

- ing. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal*, 2020, no. 8, no. 109–120. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-109-120 (In Russ.)
11. ApolloAuto/Apollo. URL: https://github.com/ApolloAuto/apollo/blob/master/docs/02_Quick%20Start/demo_guide/images/Hardware_overview_3_5.png (accessed: 12.10.2023).
12. How the drone works StarLine. URL: <https://bespilot.com/images/art-4725.jpg> (accessed: 12.10.2023).
13. Karpathy A. CVPR 2021 Workshop on Autonomous Vehicles, 2021. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=NSDTZQdo6H8> (accessed: 22.03.2022).
14. Dubinkin D.M., Aksenov V.V., Pashkov D.A. Trends in the development of unmanned mining dump trucks. *Ugol'*, 2023, no. 6(1168), pp. 72–79. DOI 10.18796/0041-5790-2023-6-72-79 (In Russ.)
15. Maslennikov D.V., Syrkin I.S. Analysis and comparison of Carla and LGSV simulators for training self-driving cars. *Rossiya molodaya: materialy XIII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenyh*. Kemerovo: Kuzbasskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni T.F. Gorbacheva, 2017, p. 1–16. (In Russ.)
16. Dosovitskiy A. et al. CARLA: An Open Urban Driving Simulator. *Proceedings of the 1st Annual Conference on Robot Learning*, 2017, pp. 1–16.
17. Zhou Q.-Y., Park J., Koltun V. Open3D: A Modern Library for 3D Data Processing. URL: <https://arxiv.org/pdf/1801.09847v1.pdf> (accessed: 25.08.2023).
18. Video camera placement module on a quarry dump truck: svidetel'stvo o gos. registratsii programmy dlja EVM 2023665572. Russian Federation. No.2023664281 / I.S. Syrkin, D.M. Dubinkin, I.F. Yunusov, R.R. Garifullin, I.R. Dilmukhametov; dec. 05.07.2023; publ. 18.07.2023. (In Russ.)
19. Camera calibration module: svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlja EVM 202366921. Russian Federation. No 2023667823 / R.R. Garifullin, D.M. Dubinkin, I.S. Syrkin, A.A. Vasina, I.F. Yunusov; dec. 28.08.2023; publ. 12.09.2023. (In Russ.)

Received 24.10.2023

ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

УДК 621.396.2

РЕАЛИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАДИОСВЯЗИ

Графкин А.В., Цветов В.П., Луканов А.С.

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, РФ

E-mail: lukanov.as@ssau.ru

На сегодняшний день важнейшей компонентой метода математического моделирования, который эффективно используется для решения современных прикладных задач, являются современные информационные технологии, позволяющие не только накапливать практически неограниченные объемы экспериментальной информации, но и анализировать эти данные с помощью средств визуализации. В статье рассматриваются вопросы, посвященные проектированию и реализации распределенной вычислительной системы, позволяющей моделировать и анализировать массовые эксперименты для передачи данных в случае использования многочастотных систем связи. В качестве моделей источников сообщений используются модели сигналов с максимальной энтропией. В качестве модели канала связи с шумами используется канал с аддитивным гауссовским шумом, имеющим равномерный спектр в заданной полосе частот. Реализованная вычислительная система позволяет таблично и визуально анализировать такие параметры массовых экспериментов как число поднесущих сигнала, диапазон временного отрезка для восстановления сигнала, отношение сигнал/шум, квадратурную и синфазную составляющие QAM сигнала, энергетическую и информационную характеристики сигнала скорость передачи информации по каналу связи. Результаты серии экспериментов иллюстрируются интерактивными графиками с анимационными эффектами.

Ключевые слова: метод математического моделирования, базы данных, информационная система, массив экспериментов, сигнально-кодовая конструкция, наложение шума на сигнал, восстановление сообщения по модели зашумленного непрерывного сигнала

Введение

Современные информационные технологии превратили метод математического моделирования в еще более мощный инструмент, позволяющий ставить и решать сложные прикладные задачи. Одной из таких актуальных задач является надежная и эффективная (высокоскоростная) передача данных по каналам радиосвязи.

Для решения данной задачи спроектирована и реализована распределенная вычислительная система (РВС), которая на основе технологий баз данных позволяет накапливать информацию, сгенерированную в процессе проведения экспериментов. А стек технологий построения распределенных вычислительных систем позволил создать распределенную систему для выполнения серий экспериментов на основе запрограммированных математических моделей, которые составляют ядро системы.

Традиционными показателями качества систем радиосвязи (СРС) являются информационная и энергетическая эффективность [3; 5–10]. Информационная эффективность определяется как:

$$\eta = \frac{R}{C},$$

где R – скорость передачи информации системой связи, C – пропускная способность канала (по Шеннону). Информационная эффективность показывает, какую долю пропускной способности канала использует система радиосвязи.

Энергетическая эффективность определяется как

$$\beta = \frac{R}{\frac{P_c}{N_0}},$$

где P_c – средняя мощность сигнала, N_0 – спектральная плотность шума, для аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ):

$$N_0 = \frac{P_{ш}}{F},$$

где $P_{ш}$ – средняя мощность шума, F – используемая полоса частот канала связи. Энергетическая эффективность имеет смысл удельной скорости, количества бит/с, приходящихся на 1 Вт мощности сигнала, отнесенных к спектральной плотности шума, и показывает, насколько эффективно с точки зрения обеспечения скорости передачи данных используются энергетические характеристики системы связи.

Одним из способов повышения эффективности СРС является разработка и применение подходящих сигнально-кодовых конструкций (СКК).

В информационной системе в качестве базы для сравнения информационной и энергетической эффективности систем радиосвязи с различными сигнально-кодовыми конструкциями используется математическая модель системы радиосвязи с ортогональным многочастотным сигналом и квадратурной амплитудной модуляцией (ОМЧС-КАМ).

В качестве исследуемой (базовой) СКК взята математическая модель ОМЧС-КАМ на основе дискретного косинус-преобразования и дискретного синус-преобразования (ОМЧС-КАМ-ДКП4-ДСП4).

Анализ предметной области

В результате анализа предметной области по восстановлению (распознаванию) сигнала на основе модели КАМ-ОЧМ модуляции входного сигнала, при прохождении его через зашумленный канал, были выделены следующие основные сущности [3; 5–8]:

Алфавит – фиксированная конечная совокупность символов.

Сообщение – представление информации в виде упорядоченного набора символов алфавита.

Источник сообщений – множество сообщений конечной длины с определенной на нем вероятностной мерой.

Кодирование (источника) сообщений – преобразование исходного сообщения, составленного из символов алфавита источника, в (канальное) сообщение, составленное из (кодовых) символов (канального) алфавита передающего устройства.

Кодовая конструкция – совокупность способов преобразования кодовой комбинации сообщения с помощью помехоустойчивых и манипуляционных кодов в передатчике и способов выявления и коррекции ошибок при приеме.

Сигнальная конструкция – совокупность функций-носителей информации, составляющих многопозиционный многочастотный сигнал, способа организации многочастотного сигнала из функций-носителей во времени, способов нанесения на них сообщения (манипуляции) в передатчике и способов извлечения сообщения из функций-носителей (деманипуляции) в приемнике.

Функция-носитель – функция $f(t, \alpha, \beta, \dots)$, которой описывается сигнал, несущий передаваемую информацию.

Передающее устройство – совокупность технических средств, предназначенных для преобразования сообщения в сигнал.

Сигнал – физический процесс, измеряемый во времени, значения параметров которого определяют сообщение.

