

На правах рукописи

САВИНКОВ Андрей Юрьевич



**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ
ОБРАБОТКИ СИГНАЛА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СРЕДЫ
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ**

Специальность: 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Воронеж – 2006

Работа выполнена в Воронежском государственном техническом университете

Научный консультант

Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор,
Фролов Вадим Николаевич

Официальные оппоненты:

Заслуженный деятель науки и техники
РФ,
доктор технических наук, профессор
Батищев Дмитрий Иванович;
доктор технических наук, профессор
Муратов Александр Васильевич;
доктор технических наук, профессор
Сумин Виктор Иванович

Ведущая организация

Московский университет приборостроения и информатики

Защита состоится 9 июня 2006 г. в 14⁰⁰ часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д 212.037.03 Воронежского государственного технического университета по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский просп., 14.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного технического университета.

Автореферат разослан " 5 " мая 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Родионов О.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время технология цифровой обработки сигнала является одной из наиболее востребованных технологий для широкого прикладного применения и при этом одной из наиболее молодых среди всех технологий, имеющих широкое применение. Цифровая обработка сигнала (ЦОС) применяется для решения задач радиолокации, навигации, телекоммуникации, гидролокации, обработки изображения и звука в различной аппаратуре специального и общегражданского назначения, в медицинской технике, в профессиональной и бытовой аудио-, видеотехнике, в фотографии.

Столь широкое распространение технологии ЦОС объясняется рядом присущих ей преимуществ: стабильность параметров и отсутствие их изменения вследствие старения, не требуется регулировка, обеспечивается высокая повторяемость параметров от экземпляра к экземпляру, гарантируется неизменность параметров при изменении температуры и напряжения питания в достаточно широких пределах, предоставляется возможность модификации алгоритмов обработки сигнала в эксплуатируемой аппаратуре путем простой замены программы, предоставляется возможность применения алгоритмов обработки, не реализуемых в аналоговой технике, обеспечиваются более высокие параметры при меньшей стоимости по сравнению с аналоговой техникой.

Ввиду наличия развитых средств автоматизации проектирования программно-аппаратных платформ цифровой обработки сигнала, основная сложность при проектировании СЦОС ложится на этап проектирования алгоритмов, особенно если учитывать постоянный рост сложности алгоритмов обработки, связанный с ростом вычислительных возможностей аппаратных платформ.

При этом решение задач проектирования алгоритмического обеспечения для СЦОС все еще остается недостаточно автоматизированным, и получение решения требует сосредоточения усилий большой команды разработчиков, включающей математиков, радиофизиков, радиоинженеров, программистов, специалистов в области математической статистики.

В то же время многие задачи этапа проектирования алгоритмического обеспечения СЦОС, такие как отладка и верификация программ моделирования, выполнение статистического моделирования, анализ результатов, визуализация выборок сигнала и ряд других задач могут быть эффективно автоматизированы за счет применения специального программного обеспечения.

Имеющиеся средства автоматизации проектирования алгоритмического обеспечения СЦОС, такие как Matlab, Simulink, Mathcad, SigLib не вполне отвечают требованиям, предъявляемым к САПР СЦОС, прежде всего, по следующим причинам:

- низкая производительность вычислений, ограничивающая объем статистического моделирования;

- ввиду универсальности существующего программного обеспечения САПР СЦОС и его ориентации на решение широкого круга задач предоставляемое библиотечное обеспечение для моделирования часто оказывается недостаточно полным для решения задач конкретной предметной области;
- в большинстве случаев оказывается невозможным прямое использование фрагментов кода из программ моделирования при разработке встроеного программного обеспечения СЦОС.

Таким образом, в условиях постоянного усложнения алгоритмического обеспечения СЦОС и при отсутствии существующих средств автоматизации проектирования алгоритмов ЦОС, полностью удовлетворяющих разработчиков, создание инвариантных и предметно-ориентированных компонентов САПР СЦОС представляется актуальной научной проблемой.

Работа выполнена в Воронежском государственном техническом университете в соответствии с межвузовской научно-технической программой И.Т. 601 "Перспективные информационные технологии в высшей школе", ГБ НИР 91.04 "Моделирование и оптимизация в автоматизированных системах", ГБ НИР 4.01 "Интеллектуализация принятия решений в автоматизированных и информационных системах", грантом Минобразования РФ "Теоретические основы оптимального проектирования слабоформализованных объектов" (№ государственной регистрации 01970003705) и в рамках одного из основных направлений Воронежского государственного технического университета "САПР и системы автоматизации производства".

Цель и задачи исследования. Целью диссертации является разработка интегрированной среды имитационного моделирования и оптимизации в САПР СЦОС, обеспечивающей автоматизацию проектных процедур анализа и синтеза алгоритмов цифровой обработки сигнала.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие задачи:

анализ средств автоматизированного проектирования СЦОС и на его основе формирование требований к созданию эффективного информационного, математического и программного обеспечения;

структуризация маршрута проектирования алгоритмического обеспечения СЦОС с ориентацией на этапы, поддающиеся формализации и автоматизации при их выполнении;

выбор оптимального состава библиотек и программных инструментов для этапов проектирования СЦОС по критерию минимизации трудозатрат на реализацию проектных процедур;

формирование требований и разработка инвариантных компонентов интегрированной среды имитационного моделирования и оптимизации алгоритмов ЦОС в системе автоматизированного проектирования;

построение математического и программного обеспечения многомерной численной оптимизации для реализации процедур синтеза в структуре интегрированной среды САПР СЦОС;

выбор языка программирования, компилятора, среды разработки и разработка программного обеспечения библиотек и программных инструментов автоматизации проектирования алгоритмов ЦОС;

формирование процедур анализа системных параметров при разработке системы связи с использованием оптимизированных алгоритмов ЦОС;

анализ эффективности применения средств САПР для промышленных разработок СЦОС.

Методы исследования. Для решения поставленных задач были использованы теоретические основы автоматизации проектирования, методы экспертных оценок, математической статистики, имитационного статистического моделирования, численные методы оптимизации, методы объектно-ориентированного проектирования и программирование на языке C++.

Научная новизна. В работе получены следующие основные результаты, характеризующиеся научной новизной:

маршрут проектирования СЦОС, обеспечивающий структуризацию этапов разработки алгоритмов ЦОС и их трансформацию в проектные процедуры анализа и синтеза на основе статистического имитационного моделирования;

структура программно-методического комплекса САПР СЦОС, позволяющая интегрировать компоненты информационного, математического и программного обеспечения в рамках структурированной системы инвариантных и предметно-ориентированных библиотек анализа и синтеза;

процедура динамической синхронизации и планирования событий в дискретной событийно-ориентированной имитационной модели, отличающаяся включением в алгоритмическую схему объектов – часов модельного времени;

способ повышения производительности процедур автоматизированного проектирования СЦОС, отличающийся характером использования внешних аппаратных вычислительных модулей на сигнальных процессорах или ПЛИС, подключаемых к программно-техническому САПР;

комплекс алгоритмов интегрированной среды имитационного моделирования и оптимизации, обеспечивающий реализацию инвариантных функций отладки и верификации программ моделирования на основе объекта – отладочная точка, визуализацию тестовых выборок сигнала, полученных из контрольных точек программы моделирования, и их предварительный статистический анализ, организацию распределенных вычислений в локальной компьютерной сети при выполнении имитационного статистического моделирования, автоматическую оптимизацию разрядности представления данных при целочисленных вычислениях в СЦОС;

процедура оптимального проектирования алгоритмов ЦОС, отличающаяся способом интеграции в среду имитационного моделирования комплекса алгоритмов многомерной численной оптимизации и объектно-ориентированных проектных операций синтеза;

процедура анализа системных параметров при разработке системы связи с использованием оптимизированных алгоритмов ЦОС, отличающаяся приемами повышения скорости автоматизированного моделирования за счет замены в интегрированной среде имитационной модели низкоуровневых алгоритмов обработки сигнала аналитическими моделями.

Практическая ценность и результаты внедрения. Практическая ценность полученных результатов состоит в следующем:

разработан набор специализированных библиотек на языке C++, применение которых при разработке программ имитационного статистического моделирования позволяет существенно сократить сроки и трудоемкость разработки программ, их отладки и верификации, снизить риск наличия необнаруженных ошибок в программах, в частности: библиотека динамической синхронизации и планирования событий в программах дискретного событийно-ориентированного имитационного моделирования, библиотека матричных вычислений с поддержкой операторной записи в арифметических выражениях с матрицами, библиотека прямой численной оптимизации с универсальным программным интерфейсом, библиотека имитационного моделирования многолучевых и дисперсионных каналов распространения, универсальная графическая библиотека для отображения двумерных графиков;

разработан программный инструмент в составе клиента и сервера с графическим интерфейсом пользователя для отладки и верификации программ моделирования на основе объекта – отладочная точка;

разработан программный инструмент в составе клиента и сервера с графическим интерфейсом пользователя для визуализации тестовых выборок сигнала, полученных из контрольных точек программы моделирования и их предварительного статистического анализа;

разработан программный инструмент в составе клиента и сервера с графическим интерфейсом пользователя для организации распределенных вычислений в локальной компьютерной сети при выполнении имитационного статистического моделирования;

разработан программный инструмент в составе клиента и сервера с графическим интерфейсом пользователя для автоматической оптимизации разрядности представления данных при целочисленных вычислениях в системах цифровой обработки сигнала.

