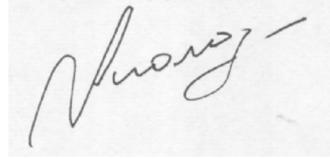


На правах рукописи



МОЛОДЯКОВ Сергей Александрович

**СИСТЕМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ
ПРОЦЕССОРОВ С ОБРАБОТКОЙ СИГНАЛОВ В ПЗС-
ФОТОПРИЕМНИКАХ**

специальность 05.13.05 – элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Санкт-Петербург - 2011

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".
(ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»)

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Гуров Игорь Петрович

доктор технических наук, профессор
Мурсаев Александр Хафизович

доктор технических наук, профессор
Сергеев Михаил Борисович

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Лыпарь Юрий Иванович

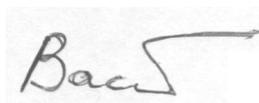
Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие "Научно-производственное объединение "Импульс".

Защита диссертации состоится " 29 " марта 2012 г. в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.18 в ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" (по адресу 195251 Санкт-Петербург, д. 29, корпус 9, ауд. 325).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке в ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан " " 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Васильев А. Е.

Проблема и ее актуальность

Задача эффективной обработки сигналов имеет высокую актуальность во многих областях: связь, локация, радиоастрономия, радиоразведка и др. Информацию часто приходится получать в реальном времени из «сложных» сигналов, которые характеризуются высоким уровнем шума, быстрым изменением во времени, широким спектральным составом. При этом основными операциями обработки сигналов являются: фильтрация, спектральный и корреляционный анализ. Всевозрастающие потребности в объеме и скорости обработки сигналов требуют развития всей элементной базы, в том числе элементов вычислительной техники.

Современные требования к быстродействию процессоров ярко характеризует задача изучения радиоизлучения нейтронных звезд – пульсаров. Для построения профиля импульса радиоизлучения пульсара необходим спектральный анализ сигналов (1000 каналов) за доли микросекунд. Быстродействие процессора для указанной задачи должно быть более 10^{11} операций с плавающей точкой в секунду. Для поляризационных измерений радиоизлучения необходима дополнительная корреляционная обработка, что значительно повышает требования к быстродействию.

Одним из основных путей решения задачи обработки сложных сигналов является использование цифровых сигнальных процессоров и специализированных процессоров на программируемой логике. Для увеличения производительности систем обработки можно повышать быстродействие отдельного процессора или использовать параллельную обработку. Быстродействие отдельного процессора обычно недостаточно, а реализация параллельной обработки требует решения задачи синхронизации и часто приводит к неудовлетворительным массогабаритным и энергетическим характеристикам систем.

Эффективным путем получения высокой производительности является использование оптических процессоров. Преимущества оптических методов обработки обусловлены, прежде всего, способностью оптических систем осуществлять параллельную обработку двумерных массивов данных. Известен ряд схем 1D, 2D и даже 3D оптических процессоров, в частности описанных в работах зарубежных и отечественных ученых: Вандерлугт Э., Псалтис Д., Папе Д., Шидер Р., Парыгин В.Н., Кулаков С.В., Ушаков В.Н., Есепкина Н.А. и др. Такие процессоры являются специализированными аналоговыми. При вводе и выводе данных в оптические процессоры используются электронные элементы, поэтому процессоры называют оптоэлектронными (ОЭ). Эквивалентная скорость обработки данных в ОЭ-процессорах достигает 10^{17} оп/сек.

Известны также дискретные ОЭ-процессоры, выполняющие алгебраические операции, быстродействие которых оценивают величиной более 10^{10} оп/сек. Такие процессоры можно рассматривать не только в качестве процессоров для обработки сигналов, но и сопроцессоров. В частности в работах Гилфойл П.С., Морозова В.Н., Евтихиева Н.Н., Нежевенко Е.С. показаны пути построения и направления применений ОЭ-процессоров типа

вектор-матричного перемножителя; отмечены возможности перепрограммирования процессоров.

Для решения практических задач необходимо объединять оптоэлектронные и цифровые вычислители в одно устройство, поэтому современные ОЭ-процессоры являются аналого-цифровыми устройствами, и далее в работе предполагается, что в состав ОЭ-процессора входят неотъемлемой частью цифровой вычислитель и соответствующее программное обеспечение. Такие ОЭ-процессоры имеют более высокие характеристики по производительности, габаритам и энергопотреблению, чем входящие в них отдельные вычислительные узлы.

Для комплексного решения вопросов разработки ОЭ-процессоров необходимо применение системного подхода к их проектированию. Проектирование ОЭ-процессоров имеет свои особенности, связанные с тем, что отдельные узлы с разной формой представления информации функционируют в рамках единого устройства. Системный подход к проектированию ОЭ-процессоров в этом случае предполагает не только выбор элементов, методов и способов их совместной работы, но и разработку отдельных узлов с учетом системных требований. Известны методология и средства проектирования аналоговых и цифровых узлов, программных средств (Лыпарь Ю.И., Угрюмов Е.П., Мурсаев А.Х., Платунов А.Е., Липаев В.В., Фокс Д., Боэм Б. и др.). Известна методология проектирования и средства разработки видеосистем на кристалле (Цыцулин А.К., Фахми Ш.С.). Однако, теория системного проектирования аналого-цифровых ОЭ-процессоров, включающих перечисленные узлы, не разработана. Поэтому встает научная проблема разработки методологии и элементов проектирования ОЭ-процессоров. Под элементами проектирования рассматривается вся совокупность конструкторов и связывающих их отношений, обеспечивающих разработку процессоров, от принципов построения и моделей до методов тестирования.

Основное ограничение при разработке ОЭ-процессоров связано с недостаточной производительностью последующих за оптическим узлом звеньев обработки: многоэлементного фотоприемника и цифрового узла. Известны два направления преодоления указанного ограничения: использование нескольких высокоскоростных каналов вывода информации с фотоприемника, и выполнении части общего алгоритма обработки сигналов в самом фотоприемнике.

В свою очередь в ОЭ-процессорах возможно применение двух типов фотоприемников: на КМОП-матрицах и на приборах с зарядовой связью (ПЗС-фотоприемники или ФПЗС). Современные КМОП-фотоприемники представляют собой гибридный процессор, включающий сенсорное поле, набор АЦП и цифровую логику, определяющую выбранный алгоритм обработки. ПЗС-фотоприемники также можно рассматривать в качестве процессоров обработки сигналов, алгоритм работы которых допускает перестройку, в отличие от КМОП-фотоприемников. ПЗС-фотоприемники могут выполнять другой набор операций, чем КМОП-фотоприемники, и чаще всего с большим быстродействием. Применение ПЗС-фотоприемников для предварительной

обработки изображений первыми предложили Барб Д.Ф., Шилин В.А., Пресс Ф.П.

Применение ПЗС-фотоприемников с обработкой сигналов на кристалле фотоприемника в ОЭ-процессорах недостаточно изучено и требует разработки как специальных, нестандартных алгоритмов работы ФПЗС, так и соответствующих методов проектирования.

В связи с изложенным тема диссертационной работы, посвященная разработке теоретических основ и прикладных методов системного проектирования и их применению при создании образцов высокопроизводительных ОЭ-процессоров с ПЗС-фотоприемниками, представляется весьма актуальной.

Цель и задачи работы

Целью работы является решение научной проблемы системного проектирования гибридных ОЭ-процессоров с обработкой сигналов в ПЗС-фотоприемниках и создание высокопроизводительных ОЭ-процессоров.

Для выполнения этой цели в работе ставились и решались следующие задачи:

1. Разработка методологии системного проектирования ОЭ-процессоров с обработкой сигналов в фотоприемниках.
2. Разработка принципов построения ОЭ-процессоров и моделей преобразования сигналов в их узлах.
3. Разработка методов обработки сигналов и их реализация, как на уровне отдельных узлов, так и на уровне ОЭ-процессоров.
4. Проведение теоретического и экспериментального исследований характеристик созданных образцов ОЭ-процессоров и определение их предельных параметров.
5. Разработка методик и применение ОЭ-процессоров для решения прикладных задач.

Методы исследований. В диссертационной работе использовались теоретические положения системного анализа, математический аппарат интегральных преобразований в оптике, методы обработки сигналов и изображений, методы моделирования, а также экспериментальное исследование созданных макетов и экспериментальных образцов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена методология системного проектирования ОЭ-процессоров, являющимися процессорами аналого-цифрового типа и позволяющими обрабатывать сигналы с быстродействием более 10^{10} оп/сек.
2. Разработан принцип построения ОЭ-процессоров, заключающийся в распределенной и согласованной по производительности конвейерной обработке сигналов по последовательным вычислительным ядрам, одним из которых является многоэлементный фотоприемник.

3. Разработана модель преобразований сигналов в ОЭ-процессорах с введением в модель ПЗС-фотоприемника распределенного зарядового операционного блока, выполняющего операции интегрирования, суммирования, вычитания и коммутации зарядовых пакетов. За счет обработки в зарядовом блоке ФПЗС удается поднять частоту конвейера до 10^3 раз по сравнению с известными ОЭ-процессорами.

4. Разработаны и применены в ОЭ-процессорах новые способы обработки зарядовых пакетов в ПЗС-фотоприемниках на основе формирования виртуальных светочувствительных элементов и синхронного накопления импульсно-манипулированных оптических сигналов, что позволило увеличить динамический диапазон аналоговой части в 2-10 раз и снизить требования к быстродействию цифровой части процессора на 1-3 порядка.

5. Предложен метод управления ПЗС-фотоприемником с помощью микропрограммирования операций, обеспечивающий переключение и выполнение разных алгоритмов обработки сигналов зарядовым операционным блоком.

6. Разработана методика поддержания долговременной стабильности параметров ОЭ-процессоров, включающая динамическую калибровку и оценку дрейфов оптической части, в частности обеспечивающая увеличение на порядок точность определения частоты исследуемых сигналов.

7. Разработан и реализован метод обработки сигналов для нового типа конвейерного ОЭ-процессора, предназначенного для регистрации сигналов пульсаров в радиоастрономии, с эквивалентным быстродействием $10^{10} - 10^{15}$ оп/сек.

8. Предложен метод обработки сигналов для ОЭ-процессора радиоинтерферометра с частотным сканированием, основанный на впервые разработанных способах синхронного накопления; переход на новую элементную базу позволил упростить аппаратуру приемного комплекса и уменьшить ее объем в несколько десятков раз.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, полученных в работе, определяется строгостью используемого в работе математического аппарата, адекватностью разработанных математических моделей реальным объектам исследования, соответствием теоретических положений и экспериментальных результатов, многолетним опытом использования ОЭ-процессоров на радиотелескопах.

Практическая ценность работы и внедрение результатов.

1. Предложенные в работе методология системного проектирования ОЭ-процессоров, принципы построения, методы, модели и алгоритмы носят формализованный характер и могут быть использованы при создании новых процессоров для решения широкого круга задач обработки сигналов.

2. Разработана методология применения ПЗС-фотоприемников, которые

используются не только как сенсоры, но и в качестве специализированных программируемых процессоров.

3. На основе предложенной методологии проектирования созданы несколько видов ОЭ-процессоров для решения задач обработки сигналов в различных областях:

- Первый отечественный ОЭ-процессор для наблюдения пульсаров;
- ОЭ-процессор синтеза радиоизображения для радиоинтерферометра с частотным сканированием, на базе которого впоследствии в ИСЗФ СО РАН была создана приёмная система Сибирского солнечного радиотелескопа;
- Гибридный вектор-матричный ОЭ-процессор.

Разработанный пульсарный процессор включен в состав приемного комплекса одного из крупнейших отечественных полноповоротных радиотелескопов РТ-64 (г.Калязин). С помощью ОЭ-процессора проведены несколько серий наблюдений и получены профили секундных и миллисекундных пульсаров. Предложенные принципы построения ОЭ-процессора для синтеза радиоизображения внедрены в приемный комплекс Сибирского солнечного радиотелескопа (г. Иркутск, уроч. Бадары), который является крупнейшим отечественным солнечным радиотелескопом, обеспечивающим непрерывное наблюдение Солнца. Акты о внедрении прилагаются.

4. Результаты диссертационной работы включены в учебные программы на кафедре Информационных и управляющих систем СПбГПУ по дисциплинам "Организация ЭВМ и систем", "Оптическая обработка информации", "Архитектура сетей ЭВМ", а также представлены в электронном учебнике по дисциплине "Организация ЭВМ и систем". Разработанные узлы ОЭ-процессоров используются в научно-исследовательской работе студентов и аспирантов.