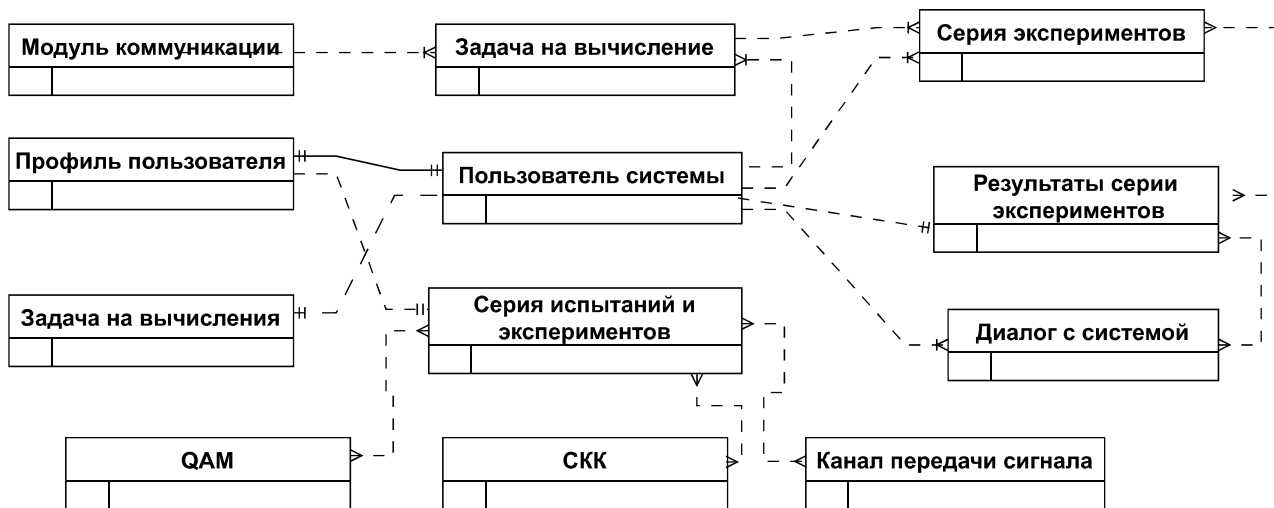


Рисунок 1. Логическая модель базы данных распределенной вычислительной системы

Модуляция/манипуляция сигнала – преобразование канального сообщения в сигнал.

Канал связи – совокупность технических средств, предназначенных для формирования, передачи и приема сигналов, и соответствующих им линий связи. Канал связи является составной частью канала передачи сообщений.

Линия связи – область распространения сигнала.

Шум – случайное изменение характеристик области распространения сигнала, влияющее на параметры передаваемого сигнала.

Параметр физического процесса – доступное для измерения в любой момент времени свойство физического процесса.

Измерение параметра физического процесса – сопоставление параметру физического процесса элемента числового множества.

Приемное устройство – совокупность технических средств, предназначенных для преобразования сигнала в сообщение.

Демодуляция/деманипуляция сигнала – преобразование сигнала в исходное канальное сообщение.

Декодирование сообщений – преобразование сообщения, составленного из символов алфавита приемного устройства, в исходное сообщение.

Испытание – последовательность следующих действий:

- случайный выбор сообщения, генерируемого численной моделью источника сообщений;
- кодирование выбранного сообщения в соответствии с моделью канала связи;
- преобразование выбранного сообщения в численную модель непрерывного сигнала исследуемой СКК;
- наложение шума в соответствии с моделью канала, формирование модели зашумленного непрерывного сигнала исследуемой СКК;

– восстановление (деманипуляция / декодирование) сообщения по модели зашумленного непрерывного сигнала;

– вычисление значений параметров, необходимых для оценки информационной и энергетической эффективности СКК, по переданному и восстановленному сообщениям;

– протоколирование результатов.

Эксперимент – последовательность испытаний. По результатам экспериментов вычисляются значения информационной и энергетической эффективности исследуемой СКК.

Концептуальная модель базы данных

На основе выделенных сущностей, спроектирована концептуальная модель базы данных для хранения и последующей обработки экспериментальных данных [4] (рисунок 1).

Пользователь системы – действия оператора осуществляются от имени авторизованного пользователя.

Профиль пользователя – задает реквизиты пользователя, определяет тип учетной записи. Предусмотрены два типа учетных записей: «эксперт» и «оператор». Доступные в системе функции зависят от типа учетной записи.

Задача на вычисление – задача на обработку (вычисление) модулем коммуникации вычислительного этапа эксперимента или испытания. Задача формируется автоматически планировщиком системы. В зависимости от типа задачи планировщик назначает ее доступному модулю коммуникации. В процессе вычисления задача имеет один из перечисленных статусов: «задача не распределена», «задачу готов обработать модуль», «задача обрабатывается модулем», «задача обработана, результат получен», «результат записан в целевую таблицу».

Модуль коммуникации – мультиплатформенное приложение, установленное на вычислительном ресурсе. Основная задача модуля – производить коммуникацию распределенной вычислительной системы с программным, программно-аппаратным или аппаратным модулем, реализующим функции отдельного элемента системы радиосвязи. Элементом может быть устройство, его прототип или математическая модель. Коммуникационный модуль снимает ограничения на операционную систему и язык программирования/среду, в которой реализован элемент. В описываемой системе при вычислениях использовались математические модули, реализованные на языках C++, Python, Matlab, ObjectPascal и др.

Серия экспериментов – позволяет сформировать параметры, указать типы вычислительных модулей, которые будут использоваться на разных этапах моделирования, прототипирования или испытания системы радиосвязи.

Серия испытаний и экспериментов, позволяют задать пакетную обработку. В этом случае указываются диапазоны параметров, для которых необходимо выполнить моделирование, на основе которого планировщик системы автоматически планирует проведение исследований и экспериментов.

Диалог с системой – в системе предусмотрена возможность обсуждения результатов процесса моделирования и вычислений между экспертами системы, а также диалог с администратором РВС.

Модель информационной системы

База данных является составной частью РВС,

позволяющей хранить результаты экспериментов и на их основе проводить оценку информационной и энергетической эффективности исследуемых СКК. Схема функционирования информационной системы изображена на рисунке 2.

Основной функционал информационной системы

При проектировании распределенной информационной системы для генерации и обработки большого массива экспериментальных данных для сравнительного анализа была выбрана наиболее распространенная сигнальная конструкция, построенная на ортогональных многочастотных сигналах с квадратурной амплитудной модуляцией (ОМЧС-КАМ) и использующая обратное и прямое дискретное преобразование Фурье (ДПФ) для нанесения на МЧС сообщения (манипуляции) в передатчике и извлечения сообщения из функций-носителей (деманипуляции) в приемнике.

В процессе экспериментальных исследований проводился сравнительный анализ моделей систем радиосвязи с зашумленным радиоканалом, построенных на основе следующих СКК, с применением манипуляции КАМ:

1. Многочастотные (ортогональные) сигнально-кодовые конструкции ОМЧС-КАМ-ДПФ.
2. Многочастотные (неортогональные) сигнально-кодовые конструкции МЧС-КАМ-ДПФ-Р, получаемые из ОМЧС-КАМ-ДПФ сужением сигналов на интервал $[0, T_0]$, при различных значениях $0,75 T \leq T_0 \leq 0,95 T$.
3. Многочастотные (ортогональные) сигналь-

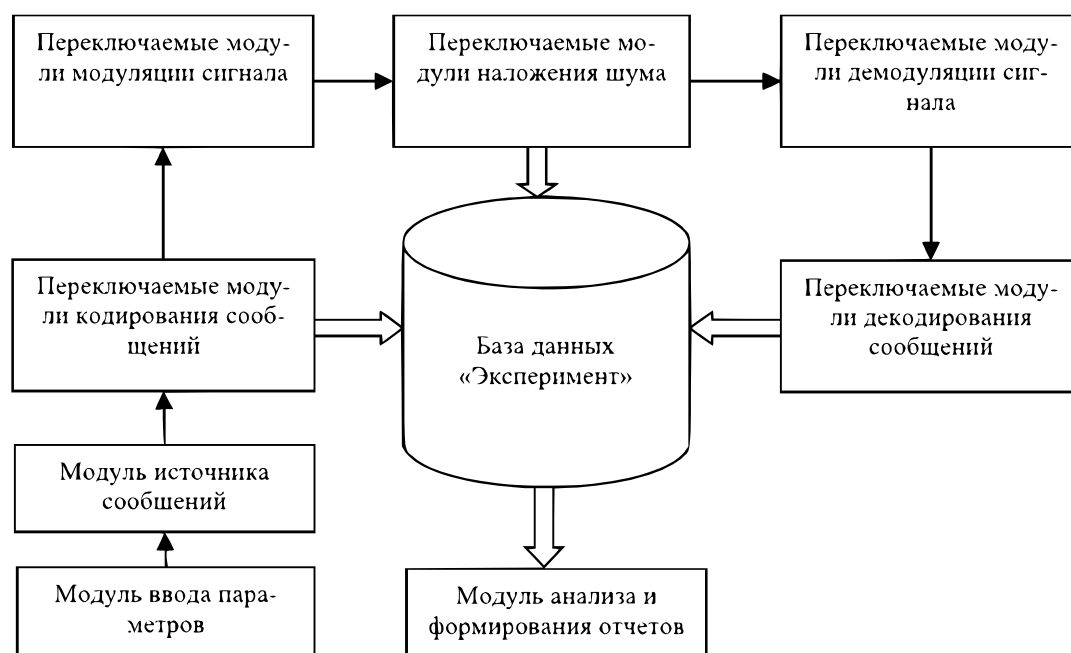


Рисунок 2. Схема функционирования системы

но-кодовые конструкции, использующие для передачи сообщений методы квадратурной амплитудной модуляции и дискретные косинус- и синус-преобразования (ОМЧС-КАМ-ДКП4-ДСП4).

