

МУЛЬТИМОДАЛЬНАЯ СИСТЕМА БИОМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАНИЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ И ПОВЕДЕНЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ



Е.М. Косарева
*Ассистент кафедры
проектирования
информационно-
компьютерных систем
БГУИР, магистр
kksrvvv@gmail.com*



Д.В. Лихачевский
*Доцент кафедры
проектирования
информационно-
компьютерных систем
БГУИР, кандидат
технических наук, доцент
likhachevskyd@bsuir.by*



Д.О. Кожевников
*Магистрант кафедры
проектирования
информационно-
компьютерных систем
БГУИР
deniskoj03@gmail.com*

Е.М. Косарева

Окончила Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Область научных интересов связана с автоматизированными системами распознавания, системами биометрической идентификации.

Д.В. Лихачевский

Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Область научных интересов связана с исследованием проблем радиочастотной идентификации объектов, организацией учебного и научно-исследовательского процессов в техническом университете.

Д.О. Кожневиков

Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Область научных интересов связана с интеллектуальной обработкой данных, схемотехникой радиоэлектронных устройств.

Аннотация. В статье предложен подход к построению мультимодальной системы биометрической идентификации, основанный на комбинировании физиологических и поведенческих характеристик (лицо, походка и пульс). Обоснован выбор модальностей. Разработана архитектура системы и предложена топология.

Ключевые слова: биометрическая идентификация, слияние данных, мультимодальная идентификация, распознавание лица, анализ походки, фотоплетизмография

Введение. Традиционные методы аутентификации, основанные на знаниях (пароли, PIN-коды) или владении (карты доступа, токены), обладают рядом существенных недостатков, включая возможность передачи третьим лицам и утери. В этой связи биометрические методы, основанные на комбинации уникальных физиологических и поведенческих характеристик человека, рассматриваются как более надежная альтернатива. Таким образом, речь идет о мультимодальной идентификации. Согласно [1], понятия «мультимодальный» и «мультибиометрический» указывают на применение более одного типа биометрической характеристики, одного датчика, одного экземпляра и/или алгоритма в той или иной комбинации для принятия определенного решения в отношении биометрической идентификации или верификации. Такой подход повышает точность идентификации и устойчивость к атакам, что особенно актуально в случае использования системы в критически важных отраслях.

Группы модальностей, применяемых в системах биометрической идентификации. Модальности, применяемые в системах биометрической идентификации, можно разделить в зависимости от природы используемых признаков на физиологические и поведенческие.

К физиологическим модальностям можно отнести характеристики, обусловленные анатомическими особенностями человека, например:

- отпечатки пальцев;
- радужную оболочку глаза;
- сетчатку глаза;
- геометрию лица и т.д.

Отпечатки пальцев характеризуются папиллярным рисунком кожного покрова пальцев, формируемым системой чередующихся гребней и впадин. Структура отпечатка включает глобальные признаки (общий тип рисунка – дуги, петли, завитки) и локальные особенности – минуции (окончания и разветвления линий), а также поры и текстурные характеристики поверхности кожи.

Радужная оболочка глаза представляет собой пигментированную мышечную структуру, окружающую зрачок. Она характеризуется сложной текстурой, включающей крипты, складки, радиальные и концентрические структуры, пигментные пятна и сосудистые элементы.

Сетчатка глаза определяется уникальным сосудистым рисунком глазного дна. Основными элементами являются артерии и вены, формирующие разветвленную топологическую структуру с характерными точками бифуркации и пересечения. Пространственное распределение сосудов и их взаимное расположение формируют индивидуальный признак, обладающий высокой устойчивостью.

Геометрия лица характеризуется совокупностью антропометрических и текстурных признаков. К структурным компонентам относятся взаимное расположение ключевых точек (глаза, нос, рот, подбородок), пропорции лица, контуры и форма отдельных областей. Дополнительно учитываются текстурные особенности кожного покрова и трехмерная структура лица.

