

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

12+

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:

АНО «РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА «РАДИО»

Зарегистрирован Министерством печати и информации РФ 01 июля 1992 г.

Регистрационный ПИ № ФС77-82030

Главный редактор В. К. ЧУДНОВ

Редакционная коллегия:

А. В. ГОЛЫШКО, А. Н. КОРОТОНОШКО, К. В. МУСАТОВ,
И. А. НЕЧАЕВ (зам. гл. редактора), Л. В. МИХАЛЕВСКИЙ,
С. Л. МИШЕНКОВ

Выпускающий редактор: С. Н. ГЛИБИН

Обложка: В. М. МУСИАКА

Вёрстка: Е. А. ГЕРАСИМОВА

Корректор: Т. А. ВАСИЛЬЕВА

Адрес редакции: 129090, Москва, Протопоповский пер., 25, к. Б

Тел.: (495) 607-31-18.

E-mail: ref@radio.ru

Приём статей — e-mail: mail@radio.ru

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

Распространение — (495) 607-31-18; e-mail: sale@radio.ru

Подписка и продажа — (495) 607-87-39

Бухгалтерия — (495) 607-87-39

Наши платёжные реквизиты:

получатель — АНО "Редакция журнала "Радио", ИНН 7708187140,
р/сч. 40703810538090108833

Банк получателя — ПАО Сбербанк г. Москва

корр. счёт 3010181040000000225 БИК 044525225

Подписано к печати 24.01.2025 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:

Официальный каталог ПОЧТА РОССИИ — П4014;

КАТАЛОГ РОССИЙСКОЙ ПРЕССЫ — 89032.

За содержание рекламного объявления ответственность несёт редакция.

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 публикации в журнале «Радио», на интернет-страницах журнала 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—2025. Воспроизведение материалов журнала «Радио», их коммерческое использование в любом виде, полностью или частично, допускается только с письменного разрешения редакции.

Отпечатано в ОАО «Подольская фабрика офсетной печати»

142100, Моск. обл., г. Подольск, Революционный проспект, д. 80/42.

Зак. 01045-25 .

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

БЛИЖЕ К ЛЮДЯМ

Телефон: +7(495)981-4571
E-mail: info@rinet.ru
Сайт: www.rinet.ru

Нейроморфные вычисления

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

"Подражание — самая искренняя форма лести, которую посредственность может дать величию"

Оскар Уайльд

Человек много чего умеет, а руководит всеми этими умениями его нервная система, которая, помимо мониторинга и управления человеческим телом, ещё умеет думать. Поэтому логично, что давняя мечта наиболее продвинутых индивидуумов заключалась в том, как сделать разумную машину, имитирующую деятельность человеческого мозга. Что же касается Neuromorphic Computing, то это новая компьютерная технология, нацеленная на использование принципов строения и работы последнего. Несмотря на то что указанные принципы изучены не полностью, уже появились нейроморфные компьютеры, или чипы, реализующие модели нейронных систем. Сегодня нейроморфные вычисления всё ещё на стадии исследований, однако им предсказывают большое будущее.

В целом нейроморфные системы стремятся эмулировать функции мозга и нервной системы, чтобы достичь более эффективной обработки информации и улучшить производительность компьютеров. Поэтому для лучшего понимания происходящего начнём с того, что же они, собственно, имитируют.

В теле человека находится бессчётное количество клеток, каждая из которых имеет собственную функцию. Самые загадочные среди них — нейроны, отвечающие за любое совершаемое человеком действие. Нейрон — специфическая структура в нашем организме, которая отвечает за передачу внутри него любой информации, в быту называемая нервной клеткой. Нейроны работают с помощью электрических сигналов и способствуют обработке мозгом поступающей информации для дальнейшей координации производимых телом действий. Каждый из нейронов имеет связь с огромным числом таких же клеток в рамках своеобразной "паутины", которая называется нейронной сетью. Посредством её в организме передаются электрические и химические импульсы, приводящие всю нервную систему в состояние покоя либо, наоборот, возбуждения.

Мы рождаемся с заданным числом нейронов, но связи между ними ещё не сформированы. Нейронная сеть строится постепенно в результате поступающих извне импульсов. Новые толчки формируют новые нейронные пути, именно по ним в течение жизни побежит аналогичная информация. Мозг воспринимает индивидуальный опыт каждого человека и реагирует на него. К примеру, ребёнок схватился за горячий утюг и отдернул руку. Так у него появилась новая нейронная связь.