Сравнение исследуемых СКК проводилось на основании следующего критерия их оптимальности:

Наиболее оптимальной, в условиях заданной шумовой обстановки, при равном количестве поднесущих и позиционности КАМ сигнала считается СКК с максимальным показателем информационной эффективности. При равенстве показателей информационной эффективности, сравнению подвергаются показатели энергетической эффективности. При равенстве обоих показателей сравниваемые СКК считаются равноправными.

Для поддержки указанного выше функционала в РВС реализованы следующие основные модули (рисунок 3).

Таким образом, РВС позволяет реализовать следующий основной функционал:

1. Моделирование источника сообщений для исследуемых СКК.
2. Моделирование шума в среде передачи.
3. Моделирование передающего устройства для каждой исследуемой СКК.
4. Моделирование канала связи для заданного ОСШ в среде передачи.
5. Моделирование приемного устройства для каждой исследуемой СКК.
6. Обработка результатов серии экспериментов для каждой исследуемой СКК.

Информационная система имеет распределенную многозвенную клиент-серверную архитектуру (рисунок 4), и реализована по модульному

принципу, что обеспечивает возможность применения различных видов кодирования источника, кодирования канала и модуляции частотных составляющих при формировании СКК.

Система реализована с использованием стека технологий: Nginx 1.1-4.2, Gunicorn, СУБД PostgreSQL 11.0, Python 3.9, Django 4.0.5, Vue.JS, Celery, PySDR, REST API (взаимодействие с вычислительными модулями на Qt, C++ и др.) [1–2].

Архитектура комплекса позволяет распределять нагрузку между вычислительными узлами, как в рамках одной локальной вычислительной сети, так в составе глобальной сетевой инфраструктуры. Информационная система реализована на основе кроссплатформенного (независящего от операционной системы) «толстого» клиента, но, при этом, объем данных, передаваемых между узлами, содержит информацию о небольшом количестве основных параметров компьютерной модели и результатах вычислений, что не оказывает серьезного влияния на сетевой трафик. Все сетевые сеансы в рамках комплекса используют защищенные протоколы передачи данных.

Основной функционал системы развернут на фреймворке Django, где реализуется интерфейс, работа с базой данных, функции взаимодействия с внешними модулями. Планировщик системы реализован на Celery, в нем формируются, а также планируются задачи на проведение экспериментов и испытаний, передаются параметры и обрабатываются результаты вычислений. Задачи распределяются между интерфейсными модулями (модулями коммуникации).

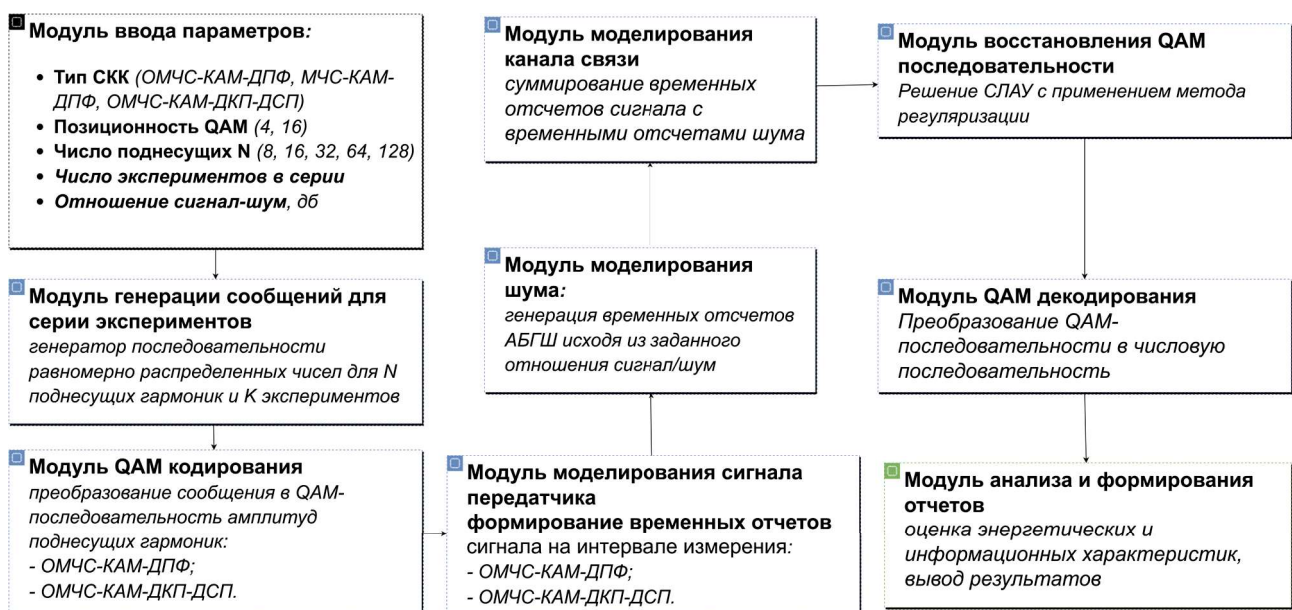


Рисунок 3. Основные модули информационной системы

Выбранная архитектура позволяет пользоваться преимуществами языка Python, расширяет возможности использования в своих проектах сложных алгоритмов за счет большого числа

библиотек и фреймворков (например, PySDR). PySDR позволяет реализовывать проекты с программно-определяемым радио (SDR) и цифровой обработки сигналов (DSP).

