

УДК 621.317.7:537.86

ОТКРЫТИЯ ПРОШЛОГО НА СТРАЖЕ НАСТОЯЩЕГО. КОНСТРУКЦИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТАЛЛОИСКАТЕЛЕЙ

Буйневич Д.А., студент

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Савилова Ю.И. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. В данной статье изучены современные системы металлодетекции, работающие совместно с машинным обучением. Приведены основные типы конструкций, а также примеры внедрения AI-алгоритмов.

Ключевые слова. Металлоискатель, мультичастотные системы, цифровая обработка сигнала, искусственный интеллект, машинное обучение, нейросетевые классификаторы.

Введение В современном мире вопросы общественной безопасности вышли на совершенно новый уровень. Требования к системам безопасности всё время растут. На массовых мероприятиях, в метрополитене, в аэропортах, школах, административных зданиях, везде необходимо обеспечить надежный уровень безопасности. И такие проблемы требуют интеллектуальных решений, ведь просто обнаружить металл недостаточно. Необходимо автономно обнаружить запрещенный предмет, распознать его и немедленно оповестить об этом необходимые службы. А также исключить ложные срабатывания, на монеты, ключи, пряжки и так далее.

Основная часть. Существенные изменения в данную сферу пришли в связи с переходом от аналогового сигнала к цифровому. Если еще в 80-х годах такой прибор мог состоять из двух транзисторов и реагировать исключительно на появление металла. То современные устройства обрабатывают сразу несколько параметров, а именно: амплитуду сигнала, фазовый сдвиг, время затухания, форму импульса и спектральный состав. **Технологическим прорывом стало использование мультичастотных систем и цифровой обработки сигнала.** В отличие от традиционных одностотных металлодетекторов, мультичастотные устройства излучают сигнал одновременно на нескольких частотах (например, от 1,5 кГц до 100 кГц). Низкие частоты эффективны для обнаружения цветных металлов, высокие - для черных металлов и мелких объектов. Анализ отклика на разных частотах позволяет вычислить электропроводность и магнитную проницаемость цели, что повышает точность классификации. Цифровая обработка сигнала преобразует аналоговый отклик в цифровой код, после чего микроконтроллер применяет адаптивную фильтрацию, подавление шумов и корреляционный анализ. **Ключевую роль также играет быстрое преобразование Фурье (БПФ), позволяющее разложить сигнал на спектральные составляющие и выделить полезный отклик на каждой из рабочих частот.** Сочетание мультичастотного зондирования и ЦОС (цифровая обработка сигнала) сделало возможным обучение нейросетей на тысячах образцов сигналов. Также с появлением микроконтроллеров, стало возможно применять машинное обучение прямо в портативных устройствах. А внедрение искусственного интеллекта, обученного на тысячах образцов, позволяет устройству самому идентифицировать предмет и принять решение о подаче сигнала.

Несмотря на кажущуюся сложность, современные датчики базируются на фундаментальном законе электромагнитной индукции:

$$\varepsilon_i = - \frac{\partial \phi}{\partial t}, \quad (1)$$

где ε_i - ЭДС индукции в контуре;

$\partial \phi$ - изменение магнитного потока;

∂t - время изменения;

Переменный ток в катушке создает вокруг нее переменное магнитное поле. А при появлении металла, возникают вихревые токи Фуко, которые создают собственное магнитное поле. Столкновение магнитных полей и фиксируется прибором. Именно это явление-регистрация изменения поля, лежит в основе всех металлодетекторов. Существует 3 основных типа металлоискателей:

1. BFO-Beat Frequency Oscillator (метод биений)- В приборе расположены два генератора радиочастоты. Частота первого фиксированная, а в колебательный контур второго включена катушка-искатель. Если в поле катушки попадает цветной металл, её индуктивность падает, если чёрный металл,

то растёт. Оба этих сигнала смешиваются на слух. При появлении металла, в наушниках слышны скачки (биения) звука вверх или вниз.

2. IB-Induction Balance (индукционный баланс)- В приборе две катушки, расположенные особым образом: либо крест на крест, либо одна в одной плоскости, а вторая сдвинута. Поля обеих катушек строго скомпенсированы, так что бы одна катушка наводила во второй 0 вольт. Как только под нами появляется металл, компенсация катушек сбивается, и вторая катушка падает сигнал.