Поведенческие модальности основаны на анализе динамических характеристик действий пользователя. К ним можно отнести:

- голос;
- динамику подписи;
- клавиатурный почерк;
- походку и т.д.

Данные модальности, как правило, менее устойчивы во времени и более подвержены влиянию внешних факторов, однако могут эффективно использоваться в качестве дополнительного уровня идентификации.

Голос как поведенческая модальность определяется совокупностью физиологических и динамических характеристик речевого аппарата. Он включает особенности голосовых связок, резонансных полостей, а также индивидуальные характеристики произношения, интонации и темпа речи.

Динамика подписи представляет собой поведенческую характеристику, включающую пространственно-временную траекторию движения пишущего инструмента. Модальность определяется формой подписи, скоростью выполнения подписи, ритмом и вариациями движений.

Клавиатурный почерк характеризуется временными параметрами взаимодействия пользователя с клавиатурой. Основными признаками являются интервалы между нажатиями клавиш, длительность удержания клавиш и ритмические особенности набора текста.

Походка определяется динамикой движения человека при перемещении в пространстве. Она включает пространственно-временные параметры шага, координацию движений конечностей, амплитуду и частоту движений, а также индивидуальные особенности кинематики тела.

В условиях постоянного усложнения методов несанкционированного доступа, а также высокой вариативности поведения злоумышленников и воздействия внешних факторов, традиционные подходы, основанные на анализе одной модальности, перестают обеспечивать необходимый уровень точности идентификации. Альтернативным подходом является идентификация на основе комбинации физиологических и поведенческих модальностей. Комбинирование модальностей разных классов позволяет компенсировать ограничения каждой отдельной модальности: физиологические признаки обеспечивают высокую стабильность, тогда как включение поведенческих признаков обеспечивает дополнительный уровень различимости.

Мультимодальное слияние данных. Мультимодальные биометрические системы проектируются по двум схемам – последовательно и параллельно. В первом случае выходные результаты анализа одной биометрической модальности используются для сужения области поиска потенциальных пользователей и передачи данной информации на вход следующему блоку. При параллельном построении системы биометрическая информация разной природы анализируется единовременно. При этом существует три возможных уровня объединений:

- на уровне признаков;
- в процессе принятия итогового решения;
- на этапе сравнения [2].

Рассмотрим процесс объединения модальностей на уровне признаков. В общем виде он начинается с формирования множества входных биометрических сигналов (формула 1):

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}, \quad (1)$$

где X_i – данные, полученные от i -й биометрической модальности.

Для каждой модальности выполняется преобразование исходных данных в биометрический шаблон (формула 2):

$$T_i = \psi(\phi(X_i)), \quad (2)$$

где $\phi(\cdot)$ включает этапы предобработки и выделения признаков;
 $\psi(\cdot)$ – формирование шаблона.

Сформированные биометрические шаблоны объединяются путем слияния (формула 3).

$$T = f(T_1, T_2, \dots, T_n), \quad (3)$$

где $f(\cdot)$ – функция агрегирования шаблонов различных модальностей.

Полученное интегральное представление используется классификатором для определения принадлежности пользователя к одному из классов. На основе результата классификации принимается решение о допуске.

Обобщенная схема объединения модальностей на уровне признаков приведена на рисунке 1.

