

ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА, ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ АНАЛОГОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Гаврилов А.В., Сойфер В.А.

Институт систем обработки изображений РАН

*Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)*

Аннотация

В статье рассматривается возможность создания аналоговых вычислительных машин, в которых переменной величиной является характеристика светового потока. Описываются существующие подходы к реализации базовых операций: сложения, разделения и усиления сигналов, дифференцирования и интегрирования. Приводятся результаты численных и оптических экспериментов, подтверждающих возможность создания оптических аналоговых вычислительных машин, а также обобщённые данные по точности и энергетической эффективности выполнения операций.

Ключевые слова: аналоговая вычислительная машина, оптическое волокно, усилитель оптического сигнала, микрокольцевой резонатор, волоконная брэгговская решётка.

Введение

Цифровые вычислительные машины имеют ряд принципиальных недостатков, которые необходимо учитывать при создании автоматизированных систем управления движением объектов, таких как космические и летательные аппараты, морские суда и т.д.

В первую очередь, это сама дискретная форма представления данных, которая неизбежно приводит к «округлению» и неточности представления информации. Увеличение разрядной сетки процессоров позволяет уменьшить неточности, но принципиально не решает проблему: ошибки остаются и, более того, накапливаются при выполнении большого количества операций, что приводит к проблеме численной устойчивости вычислительных алгоритмов [1].

Кроме того, решение целого класса задач, основанных на решении дифференциально-интегральных уравнений и лежащих в основе многих задач управления движением, в силу конечно-разностной природы алгоритмов вычисления требует значительных расчётных затрат (в сравнении с простыми операциями) [2]. Это делает затруднительным (дорогостоящим или даже невозможным) применение таких решений в автономных системах оперативного управления, требующих решения задач в режиме реального времени.

Также следует отметить, что полупроводниковая элементная база компьютеров достаточно чувствительна к условиям окружающей среды: к температуре, электромагнитным возмущениям, радиации.

В то же время аналоговые вычислительные машины (АВМ) [3-4] лишены многих из указанных недостатков. АВМ, существовавшие до экспансии цифровой техники, успешно справлялись со своими задачами и используются до сих пор в системах оборонного назначения. Самыми распространёнными и технически совершенными являлись АВМ на основе электрических элементов.

Сравнение АВМ и цифровых вычислителей показывает, что, хотя АВМ тоже выполняют расчёты с погрешностью (правда, она имеет иную причину), они более выигрышны при решении сложных задач, поскольку по своей природе позволяют получать решение в реальном времени. Однако АВМ менее универсальны: в них элементы и структура их взаимодействия определяют и обрабатываемые данные, и способ их обработки, в то время как в цифровых вычислительных машинах элементная база, данные и программа являются различными сущностями, причём изменяемыми почти независимо друг от друга. Именно универсальность, выражающаяся в возможности использования одного и того же компьютера для решения бесконечно широкого спектра задач, и привела к вытеснению АВМ по мере увеличения быстродействия компьютеров.

В последние годы стала актуальной задача создания АВМ на оптической элементной базе. Предпосылками к этому послужили работы в области разработки и исследования различных устройств фотоники (в т.ч. фотонных кристаллов [5, 6] и брэгговских структур), сформированные научная база и технологии изготовления дифракционных оптических элементов (ДОО) [7, 8]. Причём современные технологические процессы позволяют изготавливать оптические элементы с высокой точностью, вплоть до нескольких нанометров. Кроме того, стали доступными источники когерентного излучения с различными характеристиками (в т.ч. лазеры с настраиваемой длиной волны), разработаны технологии производства разнообразных оптических волноводов, широкое распространение получили волочно-оптические линии связи.

Следует уточнить, что речь идёт не о приобретающих в последнее время популярность оптических процессорах (являющихся, по сути, основанными на оптическом сигнале цифровыми процессорами) и не о достаточно подробно изученных специализиро-

ванных оптических процессорах (применяемых, например, для спектральной обработки изображений), а именно об аналоговых АВМ, в которых воспроизводятся модели процессов, а рассматриваемой переменной величиной является, например, интенсивность светового потока или комплексная амплитуда одной из характеристик электромагнитного поля. Поскольку общая теория и приёмы построения и применения как специализированных, так и универсальных АВМ достаточно глубоко проработаны [9-11] (ещё до массового распространения электронной вычислительной техники), при разработке оптических АВМ необходимо определить оптические способы реализации решающих блоков, выполняющих типовые операции.

Базовыми линейными операциями являются: умножение на постоянный коэффициент, алгебраическое сложение, дифференцирование и интегрирование по времени (рис. 1). Для воспроизведения нелинейных зависимостей возможно либо использование специальных элементов, обладающих требуемыми нелинейными характеристиками, либо применение комбинаций типовых блоков и обратных связей.

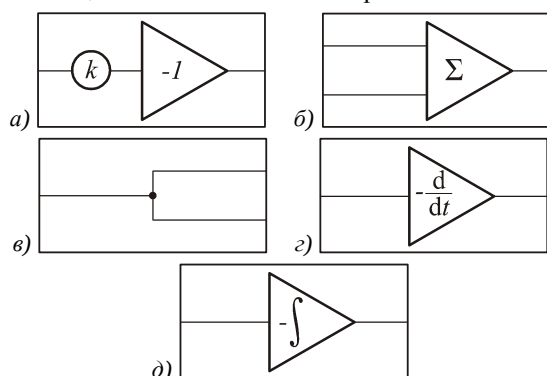


Рис. 1. Базовые операции АВМ: умножение на коэффициент (а), алгебраическое сложение (б), деление сигнала (в), дифференцирование (г), интегрирование (д)

При разработке новых оптических АВМ потребуется найти ответ на следующие основные вопросы. Во-первых, какие оптические элементы и структуры могут быть использованы в качестве элементной базы оптических АВМ, какими характеристиками они могут обладать и как могут быть изготовлены? Во-вторых, в чём будет принципиальное отличие от уже существующих электрических АВМ, нишу решения каких задач смогут занять оптические АВМ?

1. Реализация не зависящих от времени операций

Первые работы по оптическим вычислителям и их элементной базе относятся к 90-м годам прошлого века. На этом начальном этапе в основном рассматривались проблемы, касающиеся не зависящих от времени операций над величинами: суммирования, усиления, разделения сигналов.

Следует отметить, что элементная база для таких операций фактически разрабатывалась в рамках ре-

шения совершенно другой задачи: сходные операции используются в телекоммуникационных приборах, применяемых в сетях цифровой волоконной связи. Бурное развитие телекоммуникаций привело к тому, что были разработаны лазеры, модуляторы, измерительные приборы, усилители сигналов и ряд других приборов и элементов [12, 13]. Поэтому многие современные исследования по оптическим АВМ используют виды волокон, источники излучения и измерительные приборы, изначально разработанные именно для телекоммуникационного применения.

Также большое влияние было оказано развитием цифровых оптических процессоров, поскольку в них тоже используются базовые, не зависящие от времени операции. Так, в работе [14] рассмотрен оптический процессор для умножения векторов и матриц, основанный на блоках разделения, объединения и усиления сигнала. Причём для оптических процессоров скорее характерно исполнение в виде интегральных оптических структур, т.е. реализованных на поверхности подложки в виде планарных оптических элементов и волноводов.

Суммирование оптических сигналов

Одной из базовых операций является сложение двух переменных величин, реализуемое для оптических сигналов путём их простого суммирования.

Суммирование оптических сигналов обычно производится с помощью буквального соединения волноводов, по которым распространяется излучение. В зависимости от вида волновода (планарного или оптического волокна) физическая реализация сумматора может отличаться, однако общая схема (рис. 2а) остаётся той же: волноводы либо объединяются в один, либо располагаются настолько близко друг к другу, что между распространяющимися в них пучками наблюдается взаимодействие [12]. В результате в выходном волноводе наблюдается сигнал, являющийся суммой двух исходных.