Стабильная нейронная сеть выстраивается у ребёнка уже к двум годам, и уже с этого возраста те клетки, которые не используются, начинают ослабевать, что, однако, никак не мешает развитию интеллекта. Ребёнок познаёт мир через уже устоявшиеся нейронные связи, а не анализирует бесцельно всё вокруг. То есть даже у такого малыша есть практический опыт, позволяющий отсека-

ненужные действия и стремиться к полезным.

Нейрон состоит из основного тела и ядра. От клеточного тела идёт ответвление многочисленных волокон, которые именуются дендритами. Мощные дендриты называются аксонами, протяжённость которых варьируется от нескольких миллиметров до более метра (т. е. непосредственно до объекта управления). Аксоны играют ведущую роль в передаче информации между нейронами и обеспечивают работу всей нервной системы.

Место соединения дендрита (аксона) с другим нейроном называется синапсом. Дендриты при наличии раздражителей могут разрастись настолько сильно, что станут улавливать импульсы от других клеток, что приводит к образованию новых синаптических связей, которые играют существенную роль в формировании личности человека.

Нейроны можно обнаружить в различных органах человека, а не исключительно в головном мозге. Большое их число расположено в рецепторах органов чувств. Их совокупность составляет основу периферической нервной системы, а сами они имеют несколько разновидностей.

Афферентные нейроны являются переносчиками информации от органов чувств в головной мозг. У этого вида нейронов самые длинные аксоны. Импульс извне поступает по аксонам строго в определённый участок головного мозга, звуковая информация — в слуховой "отсек", запах — в "обонятельный" и т. д. Промежуточные нервные клетки обрабатывают сведения, поступившие от афферентных нейронов и передают её периферическим органам и мышцам. На заключительном этапе в дело вступают эфференты, которые доводят команду промежуточных нейронов до мышц и других органов тела.

Слаженная работа нейронов трёх типов выглядит так: человек ощущает запах шашлыка, нейрон передаёт информацию в соответствующий раздел мозга, мозг передаёт сигнал желудку, который выделяет желудочный сок, человек принимает решение "хочу есть" и бежит покупать шашлык. Упрощённо так это действует.

Самыми загадочными являются промежуточные нейроны. С одной стороны, их работа обуславливает наличие рефлекса: дотронулся до элемента под высоким напряжением — отдернул руку, полетела пыль — зажмурился. Однако пока не научились объяснять, как обмен между волокнами рождает идеи, образы, мысли. Единственное, что удалось установить учёным, это тот факт, что любой вид мыслительной деятельности сопровождается особой активностью (вспышкой) нервных клеток определённого участка головного мозга.

Ещё существует особая разновидность нейронов, которые именуются зеркальными. Их особенность заключается в том, что они не только прихо-

дят в возбуждение от внешних сигналов, но и начинают "наблюдать" за действиями своих собратьев.

Нейроны выполняют в организме несколько важных функций. Прежде всего, это наиболее изученная из них — распространение информации. Нейроны обрабатывают и переносят в головной мозг все импульсы, которые поступают из окружающего мира или собственного тела. Далее происходит их обработка, подобно тому, как работает поисковик в браузере. По результатам сканирования сведений извне головной мозг в форме обратной связи передаёт обработанную информацию к органам чувств или мышцам. Биологический нейрон, по сравнению с современными процессорами, имеет ничтожную производительность, всего десять сигналов в секунду. Но за счёт распределённой сети передачи сигнала (этакие параллельные вычисления) мозг человека обрабатывает невероятный объём информации одновременно.

К другим функциям нейронов относится аккумуляция знаний (сохранение опыта), интеграция (взаимодействие отделов мозга) и производство до 80 различных белков. Прекращение выработки белков или их выпуск в недостаточном количестве, как, впрочем, и разрыв связей между мозгом и другими органами, способно привести к тяжёлым заболеваниям.

До настоящего времени создать искусственный интеллект (ИИ), который бы приблизился к работе нейронных сетей человека, не удалось. У каждого из примерно 85 миллиардов нейронов в каждом человеческом теле имеются как минимум 10 тысяч обусловленных опытом связей, и все они работают на передачу и обработку информации.