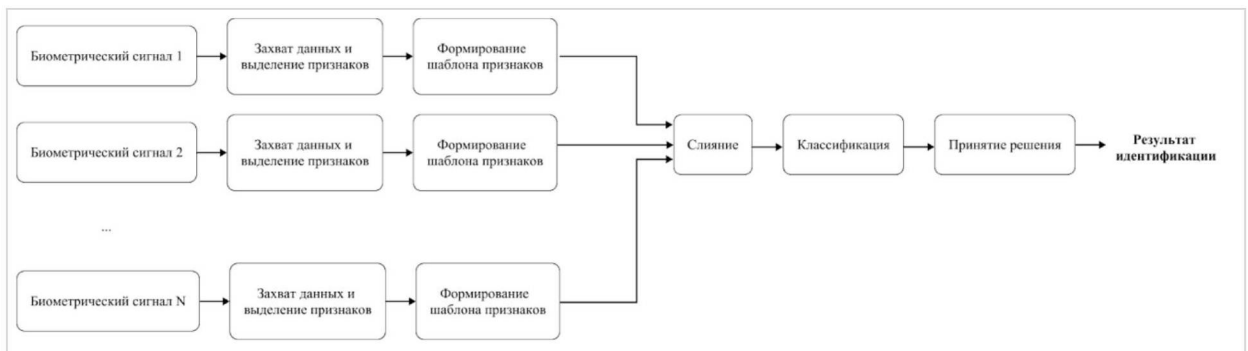


Рисунок 1. Обобщенная схема объединения модальностей на уровне признаков

Процесс объединения модальностей на уровне принятия решения аналогичен рассмотренному ранее процессу объединения модальностей на уровне сформированных признаков вплоть до этапа формирования шаблона. Различия в подходах возникают на этапе классификации. В данном случае каждая модальность рассматривается независимо (формула 4):

$$T_i \rightarrow D_i, \quad (4)$$

где D_i – результат классификации для i -й модальности.

Далее результаты классификации каждой модальности объединяются в единое решение по формуле 5:

$$D = g(D_1, D_2, \dots, D_n), \quad (5)$$

где $g(\cdot)$ – функция агрегирования решений.

Обобщенная схема объединения модальностей на уровне принятия решения приведена на рисунке 2.

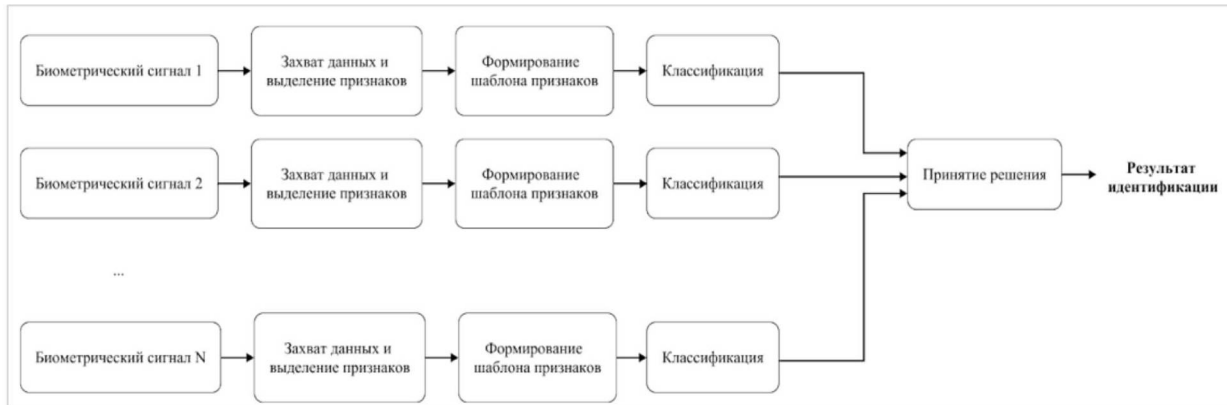


Рисунок 2. Обобщенная схема объединения модальностей на уровне принятия решения

Вариант слияния на этапе сравнения в данной работе не рассматривается, так как он относится только к задачам верификации пользователя [2].

Для задачи слияния физиологических и поведенческих признаков, таких как лицо и походка был выбран алгоритм объединения модальностей на уровне принятия решения. Это обуславливается разнородностью используемых биометрических характеристик: выбранные модальности имеют различную природу, размерность и чувствительность к внешним и психофизиологическим факторам.

Независимая обработка каждой модальности с последующим объединением результатов классификации позволяет повысить устойчивость системы к шумам и вариативности данных, а также позволяет учитывать надежность каждой модальности при формировании итогового решения.

Обоснование выбора модальностей. В контексте проектируемой системы мультимодальной биометрической идентификации в качестве основных модальностей были выбраны лицо, походка и пульс.

