

18. *Lebedev O.B.* Modeli adaptivnogo povedeniya murav'inoi kolonii v zadachakh projektirovaniya [Models of adaptive behavior of an ant colony in design tasks]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2013, 199 p.
19. *Raidl G.R.* A Unified view on hybrid Metaheuristics, *Lecture Notes In Computer Science*. Springer, 2006, pp. 1-12.
20. *Cong J., Romesis M., Xie M.* Optimality, scalability and stability study of partitioning and placement algorithms, *Proc. of the International Symposium on Physical Design*, 2003, pp. 88-94.

Лебедев Борис Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: lebedev.b.k@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 89282897933; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; д.т.н.; профессор.

Лебедев Олег Борисович – МИРЭА – Российский технологический университет; e-mail: lebedev.ob@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89085135512; кафедра информатики; д.т.н.; профессор.

Ганзжур Марина Александровна – Донской государственный технический университет; e-mail: mganzhur@yandex.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: 89081819111; кафедра вычислительных систем и информационной безопасности; старший преподаватель.

Бесхмельнов Максим Игоревич – МИРЭА – Российский технологический университет; e-mail: m_beskhmelnov@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89252622177; кафедра информатики; преподаватель.

Lebedev Boris Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: lebedev.b.k@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79282897933; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; dr. of eng. sc.; professor.

Lebedev Oleg Borisovich – MIREA – Russian University of Technology; e-mail: lebedev.ob@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79085135512; the Department of Computer Science; dr. of eng. sc.; professor.

Ganzhur Marina Aleksandrovna – Don State Technical University; e-mail: mganzhur@yandex.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79081819111; the Department of Computing Systems and Information; security senior lecturer.

Beskhmelnov Maxim Igorevich – MIREA – Russian University of Technology; e-mail: m_beskhmelnov@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79252622177; the Department of Computer Science; teacher.

УДК 519.612

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-22-37

Д.А. Береза, Л.А. Гладков, Н.В. Гладкова

РАЗРАБОТКА АГЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ БОЛЬШОЙ РАЗМЕРНОСТИ

Решение систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) является одной из важнейших фундаментальных задач при разработке нового поколения систем проектирования в различных областях науки и техники. Актуальность данного исследования обусловлена ростом объема данных и усложнением задач. Традиционные методы решения СЛАУ, такие как метод Гаусса, метод прогонки, итерационные методы (метод Якоби, метод Зейделя и т.д.), хорошо зарекомендовали себя при работе с относительно небольшими системами. Однако при решении СЛАУ большой размерности данные методы недостаточно эффективны из-за высоких вычислительных затрат и требований к памяти. Одним из перспективных подходов к решению задач высокой сложности является использование агентно-ориентированных систем. Агентно-ориентированные системы предлагают новый способ организации вычислительных процессов, основанный на взаимодействии независимых агентов, каждый из которых выполняет определенную часть задачи. Такой подход позволяет более гибко распределять вычислительные ресурсы и эффективно решать сложные задачи в условиях больших данных. Представлена методика решения уравнений, описывающих математическую модель схемы, с учетом оптимизации соотношения между точностью расчетов и временем их выполнения. В данной работе предлагается агентно-ориентированный алгоритм для решения систем линейных алгебраических уравнений большой размерности. В ходе разработки данного алгоритма был проведен анализ существующих методов и алгоритмов решения СЛАУ, выявлены их преимущества и не-

достатки. Была разработана агентно-ориентированная архитектура для решения СЛАУ большой размерности, предложена организация взаимодействия агентов и механизмы распределения задач между ними. Была выполнена программная реализация разработанного алгоритма. Для оценки эффективности предложенного подхода было проведено его тестирование на ряде тестовых задач. Также была выполнена оценка производительности и масштабируемости разработанного алгоритма, сравнение его с традиционными методами решения СЛАУ.

Автоматизация проектирования; системы линейных алгебраических уравнений; многоагентные системы; эволюционное моделирование; биоинспирированные алгоритмы; сервисно-ориентированная архитектура.

D.A. Bereza, L.A. Gladkov, N.V. Gladkova

DEVELOPMENT OF AN AGENT-BASED ALGORITHM FOR SOLVING SYSTEMS OF LINEAR ALGEBRAIC EQUATIONS OF LARGE DIMENSION

Solving systems of linear algebraic equations (SLAE) is one of the most important fundamental tasks in the development of a new generation of design systems in various fields of science and technology. The relevance of this study is due to the growing volume of data and the increasing complexity of tasks. Traditional methods for solving of SLAE, such as the Gauss method, the run-through method, iterative methods (Jacobi method, Seidel method, etc.), have proven themselves well when working with relatively small systems. However, when solving large-dimensional of SLAE, these methods are not efficient enough due to high computational costs and memory requirements. One of the promising approaches to solving problems of high complexity is the use of agent-based systems. Agent-based systems offer a new way of organizing computing processes based on the interaction of independent agents, each of whom performs a specific part of the task. This approach allows for more flexible allocation of computing resources and efficient solution of complex tasks in a big data environment. A method for solving equations describing a mathematical model of a circuit is presented, taking into account the optimization of the ratio between the accuracy of calculations and the time of their execution. In this paper, we propose an agent-based algorithm for solving systems of linear algebraic equations of large dimension. During the development of this algorithm, an analysis of existing methods and algorithms for solving of SLAE was carried out, their advantages and disadvantages were identified. An agent-oriented architecture was developed to solve large-scale of SLAE, the organization of agent interaction and mechanisms for distributing tasks between them were proposed. A software implementation of the developed algorithm was performed. To evaluate the effectiveness of the proposed approach, it was tested on a number of test tasks. The performance and scalability of the developed algorithm were also evaluated, and it was compared with traditional methods for solving of SLAE.

Design automation; systems of linear algebraic equations; multi-agent systems; evolutionary modeling; bioinspired algorithms; service-oriented architecture.

Введение. Актуальность данного исследования обусловлена возросшей потребностью в эффективных методах решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Решение СЛАУ является одной из важнейших фундаментальных задач при разработке нового поколения систем проектирования в различных областях науки и техники. СЛАУ находят применение в таких сферах, как вычислительная математика, физика, инженерные науки, экономика и т.д. С ростом объема данных и усложнением задач возникает необходимость в разработке эффективных методов и алгоритмов для решения больших СЛАУ, характеризующихся высокой размерностью и сложностью.

В настоящее время совершается переход от традиционных САПР к новому поколению систем проектирования [1]. Новые методы и программные приложения позволяют успешно решать многие задачи, которые ранее невозможно было автоматизировать. Перед специалистами стоит задача разработки фундаментальных принципов построения систем проектирования нового поколения. Традиционные методы решения СЛАУ, такие как метод Гаусса, метод прогонки, итерационные методы (метод Якоби, метод Зейделя и т.д.), хорошо зарекомендовали себя при работе с относительно небольшими системами. Однако при решении больших СЛАУ данные методы могут быть недостаточно эффективны из-за высоких вычислительных затрат и требований к памяти. В связи с этим, в последние годы возрос интерес к разработке параллельных и распределенных алгоритмов, способных эффективно использовать современные вычислительные ресурсы, включая многопроцессорные системы и вычислительные кластеры.