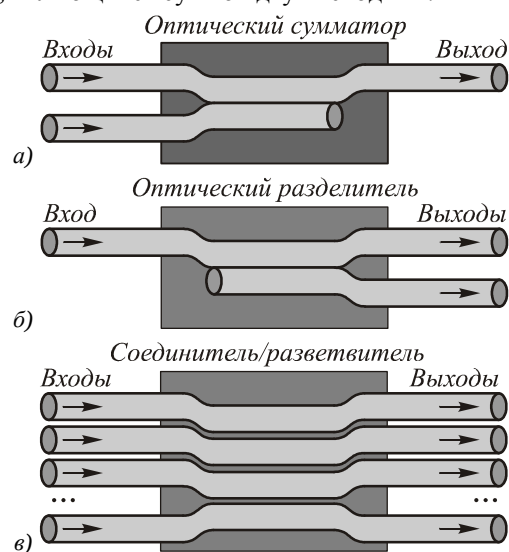


Рис. 2. Общая схема оптического сумматора (а), делителя (б) и соединителя/разветвителя общего вида (в)

Разделение оптического сигнала

На аналогичных эффектах основывается действие оптических разделителей (рис. 2б): подведённое по входному волноводу излучение возбуждает оба выходных волновода. В результате в выходных волноводах наблюдаются сигналы, сходные по характеристикам с исходным, но меньшей интенсивности.

Возможность оптического разделения сигнала позволяет реализовать ещё один фундаментальный элемент АВМ, – обратную связь: один из полученных после разделения сигналов может быть подведён по волноводу на вход блока, выполняющего более раннюю по порядку операцию. В этом случае время задержки будет определяться временем, за которое свет проходит образованный таким образом замкнутый контур волновода.

В общем случае возможно применение устройств, состоящих из нескольких оптических волокон, расположенных на определённом участке близко друг к другу или даже соединённых друг с другом (рис. 2в). Такие устройства называются оптическими разветвителями (optical splitters/couplers) [12].

Усиление оптического сигнала

Ещё одной базовой операцией является умножение переменной величины на заданное значение. Для оптического сигнала данная операция сводится к его ослаблению в случае умножения на величину менее единицы и к усилению в случае умножения на величину более единицы.

Для ослабления сигнала достаточно рассеять часть энергии или просто отвести часть энергии с помощью разделителя. Однако в силу невысокой энергетической эффективности операций дифференцирования и интегрирования более востребованным действием является, наоборот, усиление сигнала.

Усиление сигнала с заданными характеристиками может быть достигнуто путём применения оптических усилителей [15]. Широкое распространение получили усилители на основе оптического волокна, легированного ионами (doped fiber amplifiers, DFA). В них в качестве источника энергии выступает лазер, длина волны излучения которого отличается от длины волны основного используемого излучения. Лазер используется для возбуждения ионов в легированном участке волокна, которые потом излучают дополнительные фотоны под воздействием основного излучения. Наиболее широко применяются усилители на основе ионов эрбия (Erbium DFA, EDFA) [16-17].

Также достаточно широко применяются полупроводниковые оптические усилители (semiconductor optical amplifiers, SOA) [18-20], сходные по строению с лазерными диодами. В них источником энергии является электрический ток, что, с одной стороны, уменьшает их размеры и делает их более дешёвыми, но, с другой стороны, такие усилители обладают худшими характеристиками по сравнению с EDFA.

2. Реализация временных операций

Большой интерес представляют реализации зависящих от времени операций дифференцирования и интегрирования над переменными величинами, т.к. именно эти операции являются фундаментальной основой аналогового решения дифференциально-интегральных уравнений. Первые работы, посвящённые данной проблеме, появлялись значительно позже, чем работы, связанные с простыми операциями, причём по дифференцированию [21, 22] несколько раньше, чем по интегрированию [23-25], хотя интегрирование представляет намного больший интерес с точки зрения создания оптических АВМ. Существующие решения можно условно разделить на три группы по принципу их действия:

- основывающиеся на обратной связи и алгебраических аналогах операций,
- основывающиеся на характеристиках оптических структур в спектральной области,
- основывающиеся на характеристиках оптических структур во временной области.

Использование обратной связи и алгебраических аналогов операций

Первый подход опирается на интерпретации дифференцирования и интегрирования, характерные скорее для цифровой техники, чем для аналоговой. Так, в целом ряде работ [26-30] дифференцирование предлагается проводить путём разделения сигнала на два, введения временной задержки в канал одного из сигналов и последующего суммирования сигналов с весовыми коэффициентами. Таким образом, при правильном выборе коэффициентов получается аналоговый вариант конечной разности, являющейся приближением производной. На рис. 3 приведён пример схемы оптического дифференцирования, основанной на разделении сигнала и временной задержке, а также результаты оптического и численного дифференцирования гауссоподобного сигнала. Несложно убедиться, что наблюдается хорошее соответствие полученных результатов дифференцирования.

Аналогичный подход можно применить и для интегрирования, составив аналоговый вариант интегральной суммы (например, [23]). На рис. 4 приведена общая схема фильтра, использующегося при интегрировании по методу Ньютона-Котеса. Сигнал разделяется на заданное количество сигналов (определяется количеством членов в интегральной сумме), каждый из них в блоке ТС умножается на постоянный коэффициент (определяемый весовым коэффициентом члена в ряде), затем в блоке PS обеспечивается временная задержка, после чего производится суммирование всех сигналов.

В целом, такой подход, основанный на алгебраических приближениях требуемых функций, с одной стороны, прост, т.к. базовыми элементами становятся разделители сигнала, временные задержки и усилители, но, с другой стороны, сам способ такого вычисления производных и интегралов уже содержит некоторую погрешность.

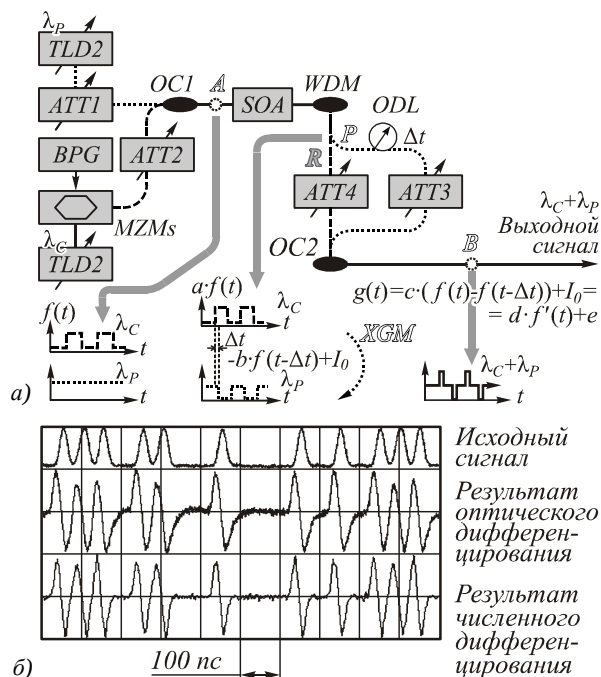


Рис. 3. Принцип действия и общая схема установки для оптического дифференцирования (TLD – настраиваемый лазерный диод, ATT – аттенюатор, BPG – генератор битов, MZMs – модулятор Маха-Цандера, OC – оптическое соединение, SOA – полупроводниковый оптический усилитель, WDM – мультиплексор с разделением по длине волны, ODL – линия оптической задержки, XGM – перекрёстная модуляция) (а), результаты дифференцирования (б) (рисунок взят из работы [27])

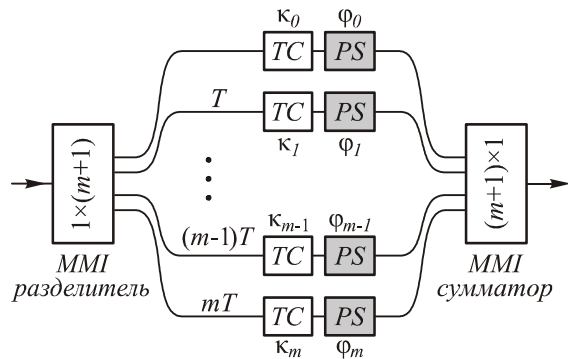


Рис. 4. Общая схема КИХ-фильтра, являющегося элементом интегрирующей схемы, основанной на применении формул Ньютона–Котеса (рисунок взят из работы [23])

Более того, величины применяющихся временных задержек имеют критическое влияние на характеристики элемента. В целом такие дифференцирующие устройства обладают низкой энергетической эффективностью (около 1%), высокой относительной ошибкой (порядка 10%), а успешно обрабатываемые сигналы могут иметь длительность порядка 100 пикосекунд. Для сравнения: электрические АВМ могли обрабатывать сигналы длительно-стью порядка микросекунд [9–11].