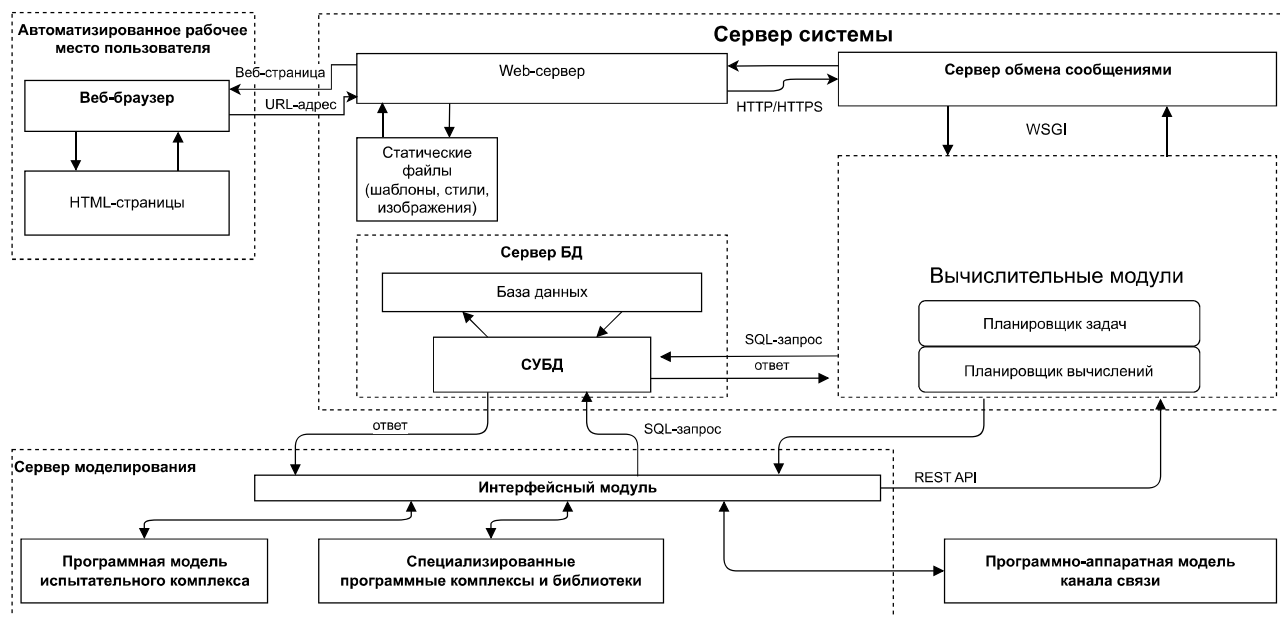


Рисунок 4. Архитектура PBC

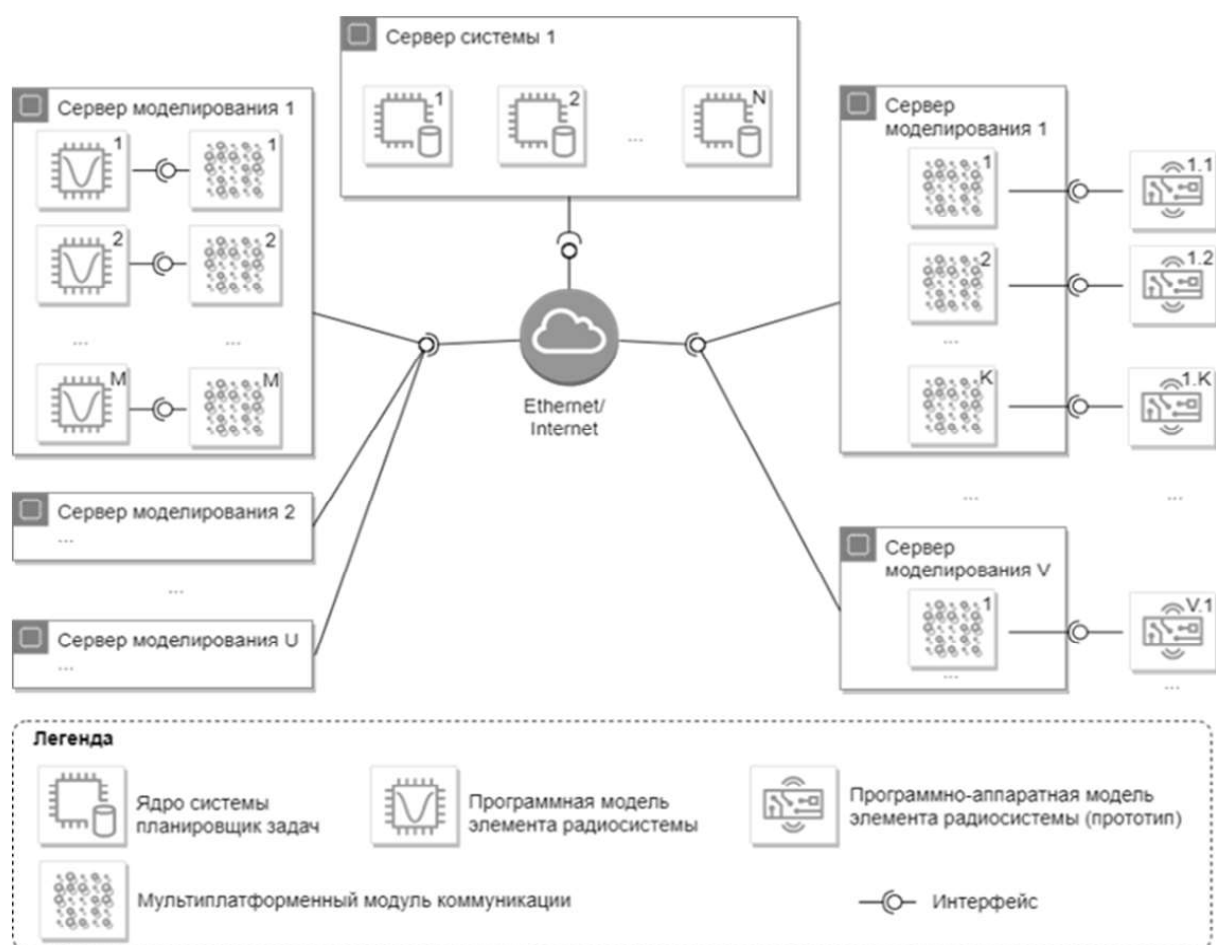


Рисунок 5. Место коммуникационного модуля в распределенной системе

Как видно из рисунка 4, интерфейсный модуль позволяет подключить к системе программные математические модели, специализированные программные комплексы и библиотеки, а также программно-аппаратные модели элементов системы РВС. При взаимодействии с ядром системы используются SQL-запросы к БД и функции REST API ядра. Объединение в единую распределенную вычислительную систему программных модулей, написанных на разных языках, исполняемых на разных вычислительных платформах, стало возможным благодаря модулю коммуникации.

Назначение модуля коммуникации и его место в системе иллюстрируется на рисунке 5.

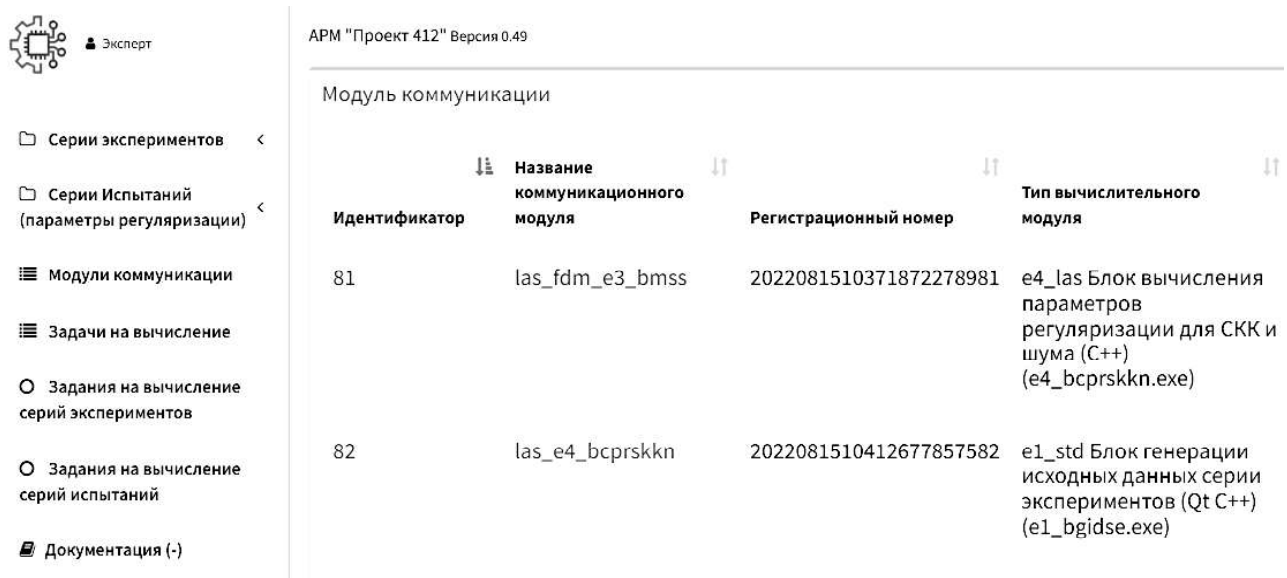
Из рисунка видно, что система позволяет использовать неограниченное количество вычислительных ресурсов, распределенных территориально. Планировщик назначает задачи вычислительным модулям с учетом их статуса.

Коммуникационный модуль, получив задачу, запускает модель элемента на связанных с ним вычислительных ресурсах.

Работа с модулем коммуникации начинается с его регистрации в распределенной системе моделирования: задаются параметры модуля для регистрации на сервере, модуль обращается к серверу для регистрации, после регистрации планировщик системы распределяет задачи на вычисление в соответствии с типами вычислительных модулей (рисунок 6).

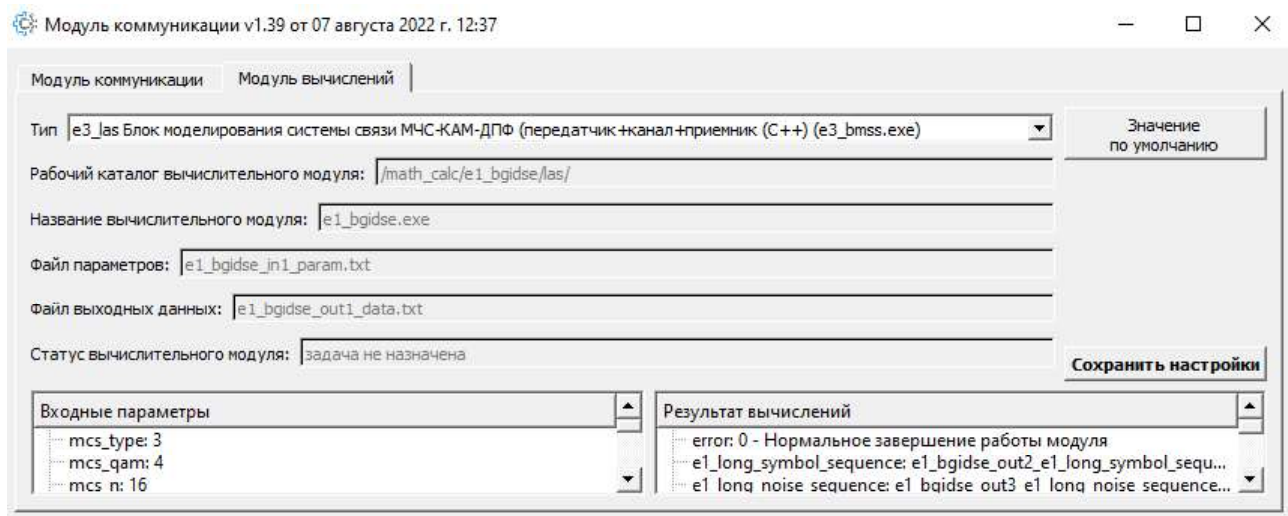
На втором этапе настройки коммуникационного модуля указывается исполнительный код или программно-аппаратный модуль, который будет запускаться на вычисление, когда придет задание от планировщика ядра системы.