Диссертационная работа выполнялась в рамках Федеральных целевых программ "Астрономия" и "Интеграция" (проекты NN 206 и 570), "Вычислительная оптоэлектроника", Межвузовских программ "Научное приборостроение", "Оптические процессоры" при частичном финансировании грантами РФФИ-96-02-17405, 00-02-17405, 06-08-00090, 07-02-01211 и грантами Минвуза. Результаты работы были использованы при выполнении НИР по договорам с НИИ Радиооптики (г. Москва), НИИ Радиофизики (г. Москва), в/ч 68240 (г. Москва), САО РАН (г. Санкт-Петербург) и др.

На защиту выносятся:

1. Методология системного проектирования ОЭ-процессоров, построенная на основе сжимающейся спиралевидной модели и сопряженного проектирования составляющих процессор узлов.

2. Принцип построения ОЭ-процессоров, заключающийся в распределенной и согласованной по производительности конвейерной обработке сигналов по вычислительным ядрам, одним из которых является фотоприемник.

3. Модель преобразований сигналов в ОЭ-процессорах с введением в модель ПЗС-фотоприемника зарядового операционного блока, выполняющего операции интегрирования, суммирования, вычитания и коммутации зарядовых пакетов.

4. Способы обработки зарядовых пакетов в ПЗС-фотоприемниках ОЭ-процессоров на основе формирования виртуальных светочувствительных элементов и синхронного накопления импульсно-манипулированных оптических сигналов.

5. Метод управления ПЗС-фотоприемником, основанный на микропрограммировании операций, на базе которых строятся микропрограммы, обеспечивающие гибкое управление зарядовым операционным блоком.

6. Методика поддержания долговременной стабильности параметров ОЭ-процессоров, включающая динамическую калибровку и оценку дрейфов оптической части.

7. Метод обработки сигналов и результаты разработки конвейерного ОЭ-процессора для регистрации сигналов космических источников – пульсаров с применением способа временной задержки и накопления в ФПЗС.

8. Метод обработки сигналов для ОЭ-процессора радиоинтерферометра с частотным сканированием.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы обсуждались и докладывались на следующих конференциях и симпозиумах: 1). Всесоюзные конференции по оптической обработке информации (Фрунзе, 1986; Ленинград, 1998; Фрунзе, 1990). 2). Всесоюзные радиоастрономические конференции (Иркутск 1986; С-Петербург, 1997; Пушино 2002; ст. Зеленчукская 2008). 3). III Всесоюзная конференция по Вычислительной оптоэлектронике (Ереван, 1987). 4). IV всероссийская конференция "Приборы с зарядовой связью и системы на их основе" (Геленджик, 1992). 5). Международная науч.-техн. конференция "Информационные технологии в моделировании и управлении" (С-Петербург, 1996, 2000). 6). Международные науч.-техн. конференции Лазеры. Измерения. Информация. С-Петербург, 2000-2010). 7). International Topical Meeting on Optical Computing'88 (Toulon, France, 1988). 8). International Conferences Advances in Optical Information Processing (Orlando, Florida, USA, 1992, 1994). 9). International Optical Information Processing Conferences (St.Petersburg, Russia, 1993, 1996). 10). European Optical Society AO Club, 2-nd Meeting "Advances in Acousto-Optics" (St.Petersburg, Russia, 1997). 11). International Forum on Wave Electronics and Its Applications. (St. Peterburg 2000, 2003). 12). Научно-практическая конференция «Научные исследования и инновационная деятельность» (С-Петербург 2008, 2009). 13) Научная сессия НИЯУ МИФИ (2008, 2010). 14) XV Международная конференция «Системный анализ в проектировании и управлении» (С-Петербург 2011).

Личный вклад. Основные научные положения, математические модели, алгоритмы, содержащиеся в диссертационной работе, получены лично автором.

Публикации. По теме диссертации соискателем лично и в соавторстве опубликовано 102 печатные работы (20 в журналах рекомендованных ВАК), в том числе – одна монография, 3 авторских свидетельства и 1 патент.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, приложения и списка литературы. Материал изложен на 302 страницах, включая 166 рисунков, 16 таблиц и список литературы из 189 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы и определена цель работы, приведены основные достижения, полученные в процессе проведения исследований и разработок, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, кратко изложено содержание глав диссертации.

В первой главе, имеющей обзорный характер, рассмотрены структура, особенности и перспективы гибридных ОЭ-процессоров обработки сигналов. Они включают (рис.1) оптический узел (ОУ), цифровой узел (ЦУ) и фоточувствительный прибор с зарядовой связью ФПЗС.

ОЭ-процессор по классификации параллельных вычислительных систем Флинна можно рассматривать как векторный процессор класса SIMD (ОКМД - одиночный поток команд, множественный поток данных), выполняющий интегральные векторные преобразования. Векторность достигается за счет использования оптического узла. Размер входного вектора оценивается для 1D процессора в 10^3 элементов, а для 2D процессора в 10^6 элементов. Производительность 1D ОЭ-процессора можно определить в 10^{10} оп/сек при времени ввода входного вектора около 1 мкс, при параллельном выводе выходного вектора и Фурье-преобразовании.

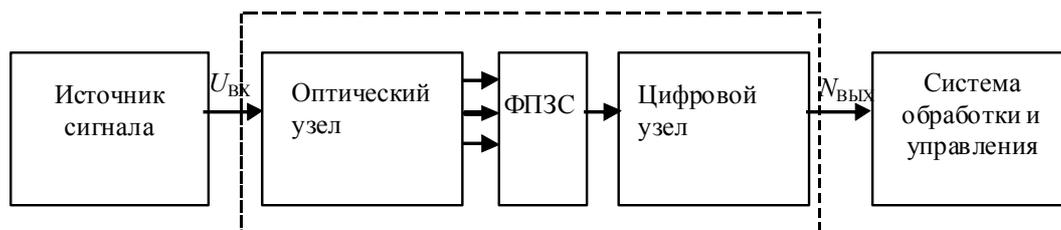


Рис. 1. Структурная схема ОЭ-процессора.

Описаны базовые схемы оптической части, выделены схемы акустооптических (АО) процессоров и вектор-матричных перемножителей. По виду оптической части проведено разделение ОЭ-процессоров на непрерывные и дискретные. Более подробно описан АО анализатор спектра, который применялся в работе.

Цифровая часть ОЭ-процессора и алгоритмы ее работы рассматриваются в рамках задач обработки сигналов, как элемент, дополняющий те функции, которые выполняет оптическая часть. Основные алгоритмы работы цифровой части решают задачи калибровки, простой потоковой обработки, хранения, передачи и управления. Простейший вариант цифровой части – это цифровая камера. Показано, что для ряда задач обработки сигналов быстроедействие

функций и ограничений выбора для следующих этапов. Модель является открытой, а значит, проектирование можно начинать с этапа, решений по которому для данной конкретной задачи нет. Проектирование ведется параллельно по всем аспектам с небольшим сдвигом по времени на соответствующих этапах.

Особенность проектирования ОЭ-процессоров связана с тем, что они являются функционально сложными аналого-цифровыми устройствами, состоящими из разнородных компонент.

В работе последовательно рассмотрены следующие этапы системного проектирования (рис. 2): формирование требований $S_{TЭТ}$, которым должен удовлетворять проектируемый объект с определением технологической базы и ее элементного состава; разработка принципов построения S_{Pr} ; моделирование и аппроксимация S_A желаемого облика объекта; синтез способов построения S_{Res} ; синтез структуры и программного обеспечения S_{App} ; параметров S_{Par} процессора и допусков на них S_{Tol} .

Таким образом, композиция отображений этапов проектирования структур имеет вид

$$П = S_{Tol} \circ S_{Par} \circ S_{App} \circ S_{Res} \circ S_A \circ S_{Pr} \circ S_{TЭТ}. \quad (1)$$

Композиция начинается с формализации требований, а заканчивается тестированием и определением допусков на параметры элементов. В композицию этапов проектирования (1) также можно включить этапы сопряженного проектирования отдельных узлов ОЭ-процессора.

ОЭ-процессоры предназначены для обработки сигналов, поэтому основные требования функционального аспекта проектирования $F_{TЭТ}$ определяются задачей по обработке сигналов в процессоре.

Отображение S_{Pr} соответствует выбору одного из принципов построения Pr . S_{Pr} имеет область определения на функции выбора функционального аспекта F_{Pr} и множестве универсум структур, при том учитывается исходная функция выбора $F_{TЭТ}$. Значение отображения лежит во множестве версий структур $\{K_{Pr}\}$, способных реализовать синтезированный (выбранный) принцип:

$$S_{Pr}: F_{TЭТ} \cap F_{Pr} \cap Pr \rightarrow K_{Pr}; K_{Pr} = \{ K_{Pri} \}, i=1 \dots M \quad (2)$$

где M – число принципов, удовлетворяющих критериям эффективности E_{fPr} для одной из компонент. В дополнение к известным принципам построения, таким как многопоточность, каскадность, в работе рассмотрены два новых: конвейерность и применение фотоприемника (ФП) для обработки сигналов, причем второй дополняет первый [1, 2].

Конвейерность является средством обеспечения непрерывности обработки сигналов. Она поддерживается за счет распределенной по узлам последовательной обработки данных (рис.3). Конвейер ОЭ-процессоров имеет ряд особенностей по сравнению с конвейером цифровых процессоров. Во-первых, по конвейеру продвигаются не команды, а вектора данных, число элементов в которых задается разрешением в первую очередь оптического узла. Во-вторых, отдельные узлы имеют разное время выполнения операций. Частота продвижения данных по конвейеру не выровнена, частоту конвейера задает

самое медленное устройство – ФПЗС. В-третьих, схема конвейера может быть более сложной.

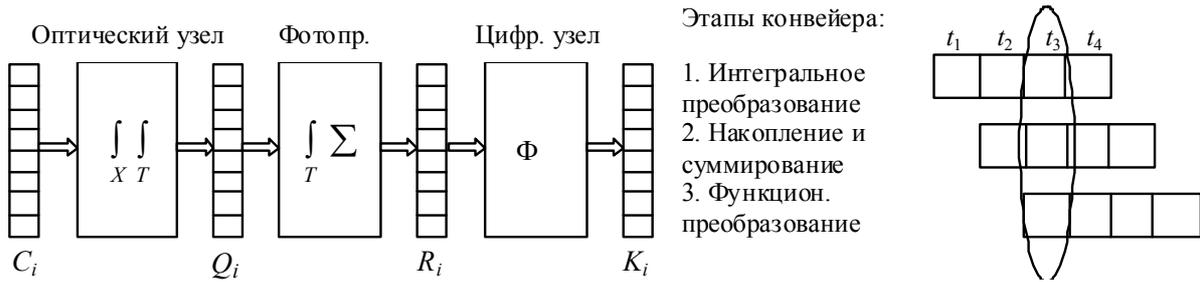


Рис. 3. Схема конвейерного ОЭ-процессора.

Принцип применения ФП для обработки оптических сигналов основан на возможностях современных ПЗС- и КМОП-фотоприемников обрабатывать сигналы. За счет такой обработки можно сжать поток данных, уменьшить время вывода кадров из фотоприемника, тем самым поднять частоту конвейера в ОЭ-процессоре. Так используя способ временной задержки и накопления можно на несколько порядков поднять частоту работы конвейера. За счет смены алгоритма работы ФП можно расширить принцип управляемости.

Отображение S_A соответствует этапу создания математической модели процессора для известных из (2) принципов построения. Отображение имеет область определения на множестве значений K_{Pr_i} и функции выбора F_A .

$$S_A: K_{Pr_i} \cap F_A \rightarrow D_{Pr}(R), \quad (3)$$

где R - вектор сигнала. Если в базе знаний имеется структура, позволяющая решить задачу (3), то переходят к синтезу параметров S_{par} . В противном случае переходят к синтезу способов построения. На этом этапе возникает задача сопряженного проектирования составляющих ОЭ-процессора узлов.