Впрочем, зарубежные работы основаны на применении простейших видов обратной связи, в то

время как существуют подходы, позволяющие получить качественно лучшие результаты [31]. Определение возможности использования таких методик для оптического дифференцирования является одним из направлений развития оптических АВМ.

Использование сходства спектральной характеристики

Второй подход основывается на том, что некоторые оптические элементы при определённых условиях имеют спектральную характеристику (функцию пропускания), близкую к характеристике дифференцирующего и интегрирующего элемента. Правда, такой подход характерен скорее для дифференцирующих элементов, и в основном в публикациях рассматриваются следующие два вида элементов: микрокольцевой резонатор [32] и брэгговская решётка в оптическом волокне [33, 34]. В первых работах [22, 35] приводятся только теоретические обоснования и результаты численного моделирования (причём обычно не в рамках строгой электромагнитной теории), но после этого появляются работы, в которых проведён натурный оптический эксперимент с устройствами-прототипами [36–38]. Результаты этих экспериментов показывают, что энергетическая эффективность составляет порядка 3%, при этом достижима ошибка менее 1% (эти параметры естественным образом взаимосвязаны).

На рис. 5 показан микрокольцевой резонатор, выполненный в виде планарного оптического элемента.

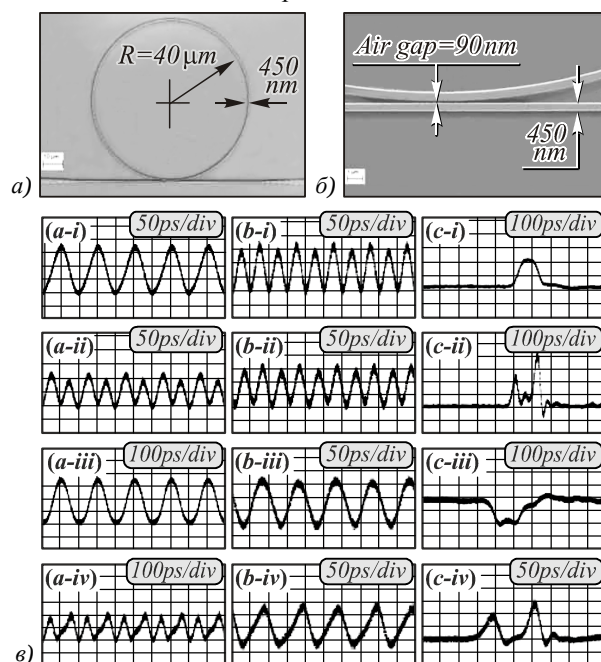


Рис. 5. Микрокольцевой резонатор (а) и его увеличенный фрагмент (б), результаты оптического дифференцирования (в) для разных видов сигнала: гауссоподобного (а-и, а-iii – входной сигнал; а-ii, а-iv – выходной сигнал), синусоидального (б-и, б-iii – входной сигнал; б-ii, б-iv – выходной сигнал) и импульсного (с-и, с-iii – входной сигнал; с-ii, с-iv – выходной сигнал) (ps – пикосекунды, div – деление на рисунке) (рисунок взят из работы [36])

Входной сигнал подаётся в подходящий к резонатору волновод, выходной сигнал снимается из этого же волновода. Полученные в рамках натурального оптического эксперимента [36] результаты дифференцирования для различных видов входного сигнала качественно совпадают с искомой производной.

Особый интерес представляют решения на основе брэгговских решёток в волокне, т.к. они имеют больше параметров реализации, чем, например, микрокольцевой резонатор, и путём их варьирования можно добиться принципиально иных результатов. Так, целый ряд работ [22, 37-40] посвящены тому, как путём изменения структуры решётки можно добиться более высоких точности и эффективности выполнения операции. Более того, предлагаются решения, когда элемент выполняет сразу вычисление производной заданного чётного порядка, и это решение оказывается намного более выгодным с энергетической точки зрения, чем применение последовательности дифференциаторов первого порядка [40].

На рис. 6а представлена общая структура волоконной брэгговской решётки. В случае решёток с регулярной структурой и решёток со сдвигом фазы (достигается с помощью нечётного числа неоднородностей решётки) спектральная характеристика, соответственно, в режиме пропускания и в режиме отражения будет в значительной мере совпадать с характеристикой операции дифференцирования. На рис. 6б приведена интенсивность входного сигнала, а на рис. 6в – квадрат значения производной, полученный в результате прохождения через волоконную брэгговскую решётку (сплошная линия) и в результате численного дифференцирования исходного сигнала (пунктирная линия) [39]. Точность дифференцирования, как нетрудно заметить, оказывается достаточно высокой.

Особый интерес представляет создание дифракционных оптических элементов (ДОЭ), спектральная характеристика которых обладает требуемыми свойствами. Преимущество такого подхода заключается в том, что дифференцирование производится с помощью ДОЭ, работающего в режиме пропускания, причём без формирования задержек и использования обратных связей. Первые результаты [41-42], полученные с помощью численного моделирования, показывают хорошие перспективы предлагаемого решения.

Формирование сигнала во временной области

Третий подход характерен в основном для интегрирующих устройств и основан на формировании сигнала во временной области. Для этого, опять же, в основном применяются микрокольцевые резонаторы и брэгговские решётки в волокне, но в несколько иных режимах использования, чем в случае дифференцирования. В целом, резонатор используется для многократной задержки в нём сигнала с последующим суммированием с текущим сигналом, что в сочетании с резонансными эффектами и приводит к интегрированию.

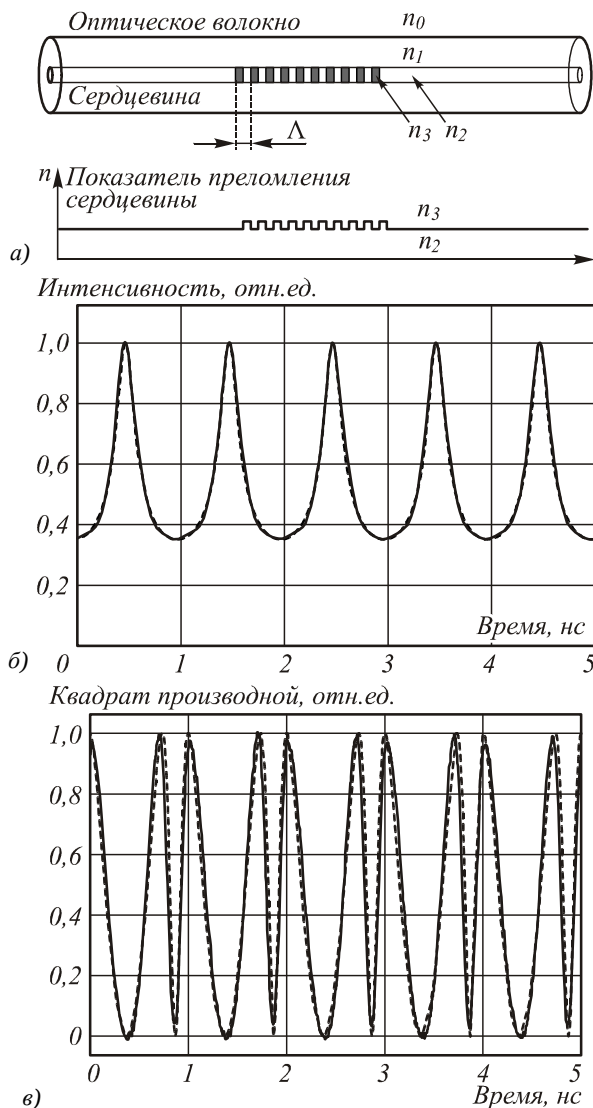


Рис. 6. Общая структура волоконной брэгговской решётки (а), интенсивность входного сигнала (б) и квадрат производной (в) по данным оптического (сплошная линия) и численного (пунктирная линия) экспериментов (рисунок взят из работы [39])

Основной проблемой при таком подходе является то, что окно интегрирования имеет конечную ширину, что приводит к ограничению длины корректно обрабатываемого сигнала. В целом достижимы ширина окна интегрирования порядка сотен пикосекунд, энергетическая эффективность порядка 10%, разрешающая способность по длительности сигнала порядка 10 пикосекунд, а возможная ошибка порядка 1%.