Одним из перспективных подходов к решению задач высокой сложности является использование агентно-ориентированных систем. Агентно-ориентированные системы предлагают новый способ организации вычислительных процессов, основанный на взаимодействии независимых агентов, каждый из которых выполняет определенную часть задачи. Такой подход позволяет более гибко распределять вычислительные ресурсы и эффективно решать сложные задачи в условиях больших данных.

Еще одним перспективным направлением является использование методов эволюционного моделирования для повышения эффективности современных систем проектирования [2–5].

В данной работе предлагается подход к решению задачи решения СЛАУ большой размерности, основанный на использовании агентно-ориентированного подхода. Для решения поставленной задачи необходимо разработать агентно-ориентированную архитектуру для организации взаимодействия агентов, а также механизм распределения задач между ними. На основе предлагаемого подхода предлагается разработать модифицированный алгоритм решения СЛАУ большой размерности и выполнить его программную реализацию. Разработка агентно-ориентированного алгоритма позволит значительно повысить эффективность и скорость решения таких задач, открывая новые возможности для исследований и практических применений.

Постановка задачи. Проектирование системы автоматизированного проектирования (САПР) – это целостный комплекс программных средств, которые синхронизированы и работают в унисон на различных этапах процесса разработки: начиная с момента получения технического задания и заканчивая созданием рабочих фотошаблонов или промежуточных макетов [1].

На рис. 1 представлена упрощенная схема проекта САПР, демонстрирующая взаимосвязь между его этапами.

1. *Формальное описание проекта (Designentry)* – процесс разработки СБИС начинается с создания проекта, который может быть выполнен на языке моделирования аппаратных устройств (например, VerilogHDL или VHDL) или на основе готовой принципиальной схемы.

2. *Логический синтез (Logic synthesis)* – этап, на котором создается список логических элементов и их соединений (netlist).

3. *Разбиение на модули (System partitioning)* – сложные системы делятся на модули, которые затем можно разрабатывать как самостоятельные СБИС или как компоненты общей СБИС.

4. *Логическое моделирование СБИС (Prelayout simulation)* – проверка всех функциональных параметров и характеристик СБИС на логическом уровне. В случае некорректных результатов моделирования, предыдущие этапы 1, 2, 3 повторяются до получения удовлетворительного результата.

5. *Топологическое размещение (Floorplanning)* – расположение модулей и блоков, созданных на основе списка логических элементов и их соединений, на поверхности кристалла СБИС.

6. *Размещение базовых элементов внутри блоков (Placement)* – процедура выбора мест для размещения стандартных элементов библиотеки (Standard Cell) в структурах.

7. *Трассирование и разводка межсоединений (Routing)* – процесс соединения стандартных элементов, модулей и конструкций между собой.

8. *Расчет паразитных характеристик (Extraction)* – вычисление паразитных ёмкостей, сопротивлений и индуктивностей, которые возникают в результате разработанной схемы.

9. *Посттопологическое проектирование (Postlayout simulation)* – анализ функционирования будущей интегральной схемы с учетом паразитных эффектов. В случае, если параметры частоты и нагрузки не соответствуют требованиям, этапы 5-9 повторяются до достижения необходимых характеристик [6–8].

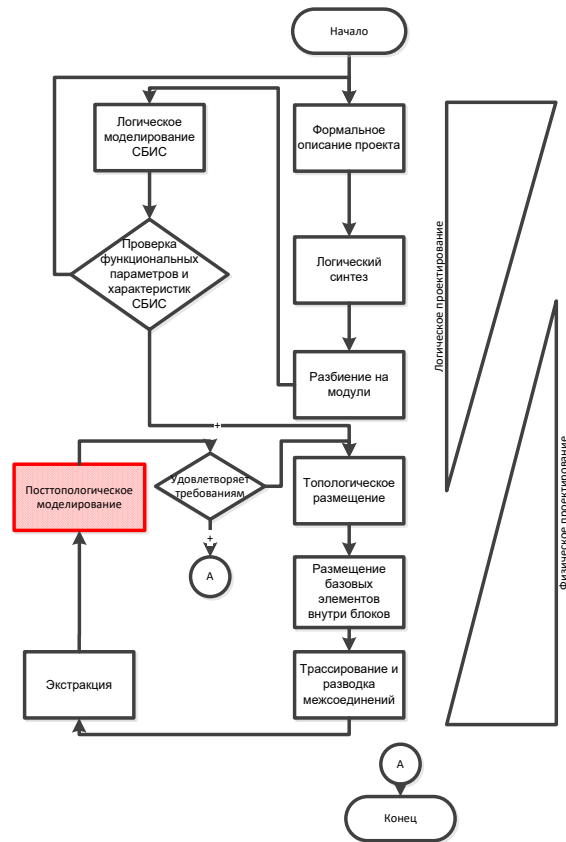


Рис. 1. Укрупненный маршрут проектирования СБИС

Ускорение процесса создания СБИС достигается благодаря использованию унифицированных наборов компонентов, универсальных логических элементов (ЛЭ) или структур, стандартизированных элементов; размещением внутренних связей в промежутках между блоками; а также применением параметризованных стандартных элементов. Функциональность СБИС должна обеспечиваться при минимальном количестве элементов, включая транзисторы, резисторы, ЛЭ, триггеры, регистры и прочее, с использованием строгой структуры. Современные системы автоматизированного проектирования СБИС способны интегрировать программные и аппаратные элементы, в том числе процессорные ядра, программируемую логику, память, интерфейсы, средства внутреннего тестирования, аналоговые и СВЧ компоненты.

В соответствии с матрично-топологической интерпретацией норм теории электрических схем, математическая модель электрической схемы сводится к двум основным категориям:

$$x' = f(x, t) = 0, \quad x(0) = x_0,$$

$$F(x', x, t) = 0, \quad x(0) = x_0,$$

где x – вектор переменных состояния (в качестве которых могут быть выбраны напряжения и/или токи ветвей, напряжения и/или токи реактивных элементов, контурные токи или узловые потенциалы) размерности N ; f – вектор правых частей системы дифференциальных уравнений размерности N , непрерывный вместе со своими производными по времени; t – время; F – вектор системы алгебро-дифференциальных уравнений неявного вида порядка N , x_0 – вектор начальных значений переменных состояния.

После этапа определения паразитных компонентов в RLC-цепи, модель электрической цепи представляется в виде системы линейных дифференциальных уравнений. В современных программах для моделирования электрических схем наиболее широкое распространение нашли методы решения систем дифференциальных уравнений, основанные на неявном подходе и использовании прогнозирования и коррекции. Матрица уравнений, которая решается на каждом этапе интегрирования или итерации, обычно включает в себя сотни или даже тысячи уравнений и характеризуется высокой разреженностью, что означает, что количество ненулевых элементов в каждой строке матрицы A зависит от специфики схемы и метода её математического описания, при этом плотность заполнения уменьшается с увеличением размерности схемы.