На рисунке 7 показаны параметры, которые необходимо настроить, чтобы модуль коммуникации знал, какие задачи, распределенные ядром систе-



Идентификатор	Название коммуникационного модуля	Регистрационный номер	Тип вычислительного модуля
81	las_fdm_e3_bmss	2022081510371872278981	e4_las Блок вычисления параметров регуляризации для СКК и шума (C++) (e4_bcprskkn.exe)
82	las_e4_bcprskkn	2022081510412677857582	e1_std Блок генерации исходных данных серии экспериментов (Qt C++) (e1_bgidse.exe)

Рисунок 6. Регистрация модуля коммуникации



Модуль коммуникации v1.39 от 07 августа 2022 г. 12:37

Модуль коммуникации | Модуль вычислений

Тип: e3_las Блок моделирования системы связи МЧС-КАМ-ДПФ (передатчик+канал+приемник (C++) (e3_bmss.exe))

Рабочий каталог вычислительного модуля: /math_calc/e1_bgidse/las/

Название вычислительного модуля: e1_bgidse.exe

Файл параметров: e1_bgidse_in1_param.txt

Файл выходных данных: e1_bgidse_out1_data.txt

Статус вычислительного модуля: задача не назначена

Значение по умолчанию

Сохранить настройки

Входные параметры

Результат вычислений

mcs_type: 3
mcs_qam: 4
mcs_n: 16

error: 0 - Нормальное завершение работы модуля
e1_long_symbol_sequence: e1_bgidse_out2_e1_long_symbol_sequ...
e1_long_noise_sequence: e1_bgidse_out3_e1_long_noise sequence...

Рисунок 7. Параметры модуля вычислений

мы, можно брать в обработку, какие программные модули запускать, в каком файле брать параметры вычисления и куда записывать результаты.

Настроенный модуль коммуникации постоянно опрашивает сервер и отслеживает очередь задач на вычисление для ассоциированного с ним модуля вычислений. Как только задача появляется в очереди, модуль коммуникации запрашивает у сервера задачу, параметры и входные данные на обработку. Если эту задачу не перехватили другие модули коммуникации, ядро системы задачу назначает ему на исполнение. Теперь задача числится за коммуникационным модулем.

Ядро системы периодически опрашивает состояние модуля коммуникации, который информирует сервер о текущем состоянии: «модуль не доступен», «модуль обрабатывает задачу», «модуль доступен и готов обрабатывать задачи».

Коммуникационный модуль формирует параметры для вычислительного модуля, запускает вычислительный модуль на вычисление (моделирование элемента радиосистемы), отправляет информацию о текущем этапе вычисления.

Полученные от вычислительного модуля результаты передаются ядру системы, чтобы в дальнейшем другой модуль коммуникации мог передать их в качестве входных данных на следующий вычислительный модуль (элемент радиосистемы). Модель радиосистемы состоит из множества элементов, реализованных в виде программных и/или аппаратных модулей, имеющих сетевую архитектуру. Модули связаны между собой в зависимости от моделируемой радиоси-

стемы. Коммуникационные модули определяют место подчиненного им вычислительного модуля на основе его типа. Например, модуль типа «e3_std Блок моделирования системы связи (передатчик+канал+приемник (Qt C++)) (e3_bmss.exe)» использует результат вычисления модулей «e1_las Блок генерации исходных данных серии экспериментов (C++) (e1_bgidse.exe)».

Интерфейс коммуникационного модуля, обрабатывающего задачу, показан на рисунке 8.

Модуль может работать в автономном режиме, его можно свернуть в трей операционной системы. Если настройки сохранить, то при очередном запуске модуля он откроется с учетом указанных настроек.

Контроль и управление ходом обработки серий экспериментов осуществляется через web-интерфейс (рисунок 6).

Клиентское Web-приложение позволяет просматривать и анализировать все этапы прохождения серии экспериментов с помощью графических иллюстраций промежуточных и итоговых результатов серии экспериментов в распределенной сети.

Например, проиллюстрируем информативность графического интерфейса для серии экспериментов, когда в качестве базовой СКК используется математическая модель ОМЧС-КАМ-ДПФ, а в качестве исследуемой СКК используется математическая модель ОМЧС-КАМ-ДКП4-ДСП4. Число поднесущих $N = 16$, число используемых временных отсчетов $M = 16$, число экспериментов в серии $P = 100$, отношение сигнал-шум $RSN = 12$ дБ. На графиках представлены квадратурная и синфазная составляющие QAM сигнала.