Использование микрокольцевых резонаторов для интегрирования [32, 35, 43, 44] несколько отличается от их использования для дифференцирования (рис. 7): выходной сигнал обычно снимается не из того же волновода, по которому подаётся входной, а из дополнительного. На рис. 8а-г приведено сравнение результатов численного и оптического интегрирования сигналов для различных видов сигналов [43].

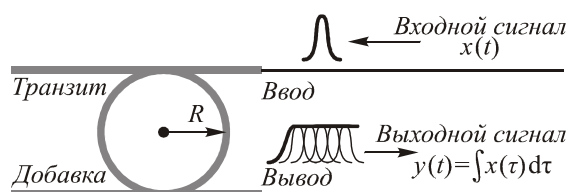
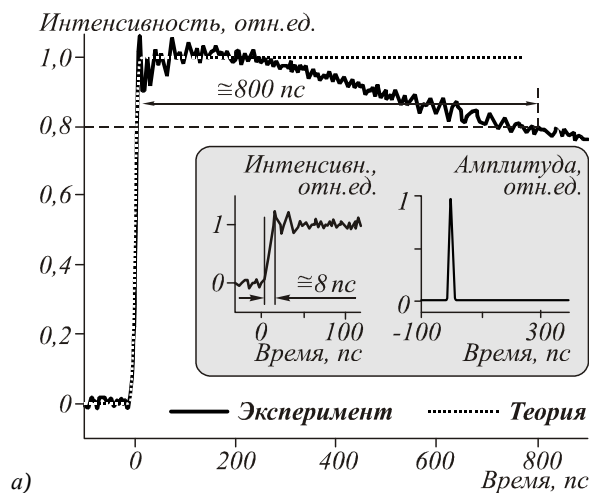
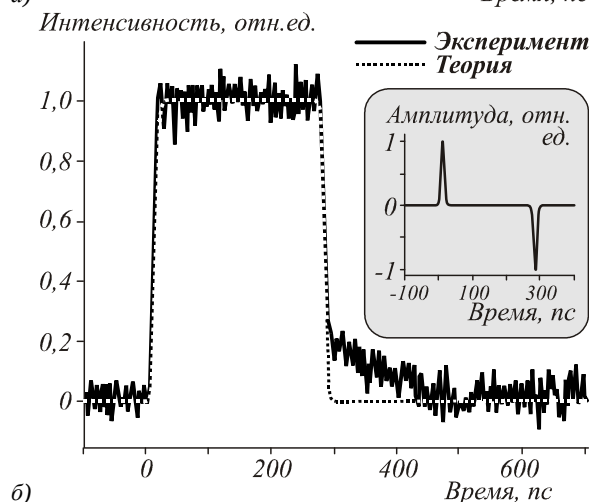


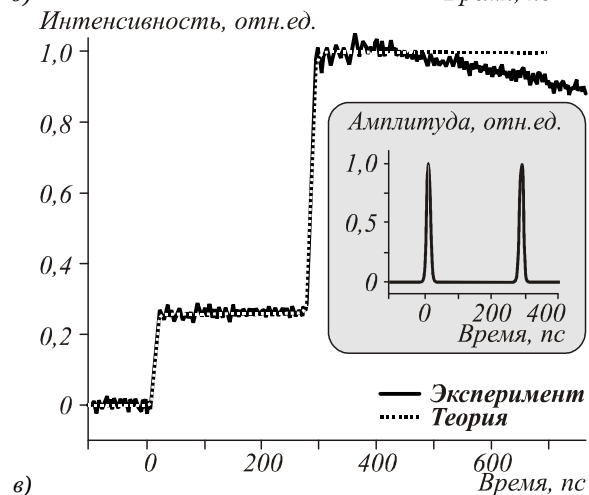
Рис. 7. Общий принцип интегрирования с помощью микрокольцевого резонатора (рисунок взят из работы [43])



а)



б)



в)

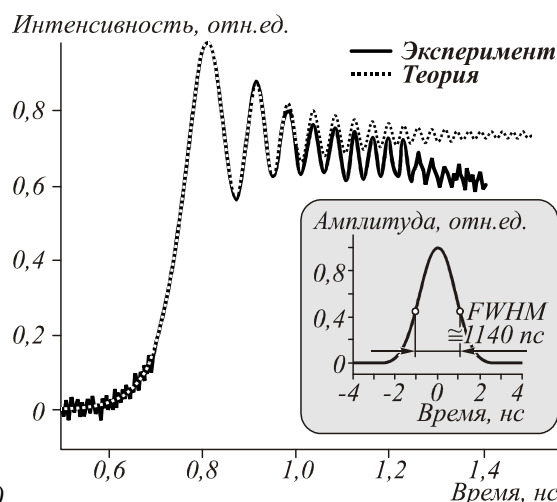


Рис. 8. Сравнение результатов численного и оптического экспериментов для различных видов сигнала (а-г) (рисунки взяты из работы [43])

Анализ результатов показывает, что достигается достаточно высокая точность интегрирования, однако она стремительно падает при выходе за пределы окна интегрирования.

Аналогично, для интегрирования используются волоконные брэгговские решетки [24, 25, 45–50]. При прохождении через решетку свет испытывает множественные переотражения на внутренних поверхностях участков с измененным показателем преломления. Это позволяет получать на выходе такого волокна не только сам сигнал, но и его повторения, характеристики которых определяются свойствами решетки. При этом решетки с регулярной структурой используются в режиме отражения [25], а решетки с фазовым сдвигом – в режиме пропускания [24].

Общая схема интегратора показана на рис. 9а.

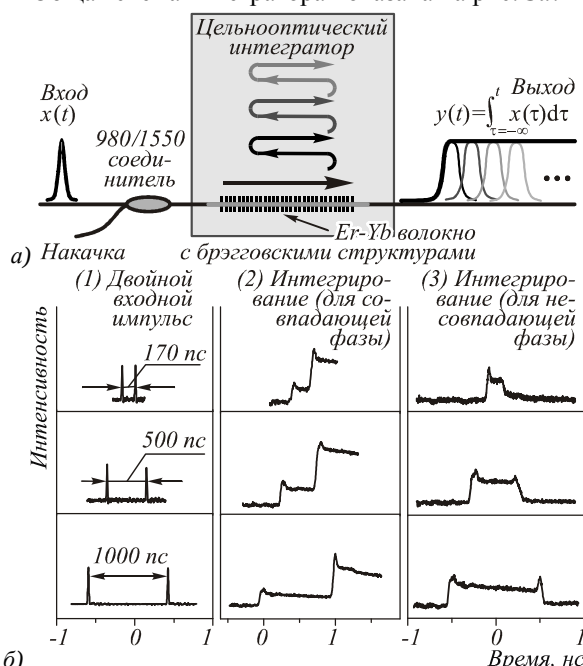


Рис. 9. Общая схема интегратора на основе брэгговской решетки (а) результат интегрирования для двух импульсов (б) (рисунок взят из работы [47])

На рис. 9б приведены полученные в ходе натурального оптического эксперимента [47] результаты интегрирования входного сигнала, сформированного из двух отдельных импульсов. Результаты демонстрируют качественное совпадение с искомой функцией интеграла, при этом также наблюдается влияние конечного окна интегрирования на результат.

Варьирование параметров решётки позволяет получать более высокую точность и энергетическую эффективность интегрирования [49], а также вычислять интегралы чётного порядка без применения повторного интегрирования [46]. Также рассмотрены способы увеличения ширины окна интегрирования, вплоть до длительности порядка сотен пикосекунд [50].

3. Решение дифференциальных уравнений

Несмотря на достаточную сложность реализации, рассмотренные операции дифференцирования и интегрирования являются лишь элементами при построении более сложных устройств, нацеленных на решение дифференциальных уравнений.