Одна из ключевых сложностей, с которой сталкиваются при работе с системой линейных алгебраических уравнений, заключается в том, что даже незначительные корректировки в правой части такой системы могут привести к значительным (превышающим допустимые рамки) изменениям в итоговом решении.

Структура системы линейных алгебраических уравнений представлена следующим образом:

$$Ax = b,$$

где x и b – векторы, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$, $b = (b_1, b_2, \dots, b_n) \in R^n$.

Система линейных алгебраических уравнений может иметь единственное решение, множество решений бесконечного количества или вовсе не иметь решения. Системы с плохой обусловленностью и вырожденные системы могут казаться идентичными при ограничении точности до определенного уровня.

Псевдорешением системы называют вектор $\tilde{x}$, минимизирующий невязку $\|Ax - b\|$ на всем пространстве R^n . Система может иметь не одно псевдорешение. Пусть F_A есть совокупность всех ее псевдорешений и x_1 – некоторый фиксированный вектор из R^n , определяемый обычно постановкой задачи [9-11].

Нормальным относительно вектора x_1 решением системы будем называть псевдорешение x_0 с минимальной нормой $\|x - x_1\|$, т.е. такое, что $\|x^0 - x_1\| = \inf_{x \in F_A} \|x - x_1\|$ [12-15].

В дальнейшем для простоты записи будем x_1 и нормальное относительно вектора $x_1 = 0$ решение называть просто нормальным решением. Для систем типа, описанной в уравнении, существует и единственное нормальное решение, что указывает на нестабильность процесса поиска такого решения в рамках данной системы, как отмечается в работах [10, 12].

Тогда задача решения СЛАУ большой размерности с плохо обусловленной матрицей, сводится к нахождению вектора x , минимизирующего следующий функционал:

$$\|Ax - b\| + 0.1\|x\| \rightarrow \min.$$

Основной целью является повышение эффективности соотношения точности решения к времени его выполнения. С ростом сложности проектов, уровня интеграции и сокращением стандартов в проектировании произошло значительное усложнение процесса проверки корректности. Классические подходы к разработке интегральных схем, используемые методы и привычные инструменты для автоматизированного проектирования не в состоянии гарантировать приемлемые временные рамки для проектирования схем на наноуровне.

Увеличение производительности в решении математических моделей может нанести значительный вклад в повышение эффективности верификационного процесса и всего этапа моделирования после настройки схемы.

В начальной стадии схемотехнического проектирования ключевым аспектом является создание модели, которая точно отображает как статические, так и динамические характеристики работы схемы. Это включает в себя решение математических уравнений, связанных с конкретными схемотехническими решениями. На рис. 2 перечислены различные численные методы, применяемые в программном обеспечении САПР СБИС для решения этих уравнений.

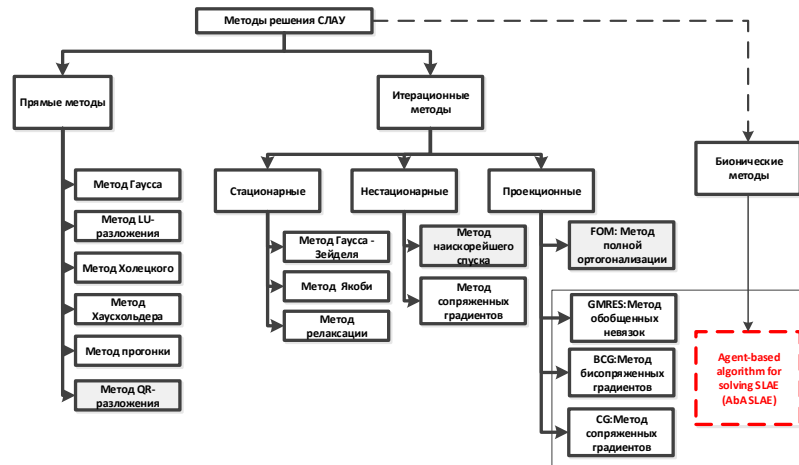


Рис. 2. Методы решения СЛАУ

В конечном счете, для анализа как статических, так и динамических условий, необходимо найти решение систем линейных алгебраических уравнений. Основной фактор, влияющий на потребление ресурсов компьютера для обработки этих задач, это эффективность используемых алгоритмов.

В общем случае, методы для решения СЛАУ разделяют на точные (прямые) методы (вычисления всегда с точностью до знака) и приближенные (итерационные) методы (вычисления приближены к точным, в теории).

Поскольку каждая формула коэффициентов выводится из предыдущей, то в случае появления ошибки она начнет постепенно накапливаться и, в результате, может достичь критического значения.

На данный момент наиболее эффективными для решения СЛАУ большой размерности считаются проекционные методы, основанные на подпространстве Крылова. Пусть существуют некоторые два пространства $K \subset R^n$ и $L \subset R^n$. Тогда необходимо найти такой вектор $x \in K$, который будет обеспечивать решение исходной системы, «оптимальное относительно подпространства L », чтобы было выполнено условие Петрова-Галеркина:

$$\forall l \in L: (Ax, l) = (b, l).$$

Данную постановку задачи будем называть задачей проектирования вектора x на подпространство K ортогонально к подпространству L .

Выберем в качестве пространства K пространство Крылова $K_m(r_0, A)$, в качестве L – пространство $K_m(\check{r}_0, A^T)$, где вектор $\check{r}_0$ удовлетворяет условию $(\check{r}_0, r_0) \neq 0$. В данном методе используется процедура Ланцоша. Решение задается формулой:

$$x_m = x_0 + \beta V_m T_m^{-1} e_1,$$

где $\beta = (\check{r}_0, r_0)$.

Основное достоинство метода – способность решать СЛАУ большой размерности [10, 12–14]. А главным недостатком данного метода и всех основанных на нем методов является невозможность преодолевать выявленные в области определения уравнений овраги ландшафта.

Предположим, что матрица системы линейных алгебраических уравнений и вектор правых частей заданы неточно и вместо исходной системы:

$$Ax = b, \quad (1)$$

где A – матрица с элементами $a_{ij} \in \mathbb{R}$, $A = \{a_{ij}\}$, x – искомый вектор с координатами $x_j \in \mathbb{R}$, $x = \{x_j\}$, b – известный вектор с координатами $b_j \in \mathbb{R}$, $x = \{b_j\}$, $i, j = 1, 2, \dots, n$; n – размер СЛАУ.

В действительности решается другая система:

$$A_1 x = b_1, \text{ где } A_1 = A + \Delta, b_1 = b + \eta. \quad (2)$$

Обозначим решения (1) и (2) через x и x_1 .

Проведем оценку погрешности решения $z = x - x_1$.

Подставляем выражения A_1 , b_1 , x_1 в (2)

$$(A + \Delta)(x + z) = b + \eta.$$

Вычитая (1), получим

$$Az + \Delta x + \Delta z = \eta,$$

$$z = A^{-1}(\eta - \Delta x - \Delta z),$$

$$z = A^{-1}(\eta - \Delta x - \Delta z),$$

$$\|z\| \leq \|A^{-1}\|(\|\eta\| + \|\Delta\|\|x\| + \|\Delta\|\|z\|).$$

Если малы $\|\Delta\|$ и $\|\eta\|$, то следует ожидать и малости $\|z\|$. В результате чего окажется, что слагаемое Δz будет иметь более высокий порядок малости.