Результаты диссертации использованы при выполнении различных НИИ и ОКР в ОАО "Концерн "Созвездие", ЗАО "Заря В", ЗАО "Заря К", ЗАО "Кодо-

фон", а также в учебном процессе ВГТУ по специальности 230104 – "Системы автоматизированного проектирования", о чем имеются соответствующие акты.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: Всероссийской научно-технической конференции "Направления развития систем и средств радиосвязи" (Воронеж, 1995), Всероссийской научно-технической конференции "Радио и волоконно-оптическая связь, локация и навигация" (Воронеж, 1997), Международных научно-технических конференциях "Радиолокация, навигация, связь" (Воронеж, 1999, 2003, 2006), Международных конференциях "Цифровая обработка сигналов и ее применение" (Москва, 1999, 2000), Международной конференции "Беспроводные системы телекоммуникаций" (Воронеж, 2000), Всероссийской научно-технической конференции "Информационные технологии" (Воронеж, 2005), Международной конференции "European Conference on Wireless Technology" (Париж, 2005), Международной конференции "IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Communications" (Берлин, 2005), Международной конференции "IEEE Vehicular Technology Conference" (Стокгольм, 2005).

Публикации. По результатам диссертации автором опубликовано 60 печатных работ (из них 1 монография, 15 статей в научных журналах из перечня ВАК и 12 свидетельств об официальной регистрации программы, выданных Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам).

В работах [2-5, 10, 17-25, 28-30, 32, 33, 35-38, 43, 45-48] рассматриваются различные аспекты проектирования и имитационного моделирования алгоритмов ЦОС, [9, 11, 14, 26, 31, 39] – анализируются принципы организации и тенденции развития цифровых телекоммуникационных систем, основные функции и цели ЦОС при их реализации, [6-8, 12, 13, 15, 16, 27, 34] – описываются принципы построения компонентов имитационных моделей, методики моделирования и общие принципы построения интегрированной среды моделирования и оптимизации алгоритмов ЦОС, [40-42, 44] – рассматриваются методы моделирования и оптимизации телекоммуникационных систем и методы анализа системных параметров при разработке системы связи с использованием оптимизированных алгоритмов ЦОС, в свидетельствах об официальной регистрации программы [49-60] приведена программная реализация основных программных инструментов и библиотек интегрированной среды имитационного моделирования и оптимизации алгоритмов ЦОС.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 234 наименований и приложений из актов внедрения результатов работы и копий свидетельств об официальной регистрации программы для ЭВМ, полученных автором по результатам диссер-

тационной работы; изложена на 269 страницах, содержит 1 таблицу и 71 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, показаны цель и задачи исследования, научная и практическая значимость, приведено краткое содержание работы по главам.

В первой главе анализируется процесс проектирования СЦОС и формируются требования к созданию эффективного информационного, математического и программного обеспечения САПР СЦОС. В качестве таких требований выдвигается:

- наличие единого формата представления данных на всех этапах проектирования с возможностью простой передачи данных между этапами проектирования для отладки и верификации;

- возможность возврата к предыдущим этапам проектирования для уточнения и коррекции проектирования;

- возможность использования языков C/C++ для разработки программ моделирования или хотя бы отдельных программных модулей с целью последующего использования фрагментов исходного кода программ имитационного моделирования для разработки встроенного программного обеспечения СЦОС;

- высокое быстродействие программ и эффективное использование вычислительных возможностей компьютера;

- наличие достаточного набора библиотечных подпрограмм и программных модулей для реализации алгоритмов ЦОС;

- наличие набора библиотечных подпрограмм и программных модулей для адекватного моделирования влияния ограниченной разрядности представления данных и ограниченной точности вычислений;

- наличие набора библиотечных подпрограмм и программных модулей для организации статистического моделирования, включая имитаторы каналов распространения, генераторы шума, генераторы информационных потоков;

- наличие вспомогательных программных инструментов для захвата, визуализации и анализа выборки сигнала;

- наличие вспомогательных программных инструментов для управления моделированием, задания сценариев моделирования и организации параллельных вычислений с использованием нескольких ЭВМ.

Затем выполняется анализ существующих средств автоматизированного проектирования СЦОС, таких как Matlab, Simulink, Mathcad, ADS, Code Composer Studio, ModelSim, SigLib на предмет их соответствия предъявленным требованиям. По результатам анализа делаются выводы:

- современные системы автоматизированного проектирования вполне успешно решают задачу взаимодействия с реальными сигнальными процессорами и ПЛИС в ходе лабораторного макетирования и отладки СЦОС, а также задачу подготовки и отладки специального программного обеспечения для СЦОС с точным учетом особенностей конкретных процессоров и ПЛИС (системы ADS, Code Composer Studio, ModelSim);

- наиболее широкий круг задач автоматизации проектирования СЦОС – от разработки концепции алгоритмов до учета влияния ограниченной разрядности представления данных – охватывает система Matlab, однако низкая скорость вычислений не позволяет выполнять в ней большие объемы статистического моделирования (а это основной метод анализа и оптимизации алгоритмов ЦОС), кроме того, возникают сложности при переносе программ с языка Matlab на языки программирования цифровых сигнальных процессоров и ПЛИС;

- системы визуального моделирования малоэффективны и недостаточно удобны для описания, оптимизации и статистического моделирования сложных алгоритмов цифровой обработки (системы Simulink, ADS);

- САПР, созданные на основе библиотеки цифровой обработки сигнала, интегрируемой в среду разработки программ на C/C++, представляют наиболее перспективное направление для создания САПР СЦОС (библиотека SigLib), однако библиотека моделирования телекоммуникационных систем, а также возможности визуализации, анализа выборок сигнала и управления моделированием требуют расширения, а концепция построения САПР на базе библиотеки ЦОС – детальной проработки для согласования с реальными потребностями разработчиков СЦОС.

Основной задачей диссертации ставится разработка интегрированной среды моделирования и оптимизации алгоритмов ЦОС на основе объектно-ориентированной библиотеки ЦОС.

Во второй главе диссертации выполняется структуризация информационного, математического и программного обеспечения автоматизированного проектирования СЦОС и определяется обобщенный маршрут проектирования системы ЦОС в соответствии с рис. 1.

Анализируется возможность автоматизации каждого этапа обобщенного маршрута проектирования СЦОС и делается вывод о возможности эффективной автоматизации выделенных на рис. 1 этапов. Основным методом анализа и синтеза алгоритмов ЦОС в настоящее время является имитационное моделирование, и возможность автоматизации выполнения указанных этапов проектирования состоит именно в возможности эффективной автоматизации процессов имитационного моделирования, разработки и отладки программ, достигаемой

за счет использования соответствующего информационного, математического и программного обеспечения.



Рис. 1. Обобщенный маршрут проектирования ЦОС

Ввиду дискретного характера входных воздействий и выходных реакций ЦОС, имитационное моделирование ЦОС должно выполняться на основе дискретной событийно-ориентированной модели. Обобщенная схема имитационного моделирования ЦОС показана на рис. 2.

Реализация выделенных на рис. 2 программных модулей имитационной модели не зависит от математических моделей сигналов, типа моделируемой системы, целей и задач моделирования. Эти модули могут без изменений многократно использоваться в различных проектах. В диссертации такие программные модули названы *инвариантными*.

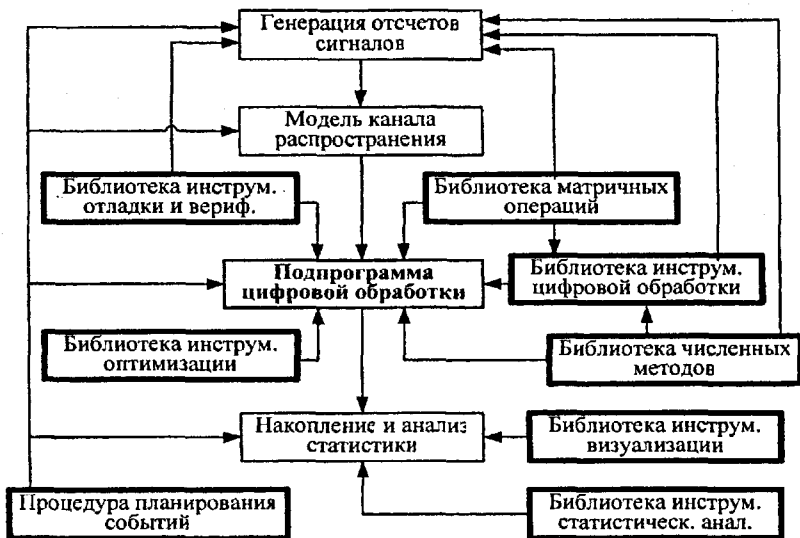


Рис. 2. Обобщенная имитационная модель СЦОС

Другие программные модули имитационной модели СЦОС определяются математическими моделями сигналов (модуль генерации отсчетов сигнала, модель канала распространения, подпрограмма цифровой обработки сигнала, которая реализует моделируемые алгоритмы) и спецификациями моделирования (модуль накопления и анализа статистики). В диссертации они названы *предметно-ориентированными*. Заметим, что при их разработке используются средства инвариантных модулей.