В работе [47] приводится уже не просто расчёт характеристик оптического элемента и результаты его работы на тестовых сигналах, но пример и результаты оптического эксперимента по решению обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка. На рис. 10 приведена постановка задачи решения дифференциального уравнения первого порядка, а также результаты оптического эксперимента (непрерывные графики) в сравнении с результатами численного решения (точки решений отмечены кружками). Совпадение оптического и численного решений подтверждает возможность и актуальность создания оптических АВМ нового поколения.

Заключение

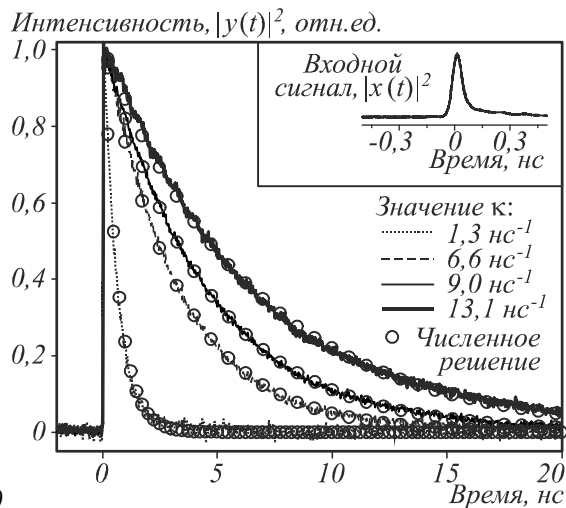
Возвращаясь к вопросам, поставленным в начале, можно сказать следующее. В основу элементной базы оптических АВМ могут лечь оптические элементы, обладающие резонансными свойствами: брэгговские решётки, микрокольцевые резонаторы и ДОЭ, причём обеспечение высокой точности работы элементов потребует высокого качества их реализации и применения лазеров с настраиваемой длиной волны. По сравнению же с электрическими АВМ оптические АВМ будут обладать высокой скоростью реакции и разрешающей способностью (порядка 10 пикосекунд против микросекунд), компактностью и возможностью интеграции в системы сбора и передачи информации на основе оптических волокон.

В качестве возможных направлений работ следует рассмотреть следующие:

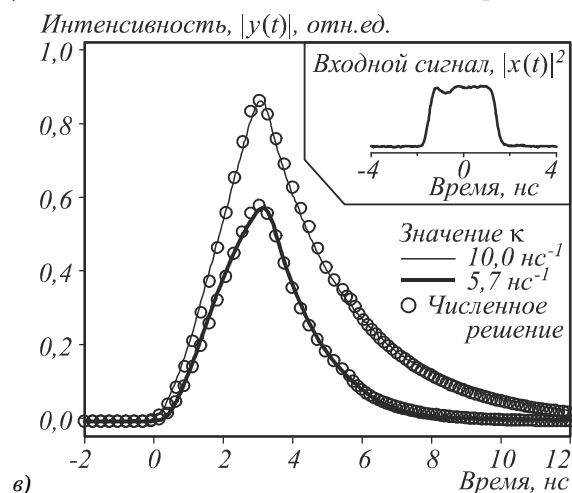
- определение возможности применения схем с обратной связью, а также различных резонансных структур и дифракционных оптических элементов для дифференцирования/интегрирования оптического сигнала (на основе моделирования в рамках строгой электромагнитной теории);

Оператор интегрирования	$x(t) \rightarrow \int (\) \rightarrow y(t) = \int_{\tau=-\infty}^t x(\tau) d\tau$
Дифференциальное уравнение первого порядка	$\frac{dy(t)}{dt} + \kappa y(t) = x(t)$
Реализация	$x(t) \rightarrow \oplus \rightarrow \int (\) \rightarrow y(t) = \int_{\tau=-\infty}^t x(\tau) d\tau - \kappa \int_{\tau=-\infty}^t y(\tau) d\tau$

а)



б)



в)

Рис. 10. Пример решения дифференциального уравнения: постановка задачи (а), решения для двух видов входного сигнала и различных значений параметра уравнения (б, в) (рисунок взят из работы [47])

- определение на основе моделирования характеристик выполнения операций и условий применимости оптических элементов (точности выполнения, энергетической эффективности, допустимых диапазонов длин волн и т.д.);

- определение зависимости характеристик выполнения операций от качества реализации оптических структур (также на основе моделирования);

- создание прототипов оптических элементов, выполняющих дифференцирование и интегрирование оптического сигнала (с учётом рекомендаций, полученных на предыдущих этапах);

- разработка рекомендаций относительно возможных реализаций АВМ с учётом характеристик элементной базы.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (Государственный контракт №07.514.11.4055), а также грантов РФФИ (гранты №10-07-00438-а, №10-07-00553-а) и грантов Президента Российской Федерации НШ – 4128.2012.9, № МД - 1041.2011.2.