Оценка погрешности в таком случае будет выглядеть следующим образом:

$$\|z\| \leq \frac{\|A^{-1}\|(\|\eta\| + \|\Delta\|\|x\|)}{1 - \|A^{-1}\|\|\Delta\|}. \quad (3)$$

Часто случается, что погрешность правой части больше погрешности самой системы, а ниже рассмотрим случай, когда задача поставлена точно. Тогда, полагая $\Delta = 0$ в (3), имеем

$$\|z\| \leq \|A^{-1}\|\|\eta\|. \quad (4)$$

В целях точной оценки взаимосвязи между ошибками в правой части и искомого ответа используется концепция устойчивости матрицы системы. Оптимальнее всего описать особенности системы через взаимодействие между относительными ошибками в правой части и искомым ответе.

Для расчета относительной ошибки решения можно воспользоваться формулой (4):

$$\frac{\|z\|}{\|x\|} \leq \|A^{-1}\| \frac{\|\eta\|}{\|x\|}. \quad (5)$$

$$Ax = b, \text{ отсюда,}$$

подставляя оценку для $\|x\|$ в (5), имеем

$$\frac{\|z\|}{\|x\|} \leq \|A^{-1}\|\|A\| \frac{\|\eta\|}{\|b\|}. \quad (6)$$

Величина $\|A^{-1}\|\|A\| = \text{cond}A$ является мерой обусловленности матрицы.

В случае, когда показатель обусловленности матрицы достигает значительных величин, то уровень относительной ошибки в вычислении решения может возрасти до высоких значений, даже при неизменной относительной погрешности в правой части системы. Обусловленность матрицы тесно связана с выбором нормы для ее измерения. Существует прямая зависимость между любым выбранным критерием нормирования матрицы и ее наибольшим по величине собственным числом: $\|A\| \geq \max |\lambda_A|$. Собственные значения матрицы A и A^{-1} взаимно обратны; поэтому

$$\|A^{-1}\| \geq \max \frac{1}{|\lambda_A|} = \frac{1}{\min |\lambda_A|}.$$

Таким образом,

$$\text{cond}A \geq \frac{\max|\lambda_A|}{\min|\lambda_A|} \geq 1.$$

Если число обусловленности $\text{cond}A = \|A^{-1}\| \|A\|$ мало, то система называется хорошо обусловленной, и плохо обусловленной, когда оно высоко. Размер, который считается критическим для числа обусловленности, определяется точностью вычислительного устройства (количество цифр t , используемых для записи мантиссы числа). Если вычисления производятся на компьютере с точностью t (согласно погрешности входных данных, равным $O(2^{-t})$), то при обусловленности, равной $O(2^{t/2})$, невозможно обеспечить точность выше $O(2^{-t/2})$.

Анализ выражения $\text{cond}A = \frac{\max|\lambda_A|}{\min|\lambda_A|}$ показывает, что большие значения обусловленности матрицы A могут возникать либо при малых значениях $\min|\lambda_A|$, либо при больших значениях $\max|\lambda_A|$ [10, 14].

Математическое описание электрической цепи, представленное в виде набора дифференциальных уравнений, обычно сводится к моделированию цепей RLC или RC. Эти модели представляют собой системы линейных дифференциальных уравнений. В современных программных комплексах для моделирования электрических схем наиболее популярны методы, основанные на неявном подходе и технике прогноза и коррекции. В рамках таких методов на каждом этапе выполняется решение системы уравнений, которые могут быть как линейными, так и нелинейными. Для решения нелинейных систем уравнений часто применяется метод Ньютона, который обеспечивает наибольшую скорость сходимости итерационного процесса. Это означает, что на каждом шаге исходная система нелинейных алгебраических уравнений преобразуется в систему линейных уравнений, что упрощает решение задачи.

Процесс решения уравнений, составляющих математическую модель СБИС, включает следующие этапы:

Первый этап – это разбор уравнений, которые отражают структуру математической модели электрической системы. При этом производится классификация систем уравнений по их типу: системы дифференциальных уравнений, системы нелинейных уравнений и системы линейных алгебраических уравнений.

На втором этапе проекта мы приступаем к вычислениям:

- ♦ в случае, если математическая модель описывается линейными дифференциальными уравнениями, применяем модифицированный неявный метод Рунге-Кутты. На каждом этапе этого метода решаем систему линейных алгебраических уравнений с помощью специализированного алгоритма. Для более сложных случаев, где на каждом этапе интегрирования возникает система нелинейных уравнений, используем модифицированный метод Ньютона, который также включает в себя решение системы линейных алгебраических уравнений на каждой итерации;

- ♦ если уравнения математической модели представлены в виде системы нелинейных уравнений, применяем разработанный модифицированный метод, основанный на методе Ньютона. На каждой итерации этого метода решаем систему линейных алгебраических уравнений с помощью разработанного специализированного алгоритма;

- ♦ в случае, если математическая модель представляет собой систему линейных алгебраических уравнений, решаем ее с помощью модифицированного метода решения систем линейных алгебраических уравнений.

На третьем этапе анализируем полученные результаты.

На рис. 3 представлена предложенная модифицированная методика решения уравнений ММ СБИС. Штриховкой отмечены модифицированные блоки решения систем линейных алгебраических уравнений.

Эволюционный алгоритм решения уравнений математических моделей СБИС.

В предлагаемом подходе к решению систем нелинейных уравнений каждая итерация начинается с преобразования исходной системы в линейный вид. Это обстоятельство позволяет переформулировать задачу как решение системы линейных алгебраических уравнений с применением модифицированного метода.

$$Ax = b,$$

где A – матрица с элементами $a_{ij} \in R, A = \{a_{ij}\}$, x – искомый вектор с координатами $x_j \in R, x = \{x_j\}$, b – известный вектор с координатами $b_j \in R, b = \{b_j\}, i, j = 1, 2 \dots, n$; n – размер СЛАУ.

В контексте генетического алгоритма хромосома является вектором x , который в ходе эволюции популяции подвергается процессу оптимизации [16].

Состав хромосомы, включающий в себя гены, которые определяют вектор неизвестных переменных x , а также дополнительные гены, необходимые для сбора данных о результативности работы операторов кроссинговера и мутации, представлен на рис. 4 [16].