Схема модели ОЭ-процессора (рис. 4) соответствует композиции этапов преобразований: $D_{Pr} = D_{\Phi_j} \circ D_{ADC} \circ D_{CCD_j} \circ D_Q \circ D_{AOS}$. На первом этапе D_{AOS} когерентное излучение $E(t)$ проходит через АО-транспарант: $E(t)s(t-x/v(t))$, где s – входной сигнал; x – координата в плоскости транспаранта; v – скорость волны в звукопроводе АО-модулятора. На выходе оптического узла наблюдается сигнал близкий к спектру входного сигнала $S(\Omega) = F[s(t)]$. Этот сигнал взвешен аппаратной функцией $h(x, \Omega)$. В плоскости фотоприемника наблюдается сигнал

$$I(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\Omega, t) \cdot h(x, \Omega) d\Omega.$$

На втором этапе D_Q происходит детектирование, дискретизация и интегрирование оптического сигнала в элементах ФПЗС; формируется набор элементарных кадров $\{Q\}$:

$$Q_i(n) = \int_0^{T_{int}} \int_{0 \Delta x} |I(t, x)|^2 \cdot r(x'_i - x) dx dt, \quad (4)$$

где $Q_i(n)$ – заряд в i -ом элементе ФПЗС в n -ый момент времени $\{Q\} = Q_i(n)$; $r(x)$ – апертурная функция элемента. Третий этап - этап преобразований векторов в операционном блоке ФП $D_{CCD_j}: \{Q\} \rightarrow \{R\}$. Четвертый этап D_{ADC} соответствует преобразованию зарядового пакета в цифровой отсчет. Заряд q претерпевает преобразование в выходном узле с емкостью C , усиливается (G –

коэффициент усиления) и преобразуется в АЦП. Окончание преобразований D_{Φ_j} связано с обработкой сигнала в цифровом узле.

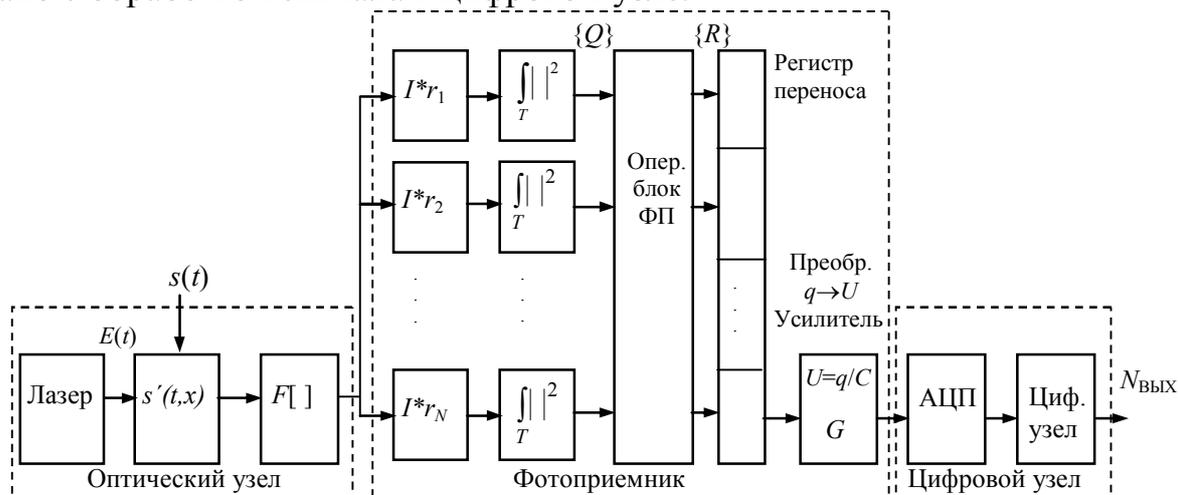


Рис. 4. Схема модели ОЭ-процессора с ПЗС-фотоприемником.

Описанная модель преобразований соответствует работе ПЗС-фотоприемника. В КМОП-фотоприемнике операционный блок ФП хотя и располагается на кристалле ФП, но в схеме (рис. 4) переносится в цифровой узел ОЭ-процессора.

Проведено сравнение способов построения ОЭ-процессоров, в зависимости от места реализации операций по обработке сигналов с выхода оптического узла. Сравниваются способы: программный – обработка в процессоре ЦУ; аппаратный – обработка в ПЛИС; способ распределенной обработки между ЦУ и ФП. Методы и средства проектирования цифровых устройств и программного обеспечения достаточно широко описаны, поэтому основное внимание уделено рассмотрению возможностей и проектированию зарядового операционного блока ФПЗС. Описаны основные элементы, из которых строится распределенный по полю ФПЗС зарядовый операционный блок. Рассмотрена модель его работы, на основе которой можно выбрать необходимую аппаратную реализацию ФП или провести полное проектирование ФП с зарядовым операционным блоком.

Каждая модель преобразования матрицы зарядовых пакетов $\{ Q \} \rightarrow \{ R \}$ требует разработки своей структуры операционного блока. Отображение S_{ACCD} имеет область определения на множестве значений схем операционного блока K_{PriCCD} и функции выбора F_{ACCD} , задающей алгоритм преобразования $\{ Q \} \rightarrow \{ R \}$

$$S_{ACCD}: K_{PriCCD} \cap F_{ACCD} \rightarrow D_{PrCCD_j}(Q, R). \quad (5)$$

Формализация преобразования (5) определяется набором операций, который выносится на ФП. Первым шагом является построение графа операций. Основными операциями, которые можно осуществлять в ФПЗС являются: 1) элементарное накопление (накопление кадра массива $\{ Q \}$), 2) суммирование кадров во времени, 3) объединение зарядов элементов массива, 4) коммутация, 5) сброс (обнуление) зарядов элементов, 6) перенос кадра в одном или другом направлении на одну или несколько строк, 7) вывод

из ФПЗС. Набор операций может расширяться, что связано с разработкой новых ПЗС-структур, совмещением ПЗС и КМОП, освоением соответствующих технологий изготовления. Отображение S_{ACCD} можно рассматривать как этап проектирования и включить в (1).

Приведем пример двух графов операций (рис. 5). Первый граф (а) соответствует операциям способа временной задержки и накопления, второй (б) - синхронного накопления отдельно четных и нечетных кадров.

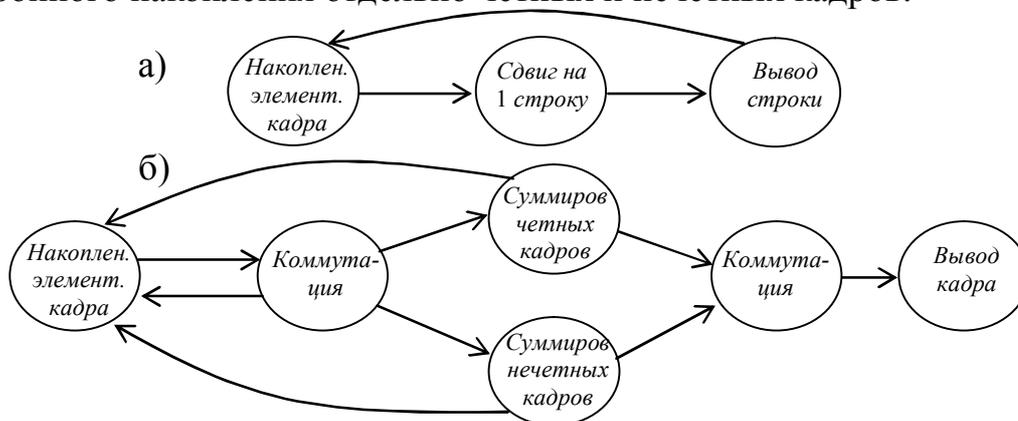


Рис. 5. Графы операций, проводимых в ФПЗС: а) временной задержки и накопления, б) синхронного накопления.

В соответствии с графами операций можно построить граф продвижения зарядовых пакетов по элементам ФПЗС. Граф (рис. 6) соответствует операциям алгоритма синхронного накопления (рис.5.б). Элементами являются ПЗС-структуры, которые накапливают, передают, коммутируют, суммируют зарядовые пакеты. Включение элементов происходит при подаче соответствующих импульсов T_0-T_6 . Данный граф отражает основную структуру операционного блока ФПЗС. Он уже определяет требования к способу построения S_{Res} и синтезу структуры S_{App} .

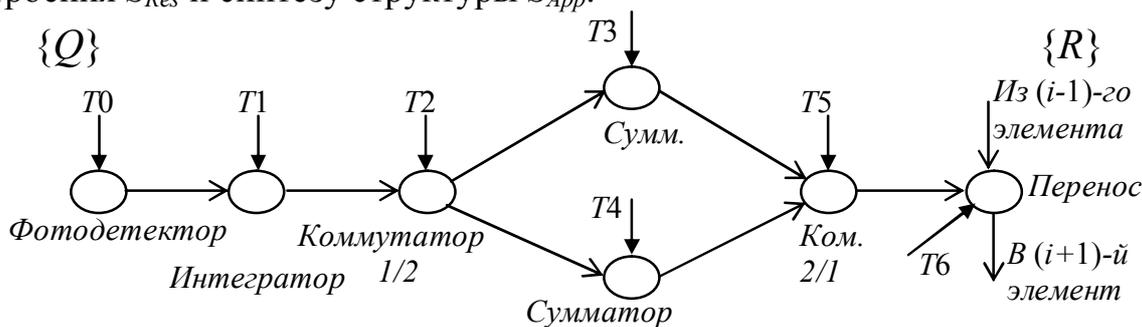


Рис. 6. Граф продвижения зарядовых пакетов по ПЗС-элементам для одного канала операционного блока.

На функциональном аспекте проектирования выполняется оценка искажений зарядовых пакетов в процессе их переносов в ПЗС-регистре с помощью предложенной имитационной модели [1, 21]. Заряд в ПЗС-ячейке рассматривается как совокупность свободного заряда Q_i^k и заряда, связанного на объемных и поверхностных ловушках L_i^k (i - номер ячейки, k - момент времени). Модель представляет собой систему разностных уравнений, описывающих следующие искажающие зарядовый пакет факторы: неполный перенос $Q_i^{k+1} = Q_i^k K_E$; генерация с ловушек $L_i^{k+1} = L_i^k(1 - K_G)$; захват ловушками

$Q_i^{k+1} = Q_i^k - (L_0 - L_{i-1}^k)K_Z$; потери заряда в подложку $L_i^{k+1} = L_i^k(1 - K_P)$; термогенерация $Q_i^{k+1} = K_T - AQ_{i-1}^k$, где основными параметрами являются: K_E – неэффективность переноса, K_G – постоянная эмиссии с ловушек, K_Z – постоянная захвата ловушками, K_P – постоянная потерь в подложку, K_T – постоянная термогенерации. В модели выделены этапы: перенос и получение отставшего заряда, приход нового заряда и перераспределение зарядов между ловушками и несвязанным зарядом. Для первых двух этапов имеем:

$$\begin{aligned} Q_i^{k+1} &= Q_i^k K_E + L_{i-1}^k K_G + Q_{i-1}^k (1 - K_E) + (K_T - AQ_{i-1}^k), \\ L_i^{k+1} &= L_i^k (1 - K_G) + L_i^k (1 - K_P), \end{aligned} \quad (6)$$

Для определения параметров модели разработана методика, связанная с оценкой искажений электрически вводимых зарядовых пакетов. Так постоянная эмиссии с ловушек K_G определялась путем ввода в ПЗС-регистр двух пачек зарядовых пакетов и измерения сигнала второй пачки. Расстояние между пачками менялось, тем самым менялось время, отведенное на эмиссию с ловушек.

Указанная модель переноса позволила определить требования к размерам зон накопления и хранения, другим параметрам алгоритмов обработки сигналов в ФПЗС. Так на рис. 7 (p – количество переносов, ε – неэффективность переноса) представлены распределения зарядовых пакетов при реверсивных и последовательных переносах, полученные в результате моделирования. При последовательных переносах 4-х зарядовых пакетов наблюдается, как отставание зарядов, так и смещение центра пачки. При реверсивных переносах центр пачки не смещается, происходит лишь размытие зарядов по соседним элементам.

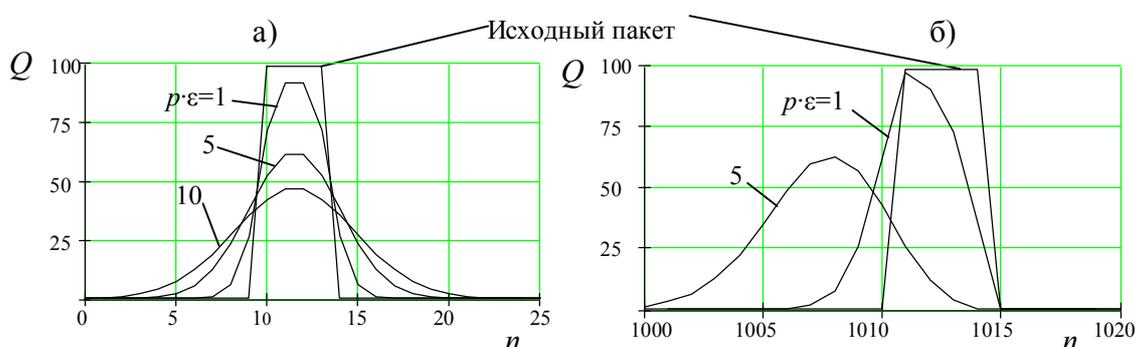


Рис. 7. Распределение 4-х зарядовых пакетов (а) при реверсивных переносах в регистре ФПЗС $p \cdot \varepsilon = 1, 5, 10$ и (б) при 1000 последовательных переносах $p \cdot \varepsilon = 1, 5$

Рассмотрена работа ОЭ-процессора, как элемента многоканального радиометра. Структурная схема радиометра приведена на рис.8. Атенюатор позволяет переключать коэффициент усиления K тракта, поддерживая необходимую загрузку ФПЗС. АЦП позволяет перевести аналоговый сигнал в цифровую форму синхронно с работой регистра сдвига ФПЗС. Цифровой интегратор увеличивает длительность накопления сигнала в N_{int} раз: $T = N_{int} \tau$, где τ - время накопления заряда в ячейке ФПЗС.