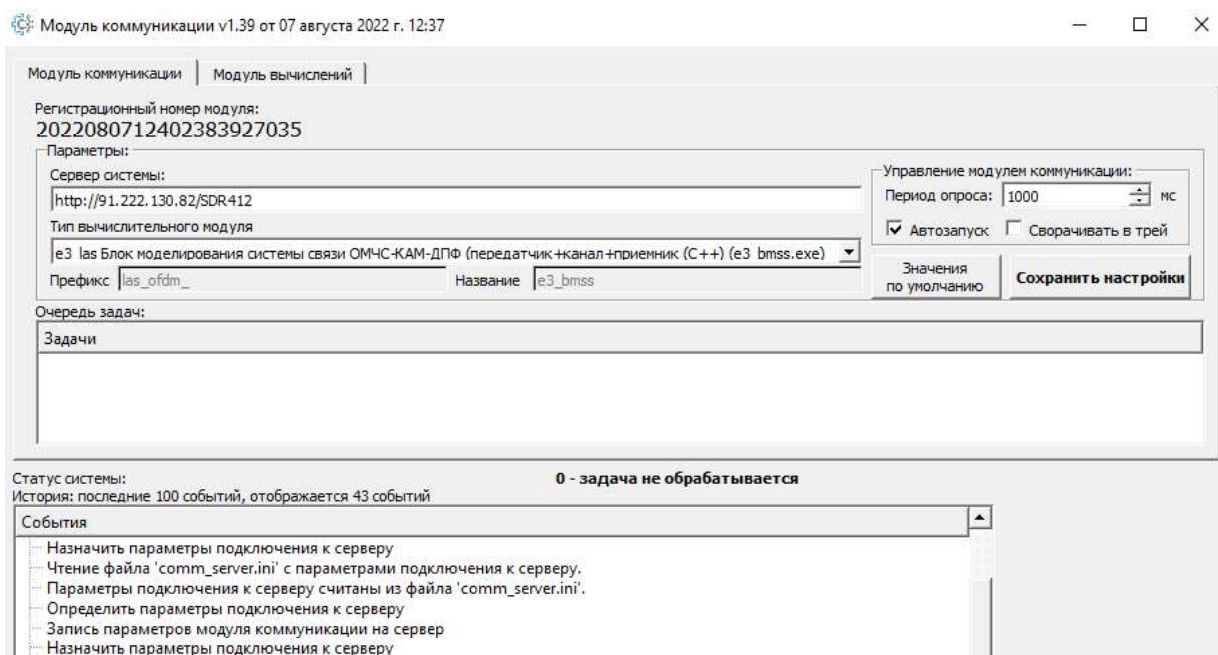


Рисунок 8. Модуль коммуникации распределенной вычислительной системы

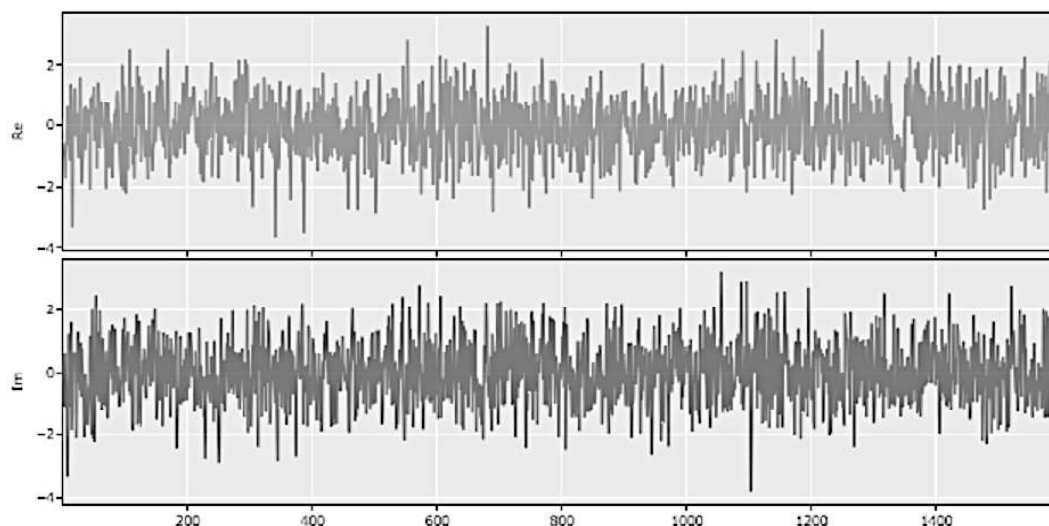


Рисунок 9. Аддитивный гауссовский белый шум, накладывается на сигнал

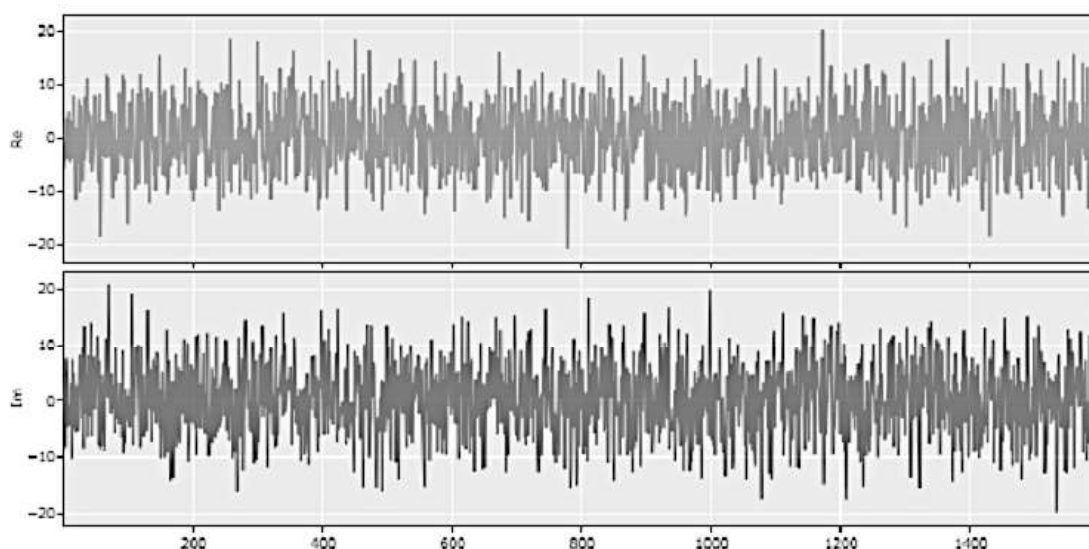


Рисунок 10. Восстановленный сигнал

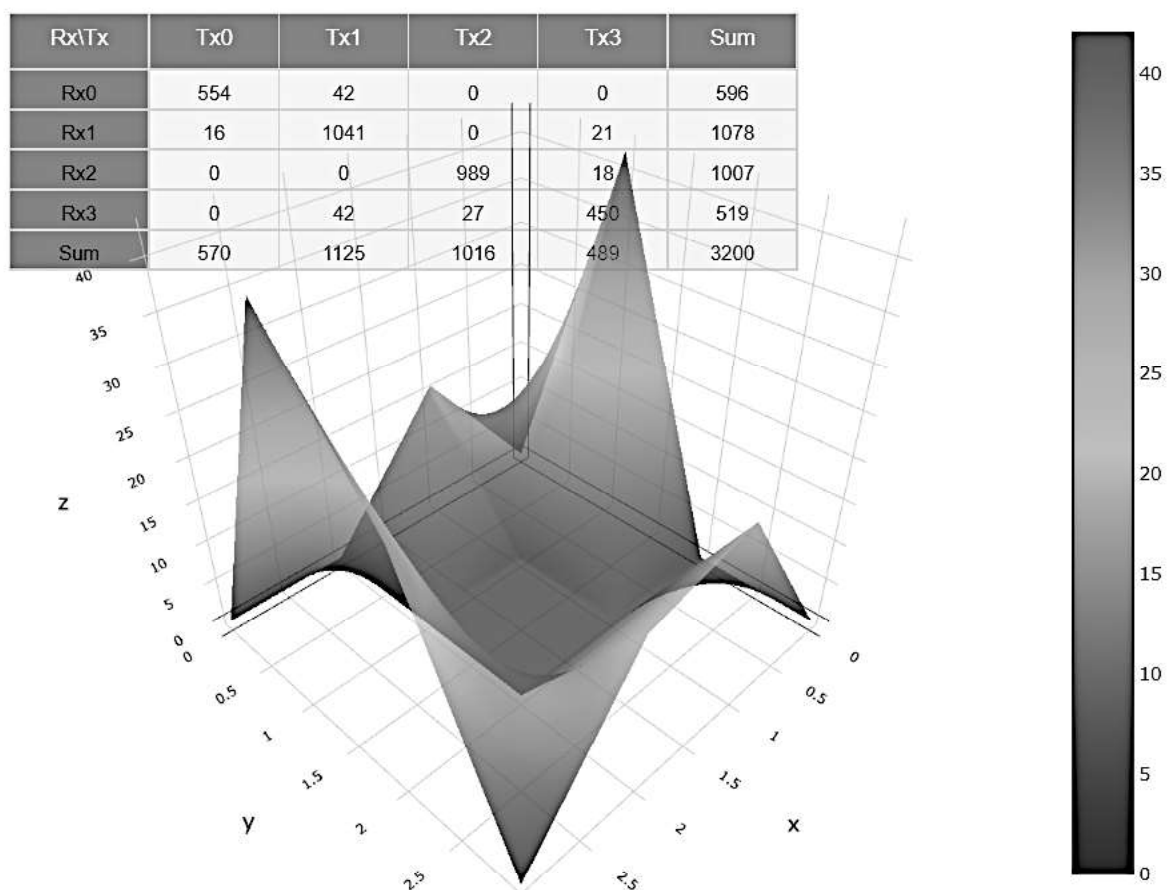
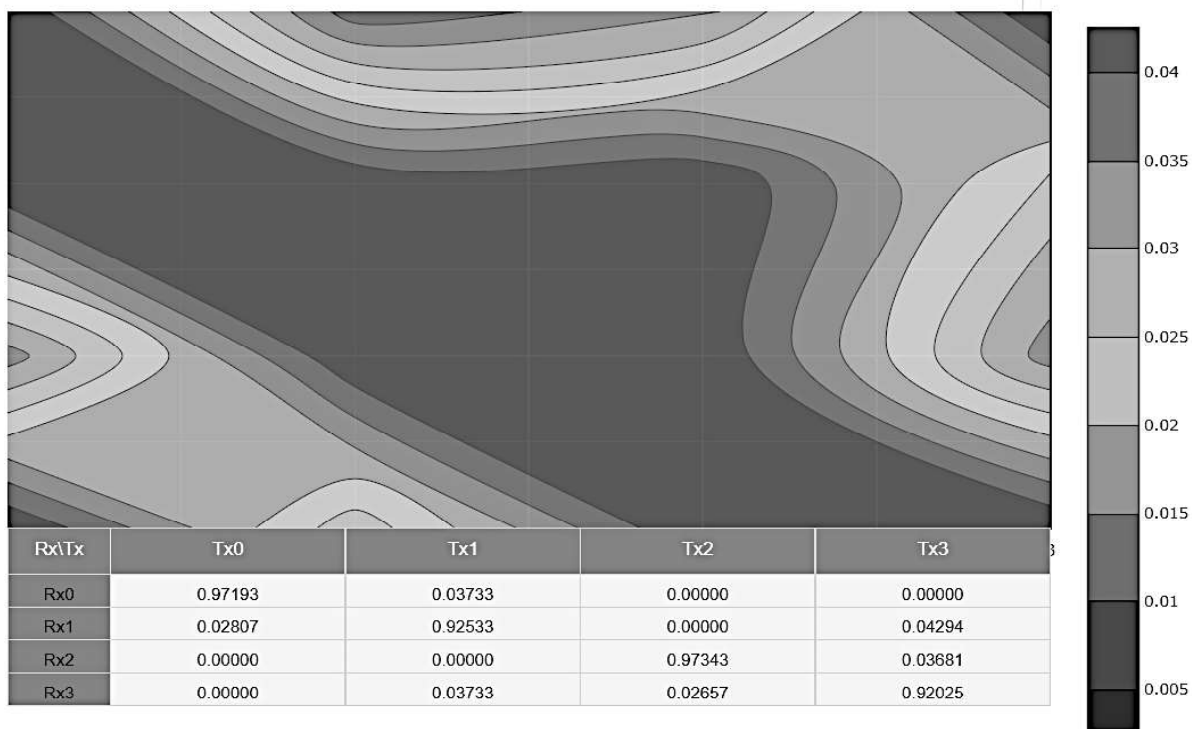
Таблица 1. Результаты серии экспериментов