Лицо является часто используемой и хорошо изученной биометрической модальностью. Идентификация по лицу обеспечивает высокую точность при наличии достаточного освещения, не требует физического контакта субъекта с оборудованием и допускает захват данных на расстоянии [3].

Преимуществом является возможность использования стандартных камер видеонаблюдения, что существенно снижает стоимость инфраструктуры. Однако при этом данная модальность подвержена влиянию внешних факторов – изменения освещения, ракурса, наличия маски или головного убора – что обуславливает необходимость ее дополнения другими модальностями [3].

Включение походки обусловлено ее способностью обеспечивать идентификацию на расстоянии и без необходимости явного взаимодействия с системой. Походка формируется под влиянием индивидуальных биомеханических характеристик человека, включая длину шага, ритм и координацию движений, что делает ее трудновоспроизводимой для злоумышленников. При этом походка менее чувствительна к качеству изображения, что компенсирует ограничения первой модальности в неблагоприятных условиях съемки [4].

Использование пульса в качестве дополнительной модальности обусловлено тем, что параметры сердечного ритма, включая вариабельность интервалов между ударами, определяются внутренними биологическими процессами и практически не поддаются сознательному контролю или имитации. Это делает пульс надежным фактором для подтверждения «живости» субъекта (liveness detection) и снижает риск атак с использованием статических изображений или записей [5].

Система мультимодальной биометрической идентификации. В настоящем исследовании предлагается архитектура системы биометрической идентификации, состоящая из шести модулей: модуля захвата данных, модуля предобработки данных, модуля извлечения признаков, модуля биометрической идентификации, модуля анализа психофизиологического состояния и модуля принятия решения.

Модуль захвата данных обеспечивает первичный сбор биометрических сигналов и представлен набором сенсоров: сенсор А представляет собой видеокамеру для фиксации кинематики тела субъекта; сенсор Б, также видеокамера, захватывает изображение лица; сенсор В осуществляет регистрацию пульсового сигнала методом фотоплетизмографии с извлечением показателей частоты сердечных сокращений (ЧСС) и вариабельности сердечного ритма (ВСР).

Модуль предобработки данных выполняет очистку и нормализацию сигналов, поступающих от каждого сенсора.

Модуль извлечения признаков преобразует предобработанные данные в числовые векторы признаков, пригодные для последующего анализа.

На выходе модуля формируются три признаковых вектора, которые поступают параллельно в модуль биометрической идентификации и в модуль анализа психофизиологического состояния.

Модуль биометрической идентификации решает задачу идентификации личности субъекта. На этапе слияния признаков производится конкатенация векторов походки и лица с применением совместного эмбединга FaceNet и GaitNet.

Полученный агрегированный вектор сопоставляется с профилями субъектов, хранящимися в базе данных системы.

Результатом работы модуля является идентификатор личности с соответствующим скором уверенности.

Модуль анализа психофизиологического состояния функционирует параллельно с модулем идентификации и решает задачу оценки текущего состояния субъекта.

Модуль принятия решения интегрирует полученные результаты и формирует итоговый профиль субъекта, включающий идентификатор личности, категорию состояния и метку времени события. Сформированный профиль передается во внешнюю систему контроля и управления доступом (СКУД) через интеграционный интерфейс API.

Структурная схема системы приведена на рисунке 3.

Топология системы. С точки зрения топологии инфраструктуры системы основу системы составляют две боковые видеокамеры (сенсоры А.1 и А.2) размещенные по обе стороны траектории движения человека и формирующие бинокулярную схему наблюдения. Их основная функция – захват кинематических параметров походки с минимизацией эффекта самоокклюзии и обеспечением устойчивого анализа движения. Фронтальная видеокамера (сенсор Б.1) ориентирована на лицо субъекта и предназначена для детекции и анализа микровыражений.

Контактный пульсометр (сенсор В.1) интегрирован в зону остановки пользователя и обеспечивает регистрацию физиологических параметров в момент взаимодействия.