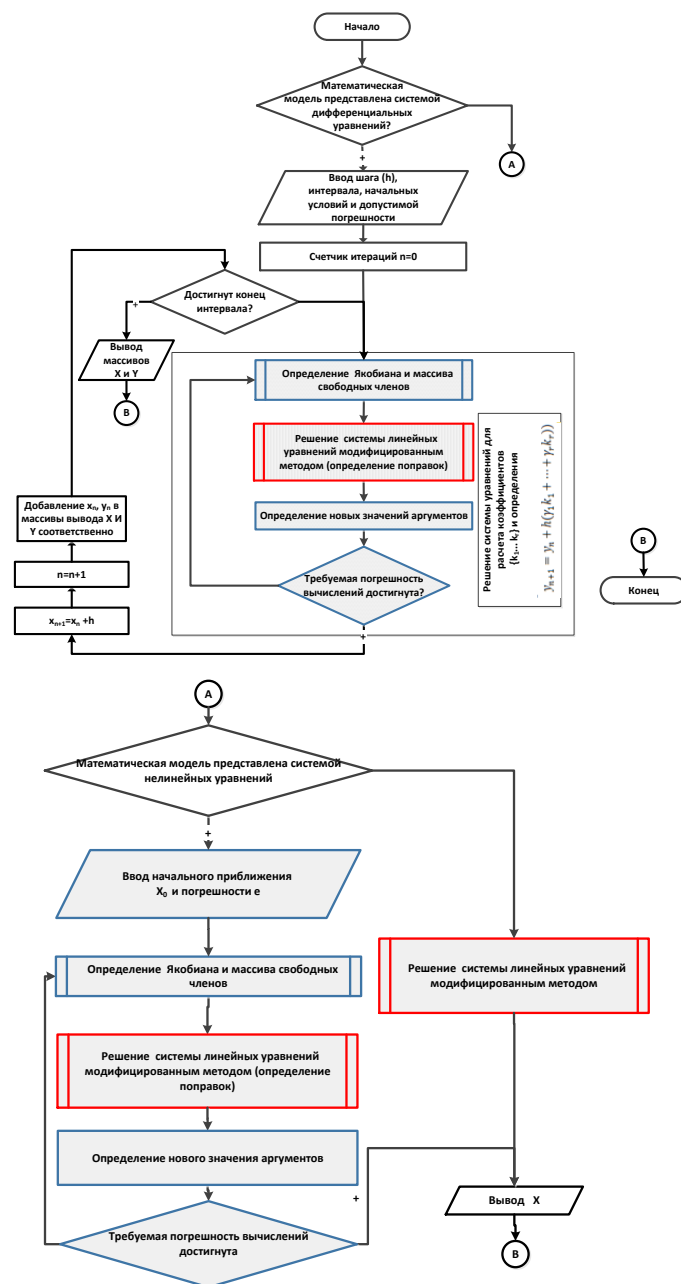


Рис. 3. Методика решения уравнений математической модели СБИС

Вектор X				Служебные гены	
X_1	X_2	...	X_n	S_k	S_m

Рис. 4. Схема хромосомы

Комплект генетических операторов был отобран так, чтобы позволять работать с числами с плавающей точкой. Информационные гены включают в себя детали о том, каким генетическим методом была создана хромосома. Этот данный критически важен для оценки результативности используемых генетических операций.

Значения служебного гена S_k (служебный ген для оператора кроссинговера):

1. Арифметический оператор кроссинговера.
2. Расширенный линейный кроссинговер.
3. Дискретный кроссинговер.
4. Двухточечный оператор кроссинговера.

Значения служебного гена S_m (служебный ген для оператора мутации):

1. Мутация с имитацией отжига.
2. Модифицированная равномерная мутация.
3. Гауссовская мутация.
4. Равномерная мутация.
5. Корректирующая мутация.
6. Мутация обобщенных минимальных невязок.
7. Мутация бисопряженных градиентов.

Разработка агентно-ориентированного алгоритма решения СЛАУ большой размерности. Для повышения эффективности решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) был предложен комбинированный метод на основе интеграции эволюционных методов отбора и методов оптимизации с использованием теории Парето.

Алгоритм функционирует на основе разделения исходной СЛАУ на k -сегментов, каждый из которых включает m -уравнений:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \quad \text{Блок 1}$$

.....

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + a_{m3}x_3 + \dots + a_{mn}x_n = b_m$$

$$a_{m+1,1}x_1 + a_{m+1,2}x_2 + a_{m+1,3}x_3 + \dots + a_{m+1,n}x_n = b_{m+1} \quad \text{Блок 2}$$

.....

$$a_{2^*m,1}x_1 + a_{2^*m,2}x_2 + a_{2^*m,3}x_3 + \dots + a_{2^*m,n}x_n = b_{2^*m},$$

.....

$$a_{k^*m,1}x_1 + a_{k^*m,2}x_2 + a_{k^*m,3}x_3 + \dots + a_{k^*m,n}x_n = b_{k^*m}. \text{ Блок } k$$

.....

$$a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + a_{n3}x_3 + \dots + a_{nn}x_n = b_n.$$

Основная идея состоит в применении оптимизирующей функции, основанной на идеальных нечетко-решениях, расположенных на пределе Парето. Поиск решения для системы линейных алгебраических уравнений с матрицей, характеризующейся невысокой степенью обусловленности, при помощи усовершенствованного подхода, сводится к определению вектора x , который минимизирует данный функционал:

$$F = \|Ax - b\| + 0,1\|x\| + Fp \rightarrow \min.$$

где $\|Ax - b\|$ – евклидова норма невязки; $\|x\|$ – евклидова норма вектора x ; F_p – значение эффективности, полученное по принципу Парето.

При решении системы линейных алгебраических уравнений всегда существует вероятность появления нескольких решений с минимальной длиной вектора x . В таких случаях предпочтение отдается решениям, которые минимизируют ошибку для всех блоков, находящихся на границе Парето. Исходя из этого для решения соответствующих систем линейных алгебраических уравнений будет использован модифицированный метод, который был специально адаптирован для работы с системами большой размерности.

Система нелинейных уравнений выглядит следующим образом:

$$F(\mathbf{x}) = 0,$$

где $\mathbf{x}$ – вектор искомых токов и/или напряжений $x_j \in R, \mathbf{x} = \{x_j\}$,

Введем следующие обозначения:

ε – допустимая погрешность, $\mathbf{A}$ – матрица с элементами $a_{ij} \in R, \mathbf{A} = \{a_{ij}\}$, матрица Якоби, $\mathbf{b}$ – известный вектор с координатами $b_j \in R, i, j = 1, 2, \dots, n; n$ – количество уравнений; $\Delta \mathbf{x}$ – вектор решений системы линейных уравнений $\Delta x_j \in R, \Delta \mathbf{x} = \{\Delta x_j\}$.

Ниже (рис. 5) представлен псевдокод алгоритма вычислительного агента.

1. Φ_0 – вектор начального приближения решения;
2. $r_0 = b - A\Phi_0$;
3. $\bar{r}_0$ – произвольный вектор, такой, что $(\bar{r}_0, r_0) \neq 0$;
4. $\rho_0 = \alpha = \omega_0 = 1$;
5. $v_0 = p_0 = 0$;
6. для $k = 1, 2, 3, \dots$
7. $\rho_k = (\bar{r}_0, r_{k-1})$; $\beta = \left(\frac{\rho_k}{\rho_{k-1}}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega_{k-1}}\right)$;
8. $p_k = r_{k-1} + \beta(p_{k-1} - \omega_{k-1}v_{k-1})$;
9. определение вектора u из решения системы $Mu = p_k$;
10. $v_k = Au$;
11. $\alpha = \frac{\rho_k}{(\bar{r}_0, v)}$;
12. $s = r_{k-1} - \alpha v_k$;
13. определение вектора z из решения системы $Mz = s$;
14. $t = Az$;
15. $w_k = \begin{pmatrix} t, s \end{pmatrix}$;
16. $\Phi_k = \Phi_{k-1} + \alpha u + \omega_k z$;
17. если Φ_k достигло требуемой точности – выход из цикла;
18. $r_k = s - \omega_k t$;
19. конец цикла по k

Рис. 5. Обобщенный алгоритм вычислительного агента

На рис. 6 приведен обобщенный агентно-ориентированный алгоритм решения больших систем линейных уравнений (СЛАУ).