3. PI-Pulse Induction (Импульсная Индукция)-Здесь только одна катушка, которая работает по очереди приёмником и передатчиком. Импульс создаёт поле, которое начинает затухать, при исчезновении импульса. Но металлические предметы создаёт вихревые токи, и поле от них затухает постепенно. Его и фиксирует катушка при переходе в режим приёма.

Настоящей же революцией в области металлодетекции стало внедрение искусственного интеллекта. Для таких устройств применяют сверточные и рекуррентные нейросетевые классификаторы. Их суть предельно проста: вместо того чтобы задавать жесткие рамки по фазе или амплитуде возвращаемого сигнала. Во время обучения сеть видит тысячи предметов:пистолеты, ножи, телефоны, ключи, монеты и многое другое. Нейросеть сама находит закономерности по форме сигнала, фазе и времени затухания каждого из возвращаемых сигналов. После обучения сеть способна на новом, ранее не виданном сигнале с высокой точностью определить, какой именно металлический предмет его породил. Причём нейросеть работает в реальном времени — решение принимается за миллисекунды. Это позволяет создавать системы безопасности, которые не просто сигнализируют о наличии металла, а сразу сообщают оператору что обнаружено.

Одним из самых ярких примеров внедрения AI является американская компания Evolv Technology с их системой Evolv Express (рисунок 1).



Рисунок 1-Пример использования системы Evolv Express

Это не традиционная рамка, через которую нужно останавливаться и выкладывать вещи, а портал для безостановочного досмотра. Человек проходит через него с обычной скоростью. Ему не нужно вынимать телефон, ключи, ремень или снимать часы. Система использует комбинацию нескольких технологий: мультислотную металлодетекцию, маломощное радиолокационное зондирование и нейросетевой анализатор сигнала. Все данные стекаются в AI-модуль, который за доли секунды принимает решение: представляет ли обнаруженный металл угрозу или нет. Пропускная способность Evolv Express достигает 4000 человек в час — это в 4-5 раз выше, чем у традиционных металлодетекторов. Система работает в десятках спортивных стадионов, парков аттракционов, музеев и школ по всей территории США. Важнейшая особенность — возможность удалённого обновления нейросетевой модели. Когда появляются новые типы угроз или новые модели оружия, компания Evolv просто пересылает обновления нейронной сети на все установленные системы.[1]

Ещё одна американская разработка-система Liberty Defender от компании Liberty Defense. Это порталый металлодетектор, также использующий нейросетевые алгоритмы, но с акцентом на образовательные и административные учреждения: школы, колледжи, университеты, суды, госучреждения. Особенность Liberty Defender в том, что он не требует сложной настройки и устанавливается за несколько минут. Система способна отличить огнестрельное и холодное оружие, от безобидных металлических предметов. Работа вместе с системой видеонаблюдения позволяет автоматически сохранять видеофрагмент того момента, когда человек с угрозой прошёл через детектор. Кроме того, Liberty Defender может быть подключён к системе оповещения для автоматического вызова охраны. Нейросеть обучалась более чем на 50000 различных предметов.[2]

Японские компании Anritsu и NEC сделали акцент на миниатюризацию. Anritsu, известная своими промышленными металлодетекторами, выпускает компактные высокочувствительные системы для контроля доступа в офисы и лаборатории. Их устройства часто встраиваются прямо в стойки турникетов или даже в напольное покрытие. Особенность японского подхода — использование не одного нейросетевого модуля, а распределённой системы: каждый металлодетектор имеет свой AI-чип, а все данные стекаются в центральную систему, которая может анализировать общую картину. NEC, в свою очередь, делает ставку на комбинированные системы: металлодетектор, камера с распознаванием лиц, тепловизор. Нейросеть принимает решение не только на основании сигнала металлодетектора, но и анализирует поведение человека и его температуру. Такие системы массово устанавливаются на входах в аэропорты Японии, на Олимпийских объектах и в банковских хранилищах.[3]

