М.: Наука, 1990.

4. Торчигин В. П. Организация многопроцессорных вычислительных комплексов с переменным количеством процессорных элементов // Автометрия.—1992.—№ 1.
5. Ramanan S. V., Jordan H. F. A new serial array time domain permutation algorithm // Optical Computing.—Kobe, Japan, 1990.
6. Каляев А. В. Многопроцессорные системы с программируемой архитектурой.—М.: Радио и связь, 1984.

Поступила в редакцию 18 июля 1991 г.

УДК 681.323.535

В. П. Торчигин

(Москва)

### ОРГАНИЗАЦИЯ МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ С ПЕРЕМЕННЫМ КОЛИЧЕСТВОМ ПРОЦЕССОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассматриваются вопросы реализации на основе конвейерных векторных ЭВМ модели вычислений, принятой в многопроцессорных вычислительных комплексах SIMD-архитектуры с массовым параллелизмом типа "Connection Machine". Проанализированы достоинства такого подхода и необходимые дополнительные аппаратные средства с традиционных векторных ЭВМ.

**Введение.** С 1986 г. в США фирмой "Thinking Machine" коммерчески поставляется суперЭВМ под названием "Connection Machine" (СМ), содержащая  $64K$  процессорных элементов (ПЭ), где  $K = 1024$ . Используемый в этой ЭВМ подход к организации вычислений привлек внимание многих разработчиков суперЭВМ, поскольку он позволяет за счет массового распараллеливания вычислений резко повысить общую производительность вычислительной системы.

Появилось достаточно много публикаций [1—7], цель которых показать довольно широкую область применения СМ и преимущества ее архитектуры при программировании и решении различных сложных прикладных задач, требующих большого объема вычислений. На основе накопленного опыта распараллеливания алгоритмов, имеющих, на первый взгляд, сугубо последовательную структуру, авторы выдвинули предположение, что для многопроцессорных систем с архитектурой СМ возможно эффективное параллельное выполнение практически любых алгоритмов, для которых отношение объема обрабатываемых данных к длине программы достаточно велико. Все попытки найти опровергающий данное предположение контрпример пока не увенчались успехом. Многие рассматриваемые в указанных работах примеры первоначально привлекли к себе внимание как возможные контрпримеры, но затем перешли в разряд примеров, подтверждающих сделанное предположение.

Этот нетривиальный результат дает основание по-новому подойти к организации решения таких задач на ЭВМ, сходных с векторными и конвейерными, но имеющими дополнительные аппаратные средства для передачи сообщений между процессорными элементами. Данные, относящиеся к различным процессорным элементам, образуют вектор и обрабатываются последовательно исполнительным устройством в конвейерном режиме. При этом коммуникационные средства СМ могут быть реализованы дополнительными минимальными аппаратными средствами, выполняющими перетасовку данных в векторе. Особенно оправдан этот подход при использовании сверхбыстродействующих оптических элементов, для которых период поступления обрабатываемых оптических сигналов  $\tau$  значительно меньше времени передачи сигналов  $T$  между элементами ( $T/\tau = 10^3—10^5$ ) [8].