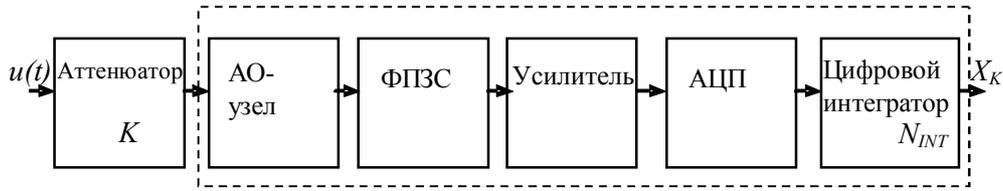


Рис. 8. Схема радиоспектрометра с ОЭ-процессором.

Входной сигнал ОЭ-процессора представляет аддитивную смесь широкополосного полезного (шумового) сигнала $s(t)$ и широкополосной помехи $n(t)$: $u(t)=s(t)+n(t)$. Сигнал на выходе определяется выражением

$$X_{jk} = \int_{j\tau}^{(j+1)\tau} \int_{-\infty}^{\infty} H(f - f_k) \cdot \left| \int_{-\infty}^{\infty} h(\xi) u(t - \xi) \exp(-i2\pi f \xi) d\xi \right|^2 df dt = L_{jk} \{F[u(t)]\}, \quad (7)$$

где $u(t)$ – входной сигнал, $h(\xi)$ – аппаратная функция, $H(f)$ – спектральная весовая функция канала ФПЗС, f_k – центральная частота k -го детектора (k -го канала радиометра), j – момент времени взятия отсчета, $L_{jk}\{F[u(t)]\}$ – операторы преобразования. В выходном значении дискретной функции (7) необходимо учитывать вклад аддитивного шума Y_{jk} , возникающего при детектировании: $Z_{jk}=X_{jk}+Y_{jk}$. Для дисперсии шума на выходе σ_Z^2 в случае некоррелированных составляющих можно записать: $\sigma_Z^2=\sigma_X^2+\sigma_Y^2$; где σ_Y^2 – дисперсия шумов детектирования; σ_X^2 – дисперсия радиометрического шума.

Введена функция g [4], определяющая вклад шумов аналоговой части ОЭ-процессора, нормированных на "шумовую загрузку" $\mu_S+\mu_n$ k -го канала:

$$\frac{\sigma_Z^2}{(\mu_S + \mu_n)^2} = \frac{1}{B_f \cdot \tau} g^2 = \frac{1}{B_f \cdot \tau} \left(1 + \frac{\sigma_Y^2 \cdot B_f \cdot \tau}{(\mu_S + \mu_n)^2} \right), \quad (8)$$

где B_f – эквивалентная флуктуационная полоса канала.

В схеме модели рис. 4 учтены основные источники шумов. Суммарный шум, приведенный к входу усилителя, определен в виде:

$$\sigma_Y^2 = \sigma_{PE}^2 + \sigma_D^2 + \sigma_{OUT}^2, \quad (9)$$

где $\sigma_{OUT}^2 = \sigma_{RES}^2 + \sigma_{TR}^2 + \sigma_{ON-OFF}^2 + \sigma_{ADC}^2$, шум темнового тока σ_D включает шумы спеклов σ_{SP} . Проведен переход от напряжений к сигнальным и шумовым электронам. Постоянное напряжение на выходе ОЭ-процессора $\mu_S + \mu_n$ порождается зарядом из N_S сигнальных электронов (e_0) за время τ . Поэтому дисперсия дробового шума σ_{PE}^2 составит N_S . Для фототока i_S и темнового тока i_D можно записать: $\sigma_{PE}^2 = \tau \cdot i_S / e_0$, $\sigma_D^2 = \tau \cdot i_D / e_0$.

Введем в выражение (8) параметры: n_{FW} – емкость потенциальной ямы ячейки ФПЗС, n_D – часть емкости занятая электронами темнового тока; Dr_{CCD} – динамический диапазон ФПЗС $Dr_{CCD}=n_{FW}/n_D$; α – коэффициент загрузки фотоприемника. Обозначив $p_{CCD}=n_{FW}(1 - \tau/\tau_0 \cdot Dr_{CCD})$, функцию g можно записать в виде удобном для рассмотрения:

$$g^2(\alpha) = 1 + \frac{B_f \cdot \tau}{\alpha \cdot p_{CCD}} + \frac{B_f \cdot \tau^2 \cdot n_{FW}}{\tau_0 \alpha^2 \cdot Dr_{CCD} \cdot p_{CCD}^2} + \frac{B_f \cdot \tau \cdot \sigma_{OUT}^2}{\alpha^2 \cdot p_{CCD}^2} \quad (10)$$

Проведен анализ параметров ОЭ-процессора для двух типов ФПЗС с длинными светочувствительными элементами (Toshiba TCD1304AP, размер

элемента $8 \times 200 \text{ мкм}^2$) и короткими Sony ILX703, размер элемента $14 \times 14 \text{ мкм}^2$). Так на рис. 9 показано влияние загрузки на функцию $g(\alpha)$. На рис.10 приведены зависимости отношения $\frac{SNR_{BX}^2}{SNR_{BBIX}^2} = \frac{g^2(\alpha)}{q}$ от времени накопления в ФПЗС τ , где

$$SNR_{BBIX}^2 = \frac{N_{int}^2 \mu_S^2}{N_{int}(\sigma_X^2 + \sigma_Y^2)} = \frac{B_f \cdot \tau_{int}}{g^2(\alpha)} \frac{SNR_{BX}^2}{1 + SNR_{BX}^2}; \quad q - \text{радиометрический выигрыш для}$$

данной шумовой полосы и времени накопления: $q = \frac{\mu_S + \mu_n}{\sqrt{\sigma_X^2}} = \sqrt{B_f \tau}$, N_{int} – число

просуммированных кадров в цифровой части.

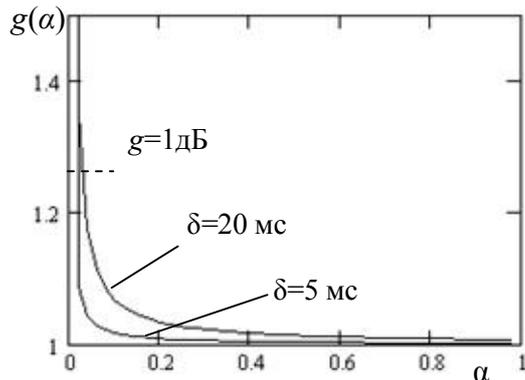


Рис. 9. Влияние загрузки ФПЗС на функцию $g(\alpha)$.

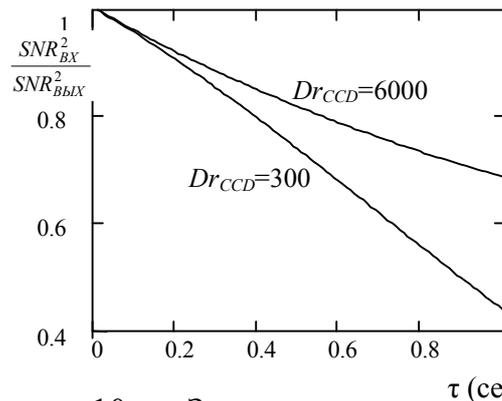


Рис. 10. Зависимость приведенного отношения SNR от времени накопления при двух динамических диапазонах ФПЗС.

Анализ полученных соотношений показывает, что при заданном отношении сигнал/шум на входе ОЭ-процессора, радиометрическом выигрыше q , шумовой загрузки ФПЗС α и фиксированном общем времени наблюдения сигнала T для достижения максимального отношения сигнал/шум на выходе необходимо минимизировать время τ накопления заряда в ФПЗС и многократно суммировать отсчеты сигнала в цифровом интеграторе N_{int} . Минимальное время накопления τ определяется нелинейными эффектами, возникающими в элементах ВЧ тракта и АО-модуляторе.

Проведено сравнение собственных шумов ОЭ-процессора при двух способах накопления сигналов в ФПЗС - кадровом и временной задержки и накопления (цифровое и аналоговое сканирование). Для рабочих диапазонов сигналов пульсарного процессора показано, что шумы ОЭ-процессора при аналоговом сканировании ниже, чем при цифровом. Минимум шумов достигается при частотах сканирования около 60 кГц.

В последнем параграфе главы рассмотрены принципы построения и модель преобразования сигналов ОЭ-процессора типа вектор-матричного перемножителя [1, 6]. Приводятся результаты исследований возможности построения ОЭ-процессора в виде гибридных микромодулей или микросхем. В микромодуле оптоэлектронные устройства ввода и вывода компонуется в единую жестко связанную структуру, которая может быть смонтирована на электронной плате подобно обычной электронной микросхеме.

В третьей главе рассмотрены способы построения и синтез структуры ОЭ-процессоров. Показано, что любая обработка в ФП снижает поток данных в цифровой узел, описаны способы обработки сигналов в ФП, рассмотрен метод управления ФП, основанный на микропрограммировании.

Оператор синтеза способов построения структур S_{Res} выделяет из множества K_A подкласс $K_{Res} \subseteq K_A$ структур, соответствующих эффективным способам построения .

$$S_{Res}: F_{Res} \cap K_A \cap D(R) \rightarrow K_{Res}. \quad (11)$$

Для ОЭ-процессоров выбор способов функционирования и построения структур в первую очередь связан с выбором алгоритмов работы ФП и ЦУ и с распределением операций между ними. Для ФПЗС алгоритм функционирования определяется временной диаграммой сигналов управления элементами ФП, в примере рис. 6 это импульсы $T0-T6$.

После завершения на функциональном аспекте формирования функции выбора F_{App} переходят к синтезу структуры. Выполнение этого отображения порождает множество эквивалентных, с точки зрения области значений S_{App} , структур $K_p = \{K_{p1}, K_{p2}, \dots, K_{p\gamma}\}$.

$$S_{App}: F_{App} \cap D(R) \cap K_{Res} \rightarrow K_p. \quad (12)$$

Для ОЭ-процессоров синтез структуры сводится к созданию схемы ПЗС-фотоприемника со своим операционным блоком и к разработке схемы и программ функционирования цифрового узла. Мощность множества K_p структур ФПЗС, работающих в соответствии с графами рис.5 и рис. 6, большая. Структуры отличаются реализацией фотодетекторов, интеграторов, сумматоров, коммутаторов, узлов вывода.

При распределении функций между ФП и ЦУ в первую очередь в качестве критерии выбора рассматриваются временные ограничения. Максимальные требования к быстродействию ЦУ возникают при отсутствии зарядовой обработки в ФП. В этом случае элементарные кадры $\{Q\}$ регулярно считываются с ФП, а вся многоуровневая обработка проходит в ЦУ и требование к тактовой частоте $f_{T_ПРОЦ}$ цифрового процессора определяется в виде

$$f_{T_ПРОЦ} \geq f_{T_ФП} (N_{УПР} + m \cdot N_{ВВ} + \sum_i N_{АЛГ1_i} + N_{АЛГ2}) \quad (13)$$

N – количество тактов процессора, затраченных на управление, ввод отсчетов, обработку по алгоритмам разных уровней.

Обычно быстродействия цифрового процессора недостаточно. Так в пульсарном ОЭ-процессоре элементарные кадры нужно считывать с периодом 1 – 10 мкс, поэтому тактовая частота $f_{T_ПРОЦ}$ цифрового процессора должна превосходить 10^{10} Гц. Преодоление указанной сложности лежит в двух направлениях: применение обработки в ФП и использование параллельно работающих каналов цифровой обработки. Обработка сигналов в ФПЗС требует проектирования специального зарядового операционного блока. Во многих случаях можно использовать уже выпускаемые ФП и применять специальные способы их управления.

Предложен и исследован ряд способов обработки сигналов в ФПЗС в том

числе: виртуальные светочувствительные элементы (ВСЭ), синхронное накопление, фрагментирование и накопление с аналоговым буфером, временной задержки и накопления [1, 18, 19]. Возможны сочетания указанных способов, что использовано в частности при разработке ОЭ-процессора синтеза радиоизображений (глава 7).