Российская разработка, заслуживающая внимания — это селективные металлодетекторы типа Сфера, производимые компанией АО Сфера. Они активно используются в метрополитенах Москвы и Санкт-Петербурга, на вокзалах, в судах и административных зданиях. Главное преимущество Сферы — селективность обнаружения, которая достигается за счёт многочастотного анализа и алгоритмов машинного обучения. Система способна игнорировать маскирующие предметы, например, металлическую фольгу и при этом надёжно обнаруживать скрытое оружие. Сфера-СМ и Сфера-СМ-2 работают в автоматическом режиме, не требуя постоянного присутствия оператора у каждого поста. При обнаружении угрозы система подаёт световой и звуковой сигнал, а также может автоматически блокировать турникет или передавать сигнал на пульт охраны. В последних версиях есть функция обучения: устройство запоминает новые образцы сигналов от предметов, которые администратор маркирует как опасные или безопасные. Это позволяет адаптировать систему под конкретный объект.[4]

Значительного внимания заслуживает израильская компания Camero, дочернее предприятие южнокорейского конгломерата SK Group. Их система Camero Guardian принципиально отличается от классических металлодетекторов тем, что использует не только электромагнитную индукцию, но и микроволновое зондирование с синтезированной апертурой на частотах 3–10 ГГц. Это позволяет обнаруживать не только металлические, но и неметаллические предметы — пластиковое оружие, керамические ножи, жидкую взрывчатку, спрятанные под одеждой. Нейросетевая обработка объединяет данные от 24 приёмопередающих модулей, формируя трёхмерное изображение тела человека в реальном времени. Алгоритмы машинного обучения обучены на более чем 200 000 сценариях прохода, включая людей с имплантами, кардиостимуляторами и скрытыми предметами. Важная особенность — система не хранит изображения тела, а только результат классификации, что соответствует требованиям приватности. Пропускная способность Guardian достигает 1500 человек в час при вероятности ложной тревоги менее 5%. Система сертифицирована для использования в аэропортах Франкфурта, Сингапура, международном терминале имени Джона Кеннеди, а также в зданиях ООН и посольствах США. Camero также предлагает портативную версию Guardian Mobile, монтируемую на автомобиль для мобильных блокпостов. [5]

Европейский рынок металлодетекции для медицинской и фармацевтической промышленности практически полностью контролируется финской компанией. Их линейка Security Pro спроектирована специально для контроля продукции в больницах, фармацевтических складах и на линиях производства лекарственных средств, где важно исключить металлические загрязнения (иглы, осколки, стружку) в флаконах. Главное технологическое отличие Security Pro — использование адаптивного машинного обучения без учителя. В отличие от классических нейросетей Evolv или Liberty, которые требуют предварительной маркировки тысяч образцов, алгоритм Metorex самостоятельно выявляет изменения в потоке сигналов в реальном времени. Это достигается за счёт автоэнкодерной архитектуры: нейросеть обучается восстанавливать нормальный сигнал пустой продукции, и любое отклонение (по амплитуде, фазе или спектру) расценивается как потенциальная угроза. Система работает на 12 частотах одновременно (от 50 кГц до 1 МГц) и способна обнаруживать частицы металла размером до 0,3 мм в продукте даже через упаковку. Алгоритм также компенсирует температурные изменения и вибрации конвейера. Security Pro сертифицирован и соответствует стандартам GMP для фармацевтики.[6]

Китайско-турецкое совместное предприятие Nokta Makro занимает уникальную нишу — бюджетные металлодетекторы с внедрением искусственного интеллекта, доступные для поисковых отрядов, служб безопасности средних предприятий и даже для любительского поиска. Флагманская модель Nokta Legend — это портативный металлодетектор с мультимастотным режимом (одновременная работа на 5, 15 и 40 кГц) и встроенным нейросетевым сопроцессором с низким энергопотреблением. Архитектура нейросети — лёгкая свёрточная сеть MobileNet, адаптированная для работы на 32-битном микроконтроллере. Это позволяет устройству классифицировать цели за 50–80 миллисекунд. Обучение сети проводилось на 50 000 образцов сигналов от монет разного достоинства, ювелирных украшений, патронов, ножей, ключей, алюминиевых пробок и фрагментов фольги. По результатам испытаний, точность распознавания составляет: монеты — 97%, золотые кольца — 91%, железный мусор — 94%. Функция AI Disc позволяет оператору сразу видеть на дисплее изображение предполагаемого предмета. Система не требует калибровки при смене грунта — нейросеть автоматически подстраивается на основе анализа спектра шума.[7]