Литература

1. **Рыжиков, Ю.И.** Вычислительные методы / Ю.И. Рыжиков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 400 с.
2. **Самарский, А.А.** Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 656 с.
3. **Витенберг, И.М.** Быстродействующие аналоговые вычислительные машины / И.М. Витенберг. – М.: Энергия, 1970. – 136 с.
4. **Коган, Б.Я.** Электронные моделирующие устройства и их применение для исследования систем автоматического регулирования / Б.Я. Коган. – М.: Физматгиз, 1963. – 512 с.
5. **Котляр, В.В.** Фотонно-кристаллическая линза для сопряжения двух планарных волноводов / В.В. Котляр, Я.Р. Триандафилов, А.А. Ковалёв, М.И. Котляр, А.В. Волков, Б.О. Володкин, В.А. Сойфер, Лим О'Фелон, Томас Краусс // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 4. – С. 326-336.
6. **Дьяченко, П.Н.** Формирование и исследование трёхмерных металлодиэлектрических фотонных кристаллов инфракрасного диапазона / П.Н. Дьяченко, С.В. Карпеев, В.С. Павельев // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 4. – С. 501-505.
7. Дифракционная компьютерная оптика / под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2007. – 736 с.
8. **Сойфер, В.А.** Дифракционные оптические элементы в устройствах нанофотоники / В.А. Сойфер, В.В. Котляр, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33, № 4. – С. 352-368.
9. **Тетельбаум, И.М.** 400 схем для АВМ / И.М. Тетельбаум, Ю.Р. Шнейдер. – М.: Энергия, 1978. – 248 с.
10. **Лебедев, А.** Аналоговые и гибридные вычислительные машины / Андрей Лебедев, Владимир Смолов. – М.: Высшая школа, 1984. – 320 с.
11. **Левин, Л.** Методы решения технических задач с использованием аналоговых вычислительных машин / Л. Левин. – М.: Мир, 1966. – 416 с.
12. **Downing, J.** Fiber Optic Communications / James Downing. – Thomson Delmar Learning, 2005. – 380 с.
13. **Зубаченко, В.Л.** Эффективность применения изделий оптоэлектроники в вычислительных и телекоммуникационных сетях / В.Л. Зубаченко // Компьютерная оптика. – 2006. – Т. 30. – С. 92-97.
14. **Ngo, N.Q.** Fiber-optic array algebraic processing architectures / Nam Q. Ngo, Le Nguyen Bihn // Appl. Opt. – 1995. – Vol. 34(5). – P. 803-815.
15. **DeCusatis, C.** Fiber Optics Essentials / Casimer DeCusatis, Carolyn J. Sher DeCusatis. – Elsevier Inc., 2006. – 272 p.
16. **Desurvire, E.** High-gain erbium-doped travelling-wave fiber amplifier / E. Desurvire, J. Simpson, P.C. Baker // Opt. Letters. – 1987. – Vol. 12(11). – P. 888-890.
17. **Bai, N.** Multimode fiber amplifier with tunable modal gain using a reconfigurable multimode pump / Neng Bai, Ezra Ip, Ting Wang, Guifang Li // Opt. Express. – 2011. – Vol. 19(17). – P. 16601-16611.
18. **Connolly, M.J.** Semiconductor Optical Amplifiers / Michael J. Connolly. – Kluwer Academic Publishers, 2002. – 172 p.
19. **Ginovart, F.** Semiconductor Optical Amplifier Studies Under Optical Injection at the Transparency Wavelength in Copropagative Configuration / Frederic Ginovart, Mohammad Amaya, Ammar Sharaiha // J. of Lightwave Tech. – 2007. – Vol. 25(3). – P. 840-849.
20. **Mikkelsen, B.** Use of semiconductor optical amplifiers for high-speed optical signal processing / B. Mikkelsen, M. Vaa, S.L. Danielsen, N.H. Poulsen, C. Joergensen, K.S. Jepsen, R.J.S. Pedersen, K.E. Stubkjaer, P. Dousiere, T. Ducellier, F. Pommerau, L. Goldstein, R. Ngo, M. Goix, K. Wunstel, K. Daub, E. Lach, G. Laube, W. Idler, M. Schilling, R. Hess, M. Duelk, W. Vogt, P.A. Besse, H. Melchior, S. Bouchoule // Optical Amplifiers and Their Applications (OAA). – 1997. – P. 213-216.
21. **Ngo, N.Q.** A new theoretical basis of higher-derivative optical differentiators / N.Q. Ngo, S.F. Yu, S.C. Tjin, C.H. Kam // Opt. Commun. – 2004. – Vol. 230. – P. 115-129.
22. **Kulishov, M.** Long-period fiber-gratings as ultrafast optical differentiators / Mykola Kulishov, José Azaña // Opt. Letters. – 2005. – Vol. 30(20). – P. 2700-2702.
23. **Ngo, N.Q.** Optical Realization of Newton-Cotes-Based Integrators for Dark Soliton Generation / Nam Quoc Ngo, Le Nguyen Bihn // J. of Lightwave Tech. – 2006. – Vol. 24(1). – P. 563-572.
24. **Ngo, N.Q.** Design of an optical temporal integrator based on a phase-shifted fiber Bragg grating in transmission // Nam Quoc Ngo // Opt. Letters. – 2007. – Vol. 32(20). – P. 3020-3022.
25. **Azaña, J.** Proposal of a uniform fiber Bragg grating as an ultrafast all-optical integrator / José Azaña // Opt. Letters. – 2008. – Vol. 33(1). – P. 4-6.
26. **Li, Zh.** Polarization temporal differentiation with application to pulse multiplication and reshaping / Zhengyong Li, Chongqing Wu // J. Opt. Soc. Am. B. – 2011. – Vol. 28(10). – P. 2347-2351.
27. **Xu, J.** All-optical differentiator based on cross-gain modulation in semiconductor optical amplifier / Jing Xu, Xinliang Zhang, Jianji Dong, Deming Liu, Dexiu Huang // Opt. Letters. – 2007. – Vol. 32(20). – P. 3029-3031.
28. **Park, Y.** Ultrafast all-optical first- and higher-order differentiators based on interferometers / Y. Park, J. Azaña, R. Slavik // Opt. Letters. – 2007. – Vol. 32(6). – P. 710-712.
29. **Xu, J.** High-speed all-optical differentiator based on a semiconductor optical amplifier and an optical filter / Jing Xu, Xinliang Zhang, Jianji Dong, Deming Liu, Dexiu Huang // Opt. Letters. – 2007. – Vol. 32(13). – P. 1872-1874.
30. **Velanas, P.** High-speed All-Optical First- and Second-Order Differentiators Based on Cross-Phase Modulation in Fibers / Pantelis Velanas, Adonis Bogris, Apostolos Argyris, Dimitris Syvridis // J. of Lightwave Tech. – 2008. – Vol. 26(18). – P. 3269-3277.
31. **Емельянов, С.В.** Новые типы обратной связи: управление при неопределённости / С.В. Емельянов, С.К. Корвин. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 352 с.
32. **Soundra Pandian, G.** Optical pulse response of a fiber ring resonator / G. Soundra Pandian and F.E. Seraji // IEEE Proceedings J. – 1991. – Vol. 138(3). – P. 235-239.
33. **Kashyap, R.** Fiber Bragg Gratings / Raman Kashyap. – Elsevier, 2009. – 614 p.
34. **Kulishov, M.** Ultrashort pulse propagation in uniform and nonuniform waveguide long-period gratings / Mykola Kulishov, José Azaña // J. Opt. Soc. Am. A. – 2005. – Vol. 22(7). – P. 1319-1333.
35. **Li, L.** Microring resonator-coupled Mach-Zender Interferometer as trigger pulse generator, optical differentiator and integrator / Li Li, Xinlu Zhang, Pingping Sun, Lixue Chen

- // Proceedings of SPIE. – 2007. – Vol. 6595. – P. 659513-1 – 659513-8.
36. **Liu, F.** Compact optical temporal differentiator based on silicon microring resonator / Fagfei Liu, Tao Wang, Li Qiang, Tong Ye, Ziyang Zhang, Min Qiu, Yikai Su // *Opt. Express*. – 2008. – Vol. 16(20). – P. 15880-15886.
 37. **Slavik, R.** Temporal differentiation of sub-picosecond optical pulses using a single long period fiber grating / R. Slavik, M. Kulishov, Y. Park, J. Azaña, R. Morandotti // *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. – 2006. – Paper CTuBB5.
 38. **Slavik, R.** Ultrafast all-optical differentiators / Radan Slavik, Yongwoo Park, Mykola Kulishov, Roberto Morandotti, José Azaña // *Opt. Express*. – 2006. – Vol. 14(22). – P. 10699-10707.
 39. **Berger, N.K.** Temporal differentiation of optical signals using a phase-shifted fiber Bragg grating / Naum K. Berger, Boris Levit, Baruch Fisher, Mykola Kulishov, David V. Plant, José Azaña // *Opt. Express*. – 2007. – Vol. 15(2). – P. 371-381.
 40. **Rivas, L.M.** Experimental demonstration of ultrafast all-fiber high-order photonic temporal differentiators / Luis M. Rivas, Sylvian Boudreau, Yongwoo Park, Radan Slavik, Sophie LaRochelle, Alejandro Carballar, José Azaña // *Opt. Letters*. – 2009. – Vol. 34(12). – P. 1792-1794.
 41. **Bykov, D.A.** Temporal differentiation of optical signals using resonant gratings / Dmitry A. Bykov, Leonid L. Doskolovich, Viktor A. Soifer // *Opt. Letters*. – 2011. – Vol. 36(17). – P. 3509-3511.
 42. **Быков, Д.А.** О способности резонансных дифракционных решёток дифференцировать импульсный оптический сигнал / Д.А. Быков, Л.Л. Досколович, В.А. Сойфер // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2012. – готовится к печати.
 43. **Ferrera, M.** Ultra-Fast All-Optical Integration on a Silicon Chip / M. Ferrera, Y. Park, L. Razzari, B.E. Little, S.T. Chu, R. Morandotti, D.J. Moss, J. Azaña // *Latin America Optics and Photonics Conference (LAOP)*. – 2010. – Paper W12.
 44. **Ferrera, M.** All-optical 1st and 2nd order integration on a chip / Marcello Ferrera, Yongwoo Park, Luca Razzari, Brent E. Little, Sai T. Chu, Roberto Morandotti, David J. Moss, José Azaña // *Opt. Express*. – 2011. – Vol. 19(23). – P. 23153-23161.
 45. **Preciado, M.A.** Ultrafast all-optical integrator based on a fiber Bragg grating: proposal and design / Miguel A. Preciado, Miguel A. Muriel // *Opt. Letters*. – 2008. – Vol. 33(12). – P. 1348-1350.
 46. **Asghari, M.H.** Proposal for arbitrary-order temporal integration of ultrafast optical signals using a single uniform-period fiber Bragg grating / Mohammad H. Asghari, José Azaña // *Opt. Letters*. – 2008. – Vol. 33(13). – P. 1548-1550.
 47. **Slavik, R.** Photonic temporal integrator for all-optical computing / Radan Slavik, Yongwoo Park, Nicolas Ayotte, Serge Doucet, Tae-Jung Ahn, Sophie LaRochelle, José Azaña // *Opt. Express*. – 2008. – Vol. 16(22). – P. 18202-18214.
 48. **Park, Y.** All-optical temporal integration of ultrafast pulse waveforms / Yongwoo Park, Tae-Jung Ahn, Yitang Dai, Jianping Yao, José Azaña // *Opt. Express*. – 2008. – Vol. 16(22). – P. 17817-17825.
 49. **Asghari, M.H.** On the Design of Efficient and Accurate Arbitrary-Order Temporal Optical Integrators Using Fiber Bragg Gratings / Mohammad Hossein Asghari, José Azaña // *J. of Lightwave Tech.* – 2009. – Vol. 27(17). – P. 3888-3895.
 50. **Asghari, M.H.** New Design for photonic temporal integration with combined high processing speed and long operation time window / Mohammad H. Asghari, Yongwoo Park, José Azaña // *Opt. Express*. – 2011. – Vol. 19(2). – P. 425-435.

