

## 13-я и 14-я лекции

### ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ: СЕНСОРЫ И НАНОСЕНСОРЫ. НАУЧНЫЕ ПРОЕКТЫ

Развиваясь, человечество все больше стремится понять и освоить природные механизмы, тысячелетиями функционирующие в биологических организмах, в том числе и человеческом. Иногда результатом таких попыток становится создание электронной техники, имитирующей работу органов чувств человека или животных.

В основе работы таких устройств лежат *сенсоры*, или датчики-технические элементы, чувствительные к внешним воздействиям (от англ. “sense” – “чувствовать”).

Собственно говоря, сегодня подобные устройства вряд ли могут кого-нибудь поразить: уже давно сенсоры встраиваются в автомобили, музыкальные центры, холодильники и другие бытовые приборы. Датчики широко используются в охранных системах, системах контроля над глобальными катаклизмами (например, *сейсмодатчики*, способные заблаговременно предупредить людей о надвигающемся землетрясении по малейшим колебаниям), системах противопожарной безопасности, медицине.

Большой популярностью сегодня пользуются *ультразвуковые сенсоры*. По принципу работы они напоминают маленький локатор. Волны, исходящие от них, проникают в любой затаенный уголок помещения, и малейшее изменение геометрии комнаты (например, появление неожиданных гостей с мешком для денег) приводит к срабатыванию сигнализации.

Похожий принцип действия и у *инфракрасных датчиков*, срабатывающих в момент попадания движущегося объекта, излучающего тепло (например, человека или собаки), в зону чувствительности датчика.

*Пьезоэлектрический сенсор* предназначен для обнаружения механических воздействий на отдельные предметы и используется при охране сейфов, музейных экспонатов и т.д. Такой сенсор представляет собой устройство, способное обнаружить смещение вплоть до 1 микрона. В основе работы сенсора лежит пьезоэлектрический эффект.

Весьма популярны также *газовые сенсоры*, суть работы которых заключается в анализе воздуха, попадающего в сенсор через полупроницаемую мембрану. Молекулы газа вступают в реакцию с электролитом у измерительного электрода. В результате реакции генерируется электрический ток, по измерению которого можно судить о наличии тех или иных веществ в атмосфере. Такие устройства позволяют определять утечку газов и проверять состояние атмосферы на предмет наличия токсичных веществ, взрывоопасного водорода и т.п.

**Наносенсоры** – это чувствительные элементы, действие которых основано на наномасштабных эффектах. Сегодня наносенсоры находят широкое применение в контроле над состоянием сложных систем, бытовой технике и в биомедицине.

Основным элементом сенсоров является запрограммированный нанорецептор, который отбирает только те молекулы, которые в данный момент представляет особый интерес.

Можно ли гарантировать чистоту отбора? На эти и другие вопросы можно ответить с помощью математического моделирования нанорецепторов и наноструктур. Классический нанорецептор, названный Молекулярным Сортирующим Ротором (далее МСР), впервые был предложен Эриком Дрекслером.

Каждый ротор имеет “гнезда” по окружности, конфигурированные под определенные молекулы. Находясь в окружении молекул, “гнезда” селективно захватывают только заданные молекулы и удерживают их до тех пор, пока молекула не окажется внутри устройства. От “гнезда” ее отсоединяет стержень, расположенный внутри ротора. Такие роторы могут быть спроектированы из 105 атомов и иметь размеры порядка (7x14x14 нм). Они смогут сортировать молекулы, состоящие из 20 и менее атомов, со скоростью  $10^6$  молекул/сек при энергозатратах в 10-22 Дж на 1 молекулу.

Роторы полностью обратимы и поэтому могут быть использованы как для нагнетания, так и для выгрузки молекул газов, воды и глюкозы. Каждый ротор имеет 12 “гнезд” для присоединения молекул, расположенных по длине окружности ротора. МСР позволят нагнетать в резервуары химически чистые вещества, в которых не будет ни одной чужеродной молекулы.

С использованием наносенсоров созданы интересные научные проекты, многие из которых уже воплощены в жизнь, а часть пока что находится в стадии разработки. Рассмотрим некоторые из них.

