

"Radio" is monthly publication on audio, video, computers, home electronics and telecommunication

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ: ЗАО «ЖУРНАЛ «РАДИО»

Зарегистрирован Министерством печати и информации РФ 01 июля 1992 г.

Регистрационный ПИ № ФС77-50754

Главный редактор В. К. ЧУДНОВ

Редакционная коллегия:

А. В. ГОЛЫШКО, А. С. ЖУРАВЛЁВ, А. Н. КОРОТОНОШКО,

К. В. МУСАТОВ, И. А. НЕЧАЕВ (зам. гл. редактора),

Л. В. МИХАЛЕВСКИЙ, С. Л. МИШЕНКОВ, О. А. РАЗИН

Выпускающие редакторы: С. Н. ГЛИБИН, А. С. ДОЛГИЙ

Обложка: В. М. МУСЯКА

Вёрстка: Е. А. ГЕРАСИМОВА

Корректор: Т. А. ВАСИЛЬЕВА

Адрес редакции: 107045, Москва, Селивёрстов пер., 10, стр. 1

Тел.: (495) 607-31-18. Факс: (495) 608-77-13

E-mail: ref@radio.ru

Группа работы с письмами — (495) 607-08-48

Отдел рекламы — (495) 607-31-18; e-mail: advert@radio.ru

Распространение — (495) 608-81-79; e-mail: sale@radio.ru

Подписка и продажа — (495) 607-77-28

Бухгалтерия — (495) 607-87-39

Наши платёжные реквизиты:

получатель — ЗАО "Журнал "Радио", ИНН 7708023424,

р/сч. 40702810438090103159

Банк получателя — ПАО Сбербанк г. Москва

корр. счёт 3010181040000000225 БИК 044525225

Подписано к печати 19.07.2018 г. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.

Объём 8 физ. печ. л., 4 бум. л., 10,5 уч.-изд. л.

В розницу — цена договорная.

Подписной индекс:

по каталогу «Роспечати» — 70772;

по Объединённому каталогу «Пресса России» — 89032;

по каталогу Российской прессы ПОЧТА РОССИИ — 61972.

За содержание рекламного объявления ответственность несёт рекламодатель.

За оригинальность и содержание статьи ответственность несёт автор.

Редакция не несёт ответственности за возможные негативные последствия использования опубликованных материалов, но принимает меры по исключению ошибок и опечаток.

В случае приёма рукописи к публикации редакция ставит об этом в известность автора. При этом редакция получает исключительное право на распространение принятого произведения, включая его публикацию в журнале «Радио», на интернет-страницах журнала, CD или иным образом.

Авторское вознаграждение (гонорар) выплачивается в течение двух месяцев после первой публикации в размере, определяемом внутренним справочником тарифов.

По истечении одного года с момента первой публикации автор имеет право опубликовать авторский вариант своего произведения в другом месте без предварительного письменного согласия редакции.


В переписку редакция не вступает. Рукописи не рецензируются и не возвращаются.

© Радио®, 1924—2018. Воспроизведение материалов журнала «Радио», их коммерческое использование в любом виде, полностью или частично, допускается только с письменного разрешения редакции.

Отпечатано в АО «ПОЛИГРАФИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС «ЭКСТРА М»,

143400, Московская обл., Красногорский р-н, а/м «Балтия», 23 км.

Зак. 18-07-00155 от 16.07.18 г.

Dr.WEB  Компьютерная сеть редакции журнала «Радио» находится под защитой Dr.Web — антивирусных продуктов российского разработчика средств информационной безопасности — компании «Доктор Веб».

www.drweb.com
Бесплатный номер службы поддержки в России:
8-800-333-79-32

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА — КОМПАНИЯ «РИНЕТ»

RINET 

Телефон: (495) 981-4571
Факс: (495) 783-9181
E-mail: info@rinet.ru
Сайт: <http://www.rinet.net>

Internet Service Provider

Как устроен Интернет нановещей

А. ГОЛЫШКО, канд. техн. наук, г. Москва

"Даже из мечты можно сварить варенье, если добавить фруктов и сахара".