Обычно предметно-ориентированные модули должны заново разрабатываться при построении новой имитационной модели, однако многие из них могут найти повторное использование при разработке программ имитационного моделирования СЦОС, например модули, реализующие основные элементы обработки сигнала в соответствии с массовыми телекоммуникационными стандартами (GSM, IMT-MC, IEEE 802.11, IEEE 802.16), компоненты моделей каналов распространения, подпрограммы накопления и анализа статистики. При этом в составе библиотечного обеспечения САПР СЦОС необходимо предусмотреть несколько альтернативных наборов предметно-ориентированных средств, предназначенных для широко распространенных элементов СЦОС, условий и задач моделирования.

Основой автоматизации проектирования программ является соответствующее библиотечное обеспечение. Предлагаемая в диссертации структура библиотечного обеспечения САПР СЦОС показана на рис. 3.

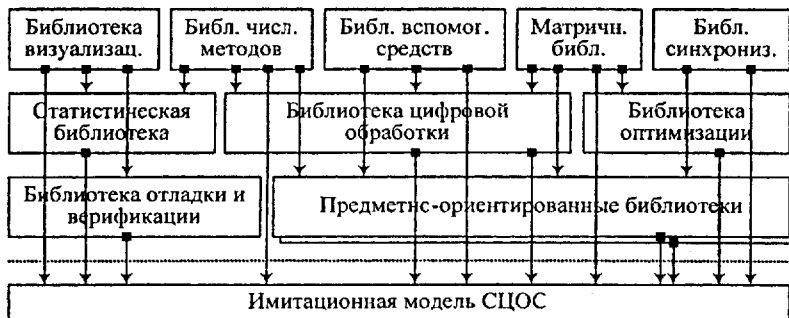


Рис. 3. Иерархия библиотечной структуры САПР СЦОС

В библиотечной структуре представлено три уровня иерархии, причем для разработки библиотек нижележащего иерархического уровня используются библиотеки вышележащих уровней. Библиотеки всех уровней иерархии предоставляют классы и функции для использования в программном обеспечении имитационных моделей.

Основу библиотечного обеспечения САПР СЦОС составляет библиотека цифровой обработки сигнала, включающая такие модули, как БПФ, БПУ, цифровой фильтр, модуляторы и демодуляторы цифровой модуляции (QAM, GMSK, PSK), кодеры и декодеры распространенных помехоустойчивых кодов (Рида-Соломона, сверточный код, турбо-код), модели типичных каналов распространения радиосигнала.

Библиотека визуализации обеспечивает графическое отображение тестовых выборок сигнала на основе простого программного интерфейса вызываемых функций типа $plot(x, y)$, где пара (x, y) задает координату точки графика, $x = \{x_1, x_2 \dots x_N\}$, $y = \{y_1, y_2 \dots y_N\}$, N - число точек графика.

Библиотека численных методов предоставляет процедуры численного интегрирования, интерполяции, сглаживания.

Библиотека вспомогательных средств моделирования обеспечивает поддержку сценариев моделирования, установки начальных условий, сохранения результатов моделирования и автоматическую генерацию отчетов.

Матричная библиотека обеспечивает поддержку в программах моделирования операций с матрицами на основе объекта-матрицы, реализующего представление данных в виде двумерного индексированного массива, операторную запись арифметических операций с матрицами и методы для специальных мат

ричных операций, таких, как обращение матриц, разложение матриц, вычисление собственных значений и собственных векторов, чтобы максимально приблизить синтаксис написания программ к общепринятой математической нотации.

Библиотека синхронизации обеспечивает планирование событий и динамическую синхронизацию дискретной событийно-ориентированной имитационной модели.

Статистическая библиотека предоставляет инструменты для статистического анализа результатов моделирования и для статистической обработки сигнала в рамках алгоритмов ЦОС. В состав библиотеки включены инструменты для линейной регрессии и прогнозирования, для оценивания параметров распределений, для проверки гипотез о распределении мгновенных значений сигналов на основе критериев согласия, для оценивания погрешностей и доверительных интервалов моделирования. Статистическая библиотека также используется для автоматизации статистических экспериментов, прежде всего, для автоматического прекращения эксперимента при достижении достаточного объема статистики.

Критерием прекращения эксперимента служит выполнение любого из трех условий (1)

$$\left\{ \begin{array}{l} (n+1) \cdot \int_{\hat{p}-10^{-l} \cdot (n/p)^{-l}}^{\hat{p}+10^{-l} \cdot (n/p)^{-l}} P(\hat{p} \cdot n, n, \hat{p}) dp \geq p_d \\ (n+1) \cdot \int_0^{p_{max}} P(\hat{p} \cdot n, n, \hat{p}) dp \geq p_d, \\ (n+1) \cdot \int_{p_{min}}^1 P(\hat{p} \cdot n, n, \hat{p}) dp \geq p_d \end{array} \right. \quad (1)$$

где n - число выполненных испытаний; \hat{p} - текущая оценка вероятности события; l - желаемое количество значащих цифр в оценке \hat{p} ; p_d - доверительная вероятность; $[p_{min}, p_{max}]$ - интересующий исследователя диапазон вероятностей события (полагается, что если оцененная вероятность события лежит за указанным диапазоном, то количественная оценка вероятности события не требуется);

$P(n, n, p) = \frac{n!}{m! \cdot (n-m)!} \cdot p^m \cdot (1-p)^{n-m}$ - биномиальное распределение.

Библиотека оптимизации предоставляет универсальные подпрограммы многомерной численной оптимизации.

Библиотека отладки и верификации предоставляет удобные механизмы для получения тестовых выборок сигналов из программ моделирования без

вмешательства в исходный код программ, визуализации и предварительного анализа полученных выборок.

Важнейшей характеристикой имитационной модели СЦОС является ее быстродействие. Для повышения вычислительной производительности и быстродействия программ моделирования в диссертации предлагается способ включения в имитационную модель СЦОС внешних аппаратных вычислителей на сигнальных процессорах или ПЛИС. Такие вычислители могут выполнять наиболее затратные в вычислительном плане задачи декодирования, многомерной демодуляции, численной оптимизации.

Объекты библиотечного обеспечения могут взаимодействовать с внешними вычислительными модулями, подключенными к компьютеру, в соответствии со схемой, показанной на рис. 4.

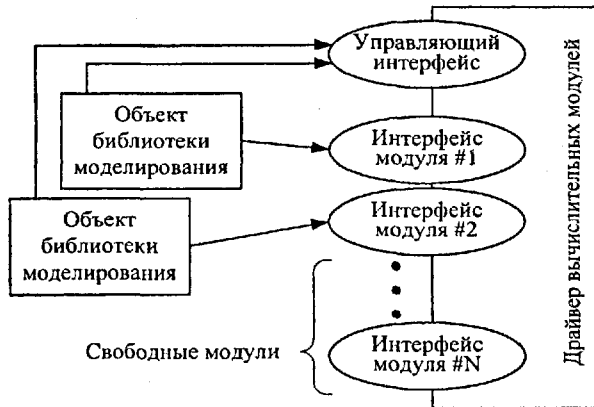


Рис. 4. Взаимодействие с внешними вычислительными модулями

Производительность специализированного вычислительного модуля для указанных операций декодирования, демодуляции и оптимизации может более чем на порядок превосходить производительность персонального компьютера, используемого для моделирования в большинстве случаев. При этом программа может автоматически загружаться объектом библиотеки во внешний вычислительный модуль при его подключении.

Помимо решения задач анализа и оценивания характеристик СЦОС, имитационное статистическое моделирование может использоваться как инструмент синтеза алгоритмов ЦОС.

Введем действительный оператор $E[y_1, y_2, \dots, y_n]$, характеризующий обобщенную меру качества алгоритма ЦОС по совокупности характеристик выхо

ных реакций СЦОС $[y_1, y_2, \dots, y_n]$, и определим задачу синтеза алгоритма ЦОС как оптимизационную задачу

$$\max_{F, p} (E[F[x_1, x_2, \dots, x_m | p]]), \quad (2)$$

где $[x_1, x_2, \dots, x_m]$ совокупность входных воздействий; p - вектор параметров алгоритма; оператор $F[\bullet]$ определяет структуру алгоритма. Задача синтеза состоит в определении структуры и параметров алгоритма цифровой обработки, максимизирующих меру качества алгоритма.

Если в ходе синтеза требуется определить наилучший, в некотором смысле, вид оператора $F[\bullet]$, то поставленную задачу будем называть задачей структурного синтеза. Если же оператор $F[\bullet]$ априорно известен, и требуется найти только оптимальное значение вектора параметров p , то поставленную задачу будем называть задачей параметрического синтеза.

Ввиду математических сложностей, аналитическое решение задачи синтеза редко удается получить. Аналитическое решение известно для ряда простых случаев различения известных сигналов и оценки параметров сигналов (частота, фаза, амплитуда, задержка) на фоне аддитивных гауссовских помех, в большинстве же случаев при решении задачи синтеза полагаются на упрощенные или эмпирические подходы, основываясь на известных результатах и прошлом опыте решения подобных задач.

Применение методов имитационного моделирования при решении задачи синтеза алгоритмов ЦОС позволяет существенно повысить эффективность решения задачи синтеза, сократить время разработки и улучшить характеристики полученных алгоритмов.

