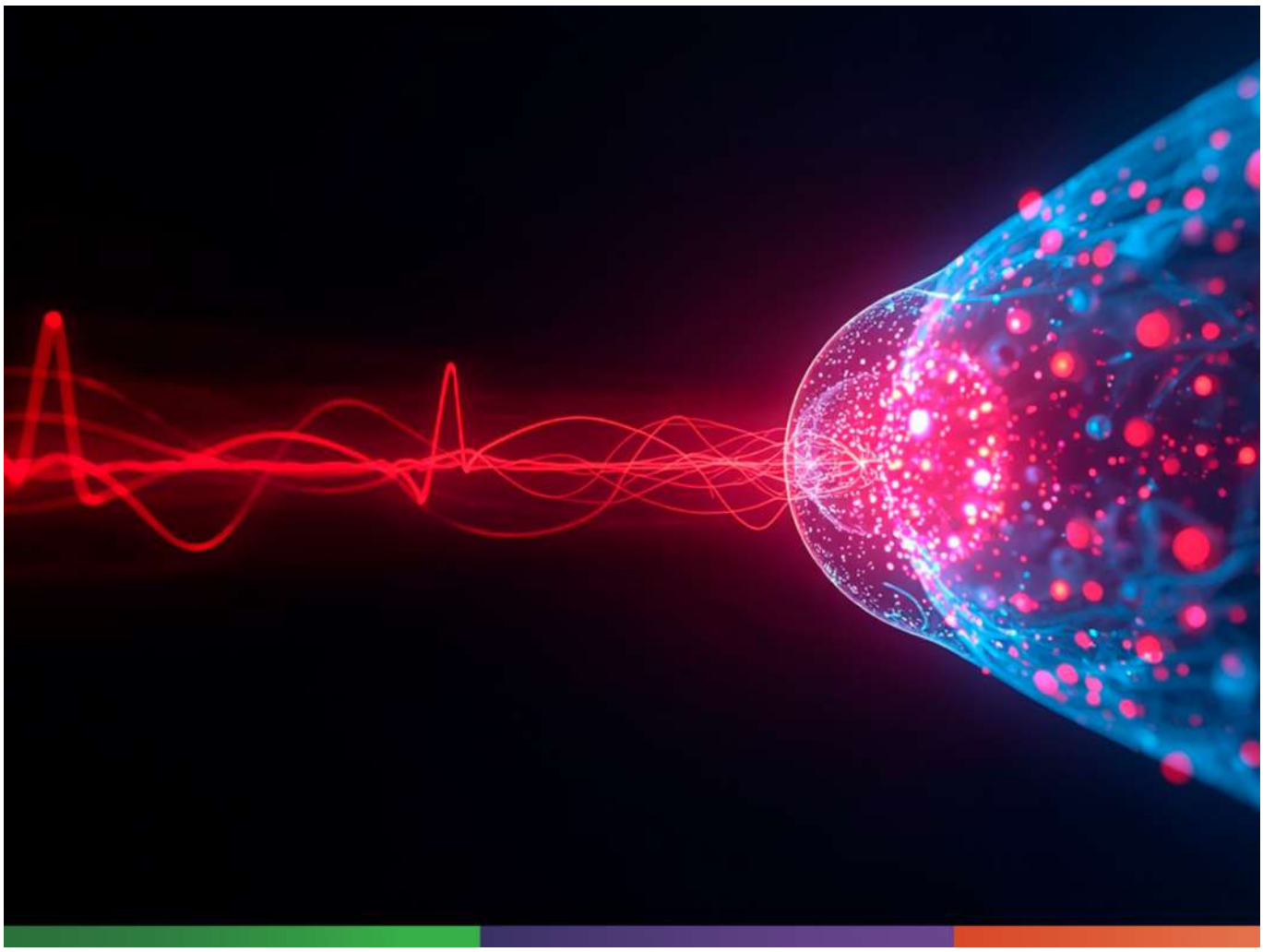
Классификация стадий гипертонии по оптическому сигналу



Гипертония — один из главных факторов риска сердечно-сосудистых заболеваний, инсульта и поражения почек, при этом значительная часть людей не знает о своем диагнозе. Традиционные тонометры дают лишь разовые измерения, поэтому востребованы методы непрерывного контроля артериального давления без манжеты. Перспективным направлением стала фотоплетизмография (ФПГ) — оптическая регистрация изменений кровенаполнения тканей, лежащая в основе многих носимых устройств.

Исследователи Высшей школы управления кибер-физическими системами СПбПУ доцент *Роман Давыдов* и аспирант *Мсукар Сухайр* совместно с коллегой из Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» предложили интерпретируемый подход к многоклассовой классификации стадий артериального давления по сигналам ФПГ. Вместо того чтобы подавать «сырой» сигнал в глубокую нейросеть, авторы преобразовали его в набор физиологически осмысленных признаков. Они описали форму и временные характеристики пульсовой волны, ее частотный состав, нелинейную динамику, показатели сосудистой жесткости, а также взаимосвязи с возрастом, индексом массы тела и частотой сердечных сокращений.

Всего исследователи сформировали 124 признака, объединенных в 12 физиологических групп. После предварительной обработки и отбора наиболее информативных параметров модель проверили на двух наборах данных. Первый — PPG-BP — включает 657 фрагментов сигналов и четыре класса: нормальное давление, предгипертонию, гипертонию первой и второй стадии. Второй — PulseDB — содержит 283 773 фрагмента и позволил оценить масштабируемость метода.

Такой дизайн отвечает ключевым требованиям отрасли. Для медицинских приложений важна не только общая точность, но и способность различать несколько стадий заболевания, корректно работать с малочисленными классами и давать объяснимый результат. Небольшие биомедицинские наборы особенно уязвимы к переобучению и утечке данных, когда модель косвенно получает доступ к информации, связанной с целевым показателем. Авторы применили раздельную обработку обучающих и тестовых данных, строгий отбор признаков и взвешивание классов, чтобы снизить эти риски.

Авторы продемонстрировали, что на наборе PPG-BP алгоритм LightGBM, обученный на отобранных признаках, достиг точности 0,74 и macro-F1 0,78, превзойдя протестированные нейросетевые архитектуры. На наборе PulseDB наилучший результат показала остаточная многослойная сеть (Residual MLP): точность составила 0,81, а macro-F1 — 0,79. Абляционный анализ подтвердил ведущую роль инженерных признаков: они обеспечили F1 = 0,911, тогда как признаки, извлеченные только из сигнала ФПГ, дали F1 = 0,384.

В работе сделан вывод о перспективности прозрачных моделей для предварительного скрининга и персонализированного мониторинга давления после краткой калибровки устройства. При этом авторы подчеркивают необходимость дальнейшей проверки на более крупных и независимых группах пациентов, особенно для второй стадии гипертонии, представленной в наборе PPG-BP ограниченным числом наблюдений.

Оригинал статьи: Interpretable Photoplethysmography Feature Engineering for Multi-Class Blood Pressure Staging. Computers 2026, 15(4), 209.