(Карлсон)

Если можно превратить в сетевой элемент любую "вещь" от автомобиля до человека, то почему бы не двинуться вглубь автомобиля или даже человека? Так концепция Интернета вещей (IoT — Internet of Things) логично дополняется концепцией Интернета нановещей (IoNT — Internet of NanoThings).

Нанотехнологии — относительно новая отрасль, занимающаяся разработкой чрезвычайно малых устройств, способных производить несложные действия. Будучи простыми и производя только примитивные операции, наномашинки по отдельности не способны выполнять сложные задачи. Во всяком случае, пока. Для обеспечения работы с более сложными приложениями, такими как доставка лекарственных средств к нужному органу в теле человека, требуется возможность обмена информацией и командами между сетевыми объектами и контроллером, что приводит к необходимости создания концепции наносетей. В той же концепции необходимо обязательно предусмотреть связь между IoNT и IoT. Ведь создание интерфейсов, необходимых при переходе из тела человека в привычную нам сеть связи, будет представлять собой отдельную интересную задачу.

В целом IoNT представляет собой множество связанных беспроводной связью наноустройств, которые имеют выход на сети связи и, прежде всего, в Интернет. Иначе множество наномасштабных сетей связи в обозримом будущем могут быть подключены к Интернету, расширив мир IoT до IoNT. Собственно, IoNT — это дальнейшее локальное развитие IoT там, где это необходимо или там, где это возможно. Причём как внутри живых и неживых объектов, так и вне их. Нетрудно предположить, что подобные технологические возможности неизбежно будут возрастать.

Исследователи перспективных технологий для телекоммуникации уже обращались, к примеру, к использованию феромонов, с помощью которых представители флоры и фауны давно научились обмениваться информацией. Как бы это могло выглядеть в какой-нибудь мобильной связи 8G, ещё более чутко улавливающей все нюансы персональных данных клиентской базы? — Ну, к примеру, так. Центр мониторинга клиентской удовлетворённости сервисом отметил резкое изменение исходящего от находящегося в конкретной точке абонента запаха, и встроенный искусственный интеллект, расценив это как испуг, вызвал в эту точку экстренные службы. Кто знает, не будут ли со временем созданы наноустройства в виде нанопыли, имитирующей феромоны?

В опубликованном несколько лет назад корпорацией EMC исследовании "Цифровая вселенная" сказано, что объём цифровой вселенной удваивается каждые два года. И если, согласно прогнозам, IoT — это миллиарды повседневных предметов и устройств, которые имеют уникальные идентификаторы и могут автоматически регистрировать, собирать и получать данные, то IoNT — это уже как минимум триллионы наноустройств.

Современному человеку худо-бедно понятно, для чего можно использовать IoT и какие выгоды это могло бы принести. Но пока всё находится в стадии зарождения, выработки концепции и выбора технологий. Благо, у некоторых продвинутых компаний есть футурологи и прочие марке-

тинговые мечтатели. Однако специалистам интересно, как всё это будет устроено и как оно будет работать. И пока человечество не избрало ничего другого, там наверняка должно быть всё "как у взрослых", т. е. привычные компоненты в исполнении "нано": камеры, телефоны, скалярные датчики, процессоры, карты памяти, источники питания, антенны и приёмопередатчики. Сегодня многие разработчики напряжённо трудятся над этой наномозаикой, чтобы она заработала по образу и подобию макромира, а уж потом она будет как-то меняться с течением времени. Всё зависит от развития новых технологий и их проникновения в нашу жизнь, а также от заинтересованности в них конечных пользователей. В зависимости от количества вещей и их вида могут применяться различные технологии для сбора, обработки и обмена информацией в рамках бесшовной передачи данных между устройствами.

Нанообъекты должны взаимодействовать в любом месте, в любое время, да и сами они вполне могут быть гетерогенными, работая как с IoT, так и с IoNT. Как и в истории с IoT, каждый элемент IoNT в цепочке создания стоимости должен пройти через революционные изменения и оптимизацию своего функционала. Факторы, стимулирующие рынок IoNT, учитывая сопутствующие трудности, зачастую сходятся к государственной поддержке, однако намекающееся увеличение связей оказывается полезным и для лидеров рынка и отрасли.