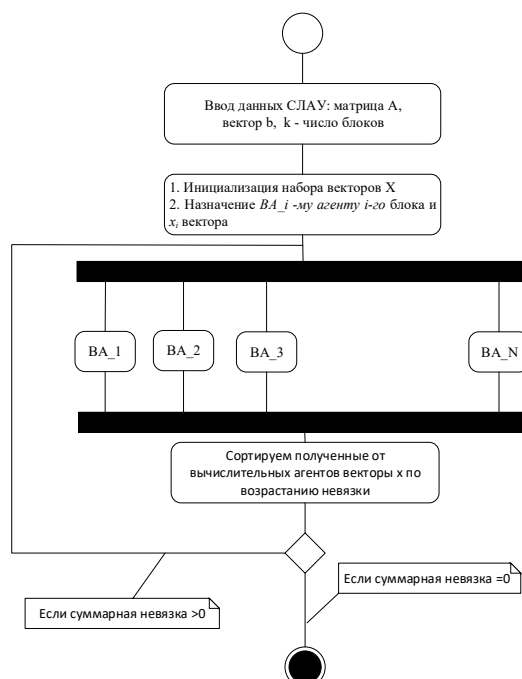


Рис. 6. Обобщенный агентно-ориентированный алгоритм решения больших систем линейных уравнений (СЛАУ)

Разработка многоуровневой мультиагентной архитектуры. Сервисно-ориентированная архитектура предполагает создание отдельных, независимых сервисов, каждый из которых реализует определенную бизнес-функцию, использует стандартизованные протоколы и интерфейсы для взаимодействия сервисов, а также управляет своим собственным состоянием и контекстом. Модульный подход позволяет легко заменять или повторно использовать компоненты, без изменения системы в целом, а также отслеживать их состояние, что аналогично принципу работы агентов в многоагентных системах (МАС). В МАС каждый агент также может быть рассмотрен как независимый модуль, выполняющий определенные задачи [16–18].

Программный агент представляет собой саморегулируемую систему, которая способна адаптироваться к окружающей среде, инициировать в ней изменения и, при необходимости, взаимодействовать с пользователем или другими агентами.

Применение агентов находит свое отражение в области моделирования; оптимизации и планирования; обеспечения автоматизации процессов и др. [19, 20].

На рис. 7. приведена структура эффективной многоагентной системы, способной к масштабированию.

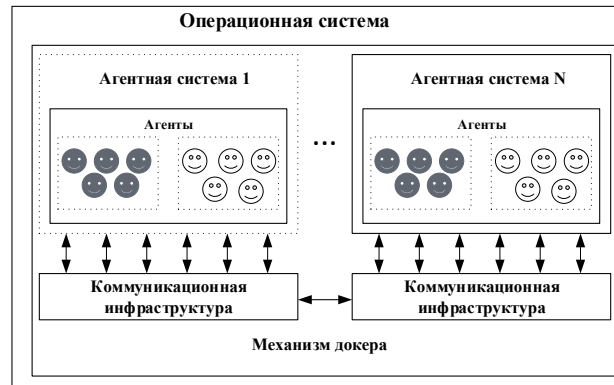


Рис. 7. Масштабируемая мультиагентная система

Результаты вычислительных экспериментов. Для тестирования разработанного алгоритма, основанного на агентных подходах, были проведены серии экспериментов на СЛАУ различных размеров, начиная от 100×100 и до 900×900 . Исходя из теоремы Бернулли, размер экспериментальной выборки определяется исходя из желаемой допустимой ошибки и доверительной вероятности, в соответствии с таблицами статистических распределений. Доверительная вероятность, также известная как "мера риска", представляет собой вероятность, на основе которой выводы сделаны. Чем выше эта вероятность, тем более надежной является вывод. Обычно принимается $P = 0,95$. Размер допустимой ошибки E определяется в зависимости от специфики исследуемого процесса, и в большинстве случаев устанавливается на уровне 0,05. Для выбранных значений допустимой ошибки и доверительной вероятности, количество наблюдений составляет 384. Однако, чтобы сократить время вычислений, было решено установить доверительную вероятность на уровне 0,9 и допустимую ошибку на уровне 0,1, что позволило уменьшить размер выборки до 50.

В ходе тестирования алгоритма, основанного на агентном подходе, были проведены серии экспериментов, каждая из которых включала 50 СЛАУ.

Результаты исследования, направленного на оценку временных характеристик разработанного алгоритма, представлены в табл. 1. В таблице указаны следующие параметры: в первой колонке «№ п/п серии» обозначен номер серии экспериментов, во второй колонке «Размер серии» указан объем экспериментов в каждой серии, в колонке «Размер СЛАУ» представлен объем системы линейных алгебраических уравнений. В колонке «Время решения (сек.)» указан средний показатель времени, затрачиваемого на решение задачи для каждой серии.

Таблица 1

Результаты экспериментов

№ п/п серии	Размер серии	Размер СЛАУ	Время решения (сек.)
1	50	500*500	2302
2	50	600*600	4264
3	50	700*700	4553
4	50	800*800	8123
5	50	900*900	12777

После проведения регрессионного анализа была получена зависимость времени решения задачи от размера СЛАУ:

$$y = 0,0313x^2 - 16,693x + 2744,9.$$

На рис. 8 представлен график, отражающий полученную взаимосвязь. Исходя из данного изображения, можно констатировать, что выявленная в результате регрессионного анализа зависимость соответствует экспериментально обнаруженной с высокой степенью точности, поскольку разброс регрессионной линии относительно экспериментальных данных незначителен.

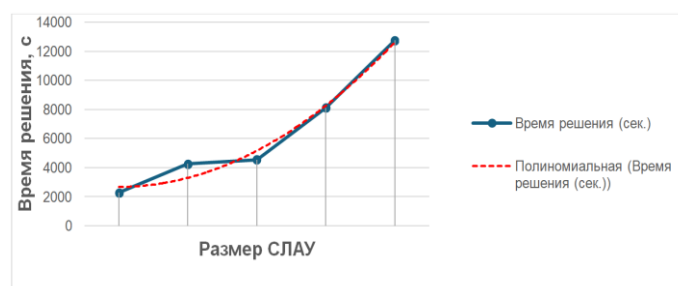


Рис. 8. Зависимость времени решения от размера СЛАУ

В ходе проведенных испытаний для агентно-ориентированного алгоритма AbA SLAE был выявлен полиномиальный характер зависимости времени выполнения задачи решения СЛАУ от её размерности, что нашло свое подтверждение в теоретических предположениях.