При этом задача параметрического синтеза сводится к задаче поиска экстремума многомерной функции и может быть решена известными методами прямой оптимизации, например методом поиска по деформируемому многограннику. В случае неунимодального характера $E[F[x_1, x_2, \dots, x_m | p]]$, могут быть использованы методы случайного поиска.

Решение задачи структурного синтеза предполагает выбор, в некотором смысле, наилучшего оператора $F_i[\bullet]$ из двух или более альтернативных вариантов операторов $F_i[\bullet], i=1, 2, \dots, K$, при этом оптимальные параметры алгоритма для рассматриваемых альтернативных вариантов $F_i[\bullet]$ могут быть неизвестны, и для решения задачи структурного синтеза необходимо сначала решить задачу параметрического синтеза для всех альтернативных вариантов $F_i[\bullet]$, а затем сравнить между собой характеристики СЦОС, получаемые при различной структуре алгоритма ЦОС.

Для адекватного сравнения альтернативных алгоритмов и для сокращения требуемого объема статистических испытаний при планировании статистического эксперимента необходимо обеспечить одинаковые условия моделирования для альтернативных решений. Например, моделирование можно выполнять одновременно для всех альтернативных алгоритмов, как показано на рис. 5.

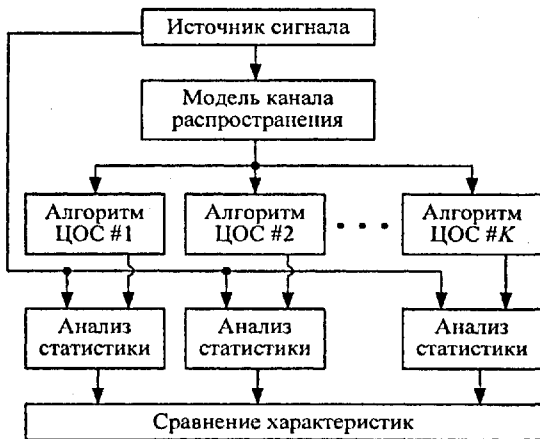


Рис. 5. Моделирование альтернативных алгоритмов

Поскольку все альтернативные алгоритмы ЦОС предназначены для решения одной и той же задачи, они полностью совместимы по форматам входных воздействий и выходных реакций, следовательно, они могут моделироваться с использованием одной и той же выборки входных воздействий и результаты работы алгоритмов могут анализироваться и сравниваться по одинаковой статистике.

Для упрощения программ моделирования можно выполнить последовательное моделирование альтернативных алгоритмов, обеспечив воспроизведение одного и того же сценария моделирования при прогоне альтернативных конфигураций модели, который может быть легко задан с помощью библиотеки вспомогательных средств САПР СЦОС.

Третья глава диссертации посвящена вопросам формирования интегрированной среды имитационного моделирования и оптимизации алгоритмов ЦОС в системе автоматизированного проектирования.

Библиотечное и математическое обеспечение, рассмотренное во второй главе, является необходимым, но недостаточным компонентом системы автоматизированного проектирования: для эффективного решения задач проектирования алгоритмического обеспечения систем цифровой обработки сигнала

необходимо предоставить разработчику единую интегрированную среду автоматизированного проектирования, объединяющую средства разработки и отладки программного обеспечения, средства верификации алгоритмов, средства визуализации результатов моделирования, библиотеки имитационного моделирования, средства планирования загрузки компьютеров и оптимизации вычислений.

В диссертации предлагается архитектура интегрированной среды моделирования и оптимизации алгоритмов ЦОС, показанная на рис. 6.

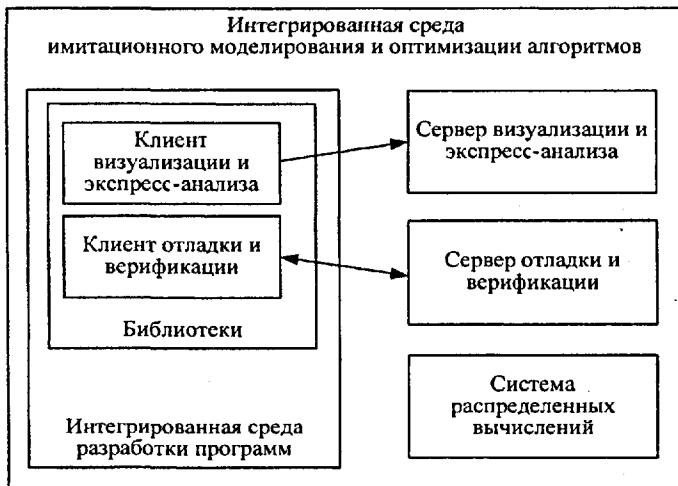


Рис. 6. Архитектура интегрированной среды имитационного моделирования и оптимизации алгоритмов ЦОС

Предлагается формировать интегрированную среду имитационного моделирования и оптимизации на базе одного из существующих инструментов разработки с поддержкой языка C++, дополнив его соответствующим библиотечным обеспечением, а также программными инструментами визуализации и статистического экспресс-анализа выборок сигнала, отладки и верификации программного обеспечения и поддержки распределенных вычислений в программах моделирования. Целесообразность такого подхода обосновывается высоким уровнем развития существующих средств разработки программного обеспечения, достигнутым в ходе многолетнего тесного сотрудничества ведущих разработчиков операционных систем, компиляторов и процессоров.

Архитектура программного обеспечения визуализации и анализа результатов имитационного моделирования показана на рис. 7.

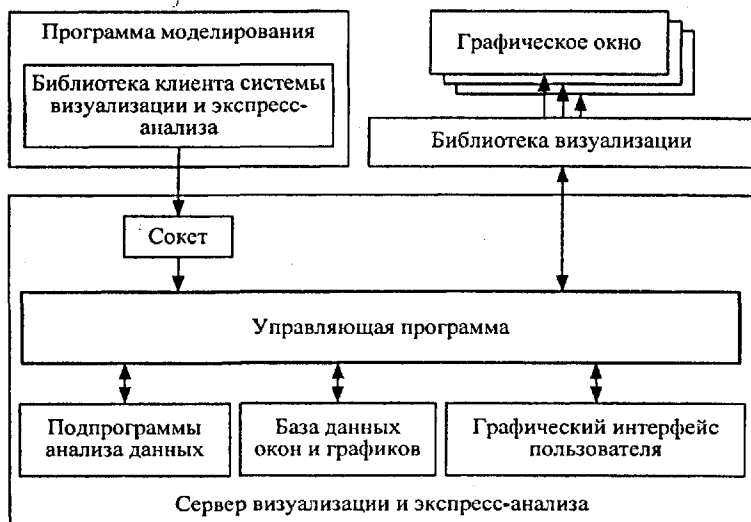


Рис. 7. Архитектура программного обеспечения визуализации и экспресс анализа результатов имитационного моделирования

Программное обеспечение визуализации и экспресс-анализа данных состоит из сервера и клиента, взаимодействующих посредством сокета.

Сервер создает графические окна на экране компьютера и управляет отображением в них графиков по запросам клиентских программ. Помимо отображения графиков, сервер может выполнять сглаживание графиков кубическими сплайнами и статистический анализ данных, включая полиномиальную линейную регрессию, а также оценивание плотности вероятности и функции распределения с использованием ядерных оценок.

Ядерная оценка плотности распределения вероятности $W(x)$ формируется по наблюдаемой выборке $\{x_i\}, i = \overline{1, N}$ по формуле

$$W(x) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N K(x - x_i | h), \quad (3)$$

где функция $K(\cdot|h)$ определяет ядро оценки; $h = \frac{\max(x_i) - \min(x_i)}{\sqrt{N}}$ - параметр сглаживания.

Разработанное программное обеспечение поддерживает прямоугольное ядро $K_R(x|h) = \begin{cases} \frac{1}{2 \cdot h}, |x| \leq h \\ 0, |x| > h \end{cases}$, треугольное ядро $K_T(x|h) = \begin{cases} \frac{h-|x|}{h^2}, |x| \leq h \\ 0, |x| > h \end{cases}$ и гауссовское ядро $K_G(x|h) = \frac{1}{h \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2h^2}}$.

Ядерная оценка функции распределения формируется путем интегрирования ядерной оценки плотности вероятности.

Архитектура программного обеспечения отладки и верификации программ моделирования показана на рис. 8.



Рис. 8. Архитектура программного обеспечения отладки и верификации алгоритмов ЦОС и программ моделирования

Программное обеспечение отладки и верификации состоит из сервера и клиента, взаимодействующих посредством сокета.

Сервер отладки и верификации получает тестовые выборки сигнала из программ моделирования через отладочные точки – специальные программные объекты, размещенные в коде программы моделирования при ее разработке.

Интерфейс отладочной точки позволяет применять ее в программе моделирования вместо обычной переменной, для этого в классе отладочная точка специальным образом определяется оператор присваивания.

Если отладочная точка подключена к серверу отладки и верификации и при выполнении программы ей присваивается новое значение, то оператор присваивания автоматически передает это значение серверу. Кроме того, по команде сервера оператор присваивания отладочной точки может заменять присваиваемые ей значения на значения, прочитанные из файла, обеспечивая этим возможность верификации работы имитационной модели по априорно заданным входным воздействиям.