Развитие нанотехнологий идёт параллельно с появлением новых разработок в Интернете и сенсорных сетях. В последние годы появилось направление нанокommunikаций, целью которого является создание новых парадигм взаимодействия наноустройств для совершенствования их возможностей и способов применения. Однако наноустройства могут общаться не только в одноранговом режиме. Встраивание наносенсоров в различные объекты и устройства, окружающие пользователей, может привести к добавлению нового измерения в концепцию IoT с помощью добавления IoNT. Такие миниатюрные сенсоры, связываемые наносетью, могут поставлять мелкоструктурные данные изнутри объектов или труднодоступных областей. Например, нательные наносенсоры могут обеспечить сбор и передачу электрокардиографических и других жизненно важных сигналов. Микросенсоры, установленные в окружающей среде, могут собирать информацию о патогенах и аллергенах, присутствующих в конкретном физическом месте. Если объединить эти два источника данных на основе IoNT, то можно будет получить точный диагноз и отслеживать состояние пациента.

Тем не менее в лице нанотехнологий инженерное сообщество получило новый набор инструментов для разработки наноразмерных компонентов с беспрецедентными функциональными возможностями. Интеграция нескольких нанокomпонентов в единый организм с помощью наносетей будет способство-

вать развитию всё новых и новых наномашин, что позволит создать множество приложений в биомедицинских, экологических, промышленных и военной сферах. Однако на сегодняшний день пока не до конца ясно не только как наномашинки будут общаться друг с другом, но и как они будут обмениваться информацией с более крупными "вещами". В ответ на данный вызов в последние годы в области нанотехнологий появилось новое направление — наносвязь или коммуникация между нанороботами, нанодронами, наномашинами и др. Размер нанороботов, кстати, составляет от 0,1 до 10 мкм.

Собственно, многие устройства становятся всё более миниатюрными, и скоро физические объекты, подключённые к Интернету, будет непросто заметить невооружённым глазом. Компьютеры размером с крупинку соли будут включать в себя солнечную батарею, тонкоплёночный элемент питания, оперативную память, датчик давления, радиоприёмник и антенну. Видекамеры размерами с зерно уже сегодня работают с высочайшим разрешением, датчики размерами с пылинку (0,05×0,005 мм) могут измерять температуру и давление, распознавать движение и передавать полученные данные.

Взаимосвязь между наносетями и Интернетом требует появления новых технологических решений для создания интерфейсов между нано- и макросетями, развития новых способов связи, методов обработки и хранения огромного объёма данных, циркулирующих в наносетях, новых моделей обслуживания данных от nanoисточников информации на наноуровне может основываться на различных физических принципах, например, на молекулярном, т. е. происходящем в биологической окружающей среде, а также акустическом и, разумеется, электромагнитном. Последний включает в себя различные виды передачи информации: фемтосоты, ZigBee, ультраширокополосные сигналы, Li-Fi и пр. Сама связь может осуществляться как между устройствами, расположенными на одном кристалле, так и между такими же кристаллами, а также для выхода на микроуровень.

Вот, к примеру, мигающие огни, которые обычно нас раздражают, оказывается, могут приносить пользу. Связь с помощью видимого света (Visible Light Communication — VLC) или Li-Fi, как её ещё называют, использует световые импульсы для беспроводной передачи информации. Базирующаяся на светодиодах Li-Fi достигла удивительно высоких скоростей передачи информации в лабораторных условиях и уже может соревноваться с обычным Wi-Fi. Кстати, ещё в 2005 г. с помощью методов геной инженерии были созданы нейроны, реагирующие на свет определённого цвета. Соответствующая технология получила название оптогенетика. Световые лучи различных цветов позволяют включать и выключать конкретные нейроны, чтобы, например, лечить хроническую боль или успокаивать пациента. Важным фактором такой

световой терапии является время, поскольку один и тот же сигнал, посланный на несколько миллисекунд раньше или позже, может восприниматься мозгом по-разному.