ВСЭ формировались путем объединения зарядовых пакетов в выходных регистрах и выходных устройствах ФПЗС (рис. 11), суммарный зарядовый пакет Q_{Σ} представляет сумму элементарных зарядов $Q_{i,j}$

$$Q_{\Sigma} = \sum_i \sum_j Q_{i,j}, \quad Q_{i,j} = \mu_e \int_{T_H} \iint_{\Delta x \Delta y} E(x,y,t) dx dy dt.$$

За счет формирования ВСЭ можно изменять:

- а) пространственное разрешение фотоприемника,
- б) уменьшить эквивалентную неэффективность переносов, в) снизить выходной поток отсчетов. Измерены апертурные характеристики ВСЭ ряда ФПЗС. Показано, что специальное управление позволяет изменять апертурные характеристики многофазных элементов ФПЗС.

Режимы синхронного накопления предназначены для работы ФПЗС при регистрации импульсно-манипулированных оптических сигналов, которые возникают в ОЭ-процессорах при сравнении двух последовательно идущих кадров изображений. В частности в радиоастрономии оптический сигнал, поступающий на ФПЗС, соответствует то сигналу с антенны S_A , то с эквивалента S_E . Частота переключения (T_M - период модуляции) чаще всего соответствует 1 кГц. Сигналы S_A и S_E должны отдельно накапливаться в течение времени интегрирования T_I .

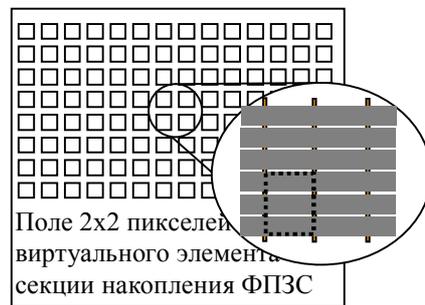


Рис. 11. Расположение ВСЭ размером 2x2 пикселей в матричном ФПЗС.

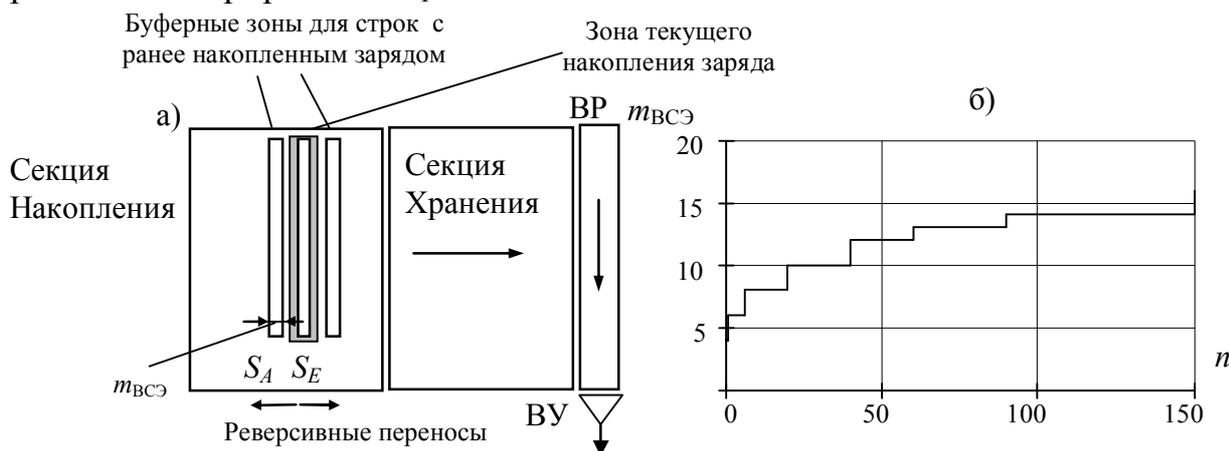


Рис. 12. Схема организации синхронного накопления в матричном ФПЗС (а) и требуемая ширина ВСЭ для объединения 90% заряда в зависимости от числа циклов реверсивных переносов при $\Delta n=50$ и $\epsilon=10^{-3}$ (б).

Рассмотрим алгоритм синхронного накопления (рис.12.а). В секции накопления ФПЗС засвечивается одна строка. Во время первого полупериода модуляции в ней накапливается заряд, соответствующий сигналу S_A . Затем весь кадр зарядов сдвигается на несколько строк влево (необходимое число строк

сдвига зарядов рассмотрено ниже). В течение второго полупериода в этой же строке накапливается заряд, соответствующий сигналу S_E . При начале следующего полупериода кадр зарядов S_E сдвигается обратно вправо и вновь накапливается заряд, соответствующий сигналу S_A , а затем сигналу S_E . После n полупериодов, в течение времени T_I , формируются суммарные зарядовые пакеты в двух строках, соответствующие раздельно проинтегрированным сигналам S_A и S_E $Q_{A\Sigma} = k_\mu \sum_i^n S_{Ai}$, $Q_{E\Sigma} = k_\mu \sum_i^n S_{Ei}$. Затем зарядовые пакеты переносятся из секции накопления в секцию хранения и выводятся из ФПЗС через выходной регистр (ВР) и выходное устройство (ВУ). Параллельно в секции накопления возобновляется синхронное накопление.

Для расширения динамического диапазона, который ограничивается объемом заряда в одной строке, можно “размазать” накапливаемый заряд на несколько строк. Для накопления многофазно-модулированного сигнала достаточно задать несколько буферных зон хранения зарядовых пакетов в соответствии с числом фаз модуляции. Для проведения операции детектирования $I=Q_A-Q_E$ в процессе вывода зарядовых пакетов можно использовать линейный или матричный ФПЗС с двумя регистрами вывода [1, 19, 20].

Использование ФПЗС для буферного хранения зарядов в процессе накопления позволяет повысить производительность ОЭ-процессора, поднять предельные частоты модуляции, снизить требования к быстродействию канала регистрации отсчетов пропорционально числу циклов накопления в ФПЗС.

Ограничения использования алгоритмов синхронного накопления на ФПЗС связаны с искажениями зарядовых пакетов и с паразитным действием темнового тока. Особенно значительны искажения при многократных реверсивных переносах $r \cdot \varepsilon > 1$ (рис. 7.б). Предложено формировать ВСЭ, в которых бы суммировались все «размазавшиеся» по соседним элементам заряды (рис. 12.б). С использованием моделирования определены требуемые размеры ВСЭ $m_{ВСЭ}$ по столбцу. Так при числе циклов реверсивных переносов $\Delta n = 50$ и зоне накопления из 4-х строк размер ВСЭ $m_{ВСЭ}$ должен быть 10-12 строк.

На функциональном аспекте рассмотрена концепция построения ПЗС-контроллеров на основе метода микропрограммирования операций управления ФПЗС. Известны два подхода к построению ПЗС-контроллера: на базе специализированных микросхем генераторов-формирователей сигналов управления ФПЗС (Texas Instruments); на основе программы, находящейся в памяти микроконтроллера или компьютера (Electrim Corporation.). В работе предлагается подход, связанный с трехуровневой моделью и методом микропрограммирования операций по управлению ФПЗС [1, 10].

На нижнем уровне модели управления находятся микрокоманды, состоящие из элементарных операций типа однократный перенос зарядов. Средний уровень - это уровень микропрограмм управления, которые состоят из микрокоманд и вспомогательных команд типа цикла, перехода, прерывания. Верхний уровень – уровень программы управления или алгоритма. Он связан с

программой пользователя и обеспечивает вызов одной или нескольких микропрограмм, обеспечивая необходимый алгоритм обработки в ФПЗС. С верхнего уровня возможна передача параметров на нижний уровень.



Рис. 13. Структурная схема ПЗС-контроллера.

Схема рис. 13 иллюстрирует концепцию построения ПЗС-контроллеров, например, для матричного ФПЗС с кадровой организацией. В памяти микропрограмм управления находятся программы управления – для каждого способа обработки сигналов в ФПЗС (синхронное накопление, ВСЭ и др.) своя микропрограмма.

Четвертая глава посвящена вопросам теоретического и экспериментального исследования характеристик ОЭ-процессоров, определению параметров и допусков на них.

Последними этапами проектирования (рис. 2) являются этапы определения параметров и допусков на них. Множество K_P совместно с функцией выбора F_{Par} является областью определения отображения S_{Par} , имеющего область значений во множестве структур с оптимальными параметрами X^*

$$S_{Par}: K_P \cap F_{Par} \rightarrow K_P(X^*). \quad (14)$$

Завершает проектирование структурного аспекта исследование чувствительности характеристик к вариациям параметров элементов. Этап описывается отображением S_{Tol} , имеющим область определения на множестве $K_P^*(X^*)$ эффективных структур с оптимальными параметрами элементов, а область значений во множестве эффективных структур $K_P^*(X^*, d_\Sigma^*)$ с оптимальным допуском d_Σ^*

$$S_{Tol}: K_P^* \cap F_{Tol} \rightarrow K_P^*(X^*, d_\Sigma^*). \quad (15)$$

Для ОЭ-процессоров имеется ряд особенностей проектирования на этих этапах. Они, прежде всего, связаны с функционированием оптического вычислителя. Основные параметры АО-процессора – полоса частотного анализа, и частотное разрешение (для пульсарного процессора временное разрешение) задаются характеристиками АО-модулятора и настройкой узлов оптического вычислителя. Экспериментальная настройка и тестирование

являются элементом в процессе синтеза параметров. Допуски на точность измерения частоты $d_{\Sigma f}^*$ входного сигнала определяются допусками на изменения (по полю ФП и во времени) аппаратной функции и частотной шкалы процессора. Допуски на точность измерения амплитуды $d_{\Sigma A}^*$ входного сигнала связаны со стабильностью лазерного излучения.

Проведен анализ выходного сигнала ОЭ-процессора, определены ограничения способа временной задержки и накопления, рассмотрена связь выходного сигнала с параметрами радиоизлучения пульсаров, показана возможность управления параметрами ОЭ-процессора путем изменения частоты работы ФП.

Структурная схема оптического узла ОЭ-процессора приведена на рис. 14. Она соответствует традиционной схеме АО-анализатора спектра с пространственным интегрированием. Фотоприемник работает по способу временной задержки и накопления.

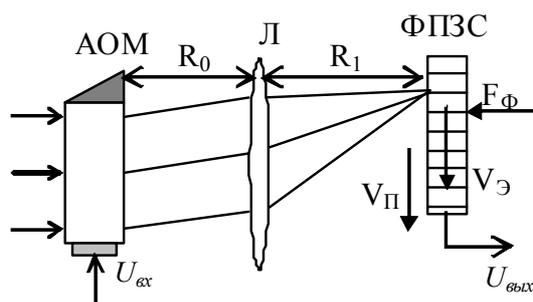


Рис. 14. Структурная схема оптического узла конвейерного ОЭ-процессора.

Рассмотрено распределение света в выходной плоскости процессора при

подаче на вход ЛЧМ-сигнала: $s(t) = S_0 \cos(2\pi f_0 t + \frac{\mu \cdot t^2}{2})$; $|t| \leq T_c / 2$, где μ - крутизна ЛЧМ-сигнала; T_c - длительность сигнала. Из анализа выражения для дифрагированной волны в плоскости ФПЗС определено первое условие настройки процессора: $R_1 = F_{\text{Л}} / (1 + F_{\text{Л}} / (kV_{3B}^2 / \mu - R_0))$, где $F_{\text{Л}}$ - фокусное расстояние линзы; $k=2\pi/\lambda$; V_{3B} - скорость акустической волны в АОМ. Когда условие настройки выполняется, распределение света в выходной плоскости процессора определяется выражением:

$$E_{\text{ВЫХ}}(\xi, t) = K_1 \int_x E(x) \exp \left[-jx \left(\frac{2\pi f_0 + \mu(t - D/2V_{3B})}{V_{3B}} - \frac{k\xi}{F_3} \right) \right] dx, \quad (16)$$

где D - апертура АОМ; K_1 - константа; F_3 - эквивалентное фокусное расстояние оптической системы $F_3 = R_0 + R_1 - R_0 \cdot R_1 / F_{\text{Л}}$. Для ЛЧМ-сигналов, у которых длительность сигнала значительно превышает временную апертуру модулятора, это выражение имеет вид $\text{sinc}()$. Движение пятна происходит со скоростью $V_{\text{П}} = \mu \frac{F_3}{kV_{3B}}$, которая прямо пропорциональна крутизне сигнала μ .