## **ПРОЕКТ “УМНАЯ ПЫЛЬ”**

В романе известного фантаста Станислава Лема «Непобедимый» грозным оружием будущего были не громоздкие космические крейсера или танки, а микроскопические частички кремния. По отдельности эти песчинки представляли собой безобидный кварцевый песок, но, объединяясь в пылевые тучи, превращались в мощное оружие.

Благодаря развитию нанотехнологий предсказания фантаста становятся реальностью. В 1998 году американские ученые из военного агентства DARPA выдвинули концепцию “умной пыли” (smart dust). Суть ее заключается в том, чтобы разбрасывать с самолетов над зоной боевых действий тысячи крошечных сенсоров-радиопередатчиков, которые незаметно для противника станут отслеживать все его перемещения и действия. Предполагалось также, что простые по отдельности сенсоры будут самоорганизовываться в сложную, наделенную искусственным интеллектом

сеть, которая сможет производить фильтрацию и первичную обработку собранных данных, дабы переправлять командование лишь существенную информацию.

Одной из самых плодотворных разработок в этом направлении стал совместный проект Калифорнийского университета в Беркли и корпорации Intel, в рамках которого созданы умные сенсоры Motes (в переводе с англ. – “пылинки”). Что же представляют собой эти “пылинки”? Это миниатюрные чувствительные приборы размером с таблетку аспирина, способные автономно работать в любых условиях и с помощью радиоволн объединяться в локальные сети для передачи собранной информации центральному компьютеру.

Исследователи изготовили несколько сотен экспериментальных “умных пылинок”. Все “пылинки” снабжены сенсорами и радиопередатчиками, передающими сигнал по цепочке от одного робота к другому. Поскольку объем памяти “пылинки” составляет лишь несколько килобайт, то для их совместной работы разработали специфическую “крошечную” операционную систему TinyOS, оперирующую файлами размером порядка 200 байт, и соответствующую систему баз данных TinyDB, проводящую внутрисетевую обработку данных. Стоит отметить, что при этом они отличаются достаточно долгим сроком службы – их батареек хватает на несколько лет! Секрет такой долговременной работы “пылинок” заключается в том, что они включаются лишь на короткое время: делают замеры, передают сигнал – и снова “засыпают”.

Что же касается принципов самоорганизации сети, то в ее основу положена логическая система простых “локальных правил”. Когда на местности развернуты тысячи сенсоров и шлюзов-маршрутизаторов, то простое правило для каждого сенсора гласит: “Установить связь с ближайшим шлюзом”. Следовательно, все сенсоры автоматически группируются вокруг ближайших шлюзов.

Первые испытания “умной пыли” проводились в марте 2001 года на военной базе в Калифорнии. Тогда с самолета было сброшено шесть “умных пылинок”. Попадая на землю, они тут же объединились в беспроводную сеть и приступили к измерению напряженности магнитного поля вокруг себя. А после того как мимо проехала машина, принялись рассчитывать ее скорость и определять направление движения, сообщая эти данные переносному компьютеру, находящемуся в ближайшем лагере.

### **Области применения “умной пыли”:**

Благодаря таким качествам, как беспроводность, автономность, миниатюрность, множественность, надежность и относительно низкая стоимость, “умная пыль” уже стремительно находит применение в повседневной человеческой жизни. Помимо военных и полицейских приложений, самоорганизующиеся сенсорные сети могут использоваться и в мирных целях — от наблюдения за окружающей средой до присмотра за

пожилыми людьми. Приведем лишь несколько примеров использования “умной пыли”, давшего высокие положительные результаты.

Каждое лето остров Дикой Утки в двенадцати милях от берегов штата Мэн подвергается массовому нашествию морских птиц, собирающихся здесь для выведения потомства. Чтобы выяснить, сколько птенцов они высиживают и какие условия для этого требуются, орнитологу Джону Андерсону приходилось каждый сезон обследовать тысячи норок, выбиваясь из сил и нарушая покой птиц. После того как два года назад Андерсон и его группа разбросали по острову сеть “умных пылинок” и подключили питающуюся от солнечной батареи базовую станцию к Интернету, их жизнь и работа коренным образом изменились. “Вы можете находиться в любой точке мира, – восхищается Андерсон, – и знать, что в данный момент происходит в любой из норок, куда мы подбросили наши маленькие и незаметные сенсоры”.