Однако для связистов более привычными и понятными являются принципы электромагнитной связи. Они определяются как передача и приём электромагнитного излучения от различных компонентов на основе новых наноматериалов. Одним из реализуемых сегодня воплощений наносвязи является парадигма разработки беспроводных сетей на чипе (Wireless Network on Chip, WiNoC), в том числе для передачи данных между нанозулами, расположенными на общей подложке. Разумеется, это ещё не IoNT, но что-то весьма близкое по технологии, которая также имеет свою небольшую историю. В своё время работа над методологией проектирования мультиядерных чипов привела к идее создания сети на чипе (Network on Chip, NoC) и стала важным направлением развития систем на кристалле (System on Chip, SoC). И уже в последнее время взгляды специалистов обратились к WiNoC, которая применима для нанотехнологий и для создания IoNT.

В частности, в настоящее время актуальна проблема обеспечения электрического контакта наноэлектронного устройства и какого-либо макроэлемента. Выяснилось, что обычно используемый метод литографического изготовления контактных площадок неэффективен для широкомасштабной параллельной обработки сигналов, требующей объединения множества наносистем на одном кристалле. Вот эту проблему и решают с помощью беспроводной связи, когда используют эффекты ёмкостной связи между миниатюрными контактными площадками или индуктивной связи между спиральными катушками индуктивности.

Одна из самых распространённых реализаций WiNoC предусматривает наличие в одном кристалле и беспроводных, и традиционных проводных линий передачи сигналов. При этом вся система на кристалле условно делится на подсети из групп ядер, внутри которых связь осуществляется с помощью проводных линий.

Каждая такая подсеть оборудована миниатюрной базовой станцией (БС), обеспечивающей передачу и получение пакетов данных по радиоканалам от других подсетей. Все ядра в подсети связаны с их БС через проводные линии. Передача пакета данных между ядрами разных подсетей осуществляется сначала локально до соответствующей БС, затем по эфиру до БС подгруппы, в которой находится адресат, и далее — по проводной линии к пункту назначения. Объединение БС в радиосеть может выполняться по топологии звезды, петли, mesh-сети и т. п., т. е. так же, как это обычно делается на макроуровне. В более сложных решениях участки проводной передачи сигналов могут вовсе отсутствовать, хотя описанная выше гибридная реализация более проста технологически.

Последние достижения в области молекулярной физики, в частности,



новых свойств углерода, применимых в интересах электроники, открыли дверь к новому поколению электронных компонентов — наноаккумуляторов, нанопамяти, логической схемотехники на наноуровне и наноантенн. Кстати, миниатюризация классической антенны (да и не только антенны) в соответствии с требованиями к размерам наномашин предполагает использование очень высоких радиочастот, что, вроде бы, может поставить под угрозу реализуемость таких сетей.

В настоящее время исследования в нанотелекоммуникациях сфокусированы на увеличении пропускной способности канала связи при использовании сверхширокополосных сигналов, занимающих весь терагерцовый диапазон частот (1 ТГц = 1000 ГГц). Соединения между наномашинками со скоростями в несколько терабит в секунду вполне возможны, но только на расстоянии намного меньше метра. Правда, во многих перспективных приложениях наносетей большего и не нужно. Более важно найти способ увеличить радиус действия отдельного узла связи. Пропускная способность канала в терагерцовом диапазоне уже исследуется на предмет определения его потенциала. С точки зрения обеспечения коммуникации, уникальные свойства, наблюдаемые в новых наноматериалах, будут задавать требования к конкретным полосам радиочастот, задержек и излучаемой мощности. Все эти задачи подразумевают фундаментальные изменения в текущем состоянии дел в области аналитических моделей каналов, сетевых архитектур и протоколов связи, являясь серьёзным источником для новых научных исследований.