Распределение света регистрируется элементами ФПЗС, зарядовые пакеты которых движутся со скоростью $V_3 = p \cdot F_{\text{Ф}}$. Вторым условием настройки процессора является синхронность движения: $V_3 = V_{\text{П}}$, которая получается при установке частоты импульсов управления ФПЗС $F_{\text{Ф}} = \mu \cdot F_3 / V_{3B} \cdot p$.

Далее анализируется выходной сигнал ОЭ-процессора при обработке ЛЧМ-сигналов, параметры модуляции которых отличаются от номинальных $\mu \neq \mu_0$. Если считать, что процессор настроен на номинальный сигнал и элементы

двигутся с номинальной скоростью $V_{\Pi} = V_{\Xi}$, тогда в нормированной системе координат, движущейся вместе с элементами ФПЗС, распределение света можно записать в виде:

$$E_{\text{ВЫХ}}(\xi_{\text{ДВ,Н}}, t_{\text{Н}}) = \int_{x_{\text{Н}}} \exp \left\{ -jx_{\text{Н}} \left[\varphi \left(t_{\text{Н}} - \frac{1}{2} \right) - \xi_{\text{ДВ,Н}} \right] + jx_{\text{Н}}^2 \frac{\varphi}{2} \right\} dx_{\text{Н}}, \quad (17)$$

где $x_{\text{Н}} = \frac{x}{D}$ - нормированная координата (изменяется от -0,5 до 0,5); $t_{\text{Н}} = \frac{t}{T_{\text{А}}}$ -

нормированное время; $\varphi = 2\pi \frac{\gamma B_{\text{С}}}{T_{\text{ОТН}}^2}$; $T_{\text{ОТН}} = \frac{T_{\text{С}}}{T_{\text{А}}}$ - нормированная длительность

сигнала: $\gamma = \frac{\Delta\mu}{\mu_0} = \frac{\mu - \mu_0}{\mu_0}$ - коэффициент рассогласования; $B_{\text{С}} = T_{\text{С}} \Delta f_0$ - база

сигнала; $T_{\text{А}}$ - временная апертура АОМ. Выходной сигнал процессора будет

$$\text{определяться } U_{\text{ВЫХ}}(\xi_{\text{ДВ,Н}}) = K_2 T_{\text{А}} \int_{-T_{\text{А}}/2}^{T_{\text{А}}/2} |E_{\text{ВЫХ}}(\xi_{\text{ДВ,Н}}, t_{\text{Н}})|^2 dt_{\text{Н}}.$$

Рассмотрено влияние установки необходимой скорости движения зарядовых пакетов в ФПЗС на выходной сигнал ОЭ-процессора. Представим распределение света в выходной плоскости в системе координат ξ^{Ξ} , движущейся с элементами ФПЗС с произвольной скоростью $V_{\Xi} = V_{\Pi} + \Delta V$; в

нормированной системе координат $\xi_{\text{ДВ,Н}}^{\Xi} = \xi_{\text{ДВ,Н}} - \Delta V_{\text{Н}} \left(t - \frac{T_{\text{А}}}{2} \right)$, где

$\Delta V_{\text{Н}} = V_{\Xi, \text{Н}} - V_{\Pi, \text{Н}}$. С учетом изложенного уравнение (17) примет вид:

$$E_{\text{ВЫХ}}(\xi_{\text{ДВ,Н}}^{\Xi}, \Delta V_{\text{Н}}, t_{\text{Н}}) = \int_{x_{\text{Н}}} \exp \left\{ jx_{\text{Н}} \left[\xi_{\text{ДВ,Н}}^{\Xi} + \Delta V_{\text{Н}} T_{\text{А}} \left(t_{\text{Н}} - \frac{1}{2} \right) \right] \right\} \exp \left(jx_{\text{Н}}^2 \frac{\varphi}{2} \right) dx_{\text{Н}}. \quad (18)$$

Из уравнения (18) видно, что форма выходного сигнала меняется в зависимости от рассогласования скоростей ΔV . С использованием формулы (18) в случае приближения равномерной засветки $E(t)$ и пренебрежении квадратичным набегом фаз φ в движущейся со скоростью $V_{\text{ССД}}$ системе координат $\xi_{\text{ДВ}}$ и используя (18) получено выражение для выходного сигнала пульсарного ОЭ-процессора:

$$U_{\text{ВЫХ}}(\xi_{\text{ДВ,Н}}) = \frac{1}{T_{\text{С}}} \int_0^{T_{\text{С}}} \left| \int_{-1/2}^{1/2} \exp \left(i \frac{D}{F_{\text{Л}} \cdot \lambda} \cdot x \cdot (\xi_{\text{ДВ,Н}} - \Delta V_{\text{МIS}}(t)) \right) dx_{\text{Н}} \right|^2 dt, \quad (19)$$

где $\Delta V_{\text{МIS}}(t) = (f_{\text{ЛIN}}(t) - f_{\text{PSR}}(t)) \cdot l / \partial f_l$ - рассогласование скоростей отклика сигнала пульсара и передачи зарядовых пакетов в ФПЗС.

На рис. 15 представлены сигналы, рассчитанные по уравнению (19) при центральной частоте сигнала 1425 МГц и различных полосах приема (1, 40, 80 МГц). Видно, что форма функции зависит от полосы приема. При используемой нами в экспериментах полосе 40 МГц искажение выходного сигнала незначительно и не сказывается на форме профиля импульса пульсара.

В работе предложена методика изучения стабильности функционирования созданных макетов ОЭ-процессоров при разных режимах работы ФПЗС путем

оценок спектроскопической дисперсии Аллана σ_A выходного сигнала ОЭ-процессора при постоянном времени кадра τ [4, 24].

$$\sigma_A^2(k) = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^{M+1} (R_{i+1}(k) - R_i(k))^2,$$

где $n=0,1,\dots,M$; $M=N/k-1$; N – общее число измерений, k – число накоплений; $R_n(k) = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k y_{nk+i}$; y_i – последовательность

экспериментальных данных с одного спектрального канала. Для кадрового режима работы ФПЗС получено, что низкочастотные флуктуации становятся доминирующими при времени накопления около 100 сек. Близкие результаты для АО спектроанализаторов получены R. Schieder (Германия). Для временной задержки и накопления сигналов в ФПЗС низкочастотные флуктуации не выделяются при более чем 2 часов накопления. Для анализа спекловой картины излучения применен аппарат вейвлет-преобразования. Имеются спеклы размерами от 2,5 элемента до 10-30 элементов фотоприемника.

Дрейф частотных параметров $H(f)$ отдельных каналов (в макете ОЭ-процессора 30 кГц/град) является трудно учитываемым процессом. В диссертации описан предложенный автором [7, 8] метод калибровки частотной шкалы, который позволяет получить высокую стабильность частотной настройки (до 0.1 аппаратной функции ОЭ-процессора).

Разработанный метод частотной калибровки предполагает периодическое измерение смещения положения частотной шкалы с помощью набора частотных реперов и затем по найденному смещению рассчитывается поправка к положению зарегистрированного сигнала. Для реализации такой калибровки в приемную систему вводятся коммутатор и генератор тестовых частотных реперов. В качестве частотных реперов была выбрана гребенка частот, которая включала 12 реперов.

В пятой главе рассмотрены особенности построения цифровой части, алгоритмического и программного обеспечения ОЭ-процессоров, определена задача проектирования спецпроцессоров, включающих аналоговый узел, ПЗС-контроллер и узел цифровой потоковой обработки.

Проведен анализ и классификация алгоритмов потоковой обработки, определены требования к алгоритмам для ОЭ-процессоров, выделен новый уровень – алгоритмы обработки сигналов в ФПЗС (рис. 16). Рассмотрены основные способы реализации спецпроцессора от одного процессора и ЭВМ до нескольких процессоров с использованием ПЛИС. Выбор реализации определяется требуемым быстродействием, которое реализуется за счет построения многоуровневой аппаратуры и параллельного выполнения операций нижнего уровня.

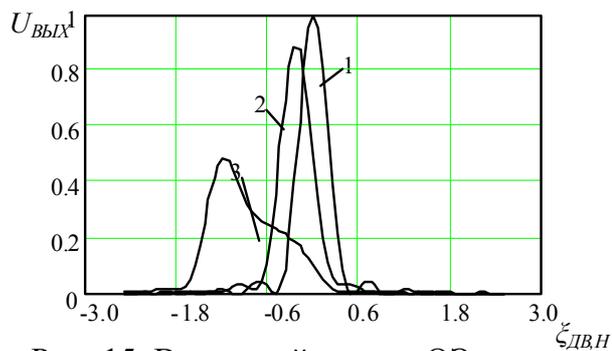


Рис. 15. Выходной сигнал ОЭ-процессора для полосы приема: 1 – 1 МГц; 2 – 40 МГц; 3 – 80 МГц.

Проведено рассмотрение основных алгоритмов потоковой цифровой обработки сигналов применительно к ЦСП. Попиксельная обработка включает алгоритмы: детектирования, цифровой двойной коррелированной выборки, калибровки неравномерности чувствительности; построковая обработка включает алгоритмы: объединения отсчетов, накопления кадров, калибровки шкалы. Алгоритмы покадровой обработки и управления режимами рассматриваются в других разделах, при описании решений конкретных задач.

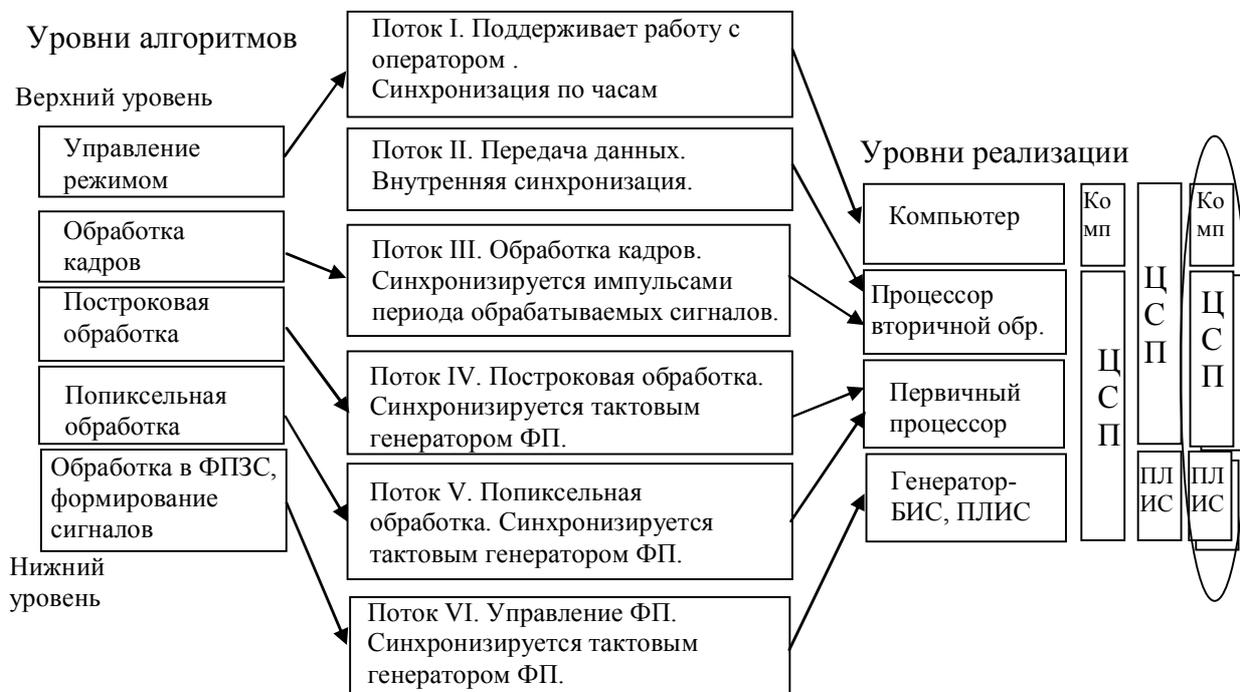


Рис. 16. Схема многоуровневых алгоритмов, потоков команд и их реализации.

В главе также описаны подходы к проектированию программного обеспечения и примеры реализаций спецпроцессоров.

В шестой главе рассмотрены структуры пульсарных ОЭ-процессоров и их применение на радиотелескопе для построения одиночных и интегральных профилей радиоизлучения пульсаров и измерения меры дисперсии.