Энергетические и информационные характеристики	Исследуемая СКК	Базовая СКК
Средняя мощность сигнала в серии экспериментов	81.800	163.600
Средняя мощность шума в серии экспериментов	5.161	10.322
Полоса частот, занимаемая сигналом	14.295	13.990
Энергетическая эффективность	0.465	0.241
Длительность передачи символа	0.5	1.0
Количество переданных символов	3200	3200
Количество ошибочно принятых символов	179.000	182.000
Скорость передачи информации, бит/сек	105.359	53.522
Пропускная способность модели канала связи	58.246	57.003
Информационная эффективность	1.809	0.939

На выходе передатчика формируется случайная целочисленная последовательность с нормальным распределением. На информационный сигнал накладывается аддитивный гауссовский белый шум (рисунок 9). После обратного ДСП4 преобразования, восстановленный сигнал на сто-

роне приемника представлен на рисунке 10.

Аналогичные графики иллюстрируют результаты для базовой СКК. В итоге получаем сравнительные характеристики для исследуемой и базовой СКК (таблица 1).

Рисунок 11. Частота приема i -ого QAM-символа при передаче j -ого символаРисунок 12. Вероятность приема i -ого QAM-символа при передаче j -ого символа

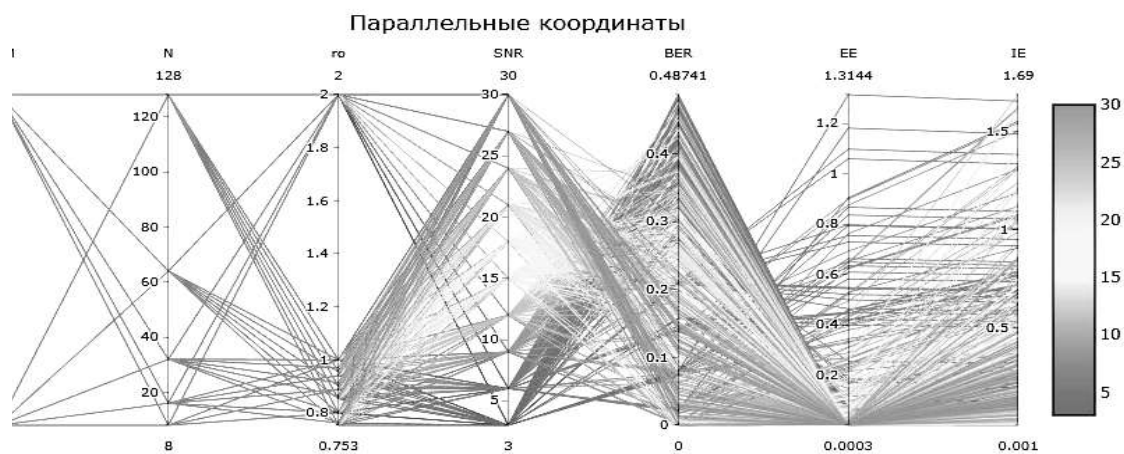


Рисунок 13. Результаты проведения серии экспериментов в параллельных координатах

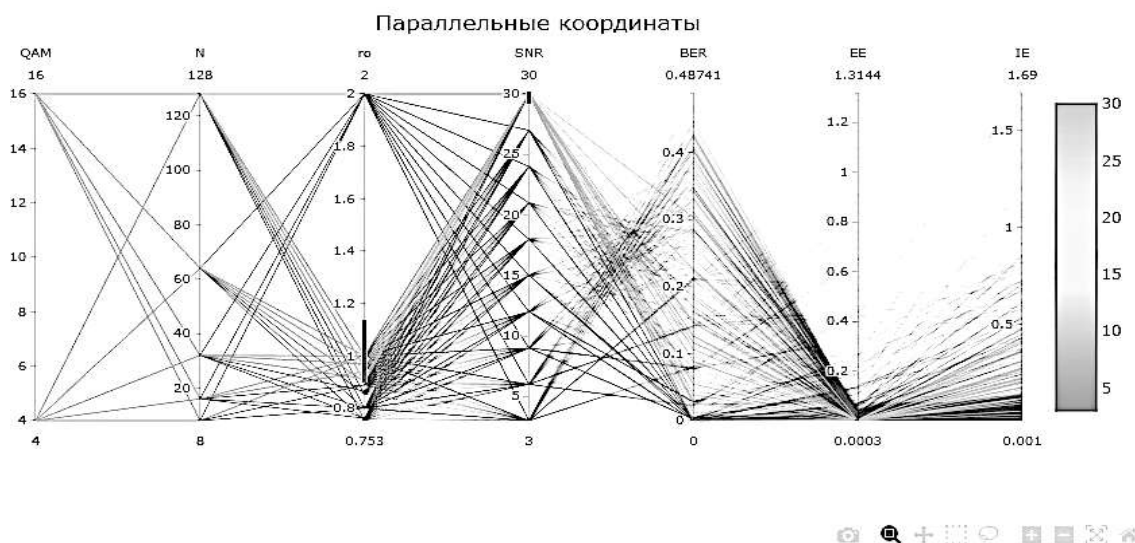


Рисунок 14. Результаты экспериментов при заданных ограничениях

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Результаты анализа информационных и энергетических характеристик исследуемых систем связи

- QAM – позиционность КАМ;
 N – число поднесущих СКК;
 СКК – тип сигнально-кодовой конструкции (ОМЧС-КАМ-ДПФ, ОМЧС-ДСП4-ДКП4, ОМЧС-КАМ-ДПФ, МЧС-КАМ-ДПФ);
 - выигрыш во времени приема/передачи сигнала относительно ОМЧС-КАМ-ДПФ;
 SNR – отношение сигнал/шум, дБ;
 BER – вероятность битовой ошибки;
 - информационная эффективность;
 - энергетическая эффективность;

QAM	N	СКК	Выигрыш во времени	SNR	BER	Информационная эффективность	Энергетическая эффективность
4	8	ОМЧС-КАМ-ДПФ	1.00	3.00	0.0808	0.799	0.634
4	8	ОМЧС-ДСП4-ДКП4	2.00	3.00	0.0802	1.001	0.794
4	8	МЧС-КАМ-ДПФ	0.88	3.00	0.1471	0.566	0.449

Рисунок 15. Фрагмент отчета с результатами анализа проведенной серии экспериментов

Полученные результаты также иллюстрируются интерактивными графиками. Например, на рисунках 11 и 12 приведены анимационные графики, полученные в результате обработки данных рассмотренного выше эксперимента для частоты приема i -ого QAM-символа при передаче j -ого символа и для вероятности приема i -ого QAM-символа при передаче j -ого символа.

В системе предусмотрена возможность исследовать результаты анализа в параллельных координатах (рисунок 13).

Более того, в процессе анализа можно в интерактивном режиме задавать пороговые значения интересующих параметров и видеть какие результаты моделирования достигались в ходе работы системы. На рисунке 14 показаны результаты экспериментов при заданных ограничениях в коридорах для интервала распознавания сигнала и SNR. Цветом выделены допустимые при этих ограничениях исходы.

Отчеты формируются автоматически для всех возможных сочетаний параметров серий экспериментов. Все отчеты о результатах сохраняются в форматах *.doc и *.pdf и, следовательно, могут быть распечатаны (рисунок 15).

Заключение

Современные информационные технологии превратили метод математического моделирования в мощный инструмент, позволяющий моделировать сложные прикладные задачи в области создания перспективных систем радиосвязи. Реализованная распределенная вычислительная система, позволяет агрегировать информацию, сгенерированную в процессе проведения экспериментов над прототипами элементов радиоканала и системой передачи информации в целом, а также наглядно отображать полученные результаты. Это позволяет значительно сократить время анализа результатов и определить вектора развития. Выбранный стек технологий позволил создать распределенную систему для выполнения серий экспериментов на основе запрограммированных математических моделей, которые составляют ядро системы. При этом обеспечивается защищенность информационных потоков, удобство работы с системой, расширяемость системы и возможность исследовать прототипы системы и программные модели с сохранением интеллектуальной собственности автора вычис-

лительного модуля. Вычислительные модули могут запускаться на рабочей станции исследователя, в этом случае ядро системы распределяет вычислительные ресурсы.