Все сенсоры синхронизированы по времени и передают данные в единый вычислительный модуль, где осуществляется их слияние и комплексный анализ.

Такая топология обеспечивает одновременный сбор поведенческих и физиологических признаков (рисунок 4).

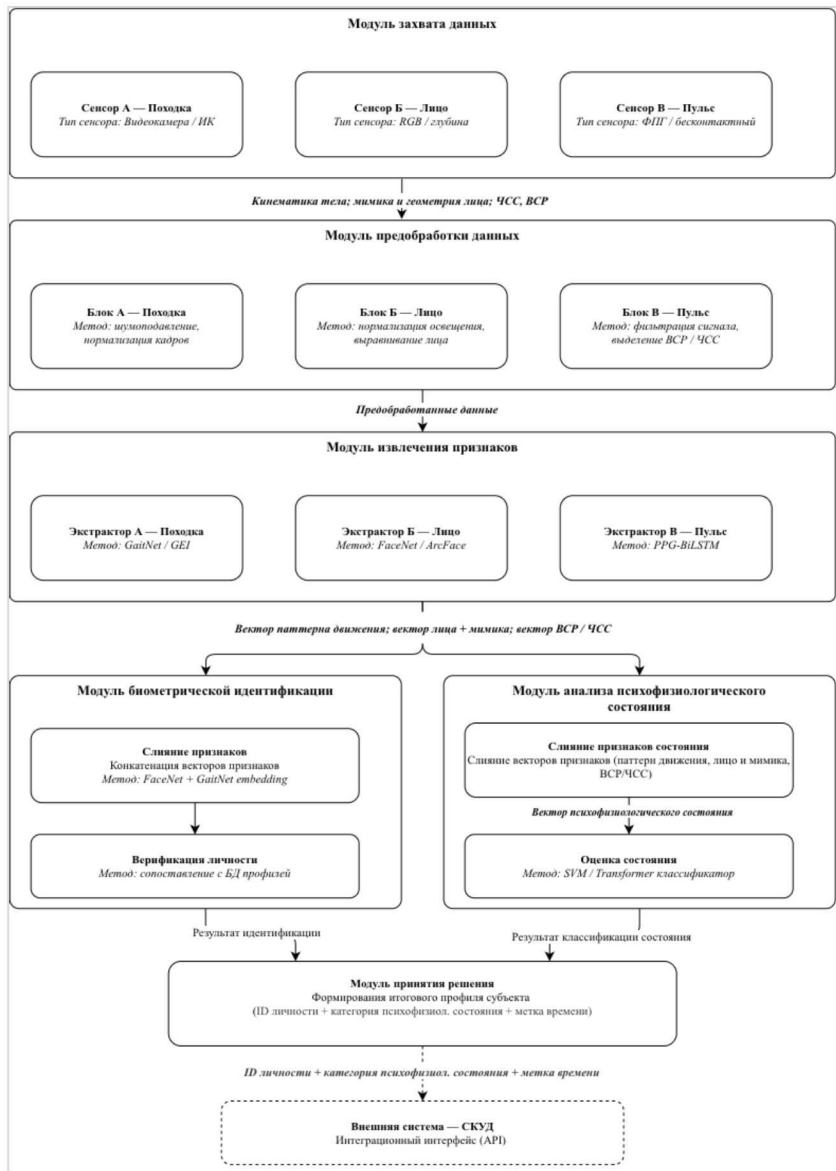


Рисунок 3. Структурная схема системы

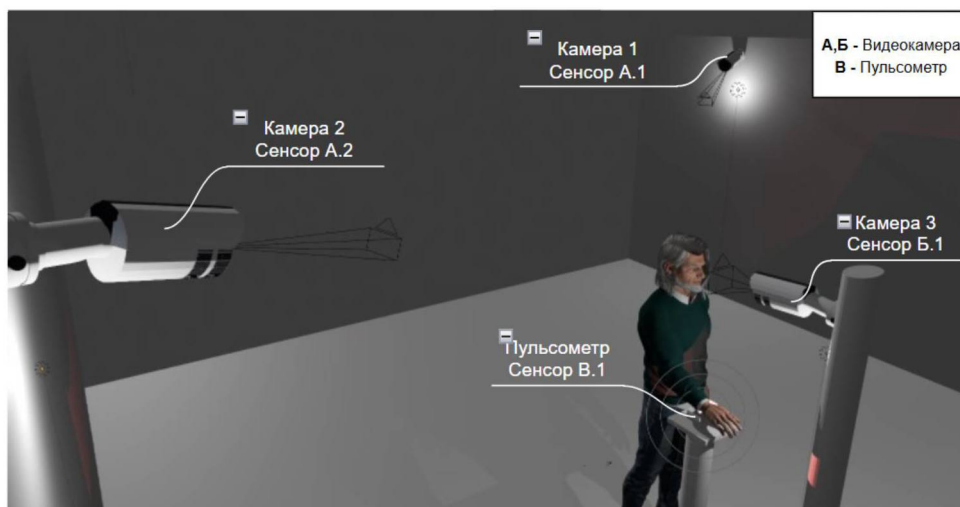


Рисунок 4. Топология системы

Заключение. В работе предложен подход к построению мультимодальной системы биометрической идентификации на основе объединения физиологических и поведенческих признаков.

Показано, что использование модальностей лица, походки и пульса, а также их слияние на уровне принятия решений.

Разработанная архитектура и топология могут быть применены в системах контроля доступа с повышенными требованиями к безопасности.

Список литературы

- [1] ГОСТ Р 54411–2018. Информационные технологии. БИОМЕТРИЯ. Мультимодальные и другие мультибиометрические технологии / ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ». – Москва, 2019. – 22 с.
- [2] Стефаниди, А. Ф. Исследование мультимодальных алгоритмов биометрической идентификации на основе методов цифровой обработки речевых сигналов и изображений : дис. ... канд. техн. наук : 2.2.13/ А. Ф. Стефаниди; Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова. – Ярославль, 2022. – 130 с.
- [3] Gupta A. Advancements and Challenges in Face Recognition Technology // International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT). – 2024. – Vol. 72, No. 11. – Pp. 92–104. – DOI: 10.14445/22312803/IJCTT-V72I11P110.