Радиоизлучение пульсаров имеет ряд особенностей, главная из которых – это дисперсия в межзвездной среде. Из-за дисперсии короткий импульс радиоизлучения пульсара дрейфует по частоте в полосе приема Δf с центральной частотой f от высоких частот к низким со скоростью

$$\alpha_{DM} = \frac{f^3}{8,3 \cdot 10^3 DM} \cdot \frac{MГц}{c}, \quad (20)$$

где DM – мера дисперсии пульсара, в парсек/см³, f – частота, в МГц. Импульс радиоизлучения, наблюдаемый в момент времени t_2 на частоте f_1 , появится на частоте $f_2 < f_1$ в момент t_2 и разность времен составит

$$\Delta T_{DM} = t_2 - t_1 = - 4.15 \cdot 10^{-3} \cdot DM (1/f_1^2 - 1/f_2^2), \quad (t - \text{в сек, } f - \text{в МГц}), \quad (21)$$

Период повторения импульсов радиоизлучения разных пульсаров меняется от единиц миллисекунд до единиц секунд.

Предложена структура и алгоритмы работы 1D пульсарного ОЭ-процессора на основе АО анализатора спектра [7, 11]. Такой ОЭ-процессор превосходит по некоторым параметрам ряд современных пульсарных машин, в частности фильтровые или пульсарную машину RuMa 1, включающую в себя 192 цифровых процессора типа ADSP2106X SHARC. ОЭ-процессор инвариантен к моменту прихода импульсов радиоизлучения и перестраивается электронным образом при изменении частоты фаз ФПЗС для обработки пульсаров с различной мерой дисперсии DM .

Структурная схема оптического узла ОЭ-процессора соответствует рис. 14. На вход подаются сигналы с ВЧ-приемника радиотелескопа. Оптическое пятно перемещается по ФПЗС со скоростью дрейфа частоты (20) в принимаемом радиоизлучении: $V_{\Pi} = V_{DM} = K \cdot \alpha_{DM}$, где K – константа, определяемая оптической схемой процессора. Синхронность перемещения пятна и зарядовых пакетов обеспечивается при частоте фазных напряжений: $F_{\Phi} = m \cdot 1,2 \cdot 10^{-4} f^3 \cdot DM^{-1} \cdot \delta f_a^{-1}$ где m – число элементов ФПЗС (число отсчетов), соответствующих элементу разрешения АО анализатора спектра; δf_a – частотное разрешение. Оценки показывают, что для типичных значений величин $DM, f_c, \delta f_a$ частота F_{Φ} должна изменяться в пределах от десятков до сотен килогерц, что легко выполняется, так как диапазон рабочих частот ФПЗС лежит в пределах от единиц килогерц до десятков мегагерц.

Предложена структура и алгоритмы работы 2D пульсарного ОЭ-процессора [1, 3]. Вторая координата используется для вычисления поляризационных характеристик радиоизлучения. Оптический узел построен по схеме двухканального акустооптического интерферометра.

Описана разработанная и реализованная автором методика калибровок пульсарного ОЭ-процессора, построенная на основе частотных калибровок АО анализатора спектра [8, 25]. Она обеспечивает точное измерение момента прихода импульсов радиоизлучения пульсаров и позволяет учесть смещение частотной шкалы процессора. Смещение времени прихода импульса, которое необходимо компенсировать, можно определить: $\Delta T = \Delta T_0 + \Delta T_M$, где ΔT_0 – сдвиг импульса за счет смещения всей шкалы; ΔT_M – сдвиг из-за изменения масштаба. $\Delta T_0 = \Delta N_0 \cdot m_{f0} / V_{CCD}$, где ΔN_0 – смещение шкалы, измеренное в элементах фотоприемника; m_{f0} – масштаб частотной шкалы. $\Delta T_M = \Delta t_{CCD} - \Delta t_{KAL}$, где Δt_{CCD} и Δt_{KAL} – время прохождения импульса пульсара по частотному диапазону (по фотоприемнику) при начальном масштабе m_{f0} и при масштабе, полученном после калибровки m_{fKAL} , $\Delta t_{CCD} = \frac{N_0 \cdot m_{f0}}{V_{CCD}}$; $\Delta t_{KAL} = \frac{N_0 \cdot m_{fKAL}}{V_{CCD}}$, где N_0 – номер элемента, соответствующего центральной частоте ОЭ-процессора. В результате смещение импульса пульсара, которое необходимо компенсировать, можно определить в виде:

$$\Delta T = \Delta T_0 + \Delta T_M = \frac{\Delta N_0 \cdot m_{f0}}{V_{CCD}} + \frac{N_0 (m_{f0} - m_{fKAL})}{V_{CCD}} \quad (22)$$

ОЭ-процессор был установлен в пульсарном приемном комплексе диапазона 1,4 ГГц радиотелескопа РТ-64 Калязинской радиоастрономической

обсерватории ФИАН. Совместно с сотрудниками ФИАН были проведены успешные наблюдения ряда пульсаров, как секундных, так и миллисекундных, одновременно и синхронно с их регистрацией в диапазоне 600 МГц на штатном фильтровом комплексе АС-600/160 ФИАН [7, 9]. Время получения профиля для разных пульсаров различно и изменялось от 10-15 мин до 2 часов. Представленные в табл.1 результаты позволяют выбрать пульсары для задачи одновременных наблюдений на разных частотах на одном радиотелескопе.

Табл. 1. Сравнение профилей пульсаров, полученных на радиотелескопе РТ-64 (г. Калязин) при одновременных наблюдениях в двух пульсарных комплексах.

Пульсары	ОЭ-процессор	АС600/160
1. PSR 0329+54 $DM=26.8$, $T_p=0,714$ с $S=203$ мЯн		
2. PSR 1937+21 $DM=71,02$ $T_p=1,55$ мс $S=16$ мЯн		
3. PSR 1713+07 $DM=15,993$, $T_p=4,57$ мс, $S=4$ мЯн		
4. PSR 1640+22 $DM=18.415$ $T_p=3.163$ мс, $S=3.5$ мЯн		

Представлена разработанная методика измерения меры дисперсии DM для секундных и миллисекундных пульсаров с применением ОЭ-процессора при одновременных двухчастотных наблюдениях пульсаров [1, 7]. Мера дисперсии определялась по временной задержке T_{DM} (дисперсионному запаздыванию) между временами появления сигнала на одной частоте f_1 и на другой f_2 (21). В работе предложена схема определения дисперсионного запаздывания T_{DM} (рис. 17). Измеренные в течение нескольких лет значения меры дисперсии DM для пульсара PSR 1937+21 позволили уточнить этот параметр в пульсарном каталоге.

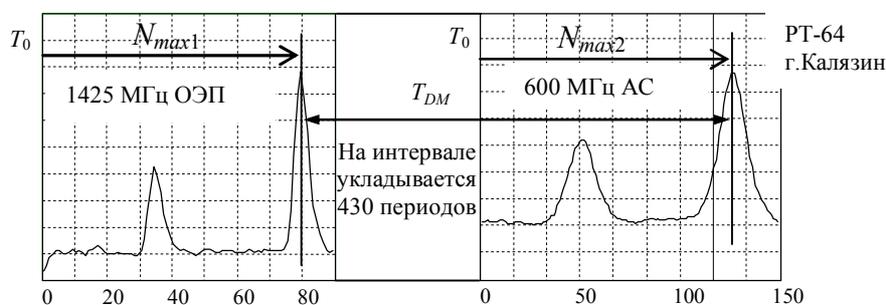


Рис. 17. Профили и дисперсионное запаздывание импульсов миллисекундного пульсара 1937+21 на двух частотах.

В работе экспериментально показана возможность использования пульсарного ОЭ-процессора для обработки и регистрации одиночных

импульсов радиоизлучения пульсаров. Такая возможность представляет интерес в частности для регистрации гигантских импульсов.

В седьмой главе рассмотрены ОЭ-процессоры с синхронным накоплением в матричном ФПЗС для систем синтезирования радиоастрономических изображений. Рассматриваются одномерный и двумерный процессоры. Вторая координата в 2D процессорах используется либо для расширения полосы анализа сигналов, либо для обеспечения корреляционной обработки.

Рассмотрен принцип синтеза и дискретизации радиоизображения, схемы оптического узла ОЭ-процессоров, временных диаграмм сигналов и режимов работы фотоприемника [3, 24].

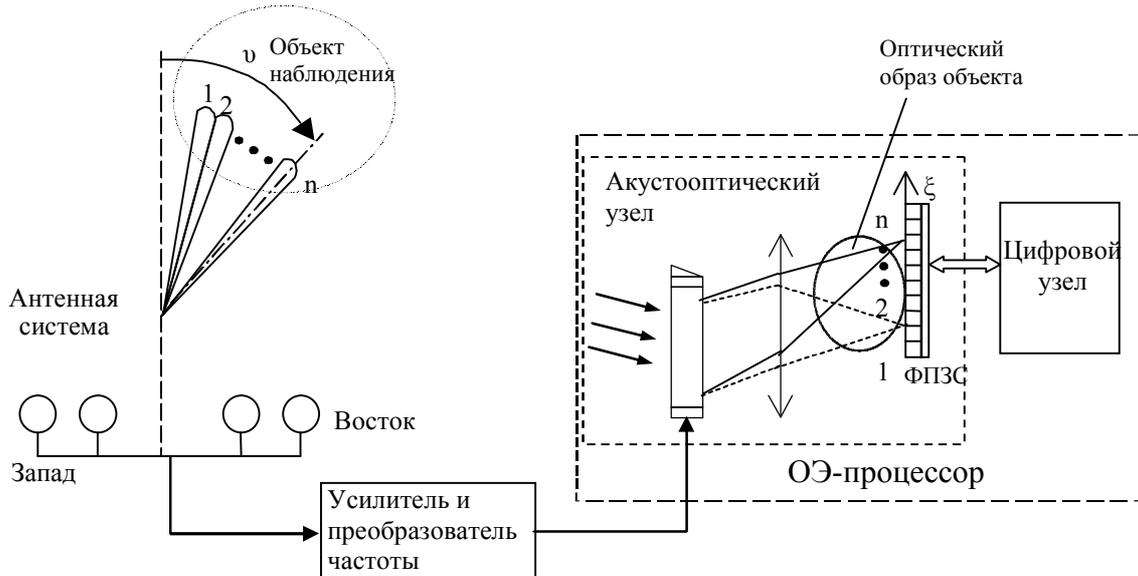


Рис. 18. Схема формирования радиоизображения в ОЭ-процессоре на радиотелескопе с частотным сканированием.

Принцип формирования радиоизображения с использованием ОЭ-процессора для радиоинтерферометра с частотным сканированием показан на рис. 18. После акустооптического взаимодействия распределение дифрагированного света в выходной плоскости акустооптического узла отражает сечение радиоизображения. Формирование каналов приемного устройства или дискретизация непрерывного изображения происходит на фотоприемнике. Каждый элемент фотоприемника представляет собой эквивалентный частотный фильтр. При использовании многоканального приемного устройства диаграмма направленности представляет собой веер диаграмм. Путем управления параметрами каналов можно управлять характеристикой направленности.

Предложено формировать набор каналов с заданными частотным разносом и шириной полосы каждого канала путем объединения сигналов с отдельных ПЗС-ячеек, т.е. путем формирования ВСЭ [16, 23]. Частотная характеристика $H(\nu)$, формируемого таким образом частотного канала, может быть представлена:

$$H(\xi - \xi_i) = \sum_{i=1}^m \int_{-\infty}^{+\infty} h(\xi') R_i(\xi - \xi') d\xi' \quad (23)$$

где $h()$ - аппаратная функция АО-узла процессора; $R(\xi - \xi_i)$ - апертурная функция i -го элемента; ξ - координата в плоскости фотоприемника; m - число объединяемых элементов.

Апертурная функция может быть аппроксимирована следующим образом:

$$R_i(\xi - \xi_i) = \text{rect}\left[\frac{\xi - 2ai}{2aq}\right], \quad \text{где } 2a - \text{период расположения ПЗС-ячеек; } q - \text{размер}$$

светочувствительной зоны ячейки, отнесенный к шагу расположения ячеек. Такое представление апертурной функции характеризует пространственное распределение чувствительности по строке и характерно для матричных ФПЗС. Об этом свидетельствуют и экспериментальные исследования, в которых измеренное значение q составляло 0,6-0,8. Аппаратная функция $h()$ определяется в первую очередь размерами окна $W(\tau)$ АО-модулятора и может

быть аппроксимирована функцией $h(\xi_i) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} W(\tau) \exp(-i2\pi\xi\tau) d\tau \right|^2$. Для

эффективного управления параметрами каналов ОЭ-процессора размер аппаратной функции должен быть близок к размеру элемента фотоприемника. В работе определены требования к дискретной перестройке частотных характеристик каналов в зависимости от положения в пространстве соответствующих лучей диаграммы направленности.

Для получения двух параметров Стокса интенсивности I и поляризации Q разработаны алгоритмы работы ОЭ-процессора, которые связаны с использованием двойной сетки модулирующих частот. Предложена модификация способа синхронного накопления, при котором на ФПЗС синхронно накапливались не два сигнала (рис. 12), а четыре, используемых затем для вычисления параметров I и Q [1, 23].