Заключение. Анализ экспериментальных результатов показывает, что метод, основанный на агентной модели, проявляет значительную эффективность при решении систем линейных уравнений. В отличие от других стратегий, данный подход не испытывает потери точности с ростом числа переменных. К тому же, время работы алгоритма растёт квадратично, что является его дополнительным достоинством.

В дальнейшем предполагается разработать гибридный эволюционный алгоритм решения СЛАУ, что позволит повысить эффективность его работы [23, 24].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Alpert Charles J., Mehta Dinesh P., Sapatnekar Sachin S.* Handbook of algorithms for physical design automation. – CRC Press, New York, USA, 2009.
2. *Гладков Л.А., Кравченко Ю.А., Курейчик В.В., Родзин С.И.* Интеллектуальные системы: модели и методы метаэвристической оптимизации: монография. – Чебоксары: Среда, 2024.
3. *Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М.* Генетические алгоритмы. – М.: Физматлит, 2011.
4. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. – М.: МГТУ им. Баумана, 2014.
5. *Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М., Сороколетов П.В.* Биоинспирированные методы в оптимизации. – М.: Физматлит, 2009.
6. *Cohon J.P., Karro J., Lienig J.* Evolutionary Algorithms for the Physical Design of VLSI Circuits. Advances in Evolutionary Computing: Theory and Applications / Ghosh, A., Tsutsui, S. (eds.). – Springer Verlag, London, 2003.

7. Гридин В.Н. Численно-аналитическое моделирование радиоэлектронных схем. – М.: Наука, 2008.
8. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. – СПб.: Лань, 2006.
9. Бойко А.Я., Безруков А.Е., Русаков А.С., Ткачев Д.Ф., Хапаев М.М. Новый алгоритм вычисления двумерных емкостей в задаче экстракции емкости // II Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем»: Сб. научных трудов / под общ. ред. А.Л. Стемпковского. – М.: ИПИМ РАН, 2006.
10. Потапов Ю. Технология экстракции паразитных параметров для моделирования межсоединений // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 6. – С. 22-26.
11. Баландин М.Ю., Шурина Э.П. Методы решения СЛАУ большой размерности. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000.
12. Рено Н.Н. Численные методы. – М.: КДУ, 2007.
13. Li R.-C., Ye Q. A Krylov subspace method for quadratic matrix polynomials with application to constrained least squares problems // SIAM J. Matrix Anal. Appl. – 2003. – 25. – P. 405-428.
14. Calvetti D, Reichel L, Shuibi A. Enriched Krylov subspace methods for ill-posed problems // Linear Algebra and its Applications. – 2003. – Vol. 362. – P. 257-273.
15. Calvetti D, Lewis B, Reichel L. On the regularizing properties of the GMRES method // Numerische Mathematik. – 2002. – Vol. 91. – P. 605-625.
16. Бегляров В.В., Берёза А.Н., Ляшов М.В. Бионический алгоритм решения систем линейных алгебраических уравнений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 12 (101). – С. 46-52.
17. Тарасов В.Б., Голубин А.В. Эволюционное проектирование: на границе между проектированием и самоорганизацией // Известия ТРТУ. – 2006. – № 8 (63). – С. 77-82.
18. Майоров И.В., Скобелев П.О. Модель динамики агентов потребностей и возможностей // Тр. XVII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 2015. – Самара: СНЦ РАН, 2015. – С. 79-87.
19. Скобелев П.О. Ситуационное управление и мультиагентные технологии: коллективный поиск согласованных решений в диалоге // Онтологии проектирования. – 2013. – № 2 (8). – С. 26-48.
20. Гридин В.Н., Дмитриевич Г.Д., Анисимов Д.А. Архитектура распределенных сервис-ориентированных систем автоматизированного проектирования // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 7 (156). – С. 51-58.
21. Мутра Р., Надареишвили И. Микросервисы. От архитектуры до релиза. – СПб.: Питер, 2023.
22. Baqais A.A.B. A Multi-view Comparison of Various Metaheuristic and Soft Computing Algorithms // I.J. Mathematical Sciences and Computing. – 2017. – 1.3 (4). – P. 8-19.
23. Gladkov L.A., Gladkova N.V., Gusev N.Y., Semushina N.S. Integrated approach to the solution of computer-aided design problems // Proceedings of the 4th International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI'19). Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer, Cham, 2020. – Vol. 1156. – P. 465-476.
24. Gladkov L.A., Gladkova N.V., Leiba S.N., Strakhov N.E. Development and research of the hybrid approach to the solution of optimization design problems // Advances in Intelligent Systems and Computing, V. 875. International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry IITI'18. – Springer Nature Switzerland AG, 2019. – Vol. 2. – P. 246-257.

REFERENCES

1. Alpert Charles J., Mehta Dinesh P., Sapatnekar Sachin S. Handbook of algorithms for physical design automation. CRC Press, New York, USA, 2009.
2. Gladkov L.A., Kravchenko Yu.A., Kureychik V.V., Rodzin S.I. Intel'lektual'nye sistemy: modeli i metody metaevristicheskoy optimizatsii: monografiya [Intelligent systems: models and methods of metaheuristic optimization: monograph]. Cheboksary: Sreda, 2024.
3. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]. Moscow: Fizmatlit, 2011.
4. Karpenko A.P. Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy [Modern algorithms of search engine optimization. Algorithms inspired by nature]. Moscow: MGTU im. Baumana, 2014.
5. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M., Sorokoletov P.V. Bioinspirirovannyye metody v optimizatsii [Bioinspired methods in optimization]. Moscow: Fizmatlit, 2009.
6. Cohoon J.P., Karro J., Lienig J. Evolutionary Algorithms for the Physical Design of VLSI Circuits. Advances in Evolutionary Computing: Theory and Applications, Ghosh, A., Tsutsui, S. (eds.). Springer Verlag, London, 2003.
7. Gridin V.N. Chislennno-analiticheskoe modelirovanie radioelektronnykh skhem [Numerical and analytical modeling of electronic circuits]. Moscow: Nauka, 2008.