Уникальной особенностью терагерцового диапазона частот является молекулярная абсорбция электромагнитного излучения. Это эффект, возникающий при передаче сигнала на частотах, близких и равных резонансным частотам молекул, которые поглощают часть энергии сигнала и создают шум на этих же частотах за счёт внутренней кинетической энергии молекул. Способность поглощать молекулярную энергию определяется физическими свойствами: молекулярными связями, пространственной ориентацией и пр. В атмосфере Земли наибольший вклад вносит абсорбция молекулами водяного пара. Ещё одной немаловажной проблемой является достаточно сильное затухание сверхвысокочастотного сигнала при распространении его в свободном пространстве во все стороны. Однако существует способ избежать серьёзных искажений сигнала, используя так называемые окна прозрачности, где потери в связи с абсорбцией на малых и средних дистанциях пренебрежительно малы.

Сегодня разрабатывают новые механизмы связи для электромагнитных наносетей, включающие в себя модуляцию на основе передачи фемтосекундных импульсов. Кстати, наноантенны позволяют использовать в беспроводных сетях на чипе не только радиочастотный, но и оптический диапазон. Будущие радиочастотные электронные

наноустройства могут использовать следующие проводящие наноматериалы: серебряные наночастицы, графитовые нанотрубки или графеновое покрытие.

В частности, на основе графена могут быть реализованы так называемые плазменные наноантенны. Не так давно исследователи из Технологического института Джорджии продемонстрировали с помощью компьютерного моделирования принципиальную возможность создания наноантенн из графена, с помощью которых сотни и тысячи механизмов или устройств нано- и микроуровней могут объединиться в единую сеть с помощью беспроводной системы связи. Во-первых, почему графен? Потому, что, в отличие от традиционных металлов, вроде меди или серебра, графен можно применить в антенне с гораздо меньшим количеством подводимой энергии. Этот эффект достигается за счёт использования поверхностных электронных волн, возникающих на поверхности графена при определённых условиях, когда электроны создают колебания электрического поля, которые, в свою очередь, становятся источником электромагнитной волны, распространяющейся исключительно по поверхности графена. Данное явление известно как поверхностная плазмон-поляритонная волна (surface plasmon polariton, SPP), которая позволит графеновым наноантеннам работать в нижней области терагерцового диапазона (0,1...10 ТГц). Кстати, аналогичный эффект в металлах (например, золоте) происходит на гораздо более высоких частотах. Благодаря новой графеновой наноантенне можно уменьшить на два порядка частоту радиопередающих устройств и уменьшить количество требуемой для её работы энергии на четыре порядка. Теоретически терагерцовый диапазон, в котором эффективно работают графеновые наноантенны, может обеспечить передачу данных в беспроводных сетях со скоростью, на два порядка превышающей скорость существующих беспроводных технологий.

В свою очередь, пьезоэлектрические свойства нанопроводников из окиси цинка уже использованы для создания наногенераторов, способных вырабатывать электроэнергию и производить электромагнитные волны в широком диапазоне частот, включая и тот, где графеновые наноантенны показывают максимальную эффективность. В комбинации с графеновыми наноантеннами подобные наногенераторы являются законченным передающим беспроводным устройством, которое требует совсем небольшого количества энергии, получаемой от энергии движения нано- или микромеханизма. Помимо этого, создаются приборы, например сенсоры, которые питаются благодаря метаболическим процессам, протекающим в клетках.

Кстати, пока исследователи мечтают об организации связи между наномашинками, использование графеновых наноантенн в сетях макромасштаба выглядит более привлекательно. Не так давно представители компании Ericsson Research представили прото-

тип миниатюрного полупроводникового приёмопередатчика, который может передавать данные со скоростями до 40 Гбит/с на частотах 141,5...148 ГГц, что примерно в 40 раз быстрее того, что способны обеспечить технологии LTE.

Существенным технологическим прорывом, позволившим перейти от теории беспроводных сетей на кристалле к их практической реализации, стало появление несколько лет назад комплексных наноантенн в виде графеновых нанотрубок, которые для обеспечения частотного мультиплексирования сигналов имеют разную длину и, следовательно, резонансную частоту. Подобное решение позволяет обеспечить выход сетей на чипе на внешний макроуровень. Причём на аналогичных принципах можно организовать и электропитание наноустройств. В этом случае наноантенны могут использоваться в качестве выпрямляющих антенн (ректенн), в которых роль выпрямителей выполняют нанотрубки с внедрённым дефектом атомной сетки. Такие наноструктуры позволяют создавать активные устройства, обладающие в дополнение к частотно-селективным и пространственно-избирательным свойствам возможностью последующего детектирования сигнала и выделения энергии, достаточной для питания наноустройства.