Заключение. Исходя из вышесказанного можно сделать вывод что, все заявленные в статье ключевые технологии нашли своё отражение в описанных системах. Что, свидетельствует о том, что за последние годы, сфера металлодетекторов шагнула далеко вперед. Традиционные аналоговые схемы, которые ещё недавно были основой любого металлоискателя, сегодня стремительно вытесняются цифровыми системами с программно-определяемой архитектурой. **Машинное обучение** использует как контролируемые методы (обучение на размеченных выборках до 200 000 сценариев), так и обучение без учителя (адаптивная настройка на фоновый шум). Но главным достижением стало внедрение технологий искусственного интеллекта. Нейросетевые классификаторы, обученные на десятках тысяч образцов сигналов, позволяют современным системам безопасности не просто обнаруживать металл, а распознавать конкретный предмет, отличая нож от мобильного телефона или пистолет от связки ключей. Это меняет не только качество, но и саму философию досмотра: от тотальной к интеллектуальной.

Тем не менее, остаются и нерешённые проблемы, которые предстоит решать в ближайшие годы. Во-первых, это вычислительная сложность: AI-анализ в реальном времени требует достаточно мощных процессоров, что увеличивает стоимость конечного устройства. Во-вторых, качество работы нейросети напрямую зависит от объёма и разнообразия обучения. Если сеть никогда не видела сигнал от нового типа оружия или необычного металлического сплава, она может ошибиться. Поэтому полностью отказываться от классических методов пока преждевременно-будущее за гибридными системами, где металлодетектор перестанет быть самостоятельным устройством и станет лишь одним из датчиков в комплексе систем безопасности. Вместе с ним будут работать камеры машинного зрения, анализирующие поведение человека-беспокойство, неестественные жесты, попытки обойти зону досмотра, тепловизоры, контролирующие температуру тела, что актуально в контексте эпидемиологических угроз, газоанализаторы, выявляющие запах взрывчатых веществ и даже системы анализа микроволнового поля. Нейросеть будет принимать решение на основе данных сразу со всех этих сенсоров, что резко повысит точность и надёжность досмотра.

Список использованных источников

1. Evolv Technology. AI-Based Weapons Detection for Public Venues: White Paper. — Boston: Evolv Technologies, 2023. — 24 с.
2. Liberty Defense. HEXWAVE System Product Documentation. — Atlanta: Liberty Defense Holdings, 2024. — 36 с.
3. Anritsu Infivis. Metal Detection Systems for Security and Industrial Applications. — Tokyo: Anritsu Corporation, 2023. — 32 с.
4. АО «Сфера». Металлодетекторы селективные «Сфера-СМ». Техническое описание и руководство по эксплуатации. — СПб.: АО «Сфера», 2024. — 48 с.
5. Camero-Tech. Xaver Personnel Screening System. Технический обзор. — Netanya: Camero-Tech Ltd, 2023. — 18 с.
6. Malvern Panalytical. Security Pro Metal Detection for Pharmaceuticals. — Helsinki: Metorex division, 2024. — 28 с.
7. Nokta Makro. Legend Multi-Frequency Detector with AI Co-processor. User Manual. — Ankara: Nokta Engineering, 2024. — 52 с.

UDC 621.317.7:537.86

DISCOVERIES OF THE PAST GUARDING THE PRESENT. DESIGN AND APPLICATION OF MODERN METAL DETECTORS

Buinevich D.A. student

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Savilova U.I. – Candidate of Technical Sciences.

Annotation. This article examines modern metal detection systems that utilize machine learning. The main design types are presented, along with examples of AI algorithm implementation.

Keywords: Metal detector, multi-frequency systems, digital signal processing, artificial intelligence, machine learning, neural network classifiers.