Сервер системы отладки и верификации предоставляет пользователю интерфейс для управления подключениями к отладочным точкам и режимами их работы и транслирует полученные от отладочных точек выборки системе визуализации и экспресс-анализа данных.

Система организации распределенных вычислений и планирования загрузки компьютеров позволяет автоматизировать запуск программ моделирования на компьютерах в пределах ЛВС в соответствии с планом моделирования. Для запуска автоматически выбирается наименее загруженный компьютер, при этом контроль и управление ходом моделирования на всех компьютерах возможен с одного рабочего места.

Архитектура системы распределенных вычислений показана на рис. 9. Разработанное программное обеспечение включает клиентскую и серверную части, которые могут выполняться как на локальном компьютере, так и на удаленных компьютерах, подключенных к общей ЛВС. Наиболее целесообразным обычно является запуск сервера распределенных вычислений на всех компьютерах, доступных в ЛВС, а клиента – только на том, с которого будет осуществляться управление моделированием.

В четвертой главе диссертации рассмотрены вопросы разработки программного обеспечения для интегрированной среды имитационного моделирования и оптимизации алгоритмов ЦОС.

Для решения задач планирования событий и временной синхронизации в имитационной модели СЦОС предлагается использовать специальный программный объект – часы моделирования, представленные классом *simulation_clock*. Основой реализации данного класса является целочисленный счетчик дискретного модельного времени *m_main_clock*, являющийся защищенной переменной класса. Класс предоставляет функцию *is_time_coincide*, встраиваемую в главный цикл программы моделирования, которая проверяет соответствие текущего модельного времени запланированному времени события и возвращает *true*, если событие должно быть обработано на текущем процессе цикла программы имитационного моделирования.

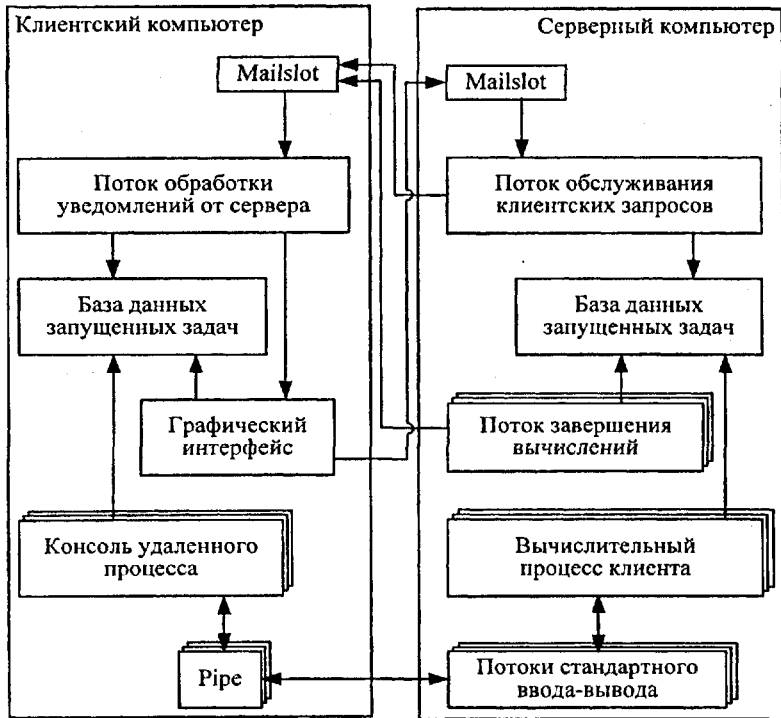


Рис. 9. Архитектура системы распределенных вычислений

В области ЦОС часто возникают задачи многомерной численной оптимизации. Они имеют место как на этапе проектирования, так и по ходу работы алгоритмов ЦОС при реализации адаптивных систем. Поэтому универсальная подпрограмма оптимизации является необходимой составляющей библиотечного обеспечения САПР ЦОС.

Наиболее универсальными в применении являются алгоритмы прямой оптимизации, не требующие аналитической записи оптимизируемой функции или ее производных. Но наличие универсального алгоритма численной оптимизации является необходимым, но не достаточным условием для разработки универсального программного инструмента многомерной численной оптимизации – необходимо еще реализовать универсальный программный интерфейс оптимизационной процедуры, позволяющий удобно использовать ее в программах имитационного моделирования.

В диссертации разработан интерфейс подпрограммы многомерной численной оптимизации на основе класса *optimizer*. Конструктор класса позволяет установить размерность задачи, начальный шаг и режимы адаптации, оператор *operator()* выполняет адаптацию по заданной функции и возвращает координаты точки минимума, для реализации метода случайного поиска может устанавливаться начальная точка адаптации и возвращаться значение целевой функции в точке минимума.

В качестве целевой функции может быть указана произвольная функция языка C++, имеющая интерфейс вызова следующего вида:

```
template <class T>
double func(std::vector<T>& x)
```

Важнейшей задачей проектирования алгоритмов ЦОС является определение требуемой разрядности представления данных при целочисленных вычислениях. Так как разрядность данных растет в ходе обработки, в системе ЦОС должны быть предусмотрены узлы сокращения разрядности. Для автоматизации определения разрядности данных в составе интегрированной среды моделирования и оптимизации предусмотрен программный инструмент, основанный на многопроходной численной минимизации функции потерь

$$\eta(k, n) = \sum_{j=1}^L \alpha_j \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N_j} |x_i^{(j)} - \bar{x}_i^{(j)}|^2}{\sum_{i=1}^{N_j} |x_i^{(j)}|^2} \quad (4)$$

Здесь L - число узлов сокращения разрядности в СЦОС; $k = \{k_i\}, i = \overline{1, L}$ - вектор величин арифметического сдвига в каждом из узлов сокращения разрядности; $n = \{n_i\}, i = \overline{1, L}$ - выходная разрядность представления данных в каждом из узлов сокращения разрядности; α_j - относительная "важность" сигнала на выходе j -го узла сокращения разрядности; N_j - размер анализируемой выборки на выходе j -го узла сокращения разрядности; $x_i^{(j)}$ - отсчеты сигнала на выходе j -го узла сокращения разрядности при моделировании с использованием плавающей точки; $\bar{x}_i^{(j)}$ - отсчеты сигнала на выходе j -го узла сокращения разрядности при целочисленном моделировании.

При этом для повышения вычислительной эффективности предложено последовательно минимизировать каждую величину $\eta_i(k_i, n_i) = \frac{\sum_{i=1}^{N_j} |x_i^{(j)} - \bar{x}_i^{(j)}|^2}{\sum_{i=1}^{N_j} |x_i^{(j)}|^2}$ независимо и завершать процедуру оптимизации, если после очередного прохода п

всем узлам сокращения разрядности выполняется условие $\begin{cases} \eta(k, n) < \varepsilon \\ \forall i: \eta_i(k, n_i) < \varepsilon_i \end{cases}$, где $\varepsilon, \varepsilon_i$ - наперед заданные величины.

Для достижения адекватности моделирования крайне важно моделирование канала распространения радиосигнала. В диссертации математическая модель канала распространения сигнала определяется выражением

$$H[\bar{s}(t)|N, c, \tau, f_n, f_x, R_n(\tau), \sigma^2] = \sum_{i=1}^N c_i \cdot \eta_i \cdot \bar{g}_i \cdot \bar{s}(t - \tau_i) + \bar{n}(t), \quad (5)$$

где N - число лучей сигнала; $c = \{c_i\}$ - вектор относительных амплитуд лучей сигнала; $\tau = \{\tau_i\}$ - вектор задержек лучей сигнала; f_n - частота логнормальных замираний; f_x - частота релеевских замираний; $R_n(\tau)$ - автокорреляционная функция аддитивного гауссовского шума (при моделировании удобнее задавать энергетический спектр $H(\omega) = F^{-1}[R_n(\tau)]$); σ^2 - дисперсия аддитивного гауссовского шума.

В соответствии с математической моделью (5) программа имитационного моделирования многолучевого канала распространения может быть построена на основе линии задержки с отводами, по схеме, показанной на рис. 10.

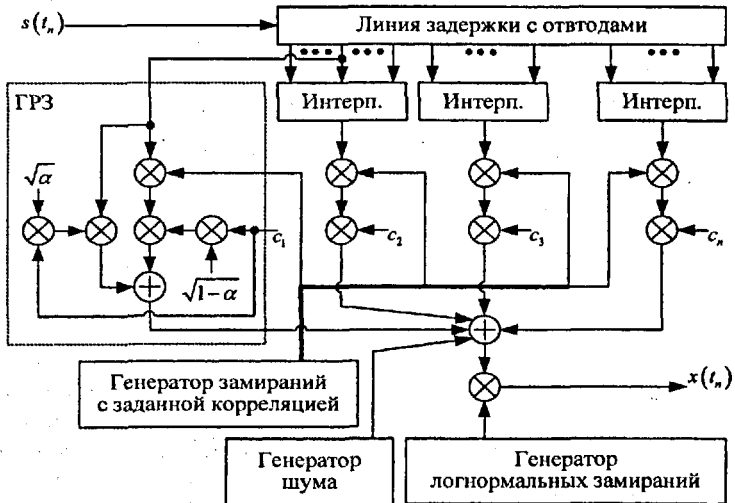


Рис. 10. Имитационная модель многолучевого канала распространения сигнала
Интерполяторы используются для получения задержек, не кратных частоте дискретизации сигнала. Задержка сигнала i -го луча определяется номером

отвода линии задержки $p_i = \left\lfloor \frac{\tau_i}{\delta} \right\rfloor$ (τ_i - задержка луча; δ - интервал дискретизации), начиная с которого располагается интерполятор, и коэффициентами интерполятора $b_{i,j}$, вычисляемыми по формуле

$$b_{i,j} = \prod_{k=1}^m \frac{\tau_i - \left\lfloor \frac{\tau_i}{\delta} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor - k}{j - k}. \quad (6)$$

Отсчеты замираний сигнала с заданной матрицей взаимной корреляции

$\mathbf{K} = \begin{Bmatrix} K_{1,1} & \dots & K_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{m,1} & \dots & K_{m,m} \end{Bmatrix}$ формируются из вектора независимых отсчетов замираний

$\mathbf{r}_n = \{r_{1,n}, r_{2,n}, \dots, r_{m,n}\}$ по формуле $\bar{\mathbf{r}}_n = \mathbf{C}[\mathbf{K}] \cdot \mathbf{r}_n$, где $\mathbf{C}[\mathbf{K}]$ - разложение Холецкого.