ИИ — всего лишь компьютерная программа, — любил говорить технооптимисты, призывая не бояться его. Однако сегодня это уже не так. В течение последних 20 лет технологические гиганты пытаются реализовать нейросети на аппаратном уровне, т. е. в "железе" и кремнии. А нейроморфные, т. е. подобные живым нервным клеткам, чипы (своего рода процессоры будущего) — это попытка создать новое поколение машин, где работа нейронов будет представлена не только грубой математической моделью, но и будет воспроизводить концепции работы мозга на аппаратном уровне.

Первые электронные компьютеры появились в годы Второй мировой войны и использовались для расчёта баллистических таблиц, дешифровки вражеских сообщений, и поэтому все мировые державы того времени активно спонсировали разработку компьютеров. Главной задачей той эпохи были абсолютная точность и строгое следование заданному алгоритму вычислений.

Несмотря на то что современные компьютеры мало похожи на первые ЭВМ, основные принципы остались теми же. Процессор получает вер-

сию операций на вход и выполняет их по очереди в строго определённом порядке. Это похоже на работу конвейера, а для его работы нужна безупречная синхронизация, иначе разные данные от разных операций перемешаются, результат попадёт в неверную ячейку памяти, и весь дальнейший расчёт будет неверным. Узкое место подобной системы — тактовость, последовательность работы. Параллельные вычисления на нескольких процессорных ядрах дают свой эффект для некоторых задач, но в большинстве случаев разделение расчётов на независимые потоки и совмещение полученных ответов всё равно оказывается неоправданно сложным.

Сегодня для ускорения работы ИИ используются отдельные микросхемы или модули процессоров, чипы для глубокого машинного обучения или отдельных функций — например, для машинного зрения, а также видеокарты, архитектура которых, в частности, справляется с параллельными вычислениями лучше центральных процессоров.

Однако все эти примеры далеки от нейроморфных вычислений, поскольку построены на традиционной последовательной вычислительной архитектуре фон Неймана с разделённым процессором и памятью. Нейроны мозга, в свою очередь, способны и хранить, и обрабатывать информацию одновременно.

Человеческий мозг устроен иначе. Он состоит из множества отдельных нервных клеток, нейронов, каждая из которых принимает сигналы от других нейронов, преобразует их к двоичному сигналу и отправляет дальше по сети. Каждый нейрон работает как бинарный индикатор признака: "было" или "не было", и это немного роднит человека с компьютерами.

Изучение мозга подтолкнуло учёных к созданию искусственных нейросетей — вычислительных систем, которые, подобно человеку, могут обучаться на основе опыта. Математическая модель нейрона выглядит как сумма всех входящих сигналов с коэффициентами и преобразование, которое либо обнуляет сигнал, либо оставляет его. Нейросети состоят из нескольких слоёв нейронов, где каждый следующий слой получает на вход результат работы всех нейронов предыдущего слоя. Это во многом похоже на то, как устроена работа мозга на самом деле.

На вход нейросети подают примеры данных и смотрят, что получилось на выходе. В зависимости от того, насколько ответ нейросети совпал с ожидаемым, корректируют значения коэффициентов (их называют параметрами), иначе говоря, ослабляют или усиливают связь между отдельными нейронами. Если алгоритм корректировки выбран успешно, то после десятков или сотен тысяч примеров параметры каждого нейрона сами подстраиваются под данные. И мы можем научить нейросеть распознавать рукописные буквы, даже



если не можем сформулировать необходимый для этого пошаговый алгоритм.

Математическая теория обучения нейросетей была заложена ещё в 50–60-е годы прошлого века. Были написаны первые перцептроны — алгоритмы, имитирующие работу нейросети на ЭВМ. Для этого все вычисления как для самих нейронов, так и для корректировки их параметров выстраивались в общую очередь и выполнялись на классическом процессоре. Однако процессоры общего назначения оказались одновременно слишком мощными и недостаточно мощными для заметных успехов в этой области: для обчёта нейросети нужны очень простые операции — в основном только сложение и умножение. Однако таких операций нужно производить на порядки больше, чем доступно обычному процессору.