В заключительных параграфах представлены результаты применения ОЭ-процессора на крупнейшем отечественном радиоинтерферометре с частотным сканированием каким является Сибирский солнечный радиотелескоп (ССРТ). ССРТ (крест из 256 антенн), предназначен для систематического и оперативного получения радиокарт Солнца и позволяет исследовать весь спектр вопросов солнечной астрофизики, в том числе быстропротекающие процессы, такие, как субсекундные импульсы радиоизлучения вспышек.

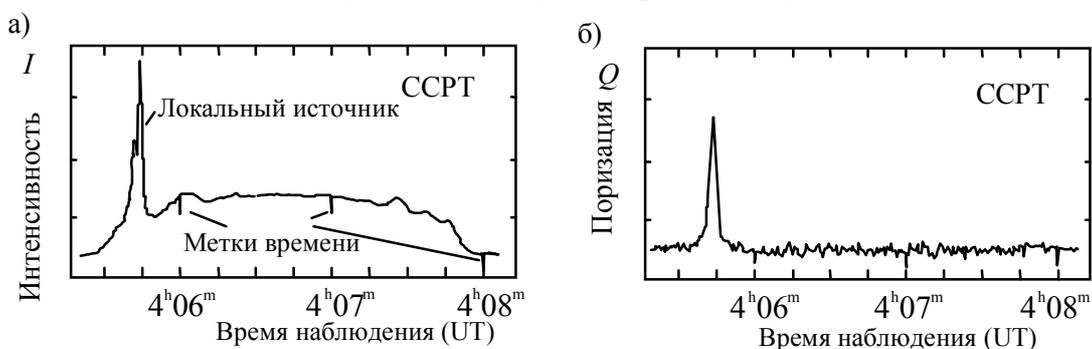


Рис. 19. Кривые прохождения Солнца по сигналам интенсивности I и поляризации Q , полученные на ОЭ-процессоре.

На рис. 19 приведены кривые прохождения Солнца по сигналам интенсивности I и поляризации Q . Виден не только локальный источник, но и то, что радиоизлучение его сильно поляризовано [17, 23].

Разработанные и опробованные в наблюдениях принципы построения и алгоритмы работы ОЭ-процессора для радиоинтерферометра с частотным сканированием использованы в ИСЗФ СО РАН при создании штатной ОЭ-приёмной системы ССРТ.

В приложении приводятся результаты исследований возможности применения ОЭ-процессора в виде гибридной микросхемы (микромодуля) для обработки траекторного сигнала (эхо-сигнала) РСА. Показана возможность использования описанного ОЭ-процессора в качестве второго каскада (по азимуту) системы формирования изображения. Этот процессор выполняет многоканальный корреляционный анализ совокупности отраженных импульсов. Первым использование ОЭ-процессоров для обработки сигналов РСА предложил Д.Псалтис, США. В работе проведен анализ сигналов, определены требования к гибридному ОЭ-процессору и его элементам, произведено макетирование основных узлов.

Для исследования особенностей работы ОЭ-микромодуля и проверки ряда технических решений были созданы несколько макетов. Схема одного из макетов ОЭ-процессоров включает линейку светоизлучающих диодов (СИД), транспарант, матричный ФПЗС и волоконные шайбы между ними. В микромодуле использовался многоэлементный светоизлучатель с 64-мя ленточными диодами (разработка НИИ «Сапфир» г. Москва). Волоконные шайбы были выполнены в виде плоскопараллельных пластин из волокон диаметром 6 мкм, при длине волокон (толщине шайбы) 2,5 мм. Матричный фотоприемник имел 264 столбца по 290 элементов. Для управления линейкой СИД предложено использовать широтно-импульсную модуляцию излучения светодиодов [6]. В этом случае величина тока, текущего через СИД, фиксируется на одном уровне (бинарное управление), а длительность свечения определяется амплитудой управляющего сигнала. Появляется возможность перехода от аналоговых элементов схем введения сигнала в ОЭ-процессор к цифровым.

Представленные реализации ОЭ-процессоров в виде гибридных микромодулей привлекательны, прежде всего, благодаря своей простоте и возможностям миниатюризации. Различные варианты архитектур микросхем и микромодулей могут применяться при решении широкого спектра задач параллельной обработки массивов данных.

Основные результаты работы

1. Предложена методология системного проектирования ОЭ-процессоров, являющимися процессорами аналого-цифрового типа.

2. Разработан принцип построения ОЭ-процессоров, заключающийся в распределенной и согласованной по производительности конвейерной обработке сигналов по последовательным вычислительным ядрам, одним из которых является многоэлементный фотоприемник.

3. Разработана модель преобразований сигналов в ОЭ-процессорах с введением в модель ПЗС-фотоприемника зарядового операционного блока. Предложена имитационная модель переноса зарядовых пакетов. Разработаны новые способы обработки зарядовых пакетов в ПЗС-фотоприемниках.

4. Предложен метод управления ПЗС-фотоприемником с помощью микропрограммирования операций. Указанный метод позволяет синтезировать ПЗС-контроллеры.

5. Разработана концепция построения и функционирования цифрового ядра для потоковой обработки сигналов в ОЭ-процессоре с учетом обработки информации в ПЗС-фотоприемнике.

6. Разработана методика поддержания долговременной стабильности параметров ОЭ-процессоров.

7. Разработан и реализован метод обработки сигналов для нового типа конвейерного ОЭ-процессора, предназначенного для регистрации сигналов космических источников – пульсаров. Разработана методика применения пульсарного ОЭ-процессора в наблюдениях на радиотелескопе. С помощью нового пульсарного ОЭ-процессора проведены несколько серий наблюдений на радиотелескопе РТ-64 (г. Калязин).

8. Предложен метод обработки сигналов для ОЭ-процессора радиоинтерферометра с частотным сканированием. Проведены первые наблюдения Солнца на ССРТ. Переход на новую элементную базу позволил упростить аппаратуру приемного комплекса и уменьшить ее объем в несколько десятков раз.

Основные публикации по теме диссертации

Монография и статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК

1. Молодяков С.А. Системное проектирование оптоэлектронных процессоров обработки сигналов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.- 226 с., ISBN 978-5-7422-3016-8.

2. Лыпарь Ю.И., Молодяков С.А. Методология системного проектирования аналогоцифровых оптоэлектронных процессоров обработки сигналов. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление.- 2011.- №6.- Т.138.- С. 181-190.

3. Лавров А.П., Молодяков С.А., Саенко И.И. Акустооптоэлектронные устройства в радиоастрономических приемных комплексах. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление.- 2010.- №4.- С.233-242.

4. Молодяков С.А., Иванов С.И. Оптоэлектронный процессор в многоканальном радиометре. // Информационно-управляющие системы.- 2009.- №2 С.10-16.

5. Молодяков С.А. Оптоэлектронные процессоры с ПЗС-фотоприемниками. Конвейерная обработка сигналов.//Информационно-управляющие системы.-2008.-№6.-С.2-8.

6. Лавров А.П., Молодяков С.А. Возможности построения процессоров обработки сигналов в виде гибридных оптоэлектронных микросхем // Научно-технические ведомости СПбГПУ Информатика. Телекоммуникации. Управление, 2008.- №5.- Т.65.- С. 144-151.

7. Есепкина Н.А., Лавров А.П., Молодяков С.А. Акустооптический компенсатор дисперсии для наблюдения радиоизлучения пульсаров. // Антенны.- 2006.- №7.- С.69-76.

8. Молодяков С.А. Новые возможности акустооптической пульсарной машины // Научно-технические ведомости СПбГТУ .- 2005.- Т.41.- № 3.- С.71-79.

9. Есепкина Н.А., Илясов Ю.П., Лавров А.П., Молодяков С.А., Орешко В.В. Применение акустооптического процессора для наблюдения радиоизлучения пульсаров // Письма в ЖТФ.- 2003.- Т.29, Вып.21.- С.32-39.

10. Esepkina N.A., Kruglov S.K., Molodyakov S.A., Khaikin V.B. Data acquisition systems based on DSP for multichannel radioastronomical receivers. // *Astronomy & Astrophysics Transactions*.- 2000.- V.19, №3-4.- P.616-623.
11. Есепкина Н.А., Лавров А.П., Молодяков С.А. Акустооптический компенсатор дисперсии для сжатия импульсов радиоизлучения пульсаров. // *Известия вузов России. Радиоэлектроника*.- 1998.- №2.- С.21-29.
12. Есепкина Н.А., Лавров А.П., Ананьев М.Н., Благодарный В.С., Иванов С.И., Мансырев М.И., Молодяков С.А. Оптоэлектронные процессоры со сканирующим ПЗС-фотоприемником. // *Квантовая электроника*.- 1995.- Т.22.- №10.- С.991-996.
13. Altynsev A.T., Grechnev V.V., Kachev L.E., Lesovoi S.V., Mansyrev M.L., Molodyakov S.A., Platonov A.V., Saenko I.I., Smolkov G.Ya., Sych R.A., Treskov T.A., Zandanov V.G., Yesevkina N.A. The observations of solar microwave buists at the Siberian solar radio telescope with 50-millisecond resolution // *Astronomy and Astrophysics*. 1994.- V.287.- P.256-260.
14. Есепкина Н.А., Гаврилов Г.А., Молодяков С.А. и др. Оптоэлектронный процессор на основе матричного ФПЗС с волоконной шайбой. // *Письма в ЖТФ*. -1992. -Т.8. -№1. -С.32-37.
15. Есепкина Н.А., Мансырев М.И., Молодяков С.А., Саенко И.И. Акустооптический спектрокоррелятор для радиогелиографа. // *Изв. вуз. Радиоэлектроника*.- 1990.- Т.33.- №8.- С.91-94.
16. Саенко И.И., Мансырев М.И., Молодяков С.А., Комар В.Я. Частотные характеристики акустооптоэлектронного приемника сигналов солнечного радиоинтерферометра. // *Известия ВУЗов. Приборостроение*.- 1989.- Т.32.- №1.- С. 75-79.
17. Гречнев В.В., Есепкина Н.А., Занданов В.Г., Качев Л.Е., Мансырев М.И., Молодяков С.А., Саенко И.И., Смольков Г.Я., Шипов Л.М. Исследование макета акустооптического приемника на Сибирском солнечном радиотелескопе. // *Письма в ЖТФ*, 1988. - Т.14. - №7. - С.581-585.
18. Молодяков С.А. Управление информационными характеристиками фотоприемника на приборе с зарядовой связью в устройстве ввода изображения в ЭВМ.// *Приборы и техника эксперимента*.- 1987.- №3.- С.71-75.
19. Есепкина Н.А., Молодяков С.А., Саенко И.И. Организация синхронного накопления на матричном ПЗС фотоприемнике в модуляционном спектрометре.//*Письма в ЖТФ*.-1986.- Т.12.- №2. - С.118-123.

Другие статьи, труды конференций и изобретения

20. Патент N 2065140 G 01 J3/433 . Оптоэлектронный модуляционный спектрометр. Есепкина Н.А., Круглов С.К., Молодяков С.А. // *Изобретения* . - М. ,-1996. -№22. -с.232 .
21. Молодяков С.А., Круглов С.К. Имитационная модель переноса зарядовых пакетов в ПЗС-регистре. // *Труды СПбГТУ*.- №468.- 1997.- С.45-48.
22. Esepkina N.A., Molodyakov S.A., Saenko I. I. Acoustooptical Receiving System for Radioimage Formation at the Siberian Solar Radiotelescope. // *Journal Photonics and Optoelectronics*.- 1998.- V.5.- № 2.- P. 63-72.
23. Лавров А.П., Молодяков С.А. Оптоэлектронный пульсарный процессор и его аппаратная функция. // *Труды СПбГПУ, Ф-т техн. киберн. - Вып. "Вычислительные, измерительные и управляющие системы"*. - 2004.- С.114-119.
24. Ivanov S.I., Lavrov A.P., Molodyakov S.A., Saenko I.I. Acousto-optical spectrometers' frequency performance stability // *Proc. SPIE*.- 2004.- V.5381.- P.253-257.
25. Esepkina N.A., Lavrov A.P., Molodyakov S.A., Oreshko V. V. Acoustooptical pulsar processor: application of frequency scale calibration // *Proc. SPIE*.- 2007.- V.6594.- 659411 .- 9p.
26. Молодяков С.А. Системное проектирование оптоэлектронных процессоров с обработкой сигналов в ПЗС-фотоприемниках. //*Труды XV Международной конференции «Системный анализ в проектировании и управлении»*, СПб, 29.06 – 1.07.2011.- С.238-246.