Независимые отсчеты замираний формируются в соответствии с математической моделью $r_{k,n} = r_k(t_n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^N w_{k,i} \left[e^{j \frac{2\pi}{N} i} \cdot \sin(\omega_i \cdot t_n) \right]$, где t_n - дискретное время; $w_{k,i} = \pm 1$ - i -ый элемент k -ой функции Уолша.

При проектировании СЦОС часто требуется получить оценки системных параметров, для получения которых необходима одновременная обработка большого числа сигналов или длительное накопление результатов обработки физического сигнала. Например, оценка пропускной способности системы связи, оценка средней задержки пакета данных или среднего числа ретрансляций пакетов в децентрализованной пакетной системе связи, моделирование алгоритмов управления передачей.

Решение таких задач прямым имитационным моделированием физической обработки сигнала неэффективно, так как требует неоправданно большого объема вычислений. В диссертации предлагается подход, основанный на замене имитационного моделирования низкоуровневых алгоритмов аналитическими статистическими моделями в виде стохастических функций, генерирующих случайные входные воздействия для алгоритмов верхнего уровня с использованием априорного знания статистических характеристик алгоритмов обработки сигнала и условий их работы. При этом методы имитационного статистического моделирования должны применяться для моделирования системных алгоритмов верхнего уровня, управляющих поведением системы в зависимости от результатов работы низкоуровневых алгоритмов обработки физических сигналов. Схема моделирования телекоммуникационной системы, реализующая данный подход, приведена на рис. 11.

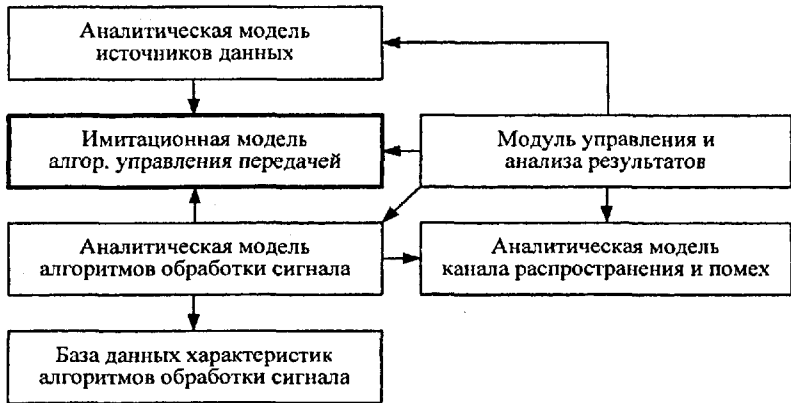


Рис. 11. Схема имитационного моделирования алгоритмов управления передачей телекоммуникационной системы

База данных характеристик алгоритмов обработки сигнала используется для определения вероятности ошибки приема информационного пакета в зависимости от условий радиосвязи. Так как таблицы базы данных не могут содержать значение вероятности ошибки для всех возможных условий радиосвязи (в силу непрерывного характера величин, определяющих условия связи), по формуле (7) выполняется интерполяция

$$p = \sum_{k=1}^N a_k \cdot \sum_{i=1}^N c_i \cdot p_{h_{\text{base}} - \lfloor \frac{N-1}{2} \rfloor + i, h_{\text{base}} - \lfloor \frac{N-1}{2} \rfloor + k} \quad (7)$$

Здесь N - порядок интерполятора; $p_{i,k}$ - табличные значения вероятностей ошибок; i_{base} - номер строки таблицы базы данных, содержащей значения вероятностей ошибок, полученные при отношении сигнал-помеха, наиболее близком к запрошенному; k_{base} - номер столбца таблицы базы данных, содержащей значения вероятностей ошибок, полученные при частоте замираний, наиболее близкой к запрошенной;

$c_i = \prod_{j=1}^N \frac{h^2 - h^2_{h_{\text{base}} - \lfloor \frac{N-1}{2} \rfloor + j}}{h^2_{h_{\text{base}} - \lfloor \frac{N-1}{2} \rfloor + i} - h^2_{h_{\text{base}} - \lfloor \frac{N-1}{2} \rfloor + j}}$; h^2 - требуемое отношение сигнал-помеха, указанное в запросе; h^2_i - значение отношения сигнал-помеха, соответствующее

i -ой строке таблицы базы данных; $a_k = \prod_{j=1}^N \frac{f - f_{k_{\text{base}} - \lfloor \frac{N-1}{2} \rfloor + j}}{f_{k_{\text{base}} - \lfloor \frac{N-1}{2} \rfloor + k} - f_{k_{\text{base}} - \lfloor \frac{N-1}{2} \rfloor + j}}$; f - требуемая

частота замираний, указанная в запросе; f_i - значение частоты замираний, соответствующее i -му столбцу таблицы базы данных.

В пятой главе диссертации анализируется эффективность применения средств автоматизации проектирования, предложенных в диссертации, при промышленных разработках СЦОС.

На основании экспертных оценок определяется относительная трудоемкость этапов проектирования СЦОС и оценивается сокращение трудоемкости отдельных этапов проектирования СЦОС за счет использования библиотечного обеспечения, программных инструментов и методик, предложенных в диссертации. Достигнутый выигрыш показан на диаграмме 12.

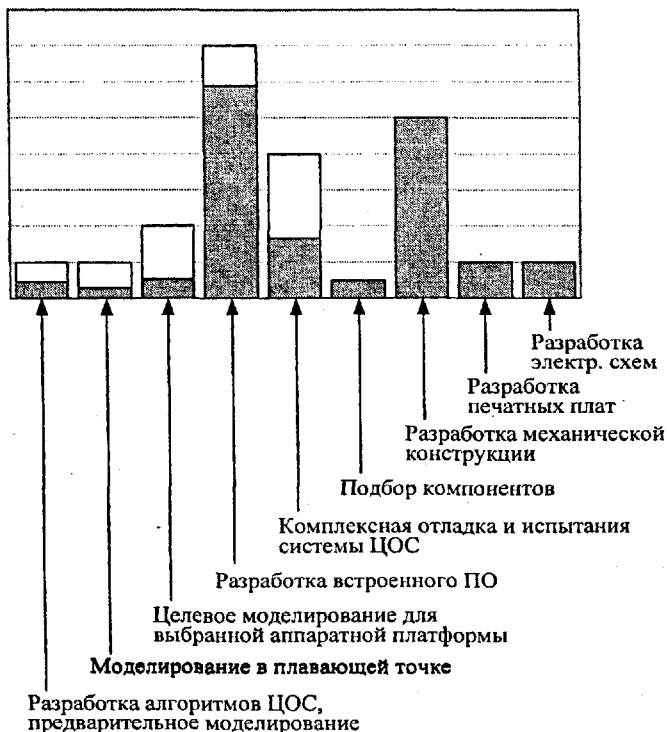


Рис. 12. Сокращение трудоемкости проектирования СЦОС за счет использования библиотечного обеспечения, программных инструментов и методик, предложенных в диссертации

Таким образом, применение средств автоматизации проектирования, предлагаемых в диссертации, позволяет сократить трудоемкость следующих частных этапов проектирования СЦОС:

- разработка алгоритмов цифровой обработки и предварительное моделирование – до 2,5 раз;
- имитационное статистическое моделирование СЦОС с использованием вычислений с плавающей точкой – до 4-х раз;
- целевое имитационное статистическое моделирование СЦОС с использованием целочисленных вычислений и с учетом особенностей выбранной для реализации СЦОС аппаратной платформы – до 4-х раз;
- разработка встроенного программного обеспечения системы цифровой обработки сигнала – до 1,3 раз;
- комплексная отладка и испытания СЦОС – до 3-х раз.

В целом, с учетом относительных трудоемкостей и длительностей этапов проектирования применение средств автоматизации проектирования, предлагаемых в диссертации, позволяет сократить общую трудоемкость и сроки проекта по разработке СЦОС до 30 процентов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Показано, что в силу слабой зависимости маршрута проектирования алгоритмов ЦОС от назначения и особенностей реализации этих алгоритмов можно получить универсальное решение для автоматизации процесса проектирования алгоритмического обеспечения ЦОС.