Пропускная способность наносети зависит не только от способа её физической реализации, но и от методов обработки сигналов, которые позволяют увеличить количество каналов информационного обмена при сохранении ширины полосы их пропускания. В частности, по аналогии с макросетями для этих целей предлагается технология мульти-MIMO (Multipoint Input — Multipoint Output). С этой целью в центре кристалла формируется антенный кластер центральной базовой станции — топологически структурированный набор малоразмерных нанотрубок. Все остальные наноузлы (расположенные на том же кристалле) оснащаются антенными решётками MIMO, составленными, например, из дипольных наноантенн (их может быть восемь или больше). При этом допускается использовать наноантенны одинаковой длины, поскольку при использовании методов пространственно-временного кодирования MIMO-сигналы не обязательно разделять по частоте. Рабочий диапазон устройства может быть миллиметровым или субмиллиметровым. Алгоритмическое решение задачи декодирования информации в такой мульти-MIMO-системе упрощается благодаря неизменности координат антенн и стабильности условий распространения сигналов под корпусом микросхемы.

Поиск новых конструктивных решений для реализации многопользовательских систем MIMO в составе WiNoS привёл к идее использования так называемых пирамидальных базовых наностанций. На вертикальных стенках такой нанопирамиды, напоминающей ступенчатые пирамиды древних цивилизаций Центральной Америки, можно разместить наноан-

тенны, а на горизонтальных поверхностях уступов — единичные вибраторы. Одна общая наноантенна может быть установлена на несколько слоёв нанорешетки, каждый из которых решает свою задачу. Дифференциация структур нанорешеток по уровням пирамиды даёт возможность эффективно использовать кластерную технологию формирования многопользовательских систем MIMO (мульти-MIMO) в составе WiNoC.

Для увеличения дальности связи WiNoC с внешними потребителями целесообразно использовать параллельную передачу данных с помощью кластеризации распределённых на кристалле наносистем MIMO. В зависимости от дальности связи размер кластера может адаптивно изменяться путём объединения нескольких наносхем в один излучатель. Похожее решение по принципу "матрёшки" возможно и для реализации одновременной многочастотной связи, при этом верхний уро-

вень наносхем объединён в один кластер, следующий под ним уровень — в другой и т. д. Таким способом формируются множественные кластеры, вложенные друг в друга и различающиеся рабочим диапазоном частот и количеством объединённых наносхем. Кластеры, образующие MIMO-систему, могут иметь различную топологию, что позволяет минимизировать краевые эффекты, снизить уровни боковых лепестков диаграмм направленности и уменьшить взаимное влияние излучателей. Для каждого диапазона частот можно создавать свою конфигурацию кластеров и их оптимальную топологию. В итоге обеспечивается связь в разных диапазонах частот и в нескольких стандартах одновременно, что позволяет решить многие, различные по функциональному назначению, задачи. К примеру, можно совмещать функции передачи данных и приём сигналов GPS или связь с макроуровнем плюс беспроводное питание чипа с помощью

ректенн. Такой подход позволяет использовать сравнительно низкочастотное излучение внутри кристалла и улучшить энергетику распространения радиоволн при передаче данных между удалёнными периферийными участками чипа.

Как нетрудно видеть, мысль разработчиков в электромагнитной части наносетей продвинулась уже довольно далеко. Однако не стоит забывать, что наносети могут формироваться и на основе молекулярных взаимодействий или, к примеру, на основе взаимодействия бактерий, над чем также работают группы специалистов. Там будут свои модели канала, сетевые архитектуры, а также принципы и протоколы связи. И ещё неизвестно, какие технологии окажутся более эффективными в будущем. В любом случае надо иметь в виду, что человечество находится на очень ранней стадии исследований в области IoNT, и перед исследователями лежит ещё много трудностей. ■