8. *Atabekov G.I.* Osnovy teorii tsepey [Fundamentals of circuit theory]. Saint Petersburg: Lan', 2006.
9. *Boyko A.Ya., Bezrukov A.E., Rusakov A.S., Tkachev D.F., Khapaev M.M.* Novyy algoritm vychisleniya dvumernykh emkostey v zadache ekstraktsii emkosti [New algorithm for calculating two-dimensional capacitances in the problem of capacitance extraction], *II Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Problemy razrabotki perspektivnykh mikroelektronnykh sistem»*: Sb. nauchnykh trudov [II All-Russian scientific and technical conference "Problems of developing promising microelectronic systems": Collection of scientific papers], ed. by A.L. Stempkovskogo. Moscow: IPPM RAN, 2006.
10. *Potapov Yu.* Tekhnologiya ekstraktsii parazitnykh parametrov dlya modelirovaniya mezhsoedineniy [Technology of extraction of parasitic parameters for modeling interconnections], *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti* [Technologies in the electronic industry], 2007, No. 6, pp. 22-26.
11. *Balandin M.Yu., Shurina E.P.* Metody resheniya SLAU bol'shoy razmernosti [Methods for solving high-dimensional SLAEs]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2000.
12. *Reno N.N.* Chislennyye metody [Numerical methods]. Moscow: KDU, 2007.
13. *Li R.-C., Ye Q.* A Krylov subspace method for quadratic matrix polynomials with application to constrained least squares problems, *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, 2003, 25, pp. 405-428.
14. *Calvetti D., Reichel L., Shuibi A.* Enriched Krylov subspace methods for ill-posed problems, *Linear Algebra and its Applications*, 2003, Vol. 362, pp. 257-273.
15. *Calvetti D., Lewis B., Reichel L.* On the regularizing properties of the GMRES method, *Numerische Mathematik*, 2002, Vol. 91, pp. 605-625.
16. *Beglyarov V.V., Bereza A.N., Lyashov M.V.* Bionicheskiy algoritm resheniya sistem lineynykh algebraycheskikh uravneniy [Bionic algorithm for solving systems of linear algebraic equations], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 12 (101), pp. 46-52.
17. *Tarasov V.B., Golubin A.V.* Evolyutsionnoe proektirovaniye: na granitse mezhdu proektirovaniem i samoorganizatsiyey [Evolutionary design: on the border between design and self-organization], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2006, No. 8 (63), pp. 77-82.
18. *Mayorov I.V., Skobelev P.O.* Model' dinamiki agentov potrebnostey i vozmozhnostey [Model of the dynamics of agents of needs and opportunities], *Tr. XVII Mezhdunarodnoy konferentsii «Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh»*, Samara, 2015 [Proceedings of the XVII International Conference "Problems of Control and Modeling in Complex Systems", Samara, 2015]. Samara: SNTS RAN, 2015, pp. 79-87.
19. *Skobelev P.O.* Situatsionnoye upravlenie i mul'tiagentnye tekhnologii: kollektivnyy poisk soglasovannykh resheniy v dialoge [Situational management and multi-agent technologies: collective search for agreed solutions in dialogue], *Ontologii proektirovaniya* [Ontologies of design], 2013, No. 2 (8), pp. 26-48.
20. *Gridin V.N., Dmitrevich G.D., Anisimov D.A.* Arkhitektura raspredelennykh servis-orientirovannykh sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya [Architecture of distributed service-oriented automated design systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 7 (156), pp. 51-58.
21. *Mitra R., Nadareishvili I.* Mikroservisy. Ot arkhitektury do reliza [Microservices. From architecture to release]. Saint Petersburg: Piter, 2023.
22. *Baqais A.A.B.* A Multi-view Comparison of Various Metaheuristic and Soft Computing Algorithms, *I.J. Mathematical Sciences and Computing*, 2017, 13 (4), pp. 8-19.
23. *Gladkov L.A., Gladkova N.V., Gusev N.Y., Semushina N.S.* Integrated approach to the solution of computer-aided design problems, *Proceedings of the 4th International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'19). Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham, 2020, Vol. 1156, pp. 465-476.
24. *Gladkov L.A., Gladkova N.V., Leiba S.N., Strakhov N.E.* Development and research of the hybrid approach to the solution of optimization design problems, *Advances in Intelligent Systems and Computing, V. 875. International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry IITI'18*. Springer Nature Switzerland AG, 2019, Vol. 2, pp. 246-257.

Береза Денис Андреевич – Южный федеральный университет; e-mail: dbereza@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; аспирант.

Гладков Леонид Анатольевич – Южный федеральный университет; e-mail: lagladkov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; профессор.

Гладкова Надежда Викторовна – Южный федеральный университет; e-mail: nvgladkova@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; старший преподаватель.

Bereza Denis Alexandrovich – Southern Federal University; e-mail: dbereza@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; postgraduate student.

Gladkov Leonid Anatol'evich – Southern Federal University; e-mail: lagladkov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; professor.

Gladkova Nadezhda Viktorovna – Southern Federal University; e-mail: nvgladkova@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; senior teacher.

УДК.681.1

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-37-45

В.П. Федосов, Аль-Мусави Висам Мохаммедтаки М. Джавад, С.В. Кучерявенко
АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ
СИГНАЛОВ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В КАНАЛЕ 3D WIMAX НА ОСНОВЕ
ПРИНЦИПОВ SIMO-OFDM

Развитие телекоммуникационной отрасли сосредоточено на использовании систем беспроводной широкополосной связи, позволяющих увеличить скорость передачи информации. Для решения этой задачи разработаны новые технологии с высокими передающими способностями. Ограничение спектра сигнала и замирание сигнала в зонах Френеля из-за многопутных компонентов в беспроводной системе, развернутой в городских кварталах с плотной застройкой, представляют собой значительные проблемы при проектировании систем беспроводной связи, а также появление эффекта Доплера в результате движения мобильной станции и затухание сигнала при распространении в канале в различных частотных диапазонах. Чтобы увеличить скорость и пропускную способность, можно использовать процедуру передачи и приема сигналов для формирования каналов с одним входом и несколькими выходами SIMO (Single Input Multiple Output), обеспечивающих пространственную фильтрацию при выборе пути с максимальной мощностью сигнала. В статье представлен анализ и моделирование передачи данных на основе системы SIMO беспроводного канала 3D WiMAX. Результаты сравнения обработки сигналов этим методом с использованием адаптивного алгоритма и без него, полученный по критерию максимума отношения сигнал/шум (SNR – Signal to Noise Ratio) представлены зависимостями вероятности появления битовой ошибки (BER – Bit Error Rate) от отношения сигнал/шум (SNR). В результате моделирования был сделан вывод, что для одной и той же системы вероятность ошибки чувствительна к изменению типа модуляции, иными словами, BER изменяется в соответствии с изменением вида модуляции сигнала. Также можно сделать вывод, что системы SIMO чувствительны к многопутному распространению сигнала (multipath) для одного и того же типа модуляции, а BER растет с увеличением количества приемников поскольку снижается отношение сигнал/шум SNR.

SIMO – Single Input Multiple Output; MIMO – Multiple Input – Multiple Output – MIMO; вероятность битовых ошибок BER – Bit Error Rate; OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing, многопутность.

V.P. Fedosov, AL-Musawi Wisam Mohammedtaqi M. Jawad, S.V. Kucheryavenko
ADAPTIVE ALGORITHM FOR PROCESSING SPATIAL-TEMPORAL SIGNALS
FOR DATA TRANSMISSION IN 3D WIMAX CHANNEL BASED
ON SIMO-OFDM PRINCIPLES

The development of the telecommunications industry is focused on the use of wireless broadband communication systems that allow increasing the speed of information transfer. New technologies with high transmission capabilities have been developed to solve this problem. Limitation of the signal spectrum and signal fading in Fresnel zones due to multipath components in a wireless system deployed in densely built-up urban areas are significant problems in the design of wireless communication systems, as well as the occurrence of the Doppler effect due to the movement of the mobile station and signal attenuation during propagation in the channel in different frequency ranges. To increase the speed and throughput, it is possible to use the procedure of transmitting and receiving signals to form channels with one input and several outputs SIMO (Single Input Multiple Output), providing spatial filtering when choosing the path with the maximum signal power. The article presents the analysis and modeling of data transmis-