References

1. **Rizhikov, Yu.I.** Numerical methods / Yu.I. Rizhikov. – Saint Petersburg: “BHV-Peterburg” Publisher, 2007. – 400 p. – (in Russian).
2. **Samarskiy, A.A.** Theory of difference schemes / A.A. Samarskiy. – Moscow: “Nauka” Publisher, 1977. – 656 p. – (in Russian).
3. **Vitenberg, I.M.** Fast operating analog computers / I.M. Витенберг. – Moscow: “Energiya” Publisher, 1970. – 136 p. – (in Russian).
4. **Kogan, B.Ya.** Electronic simulators and their application to the study of automatic control systems / B.Ya. Kogan. – Moscow: “Phizmatgiz” Publisher, 1963. – 512 p. – (in Russian).
5. **Kotlyar, V.V.** Photonic crystal lens for coupling two planar waveguides / V.V. Kotlyar, Ya.R. Triandafilov, A.A. Kovalev, M.I. Kotlyar, A.V. Volkov, B.O. Volodkin, V.A. Soifer, Lim O’Felon, Thomas Krauss // *Computer Optics*. – 2008. – V. 32, N 4. – P. 326-336. – (in Russian).
6. **Dyachenko, P.N.** Fabrication and investigation of three-dimensional metallodielectric photonic crystals for infrared range / P.N. Dyachenko, S.V. Karpeev, V.S. Pavelyev // *Computer Optics*. – 2010. – V. 34, N 4. – P. 501-505. – (in Russian).
7. *Diffractional computer optics* / edited by V.A. Soifer. – Moscow: “Fizmatlit” Publisher, 2007. – 736 p. – (in Russian).
8. **Soifer, V.A.** Diffractive optical elements in nanophotonics devices / V.A. Soifer, V.V. Kotlyar, L.L. Doskolovich // *Computer Optics*. – 2009. – V. 33, N4. – P. 352-368. – (in Russian).
9. **Tetelbaum, I.M.** 400 schemes for analog computers / I.M. Tetelbaum, Yu.R. Schneider. – Moscow: “Energiya” Publisher, 1978. – 248 p. – (in Russian).
10. **Lebedev, A.** Analog and hybrid computers / Andrey Lebedev, Vladimir Smolov. – Moscow: “Visshaya Shkola” Publisher, 1984. – 320 p. – (in Russian).
11. **Levine, L.** Methods for Solving Engineering Problems Using Analog Computers / L. Levine. – New York: McGraw-Hill, 1964. – 485 p.
12. **Downing, J.** Fiber Optic Communications / James Downing. – Thomson Delmar Learning, 2005. – 380 c.
13. **Zubachenko, V.L.** Effectiveness of optoelectronic devices usage in computation and telecommunication networks / B.L. Зубаченко // *Computer Optics*. – 2006. – V. 30. – P. 92-97. – (in Russian).
14. **Ngo, N.Q.** Fiber-optic array algebraic processing architectures / Nam Q. Ngo, Le Nguyen Bihn // *Appl. Opt.* – 1995. – Vol. 34(5). – P. 803-815.
15. **DeCusatis, C.** Fiber Optics Essentials / Casimer DeCusatis, Carolyn J. Sher DeCusatis. – Elsevier Inc., 2006. – 272 p.
16. **Desurvire, E.** High-gain erbium-doped travelling-wave fiber amplifier / E. Desurvire, J. Simpson, P.C. Baker // *Opt. Letters*. – 1987. – Vol. 12(11). – P. 888-890.
17. **Bai, N.** Multimode fiber amplifier with tunable modal gain using a reconfigurable multimode pump / Neng Bai, Ezra Ip, Ting Wang, Guifang Li // *Opt. Express*. – 2011. – Vol. 19(17). – P. 16601-16611.
18. **Connelly, M.J.** Semiconductor Optical Amplifiers / Michael J. Connelly. – Kluwer Academic Publishers, 2002. – 172 p.
19. **Ginovart, F.** Semiconductor Optical Amplifier Studies Under Optical Injection at the Transparency Wavelength in Copropagative Configuration / Frederic Ginovart, Mohammad Amaya, Ammar Sharaiha // *J. of Lightwave Tech.* – 2007. – Vol. 25(3). – P. 840-849.
20. **Mikkelsen, B.** Use of semiconductor optical amplifiers for high-speed optical signal processing / B. Mikkelsen,

