

И.И.БЛОХ

**ОСНОВНЫЕ
ПОНЯТИЯ
ТЕОРИИ
ИНФОРМАЦИИ**

Л Е Н И Н Г Р А Д

ОБЩЕСТВО ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ
ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ РСФСР

Ленинградское отделение

И. И. БЛОХ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ
ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ

ЛЕНИНГРАД
1959

О Г Л А В Л Е Н И Е	Стр.
Введение	3
Что такое информация	4
Общая схема передачи сообщений	6
Как измерить информацию	9
Информация сложных событий	12
Каналы связи и их пропускная способность	14
Кодирование	17
Переработка, передача и использование информации	18
Теория информации в биологии	22
Применение теории информации к языкознанию	26
Заключение	28

Автор — Илья Иосифович Блох

Научный редактор доктор физико-математических наук
Л. Л. Мясников

Редактор издательства *Г. С. Воробьев*

Техн. редактор *А. М. Гурджиева*

М-04455

Объем печ. л. 1 $\frac{1}{4}$

Подписано к печати 22/VI-1959 г.

Заказ ~~200~~

Тираж 2400 экз.

Типография ЛДНТП

ВВЕДЕНИЕ

Наша эпоха замечательна величайшими завоеваниями в области науки и техники.

На наших глазах сбылось то, что в течение многих веков было лишь мечтой и фантазией: человек поднялся в воздух, раскрыл строение атома и овладел неисчерпаемой энергией.

Гений советского народа создал спутников Земли и Солнца. Все это стало возможным в результате преобразований во всех областях общественной жизни, на основе победы социализма в Советском Союзе.

Сейчас, когда мы вступили в период развернутого строительства коммунизма, все усилия по повышению производительности труда должны быть направлены на ликвидацию трудоемких процессов, замену физических усилий работающего машиной. Автоматизация производственных процессов будет способствовать уничтожению существенного различия между физическим и умственным трудом, сокращению рабочего дня, созданию неисчислимых материальных благ и возможностей культурного роста нашего народа.

В наш век больших скоростей и мощностей мы должны беречь человека, не перегружать его память, внимание, зрение, слух, мозг. Необходимо мобилизовать машины для помощи человеку в его умственной деятельности.

Для того чтобы знать, на что способна машина, что ей можно поручить для разгрузки человека, надо установить общие черты человека и машины и принципиальное их различие, — знать, где кончаются возможности машины и где начинаются слабости человека. Такой математической теорией, которая может отчасти отображать действия человека и машины, является теория информации.

ЧТО ТАКОЕ ИНФОРМАЦИЯ

К информации относятся сообщения, передаваемые по различным каналам связи: по телеграфу, радио, телевидению, передача радиосигналов с искусственных спутников на Землю, данные, которые получает и преобразовывает электронно-счетная машина. К информации относятся все сведения, получаемые человеком из внешнего мира при помощи органов зрения, слуха, осязания, обоняния.

Внешний мир воздействует на человека через органы чувств, которые дают человеку информацию об окружающей обстановке.

Получаемая информация преобразуется нервной системой и мозгом, а затем, после накопления, преобразования и отбора, используется человеком для воздействия на внешний мир. Накопленный человеком опыт, информация, которой он располагает, дает возможность строить машины, приборы, аппараты, помогающие ему эффективно воздействовать на природу и накапливать новую, более глубокую информацию.

Возникает вопрос, что может быть выделено как общее у совершенно различных процессов, которые происходят при передаче радиосигналов со спутников Земли и Солнца, при работе математических электронных машин, при автоматическом управлении, при передаче речи, музыки и при работе нервной системы и мозга.

Это общее в том, что во всех этих процессах происходит получение, хранение, преобразование, передача информации и ее использование.

В связи с этим представляет интерес попытка создания общей статистической теории передачи сигналов в

системах связи, радиолокации, телемеханики при наличии помех.¹

Особенностью этой теории является то, что воздействие помех оценивается не по отношению $\frac{\text{сигнал}}{\text{помехи}}$ на выходе канала, а по некоторому статистическому параметру, характеризующему достоверность полученных данных.

Так, например, процесс радиолокационного измерения дальности оценивается ненадежностью его, под которой понимается вероятность того, что во множестве результатов наблюдения измеренная дальность не совпадает с истинной.

Теория информации возникла из практических потребностей радиосвязи около тридцати лет назад. Она была вызвана к жизни всё более и более увеличивающимся количеством радиостанций и возникшей в связи с этим проблемой уменьшения их взаимных помех. Одной из первых работ по теории информации была работа советского ученого, академика В. А. Котельникова.

¹ Помехи, с которыми приходится иметь дело, весьма разнообразны как по своему происхождению, так и по физическим свойствам.