2. Разработан набор объектно-ориентированных библиотек для поддержки моделирования ЦОС, включая библиотеку визуализации для отображения на экране компьютера тестовых выборок сигнала или результатов их обработки (виртуальный осциллограф, виртуальный спектроанализатор), библиотеку вспомогательных средств моделирования (поддержка сценариев моделирования и автоматическая генерация отчетов для автоматизации процесса моделирования), библиотеку численных методов (численное интегрирование, интерполяция, решение уравнений), библиотеку синхронизации для динамической синхронизации модели и планирования событий, матричную библиотеку, статистическую библиотеку (регрессия, оценивание параметров выборок, проверка статистических гипотез, генерация псевдослучайных последовательностей с заданными статистическими характеристиками), библиотеку ЦОС (цифровая фильтрация, модуляция-демодуляция, кодирование-декодирование, БПФ и др.), библиотеку инструментов многомерной численной оптимизации, библиотеку отладки и верификации алгоритмов ЦОС, предметно ориентированные библиотеки для распространенных телекоммуникационных стандартов.

3. Предложена концепция построения и реализована интегрированная среда моделирования и оптимизации алгоритмов ЦОС.

4. Разработан и реализован в составе интегрированной среды моделирования и оптимизации отладочный интерфейс, позволяющий в процессе моделирования получать для анализа выборки сигнала из имитационной модели или передавать в моделируемый алгоритм внешние данные без вмешательства в программный код, реализующий данный алгоритм.

5. Разработан и реализован в составе интегрированной среды моделирования и оптимизации модуль визуализации и статистического анализа тестовых выборок сигнала, использующий отладочный интерфейс для получения тестовых выборок.

6. Разработана и реализована в составе интегрированной среды моделирования и оптимизации система распределенных вычислений, обеспечивающая возможность использования в ходе моделирования вычислительных ресурсов всех ПК в рамках локальной сети с автоматической балансировкой их загрузки.

7. Предложено и реализовано в составе интегрированной среды моделирования и оптимизации подключение к ПК для ускорения вычислений внешних вычислительных модулей на быстродействующих сигнальных процессорах или ПЛИС, использование которых позволяет существенно повысить производительность имитационных моделей.

8. Разработано и реализовано в составе интегрированной среды моделирования и оптимизации программное обеспечение для автоматической оптимизации разрядности представления данных в системе ЦОС по компромиссному критерию сложность – качество обработки.

9. Предложен метод имитационного моделирования телекоммуникационных систем, обеспечивающий получение оценок системных параметров (пропускная способность сети, средняя задержка пакета, вероятность обслуживания и др.) с минимальными вычислительными затратами.

10. Для поддержки синхронизации и планирования событий в программах динамического, дискретно-событийного, имитационного моделирования разработан универсальный программный объект – часы моделирования, инкапсулирующий всю функциональность по планированию событий, включая динамическое изменение расписания событий во время моделирования. Наличие такого объекта позволяет существенно упростить разработку программ моделирования и избежать ошибок, связанных с нарушением синхронизации имитационной модели, пропуском событий или ошибочным генерированием лишних событий.

11. Предложена методика имитационного моделирования дисперсионных и нестационарных каналов распространения сигнала.

12. Показано, что применение средств автоматизации проектирования, предлагаемых в диссертации, позволяет сократить общую трудоемкость проекта по разработке системы цифровой обработки сигнала и сократить сроки проектирования до 30 процентов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Книги

1. Савинков А.Ю. Моделирование и оптимизация в САПР систем цифровой обработки сигналов: Монография. Воронеж: Издательство Воронежского государственного университета, 2006. 212 с.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

2. Алгоритмы квазикогерентного приема фазоманипулированных сигналов в канале с быстрым федингом / А.В. Гармонов, Ю.Е. Карпитский, В.Б. Манелис, А.Ю. Савинков // Цифровая Обработка Сигналов. М. 2001. № 3. С. 2-8.

3. Определение координат мобильного абонента в городских условиях / А.Ю. Савинков, С.В. Фурсов, К.А. Зимовец, Ю.Н. Прибытков // Мобильные системы. М. 2003. № 10. С. 36-40.

4. Родионов В.С., Савинков А.Ю., Кравченко Ю.В. Практические аспекты реализации биометрической защиты, основанной на клавиатурном почерке // Информация и безопасность: Регион. науч.-техн. журнал. Воронеж. 2003. № 2. С. 170-171.

5. Родионов В.С., Савинков А.Ю. Повышение помехоустойчивости системы сотовой связи с кодовым разделением каналов // Информация и безопасность: Регион. науч.-техн. журнал. Воронеж. 2004. № 1. С. 86-87.

6. Савинков А.Ю. Синхронизация и верификация в имитационном моделировании // Информационные технологии. М. 2004. № 3. С. 20-24.

7. Савинков А.Ю. Визуализация и экспресс-анализ результатов в имитационном моделировании // Системы управления и информационные технологии. М. 2004. № 5. С. 88-90.

8. Савинков А.Ю. Реализация имитационной модели дисперсионного канала распространения сигнала // Системы управления и информационные технологии. М. 2004. № 2. С. 102-104.

9. Технология OFDM и варианты множественного доступа на ее основе / А.В. Гармонов, А.Ю. Савинков, С.А. Филин, С.Н. Моисеев, М.С. Кондаков // Мобильные системы. М. 2005. № 10. С. 12-18.

10. Ашихмин А.В., Савинков А.Ю. Алгоритмы синтеза, анализа и функционирования вибраторных антенных решеток, предназначенных для аппаратуры радиопеленгации // Системы управления и информационные технологии. М. 2005. № 5. С. 85-90.

11. Технический обзор стандарта IEEE 802.16 / А.В. Гармонов, А.Ю. Савинков, С.А. Филин, С.Н. Моисеев, М.С Кондаков // Мобильные системы. М. 2005. № 11. С. 16-24.

12. Савинков А.Ю., Фефилов И.И. Использование аппаратных ускорителей на сигнальном процессоре в имитационном моделировании // Системы управления и информационные технологии. М. 2006. № 1. С. 74-76.

13. Савинков А.Ю. Моделирование на ЭВМ нестационарного канала распространения сигнала // Системы управления и информационные технологии. М. 2006. № 1. С. 76-84.

14. Пропускная способность сотовой беспроводной сети передачи данных WiMAX / А.В. Гармонов, А.Ю. Савинков, С.А. Филин, С.Н. Моисеев, М.С. Кондаков // Мобильные системы. М. 2005. С. 18-21.

15. Савинков А.Ю. Численная оптимизация параметров на C++ // Системный анализ и управление в биомедицинских системах: Журнал практ. и теоретической биологии и медицины. М. 2006. № 1. С. 154-158.

16. Савинков А.Ю. Реализация распределенных вычислений для имитационного моделирования // Системный анализ и управление в биомедицинских системах: Журнал практ. и теоретической биологии и медицины. М. 2006. № 1. С. 159-163.

Статьи и материалы конференций

17. Гармонов А.В., Савинков А.Ю., Филатов А.Г. Применение пространственной селекции с целью повышения емкости систем связи с кодовым разделением каналов // Направления развития систем и средств радиосвязи: Тез. докл. ВНТК. Воронеж, 1995. С. 37.

18. Щукин Н.И., Савинков А.Ю. Оптимизация временного дискриминатора широкополосного сигнала при частотной режекции спектра // Теория и техника радиосвязи: Науч.-техн. сб. Воронеж: ВНИИС, 1995. Вып. 1. С. 111-116.

19. Щукин Н.И., Савинков А.Ю. Оптимизация выделения несущей в широкополосных системах с частотной режекцией спектра сигнала // Теория и техника радиосвязи: Науч.-техн. сб. Воронеж: ВНИИС, 1995. Вып. 2. С. 111-116

20. Щукин Н.И., Савинков А.Ю., Усачев В.М. Оценивание фазы несущей режектированных широкополосных сигналов // Радио и волоконно-оптическая связь, локация и навигация: ВНТК. Воронеж, 1997. Т. 1 С. 533-539.

21. Спектральная обработка режективированного многолучевого широкополосного сигнала / А.В. Гармонов, А.Ю. Савинков, В.М. Усачев, Н.И. Щукин // Радио и волоконно-оптическая связь, локация и навигация: ВНТК. Воронеж, 1997. Т. 1. С. 540-547.

22. Савинков А.Ю. Алгоритм квазиоптимального приема ШПС сигнала в условиях пространственно-сосредоточенных помех // Теория и техника радиосвязи: Науч.-техн. сб. Воронеж: ВНИИС, 1998. Вып. 2. С. 49-55.

23. Савинков А.Ю. Применение совместной пространственно-частотной селекции для защиты от узкополосных пространственно-сосредоточенных помех в системах связи с кодовым разделением каналов // Радиолокация, навигация, связь: МНТК. Воронеж, 1999. Т. 1. С. 521-528.

24. Гармонов А.В., Савинков А.Ю., Карпитский Ю.Е. Итеративный квази-когерентный многолучевой прием с линейной регрессией // Радиолокация, навигация, связь: МНТК. Воронеж, 1999. Т. 1. С. 546-550.

25. Жданов А.Э., Савинков А.Ю. Анализ построения схемы турбокодирования // Радиолокация, навигация, связь: МНТК. Воронеж, 1999. С. 1631-1639.