В прошлом году биолог университета Калифорнии в Беркли Тодд Доусон развернул в местном ботаническом саду сеть из 80 миниатюрных приборов производства корпорации Intel и получил первую в мире трехмерную картину изменений микроклимата в вечнозеленом лесу. Аналогичный, но более масштабный проект по исследованию экосистем осуществляет сейчас с помощью тех же малышек лос-анджелесский университет Калифорнии в лесном заповеднике около города Palm Springs.

Другие исследователи испытывают «motes» в качестве средства для моделирования последствий землетрясений, мониторинга движения транспорта в военных зонах, использования воды в сельскохозяйственных угодьях, получения информации о состоянии зданий, дорог, загрязнении водоемов – этот перечень можно продолжать до бесконечности. В частности, это будет очень важно для тех «motes», которые будут использоваться в городах для обнаружения признаков нападения биотеррористов.

Одним из обоснованных опасений являются сомнения по поводу правомочности данной технологии. Помимо позитивных применений, “умная пыль” может играть роль и незаметного подслушивающего устройства (особенно если учесть современные темпы миниатюризации электроники), что дает ее обладателям большие возможности для вторжения в личную жизнь граждан. А по мере ее распространения вероятность злоупотреблений полученной информацией может только расти. Но поскольку остановить научно-технический прогресс еще не удавалось, это, по-видимому, должно привести к совершенствованию законов с учетом появившихся новых технических возможностей покушения на неприкосновенность личности.

### **ПРОЕКТ “ЭЛЕКТРОННЫЙ НОС”**

Представьте, что вы после продолжительной вечерней прогулки заходите в дом, где печется яблочный пирог. С первой же секунды ваш нос, почуяв и распознав аппетитный аромат, сообщит об этом вашему мозгу.

Как это происходит? Дело в том, что практически любое химическое вещество издает специфический запах. Попадая в нос, молекулы этого вещества, присутствующие в воздухе в небольших концентрациях, раздражают соответствующие рецепторы, передающие в мозг информацию о наличии в воздухе определенных веществ посредством нейронной сети.

Известно, что чувствительность носа у людей сильно различается. Профессиональные дегустаторы парфюмерии обладают уникальным “нюхательным” даром и превосходят в этом обладателей обычных носов. Специально натренированные собаки-ищейки способны “вынюхивать” определенные виды наркотических или взрывоопасных веществ. Но ни одна собака не в состоянии уловить запах человека в помещении, где сильно пахнет бензином, ацетоном, краской, или когда следы присыпаны пахучим веществом (например, табаком); на остроту обоняния самого первоклассного дегустатора сильно влияют такие факторы, как усталость, различные инфекции, токсические вещества, общее физическое состояние, субъективность в оценках восприятия и т.д.

С целью избавления от этих и других неудобств в настоящее время разрабатываются различные варианты так называемого “электронного носа”.

***Электронный нос – это мультисенсорная система для скоростного анализа состояния воздуха, имитирующая работу человеческого органа обоняния.***

Такое устройство представляет собой программируемый набор датчиков, каждый из которых “нюхает” отдельный компонент запаха вещества или продукта. Чем больше датчиков установлено, тем точнее результат. Наносенсоры для электронного носа подбираются по их химическому средству, и обычно для этой цели используются полимерные проводящие плёнки.

В отличие от обычных газовых сенсоров, разрабатываемых специально для каждого отдельного вещества, электронный нос достаточно универсален, а с помощью наносенсоров способен уловить и детектировать настолько малые концентрации веществ, что с ним не сравнится ни одна ищейка.

**Строение электронного носа**

Как правило, электронный нос состоит из трех функциональных узлов:

- системы пробоотбора;
- матрицы сенсоров с заданными свойствами;
- блока процессорной обработки сигналов, поступающих от сенсоров.