На протяжении всего XX века нейросети оставались в основном теоретической разработкой, уделом математиков и редких инженеров-энтузиастов. Существенные изменения произошли в 2010-х годах, когда ИИ на базе нейронных сетей обучили делать выводы на основе анализа данных после предварительной тренировки. Сегодня такие системы применяются, например, для подсчёта пассажиров в автобусе или фиксации номера автомобиля нарушителя ПДД. Даже смартфоны со временем обзавелись ИИ — например, для обработки изображений или видео.

То есть прорывные успехи в этой области случились относительно недавно, с выходом на рынок графических процессоров (GPU), способных к гораздо более эффективному вычислению нескольких простых операций. С 2015 г. нейросети стали проникать во все сферы жизни. Благодаря мощным GPU и библиотекам для разных языков программирования экспериментировать с ними мог любой желающий. Появились понятливые голосовые помощники, автопилот Tesla, оплата с помощью лица, ChatGPT и Midjourney.

Впрочем, несмотря на впечатляющие успехи, современные нейросети являются сильно упрощённой моделью работы биологических нейросетей. Они демонстрируют возможность воспроизведения машины природных концепций, но их возможности на порядки отстают от природного прототипа.

Впервые нейрочип был показан широкой аудитории корпорацией Intel в 2014 г. За прошедшее десятилетие появилось множество разных разработок на эту тему от разных компаний. TrueNorth, Neurogrid, BrainScaleS, SpiNNaker, Intel Loihi, Akida, Tianjic, Dynap-SEL, XYLO, отечественный "Алтай" — далеко не полный список существующих на сегодняшний день нейроморфных чипов. Сейчас это тема активных научных разработок, поэтому здесь нет каких-то устоявшихся стандартов. Однако большинство из них строятся вокруг схожих принципов.

В первую очередь, это асинхронность и импульсность — отказ от тактовой частоты и конвейера. Каждый нейрон работает независимо и посылает сигнал, когда его триггер срабатывает. При этом возникает необходимость усложнить логику обработки входных сигналов. Взамен одномоментного считывания актуальных данных на входных контактах нейрону нужно уметь интегрировать сигналы, приходящие в разные моменты времени.

Ещё одно важное отличие — память. Если в искусственной нейросети модель описывается сотнями миллионов параметров, которые хранятся на диске и подгружаются в процессор при обчёте каждого следующего узла нейросети, то в нейроморфных чипах память — это изменённое состояние нейрона. По мере обучения и накопления опыта каждый нейрон постепенно меняет свои параметры обработки сигналов, приоритизируя одни синапсы и отключая другие. Это состояние хранится в памяти самого нейрона.

То, как эти идеи воплощаются на практике, можно увидеть на примере нейроморфного чипа TrueNorth от компании IBM. В каждом ядре по горизонтали уложены выходные контакты одного слоя нейронов. По ним проходят импульсы, когда нейрон срабатывает. По вертикали уложены входные контакты следующего слоя нейронов. Они пересекаются в виде квадратной сетки, и каждый узел этой сетки — это синапс между выходным контактом одного нейрона и входным контактом другого. Такая укладка позволяет сделать полносвязную систему, в которой каждый нейрон одного слоя связан с каждым нейроном следующего слоя. Уже в процессе обучения некоторые из этих связей обнуляются, а синапс распадается (почти как у ребёнка). По той же схеме подключаются все последующие слои.

Аппаратная система лишена большого энергетического недостатка, присущего программным нейросетям. На классическом компьютере, даже если в какой-то части нейросети не проходит никакого сигнала, алгоритм всё равно подаёт эти пустые данные на обчёт. В нейроморфных системах спящие нейроны тратят гораздо меньше энергии — только для хранения своего состояния. Более того, сейчас идёт активная разработка мемристоров — электронных элементов, которые при подаче тока меняют своё значение и сохраняют его. Если это удастся, они заменят транзисторы, которым для сохранения состояния нужна постоянная подача энергии. К тому же энергоэффективность открывает нейросетям дорогу к всевозможным мобильным и носимым девайсам.

Сегодня искусственные нейроны объединяются по модели импульсных нейронных (спайковых) сетей (Spiking Neural Network, SNN), особенностью которых является передача данных с помощью разнесённых по времени коротких импульсов равной амплитуды,

а не за счёт меняющихся по времени значений, как в нейросетях предыдущих поколений. Благодаря кодированию данных импульсами и временными промежутками между ними импульсные нейросети моделируют естественные процессы передачи сигналов, которые также управляют процессами обучения с динамическим переназначением синапсов между нейронами в ответ на стимулы.