- M. Vaa, S.L. Danielsen, N.H. Poulsen, C. Joergensen, K.S. Jepsen, R.J.S. Pedersen, K.E. Stubkjaer, P. Dousiere, T. Ducellier, F. Pommerau, L. Goldstein, R. Ngo, M. Goix, K. Wunstel, K. Daub, E. Lach, G. Laube, W. Idler, M. Schilling, R. Hess, M. Duellk, W. Vogt, P.A. Besse, H. Melchior, S. Bouchoule // *Optical Amplifiers and Their Applications (OAA)*. – 1997. – P. 213-216.
21. **Ngo, N.Q.** A new theoretical basis of higher-derivative optical differentiators / N.Q. Ngo, S.F. Yu, S.C. Tjin, C.H. Kam // *Opt. Commun.* – 2004. – Vol. 230. – P. 115-129.
 22. **Kulishov, M.** Long-period fiber-gratings as ultrafast optical differentiators / Mykola Kulishov, José Azaña // *Opt. Letters*. – 2005. – Vol. 30(20). – P. 2700-2702.
 23. **Ngo, N.Q.** Optical Realization of Newton-Cotes-Based Integrators for Dark Soliton Generation / Nam Quoc Ngo, Le Nguyen Bihn // *J. of Lightwave Tech.* – 2006. – Vol. 24(1). – P. 563-572.
 24. **Ngo, N.Q.** Design of an optical temporal integrator based on a phase-shifted fiber Bragg grating in transmission // Nam Quoc Ngo // *Opt. Letters*. – 2007. – Vol. 32(20). – P. 3020-3022.
 25. **Azaña, J.** Proposal of a uniform fiber Bragg grating as an ultrafast all-optical integrator / José Azaña // *Opt. Letters*. – 2008. – Vol. 33(1). – P. 4-6.
 26. **Li, Zh.** Polarization temporal differentiation with application to pulse multiplication and reshaping / Zhengyong Li, Chongqing Wu // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 2011. – Vol. 28(10). – P. 2347-2351.
 27. **Xu, J.** All-optical differentiator based on cross-gain modulation in semiconductor optical amplifier / Jing Xu, Xinliang Zhang, Jianji Dong, Deming Liu, Dexiu Huang // *Opt. Letters*. – 2007. – Vol. 32(20). – P. 3029-3031.
 28. **Park, Y.** Ultrafast all-optical first- and higher-order differentiators based on interferometers / Y. Park, J. Azaña, R. Slavik // *Opt. Letters*. – 2007. – Vol. 32(6). – P. 710-712.
 29. **Xu, J.** High-speed all-optical differentiator based on a semiconductor optical amplifier and an optical filter / Jing Xu, Xinliang Zhang, Jianji Dong, Deming Liu, Dexiu Huang // *Opt. Letters*. – 2007. – Vol. 32(13). – P. 1872-1874.
 30. **Velanas, P.** High-speed All-Optical First- and Second-Order Differentiators Based on Cross-Phase Modulation in Fibers / Pantelis Velanas, Adonis Bogris, Apostolos Argyris, Dimitris Syvridis // *J. of Lightwave Tech.* – 2008. – Vol. 26(18). – P. 3269-3277.
 31. **Emelyanov, S.V.** New feedback types: control in uncertain conditions / S.V. Emelyanov, S.K. Korovin. – Moscow: "Nauka" and "Fizmatlit" Publishers, 1997. – 352 p. – (in Russian).
 32. **Soundra Pandian, G.** Optical pulse response of a fiber ring resonator / G. Soundra Pandian and F.E. Seraji // *IEEE Proceedings J.* – 1991. – Vol. 138(3). – P. 235-239.
 33. **Kashyap, R.** *Fiber Bragg Gratings* / Raman Kashyap. – Elsevier, 2009. – 614 p.
 34. **Kulishov, M.** Ultrashort pulse propagation in uniform and nonuniform waveguide long-period gratings / Mykola Kulishov, José Azaña // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2005. – Vol. 22(7). – P. 1319-1333.
 35. **Li, L.** Microring resonator-coupled Mach-Zender Interferometer as trigger pulse generator, optical differentiator and integrator / Li Li, Xinlu Zhang, Pingping Sun, Lixue Chen // *Proceedings of SPIE*. – 2007. – Vol. 6595. – P. 659513-1 – 659513-8.
 36. **Liu, F.** Compact optical temporal differentiator based on silicon microring resonator / Fagfei Liu, Tao Wang, Li Qiang, Tong Ye, Ziyang Zhang, Min Qiu, Yikai Su // *Opt. Express*. – 2008. – Vol. 16(20). – P. 15880-15886.
 37. **Slavik, R.** Temporal differentiation of sub-picosecond optical pulses using a single long period fiber grating / R. Slavik, M. Kulishov, Y. Park, J. Azaña, R. Morandotti // *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. – 2006. – Paper CTuBB5.
 38. **Slavik, R.** Ultrafast all-optical differentiators / Radan Slavik, Yongwoo Park, Mykola Kulishov, Roberto Morandotti, José Azaña // *Opt. Express*. – 2006. – Vol. 14(22). – P. 10699-10707.
 39. **Berger, N.K.** Temporal differentiation of optical signals using a phase-shifted fiber Bragg grating / Naum K. Berger, Boris Levit, Baruch Fisher, Mykola Kulishov, David V. Plant, José Azaña // *Opt. Express*. – 2007. – Vol. 15(2). – P. 371-381.
 40. **Rivas, L.M.** Experimental demonstration of ultrafast all-fiber high-order photonic temporal differentiators / Luis M. Rivas, Sylvain Boudreau, Yongwoo Park, Radan Slavik, Sophie LaRochelle, Alejandro Carballar, José Azaña // *Opt. Letters*. – 2009. – Vol. 34(12). – P. 1792-1794.
 41. **Bykov, D.A.** Temporal differentiation of optical signals using resonant gratings / Dmitry A. Bykov, Leonid L. Doskolovich, Viktor A. Soifer // *Opt. Letters*. – 2011. – Vol. 36(17). – P. 3509-3511.
 42. **Bykov, D.A.** On the ability of resonance diffractive gratings to differentiate an impulse optical signal / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, V.A. Soifer // *J. of Experimental and Theoretical Physics*. – 2012. – In press. – (in Russian).
 43. **Ferrera, M.** Ultra-Fast All-Optical Integration on a Silicon Chip / M. Ferrera, Y. Park, L. Razzari, B.E. Little, S.T. Chu, R. Morandotti, D.J. Moss, J. Azaña // *Latin America Optics and Photonics Conference (LAOP)*. – 2010. – Paper W12.
 44. **Ferrera, M.** All-optical 1st and 2nd order integration on a chip / Marcello Ferrera, Yongwoo Park, Luca Razzari, Brent E. Little, Sai T. Chu, Roberto Morandotti, David J. Moss, José Azaña // *Opt. Express*. – 2011. – Vol. 19(23). – P. 23153-23161.
 45. **Preciado, M.A.** Ultrafast all-optical integrator based on a fiber Bragg grating: proposal and design / Miguel A. Preciado, Miguel A. Muriel // *Opt. Letters*. – 2008. – Vol. 33(12). – P. 1348-1350.
 46. **Asghari, M.H.** Proposal for arbitrary-order temporal integration of ultrafast optical signals using a single uniform-period fiber Bragg grating / Mohammad H. Asghari, José Azaña // *Opt. Letters*. – 2008. – Vol. 33(13). – P. 1548-1550.
 47. **Slavik, R.** Photonic temporal integrator for all-optical computing / Radan Slavik, Yongwoo Park, Nicolas Ayotte, Serge Doucet, Tae-Jung Ahn, Sophie LaRochelle, José Azaña // *Opt. Express*. – 2008. – Vol. 16(22). – P. 18202-18214.
 48. **Park, Y.** All-optical temporal integration of ultrafast pulse waveforms / Yongwoo Park, Tae-Jung Ahn, Yitang Dai, Jianping Yao, José Azaña // *Opt. Express*. – 2008. – Vol. 16(22). – P. 17817-17825.
 49. **Asghari, M.H.** On the Design of Efficient and Accurate Arbitrary-Order Temporal Optical Integrators Using Fiber Bragg Gratings / Mohammad Hossein Asghari, José Azaña // *J. of Lightwave Tech.* – 2009. – Vol. 27(17). – P. 3888-3895.
 50. **Asghari, M.H.** New Design for photonic temporal integration with combined high processing speed and long operation time window / Mohammad H. Asghari, Yongwoo Park, José Azaña // *Opt. Express*. – 2011. – Vol. 19(2). – P. 425-435.

PROSPECTS OF OPTICAL ANALOG COMPUTERS DEVELOPMENT

A. V. Gavrilov, V. A. Soifer

Image Processing Systems Institute of the RAS,

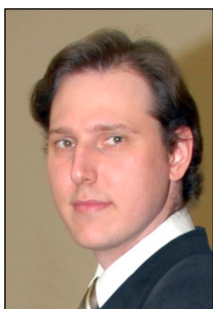
S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University)

Abstract

Prospects of creating analog computers, in which light characteristics are used as variables, are considered. Present approaches to implementation of base operations (addition, separation, amplification, differentiation and integration) are described. The results of optical experiments and numerical simulations are cited that prove an opportunity of optical analog computers creating. Also a summary on base operations effectiveness and precision are cited.

Key words: analog computer, optical fiber, optical amplifier, microring resonator, fiber Bragg grating.

Сведения об авторах



Гаврилов Андрей Вадимович, 1982 года рождения. В 2005 году окончил с отличием Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ). В 2009 году защитил диссертацию на соискание степени кандидата физико-математических наук. В настоящее время работает доцентом кафедры технической кибернетики СГАУ. Круг научных интересов включает моделирование распространения электромагнитного излучения в волноводах, а также параллельные и распределённые вычисления. Имеет более 30 публикаций по темам исследований.

E-mail: Andrey.W.Gavrilov@gmail.com.

Andrey Vadimovich Gavrilov (b. 1982), graduated with honors (2005) from the S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU). He is PhD in Physics and Mathematics (2009).

At present he is an Associate Professor at SSAU's Technical Cybernetics department. The area of interests includes simulation of light propagation in waveguides as well as parallel and distributed computing. He's list of publications contains more than 30 scientific papers.



Сойфер Виктор Александрович – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, директор Института систем обработки изображений РАН. Лауреат государственной премии и премии правительства РФ в области науки и техники. Диплом инженера получил в Куйбышевском авиационном институте, ныне – Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) в 1968 году. Докторскую диссертацию защитил в 1979 году в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ». Автор и соавтор значительного числа научных публикаций с высоким индексом цитируемости, 10 книг и 50 авторских свидетельств и патентов.

E-mail: soifer@ssau.ru.

Victor Alexandrovich Soifer is a corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Engineering, Professor, and director of the Image Processing Systems Institute (IPSI) of the RAS. He is the recipient of the State Prize of the Russian Federation and the RF government prize in Science and Technology. He was awarded an Engineer qualification (1968) by Kuibyshev Aviation Institute (KuAI, presently, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov, SSAU). He received a Doctor in Engineering degree (1979) from Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI" (ETU). He is a SPIE and IAPR member. He is the author and coauthor of a substantial number of scientific publications with high citation index, 10 books, and 50 author's certificates and patents.

Поступила в редакцию 12 марта 2012 г.