Исследуемая проба закачивается воздушным насосом в кюветное отделение, где установлена линейка или матрица сенсоров. Там порция газовой смеси разделяется на отдельные фракции, которые прогоняются через систему специальных рецепторов и, в зависимости от состава и количества, изменяют их характеристики. В одном из вариантов

электронного носа присоединение специфической молекулы к поверхности сенсора, представляющего собой тончайшую иглу толщиной в 100 нм и длиной 50 микрон, вызывает изменение резонансной частоты за счет изменения его массы. Измеряя частоту колебаний, можно определить присутствие специфических групп молекул.

Величины показаний каждого детектора передаются на процессорный модуль. Специальная программа анализирует полученные данные и выдает результаты в виде своеобразных “клякс” - хроматограмм (на самом деле это графики интенсивностей запахов в центральных координатах).

После дегустации в систему подаются пары промывочного газа (например, спирта), чтобы удалить пахучее вещество с поверхности датчиков и подготовить прибор к проведению нового измерительного цикла.

Период времени, в течение которого сенсоры электронного носа анализируют закаченную пробу воздуха, называется *временем отклика*. Современные образцы отличаются достаточно высоким быстродействием. Время отклика у некоторых из них составляет порядка 10 секунд.

Период подачи в ячейку промывочного газа получил название *времени восстановления* (латентного периода). Время восстановления, как правило, колеблется в пределах минуты.

Следует отметить, что проблема идентификации запахов с алгоритмической точки зрения достаточно сложна (каждый запах представляет собой сложный комплекс химических соединений), поэтому для распознавания образов запаха система “электронный нос” использует элементы искусственного интеллекта. В частности, наиболее перспективным считаются так называемые искусственные нейронные сети (ИНС).

Нейронные сети представляют собой компьютерную имитацию взаимодействующих нейронов мозга человека и состоят из ряда соединенных между собой простых обрабатывающих информацию единиц – нейронов. Слои нейронов, получающих внешнюю информацию, называются *входными*, выводящих конечный результат – *выходными*, промежуточные слои – *внутренними*, или скрытыми. При этом у каждого нейрона имеются несколько входов и только один выход. Главным плюсом нейронных сетей является их *обучаемость*, то есть возможность целенаправленной минимизации ошибок выходных сигналов.

## **Области применения электронного носа**

До недавнего времени главными препятствиями на пути использования электронного носа были его малая эффективность и высокая цена. Ранние сенсорные матрицы имели недостаточную чувствительность, были не специфическими, медлительными, часто нестабильными в течение длительного времени и дорогими.

На сегодняшний день достаточно большое количество “электронных носов” являются коммерчески доступными приборами. Современный электронный нос срабатывает за 10 секунд, обладает высокой степенью

специфичности и чувствительности, стабильно работает в течение длительного времени и использует сравнительно недорогую технологию твердотельного датчика-сенсора. Сейчас стоимость такого прибора составляет от \$20 тыс. до \$100 тыс., но по мере совершенствования технологии изготовления самих сенсоров прогнозируется существенное снижение их стоимости.

Тем не менее, уже сегодня “электронные носы” уже оказывают помощь в решении многих проблем.

**Криминалистика и национальная безопасность.** “Электронный нос” может обеспечить новые возможности в борьбе с контрабандным ввозом и распространением наркотиков, предупредить террористические диверсии. Вынюхивая метан, можно быстро обнаружить и устранить утечки в газопроводах.

**Промышленность.** Есть сведения, что в районе многих месторождений угля и нефти наблюдается повышенная микроконцентрация этого природного газа. Стало быть, “электронный нос” способен отыскивать залежи этих ископаемых.

**Пищевая промышленность.** “Электронный нос” может быть использован для оценки свежести продуктов, контроля качества, мониторинга случайных или преднамеренных загрязнений или несоответствий торговой марке. Например, с помощью этого прибора удалось установить, что почти половина образцов кофе “Нескафе”, продаваемого в наших магазинах, очень далека от эталона. То же самое и с коньяками.

Электронный нос необходим при разработке и производстве кормов для животных, ведь в этом случае сами потребители продукта не могут прокомментировать его запах.

Портативный интегральный прибор может помочь туристам отличить съедобные природные объекты от несъедобных.