Нейросеть типа SNN обеспечивает крайне высокую скорость и производительность, а её структура может обучаться непосредственно во время работы. Она может обрабатывать динамические задачи, например распознавать изображения в видеоряде. Многозадачность спайковых нейронных сетей позволяет обучать группы нейронов для решения различных проблем и осуществлять распознавание с предсказанием по неполным данным.

В сентябре 2017 г. Intel Labs представила самообучающийся нейроморфный процессор Loihi первого поколения, предназначенный для изучения функциональных возможностей спайковых нейронных сетей и имитации адаптивного поведения мозга с возможностью масштабирования решений от двух и более процессоров на одной плате. Осенью 2021 г. Intel представила процессор нового поколения Loihi 2, а также среду программирования Lava с открытым исходным кодом для разработки нейроморфных приложений.

Число искусственных нейронов в Loihi 2 увеличилось, по сравнению с первым поколением, сразу в восемь раз, до 1 млн, при этом физический размер кристалла, напротив, уменьшился почти в два раза, до 31 мм². Сравнения с предыдущим поколением показали прирост скорости обработки данных до десяти раз, а также до 15 раз более плотную концентрацию ресурсов с большей экономией энергии. В Intel также подчёркивают, что нейроморфные сети Loihi 2 работают до 5 тыс. раз быстрее, чем биологические нейроны.

В последние годы исследователи отмечали, что нейроморфное оборудование опережает прогресс в программной области, особенно в части алгоритмов. Открытая модульная среда разработки Lava призвана устранить эти противоречия и унифицировать программный стек, особенно с учётом близкой перспективы появления коммерческих нейроморфных продуктов, и предоставляет разработчикам совместное использование общих инструментов и библиотек, возможность взаимного обмена накопленным опытом.

Современные нейроморфные чипы ещё не достигли уровня сложности связей в человеческом мозге, однако вполне могут поспорить с ним в скорости. Искусственные нейроны, собранные на современных электронных технологиях, могут обрабатывать и пропускать в сотни раз больше сигналов в секунду, чем нейроны человеческого мозга. Нейроморфные чипы

потребляют мало энергии, почти не ограничены в возможностях масштабирования и довольно точно моделируют поведение своих биологических аналогов. Вместе с вероятностными алгоритмами обработки неопределённых и противоречивых данных они являются одним из наиболее перспективных вариантов развития ИИ.

Следующее поколение технологий ИИ, над которым, в частности, работают в Intel Labs (научно-исследовательское подразделение компании, которое изучает перспективные идеи работы с данными), будет использовать алгоритмы, более точно имитирующие работу биологического мозга, в том числе в части интерпретации (трактовки в правильном контексте) и автономной адаптации (улучшенное представление данных без взаимодействия с внешней средой) для реагирования на непредвиденные ситуации и различные абстракции.

Одной из наиболее наглядных демонстраций возможностей нейроморфных вычислений стала совместная публикация исследователей из Intel Labs и Корнельского университета в журнале Nature Machine Intelligence, где они поделились опытом использования процессоров Intel Loihi для имитации системы обоняния человека. Исследователи научили предварительно натренированный Loihi точно и с первого раза распознавать до 10 видов запахов вредных веществ, включая ацетон, аммиак, метан и другие химикаты, используемые при создании наркотических и других подобных веществ. Альтернативным решениям, в том числе с применением ИИ и глубокого обучения, для такого уровня точности требуется в 3 тыс. раз больше выборок для обучения по каждому классу веществ.

Ещё один удачный пример на стыке нейроморфных вычислений и биологии продемонстрировала команда учёных из Национального университета Сингапура (NUS). Исследователи создали роботизированную руку с искусственной кожей и датчиками зрения и оснастили её нейроморфным процессором Loihi. В итоге искусственная рука была обучена обнаруживать прикосновения более чем в тысячу раз оперативнее, чем сенсорная нервная система человека, и определять форму, текстуру объектов в десять раз быстрее, чем человеческий глаз.