Литература

1. Хэнчеп Э., Листуон Б. Vue.js в действии. СПб.: Питер, 2019. 304 с.
2. Документация по Celery. URL: <https://docs.celeryq.dev/en/stable/> (дата обращения: 15.09.2023).
3. Ипатов В.П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. М.: Техносфера, 2007. 488 с.
4. Леонович Г.И., Сорокин М.С., Крутов А.Ф. Низкочастотный радиотелеметрический канал на основе пространственно-распределенной приемной антенной системы и ортогонального частотного мультиплексирования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, № 6. С. 48–51.
5. Цветов В.П., Графкин А.В., Луканов А.С. Программный стенд для моделирования цифровых каналов систем радиосвязи // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы Всероссийской научно-технической конференции. Самара: ООО «Артель», 2023. С. 179–172.
6. Об одной модели динамического управления потоком данных в радиоканале / В.П. Цветов [и др.] // Перспективные информационные технологии: материалы Международной научно-технической конференции. Самара, 2015. С. 299–302.
7. Цветов В.П. Об одной задаче декодирования символов по неполным данным в радиоканале // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2017): материалы III Международной конференции. Самара, 2017. С. 954–957.
8. Цветов В.П. Использование помех для защиты данных в радиоканале // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020): материалы VI международной конференции. Самара, 2020. С. 255–260.
9. Tsvetov V.P. Wireless channel noises and data protection. CEUR Workshop Proceedings. 2020. Vol. 2667. P. 234–237.
10. Технология OFDM: учебное пособие для вузов / М.Г. Бакулин [и др.]. М.: Горячая линия - Телеком, 2015. 360 с.

Получено 12.10.2023

Графкин Алексей Викторович, к.т.н., доцент кафедры безопасности информационных систем (БИС) Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева (Самарский университет). 443086, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 34. Тел. +7 927 607-00-44. E-mail: lvg_alex@mail.ru

Цветов Виктор Петрович, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры БИС Самарского университета. 443086, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 34. Тел. +7 927 001-89-56. E-mail: tsf-su@mail.ru

Луканов Александр Сергеевич, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры информатики и вычислительной математики Самарского университета. 443086, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 34. Тел. +7 927 659-34-12. E-mail: las15@mail.ru

IMPLEMENTATION OF DISTRIBUTED COMPUTING SYSTEM FOR SIMULATING OF THE RADIO COMMUNICATION PROCESSES

Grafin A.V., Tsvetov V.P., Lukanov A.S.

Samara National Research University. Samara, Russian Federation

E-mail: las15@mail.ru

Today, the most important component of the mathematical modeling method, which is effectively used to solve modern application problems, is modern information technology, which allows not only to accumulate practically unlimited amounts of experimental information, but also to analyze this data using visualization methods. The article discusses issues related to the development and implementation of a distributed computing system that makes it possible to simulate and analyze multiple experiments for data transmission in the case of using multi-frequency communication systems. Signal models with maximum entropy are used as message source models. As a model of a communication channel with noise, a channel with additive Gaussian noise which has a uniform spectrum in a given frequency band is used. The implemented computing system allows tabular and visual analysis of such parameters of the multiple experiments as the number of signal subcarriers, the range of time interval for signal restoration, the signal-to-noise ratio, the quadrature and in-phase components of the QAM signal, the energy and information characteristics of the signal and the speed of data transmission of the communication channel. The results of the serial experiments are illustrated in form of interactive graphs with animated effects.

Keywords: *mathematical modeling method, databases, information system, array of experiments, signal-no-code construction, noise superimposition on the signal, message recovery according to the noisy continuous signal model*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.2.11

Grafin Aleksei Viktorovich, Samara National Research University, 34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation; Associated Professor of Information Systems Security Department, PhD in Technical Science, Associated Professor. Tel. +7 927 607-00-44. E-mail: lvg_alex@mail.ru

Tsvetov Viktor Petrovich, Samara National Research University, 34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation; Associated Professor of Information Systems Security Department, PhD in Physics and Mathematics Science, Associated Professor. Tel. +7 927 001-89-56. E-mail: tsf-su@mail.ru

Lukanov Aleksandr Sergeevich, Samara National Research University, 34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation; Associated Professor of Computer Science and Computational Mathematics Department, PhD in Physics and Mathematics Science, Associated Professor. Tel. +7 927 659-34-12. E-mail: las15@mail.ru

References

1. Hanchett E., Listwon B. *Vue.js in Action*. Saint Petersburg: Piter, 2019, 304 p. (In Russ.)
2. Celery Documentation. URL: <https://docs.celeryq.dev/en/stable/> (accessed: 15.09.2023).
3. Ipatov V.P. *Wideband systems and code division of signals: Monograph*. Moscow: Tehnosfera, 2007, 488 p. (In Russ.)
4. Leonovich G.I., Sorokin M.S., Krutov A.F. Low frequency radio telemetry channel on the basis of spatially distributed receiving antenna system and orthogonal frequency division multi-

- plexing. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 2011, vol. 13, no. 6, pp. 48–51. (In Russ.)
5. Tsvetov V.P., Grafkin A.V., Lukanov A.S. Software stand for modeling digital channels of radio communication systems. *Aktualnye problemy radioelektroniki i telekommunikacij: materialy Vse-rossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Samara: OOO Artel*, 2023, pp. 179–182. (In Russ.)
 6. Tsvetov V.P. et al. About one model of dynamic control of data flow in a radio channel. *Perspektivnye informacionnye tekhnologii: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Samara*, 2015, pp. 299–302. (In Russ.)
 7. Tsvetov V.P. On one problem of decoding symbols using incomplete data in a radio channel. *Informacionnye tekhnologii i nanotekhnologii (ITNT-2017): materialy III Mezhdunarodnoj konferencii. Samara*, 2017, pp. 954–957. (In Russ.)
 8. Tsvetov V.P. Using of interference for data protection in the radio channel. *Informacionnye tekhnologii i nanotekhnologii (ITNT-2020): materialy VI Mezhdunarodnoj konferencii. Samara*, 2020, pp. 255–260. (In Russ.)
 9. Tsvetov V.P. Wireless channel noises and data protection. *CEUR Workshop Proceedings*, 2020, vol.2667, pp. 234–237.
 10. Bakulin M.G. *OFDM technology: Textbook for Universities*. Moscow: Goryachaya liniya - Telekom, 2015, 360 p.

Received 12.10.2023

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 621.372.552

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО КРИПТОГРАФИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ СООБЩЕНИЯ НА ЕГО ОБНАРУЖИВАЕМОСТЬ В СТЕГАНОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Шамшаев М.Ю., Шакурский М.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: maxsham2000@mail.ru, m.shakurskiy@gmail.com

Классическая задача стеганографии заключается в маскировке важного сообщения в покрывающем объекте, не представляющем интерес для злоумышленника. При этом внимание уделяется защите от обнаружения самого факта встраивания сообщения, так как в случае подозрения злоумышленником факта наличия скрытого сообщения в передаваемом информационном объекте злоумышленник может разрушить сообщение. Внимание же устойчивости к прочтению в стеганографии не уделяется, так как считается, что этот вопрос решается посредством предварительного криптографического шифрования сообщения. Однако, такое шифрование влияет на статистические параметры сообщения, что играет немаловажную роль при формировании стеганографической системы. Статья посвящена анализу влияния криптографического кодирования на потенциальную обнаруживаемость сообщения после стеганографической маскировки. Приводятся результаты исследования влияния криптографического кодирования на распределение значений передаваемой информации при использовании шифра «Кузнечик».

Ключевые слова: стеганография, криптография, криптографическое кодирование, распределение значений

Введение

В настоящее время вопрос безопасности передачи информации является одним из самых актуальных в области информационных технологий. Это связано как с переходом многих сфер человеческих и корпоративных взаимоотношений в области электронных систем передачи данных, так и с растущим уровнем киберпреступности.

Очевидно, что системы защиты информации находятся в положении «отстающего», так как преступники постоянно находят новые пути обмана. С другой стороны, внедрение новых систем безопасности сковано бюрократическим аппаратом в организациях. Тем не менее, постоянное развитие систем защиты информации значительно осложняет работу злоумышленников.