**Медицина** . Индивидуальный запах выделений человека уже давно используется в классической медицине как важный диагностический признак. В XXI веке нос врача заменит “электронный нос”. Ученые Пенсильванского университета создали “электронный нос”, который выявляет инфекционные болезни по дыханию обследуемого человека. Дело в том, что все бактерии, независимо от своей природы, в процессе жизнедеятельности выделяют различные газы. В случае поражения инфекцией дыхательных путей эти газы обязательно присутствуют в выдохе. “Электронный нос” подносится ко рту больного, получает его выдох и сравнивает химический состав с базой данных типичных примеров химического состава выдоха заведомо больных людей, на основании чего ставится соответствующий диагноз.

Образец прибора, разработанный в Иллинойском институте технологий способен обнаружить в воздухе возбудителей туберкулеза и других

инфекционных заболеваний. По запаху станет возможным диагностировать пневмонии, онкологические заболевания и даже атипичную пневмонию (SARS). При черепно-мозговых травмах на самых ранних этапах можно будет распознать запах вытекающей спинномозговой жидкости, что позволит предотвратить многие смертельные исходы травматических поражений центральной нервной системы.

Следует отметить, что диагностика заболеваний дыхательных путей является в медицинской практике очень сложным процессом. Отличить, скажем, пневмонию от обычной респираторной инфекции типа ОРЗ удастся далеко не сразу. Применение “электронного носа” позволяет ускорить проведение анализа, снизить стоимость и повысить точность результатов. Ученые считают, что “электронный нос” будет таким же верным спутником врача, как и аппарат для измерения артериального давления.

**Развлечения.** Уже сегодня создан небольшой прибор, позволяющий синтезировать запахи, смешивая ароматические вещества в определенных компьютером пропорциях. Объединив его с “электронным носом” можно будет «отсканировать запах», а потом передать его через Интернет и воспроизвести! Компьютерные игры наполнятся ароматами, а продавцы пиццы и парфюмерии смогут размещать запахи продукции на своих сайтах. Впрочем, с парфюмерией все обстоит не совсем гладко – ведь если каждая девушка сможет скачать из Интернета понравившийся запах, то не надо будет покупать духи. Более того – можно будет отсканировать электронным носом запах духов в магазине или даже на дискотеке – и спокойно синтезировать их дома! Не говоря уже о том, что на рынке можно будет купить коллекции тысяч ароматов, записанные на CD. Видимо, парфюмерная отрасль начнет борьбу с «ароматическим пиратством», как производители музыки и программ.

Многим знакома электронная робот-собака Aibo. Так вот если оснастить ее “электронным носом” она сможет узнавать хозяина по запаху и различать предметы как настоящая!

### **ПРОЕКТ “ЭЛЕКТРОННЫЙ ЯЗЫК”**

Для анализа многокомпонентных жидкостей ученые из Санкт-Петербургского университета Юрий Власов и Андрей Легин совместно с итальянскими коллегами из Римского университета “Тор Вергата” изготовили систему химических сенсоров типа “электронный язык”. Этот прибор распознает жидкости сложного состава по вкусу, то есть выполняет работу электронного дегустатора.

В основе этой системы – массив сенсоров, методы распознавания образов и многомерной калибровки для обработки данных. Издавна принято различать четыре основных вкуса: кислый, сладкий, соленый и горький. В целом же считается, что вкусовые ощущения связаны с характерными сигналами” отпечатками”, порождаемыми разными сочетаниями импульсов

от вкусовых рецепторов языка. На этих же принципах строится и работа электронного языка. Он состоит из четырех разных химических сенсоров, каждый из которых по-разному реагирует (изменением электрического сопротивления) на тот или иной вкус. Комбинация сигналов сенсоров составляет электронный “отпечаток” вкуса. Для удобства классификации “отпечатков” разработчики сводят реакции всех сенсоров к местоположению одной точки на графике. Присутствие сладкой компоненты смещает точку к верхней левой вершине диаграммы, кислой компоненты – к верхней правой вершине, горькой или соленой – вниз графика. Вкус кофе при такой классификации, к примеру, попадает в нижнюю часть диаграммы, ближе к середине по горизонтали, а такие, казалось бы, похожие для человеческого языка вкусы дистиллированной и слабо минерализованной воды оказываются на графике легко различимыми.