Аэрокосмическая компания Airbus совместно с Университетом Кардиффа использует процессор Loihi в проекте совершенствования технологии обнаружения вредоносных программ. В компании полагают, что возможности обучения и масштабирования Loihi в режиме реального времени помогут ускорить обнаружение вредоносного кода при низком энергопотреблении и помогут в борьбе с вымогателями.

Таким образом, ключевым преимуществом нейроморфных процессоров

является возможность искусственных нейронов обучаться "на лету", одновременно передавать, хранить и обрабатывать информацию. Особая архитектура, где каждый нейрон связан синапсами с тысячами других нейронов, позволяет таким процессорам учиться, развиваться и адаптироваться по аналогии с образом мышления человека.

При всём этом следует понимать, что нейроморфные системы всё ещё проходят эволюционную стадию лабораторных исследований и не ориентированы на замену традиционных компьютеров в коммерческих масштабах. Пока что это в большей степени инструмент для изучения возможностей нейроморфных вычислений. Переход от традиционной вычислительной архитектуры к нейроморфным системам связан со сложностью создания нейроалгоритмов. Так, в отличие от покадровой обработки видео с традиционной архитектурой, нейроморфный алгоритм рассматривает её как изменённую визуальную информацию во времени.

Нейроморфные вычисления — это, по сути, полное переосмысление компьютерной архитектуры с использованием новейших разработок нейробиологии для создания процессоров и систем с функциональностью биологического мозга.

Когда-то идеи философов о человеческом разуме привели к вере в то, что рациональное мышление можно описать, пользуясь алгебраическими или логическими механизмами. Позже, с появлением электронных приборов и компьютеров, человечество попало в состояние постоянного ожидания того, что вот ещё немного, и появится машина (или программа), разум которой сравним с человеческим. Некоторые объявляли разумные машины спасителями человечества, а некоторые видели в этих машинах источник великого бедствия, так как полагали, что появление на Земле второй разумной сущности приведёт к уничтожению первой.

Мы живём в интересное время в ожидании понимания, кто из них оказался прав.

По материалам

<https://3dnews.ru/1114711/neyromorfnie-vichisliteli-v-metalle>,

https://www.defectologiya.pro/zhurnal/nejronyi_chno_eto_take,ix_vi_dyi_i_funkczii/?ysclid=m49y1ck84c108912720,

<https://www.kommersant.ru/doc/5089550>,

<https://habr.com/ru/companies/ruvds/articles/576376/>,

<https://www.kommersant.ru/doc/5089550?ysclid=m48frr3j9a388121266>,

<https://ya.zerocoder.ru/pgt-razrabotka-nejromorfnyh-sistem-neuromorphic-computing/>

МОДУЛЬНАЯ РЕКЛАМА

Отмороженные цены
на радиодетали.

www.radiodetali.perm.ru

Тел: 8-800-201-75-54

Вышла в свет новая книга



**Дементьев А. Н.,
Захаркин С. В.,
Иванов В. А.**

Сигналы и каналы связи. Учебное пособие для вузов. — М.: Горячая линия — Телеком, 2024. — 344 с.: ил.

ISBN 978-5-9912-1090-4.

Приведено описание основных способов представления сигналов и помех как случайных процессов, методов анализа сигналов (различные в ряду Фурье, частотно-временные характеристики и энергетические спектры, интегральное и дискретное преобразование Фурье, быстрое преобразование Фурье, вейвлет-анализ сигналов и др.).

Рассмотрены основы дискретного преобразования сигналов, методы, математический аппарат, спектральные характеристики модуляции сигналов (амплитудной, угловой, относительной фазовой, квадратурной амплитудной и амплитудно-фазовой). Представлены способы формирования широкополосных сигналов и ортогональной модуляции с частотным разделением, а также модели непрерывных и дискретных каналов связи, их основные характеристики, описание интерфейсов и протоколов физического уровня. Материал изложен последовательно, от простого к сложному.

Для студентов вузов и курсантов, обучающихся по специальности 10.05.02 — "Информационная безопасность телекоммуникационных систем", докторантов, аспирантов (адъюнктов), обучающихся по направлению подготовки "Информационная безопасность".

Будет полезна специалистам в области мониторинга телекоммуникационных систем, а также студентам вузов радиотехнического профиля.

Адрес издательства в Интернет
WWW.TECHBOOK.RU