- [4] Munusamy V., Senthilkumar S. Emerging Trends in Gait Recognition Based on Deep Learning: A Survey // PeerJ Computer Science. – 2024. – Vol. 10. – Art. e2158. – DOI: 10.7717/peerj-cs.2158.
- [5] Aziz M.A., et al. PPG-Based Biometric Authentication: A Review on Architectures, Datasets, Attacks and Security Challenges // Sensors / PMC. – 2025.

Авторский вклад

Косарева Екатерина Максимовна – подготовка обзора модальностей, используемых в системах биометрической идентификации; проведение сравнительного анализа подходов к мультимодальному слиянию данных; разработка структурной схемы системы.

Лихаческий Дмитрий Викторович – постановка задачи исследования, обоснование выбора модальностей.

Кожевников Денис Олегович – разработка топологии системы.

MULTIMODAL BIOMETRIC IDENTIFICATION SYSTEM BASED ON A COMBINATION OF PHYSIOLOGICAL AND BEHAVIORAL CHARACTERISTICS

E.M. Kosareva

Assistant of the Department of Information Computer Systems Design BSUIR, Master of Technical sciences

D.V. Likhachevsky

Associate Professor, Department of Information Computer Systems Design BSUIR, PhD of Technical sciences, Associate Professor

D.O. Kojevnikov

Master student of the Department of Information Computer Systems Design BSUIR

Abstract. This article proposes an approach to constructing a multimodal biometric identification system based on combining physiological and behavioral characteristics (face, gait, and heart rate). The choice of modalities is substantiated. The system architecture is developed, and a topology is proposed.

Keywords: biometric identification, data fusion, multimodal identification, face recognition, gait analysis, photoplethysmography.