Как и “электронный нос”, данная система основана на хроматографии, когда состав смеси определяется путем разделения присутствующих в ней компонентов. В “электронном языке” это достигается за счет применения специального микрочипа с миллионами мельчайших каналов, предназначенных для отбора молекул строго определенного размера. Сигнал от микрочипа обрабатывается компьютером и выдается в удобной для пользователя форме.

Возможности распознавания вкуса с помощью “электронного языка” ученые показали на примере минеральной воды, соков, кофе и растительного масла: электронный дегустатор успешно различил около 30 видов грузинских и итальянских минеральных вод, более 30 различных соков, 15 типов кофе, представляющих смеси разных близких по вкусу сортов. Разумеется, “электронный язык” легко отличил настоящую, природную минеральную воду от ее искусственной подделки, хотя по основному химическому составу они были практически идентичны. Удалось решить и более сложную задачу – распознать три разных сорта растительного масла. На очереди твердые пищевые продукты – фрукты, мясо, рыба.

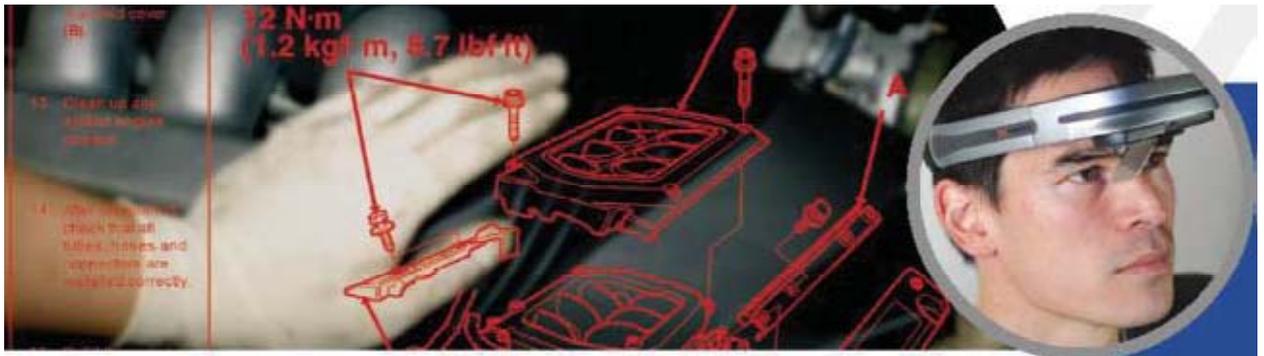
Помимо чисто дегустаторских “способностей” электронного языка, его также можно использовать и для анализа рабочих жидкостей на предмет наличия примесей. Кроме того, станет возможным быстрый и точный мониторинг окружающей среды, ведь для определения уровня загрязнения воды достаточно «лизнуть» воду в реке или озере.

### **ПРОЕКТ “ВИДЕООЧКИ”**

Новая технология позволила компании Microvision сделать систему проекции изображения прямо на сетчатку глаза. Этим создается иллюзия полноразмерного изображения.

Теперь не только пилоты сверхзвуковых самолетов могут использовать шлем с трехмерным изображением. Он перешел на службу к автомеханикам и инженерам. Простой автомеханик, надев такой шлем, превращается в

информационного гуру. На сетчатку глаза передается рисунок, показывающий точные чертежи выбранного автомобильного узла, его комплектация, необходимые расчеты. С помощью беспроводной системы пользователь связан с Интернетом – если чего нет в стандартной базе данных, он может поискать там. Также с помощью встроенной системы расчетов автомеханик может рассчитать любой узел автомобиля (или другого механизма).



Видеоочки-экспертная система NOMAD от Microvision

Вскоре такими шлемами обзаведутся не только автолюбители. Фактически передаваемая на сетчатку глаза картинка может быть любой. Новинка очень пригодится инженерам, химикам, биологам и, конечно, любителям компьютерных игр.