26. Борисов В.И., Гармонов А.В., Савинков А.Ю. Сравнительный анализ радиointерфейсов систем подвижной связи 3-го поколения // Мобильные системы. М. 1999. № 7. С. 21-25.

27. Савинков А.Ю. Использование библиотек классов C++ для имитационного моделирования // Цифровая обработка сигналов и ее применение: МНТК. М., 1999. Т. 1. С. 217-233.

28. Радченко Ю.С., Савинков А.Ю. Исследование алгоритмов сжатия изображений на основе полиномиальных преобразований (алгоритм GDСР) // Цифровая обработка сигналов и ее применение: МНТК. М., 2000. Т. 1. С. 89-91.

29. Итеративный алгоритм демодуляции сигнала при многокодовой передаче / В.Б. Манелис, А.Ю. Савинков, А.И. Сергиенко, Е.В. Гончаров // Беспроводные системы телекоммуникаций: МНТК. Воронеж, 2000. С. 115-118.

30. Савинков А.Ю., Манелис В.Б., Карпитский Ю.Е. Итеративный алгоритм квази-когерентного приема фазоманипулированных сигналов // Беспроводные системы телекоммуникаций: МНТК. Воронеж, 2000. С. 148-154.

31. Карпитский Ю.Е., Савинков А.Ю. Сравнение OFDM и DS-CDMA при их использовании в прямом канале сотовых систем связи // Беспроводные системы телекоммуникаций: МНТК. Воронеж, 2000. С. 46-52.

32. Гармонов А.В., Савинков А.Ю., Филин С.А. Автономная система синхронизации базовых станций системы связи на основе технологии CDMA: средства передачи сигналов точного времени // Беспроводные системы телекоммуникаций: МНТК. Воронеж, 2000. С. 12-20.

33. Сравнение характеристик многопользовательского приема в условиях синхронной и асинхронной моделей распространения сигнала / А.В. Гармонов,

Е.В. Гончаров, В.Б. Манелис, А.Ю. Савинков // Беспроводные системы телекоммуникаций: МНТК. Воронеж, 2000. С. 143-147.

34. Савинков А.Ю., Козыревский Д.Г. Использование технологии объектно-ориентированного программирования при имитационном моделировании // Беспроводные системы телекоммуникаций: МНТК. Воронеж, 2000. С. 111-114.

35. Квазикогерентный прием фазоманипулированных сигналов в канале с быстрым федингом / А.В. Гармонов, Ю.Е. Карпитский, В.Б. Манелис, А.Ю. Савинков // Цифровая обработка сигналов и ее применение: МНТК. М., 2000. С. 123-127.

36. Каюков И.В., Манелис В.Б., Савинков А.Ю. Алгоритм формирования диаграммы направленности адаптивной антенной решетки в обратном канале сотовой системы связи // Радиолокация, навигация, связь: МНТК. Воронеж, 2003. С. 1904-1910.

37. Каюков И.В., Манелис В.Б., Савинков А.Ю. Алгоритм формирования диаграммы направленности адаптивной антенной решетки в прямом канале сотовой системы связи // Радиолокация, навигация, связь: МНТК. Воронеж, 2003. С. 1899-1903.

38. Гармонов А.В., Жданов А.Э., Савинков А.Ю. Протокол автоматического запроса-повторения, использующий выколотые сверточные коды для увеличения пропускной способности радиосистем передачи данных // Теория и техника радиосвязи: Науч.-техн. сб. Воронеж: ВНИИС, 2004. Вып. 2. С. 87-93.

39. Гармонов А.В., Савинков А.Ю. Обзор физического уровня и уровня управления доступом к передающей среде в сотовых системах связи четвертого поколения // Информационные технологии: ВНТК. Воронеж, 2005. С. 21-35.

40. Joint fragment size and transmission rate optimization for basic access mechanism of IEEE 802.11b distributed coordination function / С.А. Филин, Seok Ho Cheon, Do Hyun Yim, Ki Tae Han, Yun Sang Park, А.В. Гармонов, А.Ю. Савинков, В.Б. Манелис, С.Н. Моисеев, М.С. Кондаков // European Conf. Wireless Technol. (ECWT 2005): МНТК. Париж, 2005. С. 403-406.

41. Joint fragment size and transmission rate optimization for request-to-send/clear-to-send mechanism of IEEE 802.11b distributed coordination function / А.В. Гармонов, А.Ю. Савинков, Seok Ho Cheon, Do Hyun Yim, Ki Tae Han, Yun Sang Park, С.А. Филин, В.Б. Манелис, С.Н. Моисеев, М.С. Кондаков // IEEE Int. Symp. Pers., Indoor and Mobile Commun. (PIMRC 2005): МНТК. Берлин, 2005. С. 737-741.

42. Joint fragment size, transmission rate, and request-to-send/clear-to-send threshold optimization for IEEE 802.11b distributed coordination function / А.В. Гармонов, А.Ю. Савинков, Seok Ho Cheon, Do Hyun Yim, Ki Tae Han, Yun Sang Park, С.А. Филин, В.Б. Манелис, С.Н. Моисеев, М.С. Кондаков // IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC 2005 Spring): МНТК. Стокгольм, 2005. С. 2056-2060.

43. Родионов В.С., Савинков А.Ю. Алгоритм цифровой обработки сигналов адаптивной антенной решетки в системах множественного доступа // Радиолокация, навигация, связь: МНТК. Воронеж, 2006. Т. 2. С. 771-776.

44. Моделирование механизма доступа в сети IEEE 802.11 / А.В. Гармонов, А.Ю. Савинков, С.А. Филин, В.Б. Манелис, С.Н. Моисеев, М.С. Кондаков // Радиолокация, навигация, связь: МНТК. Воронеж, 2006. Т. 2. С. 942-952.

45. Расчет порогов входа и выхода для соты локальной сети при вертикальном хэндовере / А.В. Гармонов, А.Ю. Савинков, С.Н. Моисеев, С.А. Филин, М.С. Кондаков // Радиолокация, навигация, связь: МНТК. Воронеж, 2006. Т. 2. С. 952-963.

46. Две схемы горизонтального хэндовера для WiMAX сети / А.В. Гармонов, А.Ю. Савинков, С.Н. Моисеев, С.А. Филин, М.С. Кондаков // Радиолокация, навигация, связь: МНТК. Воронеж, 2006. Т. 2. С. 963-970.

47. Схема реализации вертикального хэндовера между беспроводными сетями по стандартам IEEE 802.16 IEEE 802.11 // А.В. Гармонов, А.Ю. Савинков, С.Н. Моисеев, С.А. Филин, М.С. Кондаков // Радиолокация, навигация, связь: МНТК. Воронеж, 2006. Т. 2. С. 970-981.

48. Лавлинский А.А., Прибытков Ю.Н., Савинков А.Ю. Построение MESH сети с распределенным управлением передачи на основе стандарта IEEE 802.16 // Радиолокация, навигация, связь: МНТК. Воронеж, 2006. Т. 2. С. 981-990.

Свидетельства о регистрации программы

49. Савинков А.Ю. Программный комплекс для моделирования на ЭВМ устройств цифровой обработки сигналов // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 990749. Бюл. № 1, 2000. С. 21-22.

50. Савинков А.Ю. Моделирование многолучевого приема в обратном канале системы IS-95 // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2000610683. Бюл. № 4, 2000. С. 90.

51. Савинков А.Ю. Моделирование квазикогерентного приема с одновременным временным слежением в обратном канале системы IS-95 // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2000610684. Бюл. № 1, 2000. С. 90-91.

52. Савинков А.Ю. Моделирование многолучевого канала распространения сигнала // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2000610685. Бюл. № 1, 2000. С. 91-92.

53. Савинков А.Ю. Моделирование многолучевого приема сигнала с компенсацией влияния лучей // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2000610687. Бюл. № 1, 2000. С. 93-94.

54. Савинков А.Ю. Моделирование многолучевого приема с решающей обратной связью в прямом канале UMTS // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2000610688. Бюл. № 1, 2000. С. 94.

55. Савинков А.Ю., Поличной С.В. Библиотека матричных расчетов // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003611292. Бюл. № 3, 2003. С. 153.

56. Савинков А.Ю. Модуль численной оптимизации // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004611489. Бюл. № 3, 2004. С. 157.

57. Козыревский Д.Г., Савинков А.Ю. Моделирование Bell Labs Layered Space-time algorithm для приема сигнала в канале Multiple In Multiple Out (Моделирование BLAST для приема сигнала в канале MIMO) // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005611995. Бюл. № 4, 2006. С. 121.

58. Савинков А.Ю. Оптимизация разрядности представления данных при цифровой обработке сигнала // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005612155. Бюл. № 4, 2006. С. 119.

59. Савинков А.Ю. Реализация отладочных точек в программах цифровой обработки сигнала // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005612156. Бюл. № 4, 2006. С. 119.

60. Поличной С.В., Савинков А.Ю., Каюков И.В. Имитационная модель канала связи по протоколу IEEE 802.11b // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005612158. Бюл. № 4, 2006. С. 120.



Подписано в печать 24.04.2006.

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 2,0. Тираж 90 экз. Зак. № 153

Воронежский государственный технический университет

394026 Воронеж, Московский просп., 14