При передаче сообщений по радио мы встречаемся с помехами от соседних (по частоте) станций. Причина этих помех — плохая техника и организация радиопередач. Для устранения помех между станциями необходимо строго придерживаться установленного соответствующими соглашениями расписания длины волн.

Другой вид помех — так называемые промышленные помехи от всевозможных электрических устройств, как-то: электрического транспорта, коллекторных электрических моторов промышленных установок высокой частоты.

Большую роль в радиосвязи играют атмосферные помехи.

Помимо внешних помех, существуют внутренние помехи; они могут возникать внутри самой системы, в различных ее звеньях. Эти помехи объясняются колебаниями электрических величин около их средних значений и называются флуктуационными помехами. Большое значение имеют флуктуации, вызываемые тепловым движением электронов проводимости.

Помимо тепловых флуктуаций, возникают дробовые флуктуации, которые объясняются дискретной природой электрического тока и проявляются в электронных лампах в виде характерного шума — так называемого дробового эффекта.

Флуктуационные помехи отличаются тем, что явления, порождающие их, лежат в природе вещей и принципиально не могут быть устранены. Флуктуационные помехи играют большую роль в современной технике связи, и способам борьбы с ними уделяется много внимания.

В своей работе «О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи» Котельников доказал ряд важных положений теории информации. В частности, для передачи информации непрерывно меняющихся сигналов — таких, как речь, телевидение и многих других, нет необходимости передавать значения сигналов во все моменты, а достаточно ограничиться их передачей через определенные промежутки времени, длительность которых определяется полосой частот передаваемых сигналов.

Котельников показал, что эти промежутки времени равны $\frac{1}{2F}$, где F — полоса частот. Если, например, полоса частот передаваемых сигналов составляет 2000 герц, то вполне достаточно передавать полезный сигнал через промежутков времени $\frac{1}{4000}$ секунды.

В 1948—1949 годы американский ученый Шэннон опубликовал ряд фундаментальных работ, значительно продвинувших развитие теории информации.

Большой вклад в теорию информации внесли советские ученые Колмогоров, Хинчин, Пугачев, Яглом и другие.

Рассмотрим общую схему передачи, преобразования информации при взаимодействии человека с окружающей природой и созданной им машиной.

ОБЩАЯ СХЕМА ПЕРЕДАЧИ СООБЩЕНИИ

Сообщения представляют собой совокупность сведений, которые должны быть переданы получателю; это объект передачи. При передаче телеграммы сообщением будет тот или иной текст. По телефону передается не только содержание фраз, но и интонация голоса. Эти сообщения поступают в устройство, называемое передатчиком. Передатчик, как правило, преобразует сообщение в электрический сигнал, который затем идет по линии связи к приемнику. Преобразование сообщения в сигнал состоит из трех операций: 1) преобразования сообщения в электрические величины, 2) кодирования и 3) модуляции. Рассмотрим каждую из этих операций.

Первая операция в телефонной передаче осуществляется микрофоном, который преобразует изменения звукового давления в изменение электрического тока. В человеческом ухе под действием звука происходят колебания барабанной перепонки, которые с помощью ко-

сточек среднего уха передаются внутреннему уху, где в лабиринте возникают электрические потенциалы и электрические напряжения возбуждают слуховой нерв.

При телевизионных передачах изображение ощупывается (сканируется) узким лучом света; отраженный свет попадает на фотоэлемент, преобразующий колебания светового потока в соответствующие колебания электрического тока. У человека таким преобразователем изображения в электрический ток является глаз. Но человеческие передатчики — глаз, ухо и другие — значительно сложнее, чем передающее устройство в любых системах связи. Помимо физического преобразования сообщения в сигнал, необходимо математическое преобразование — кодирование.

Под кодированием понимается построение сигнала по некоторому определенному принципу. При передаче букв по телеграфу устанавливается связь между совокупностями сигналов и буквами; таким образом, каждой букве соответствует определенное сочетание сигналов.

Под модуляцией понимается воздействие на некоторый параметр физического переносчика сигнала. Переносчиком сигнала будет постоянный, переменный ток или электромагнитные волны; у человека таким передатчиком служат биотоки и ионный ток.

До тех пор пока параметры переносчика остаются неизменными, мы не можем передавать никаких сведений, кроме факта: передатчик включен и переносчик подготовлен к передаче сообщений.

Теперь нужно как-то «нагрузить» переносчик сообщением. Для этого начнем так изменять один из параметров переносчика, чтобы каждое из возможных сообщений отображалось значениями изменяемого параметра.

В этом и заключается физический смысл процесса, который мы называли модуляцией. Параметрами, определяющими это колебание, являются амплитуда, частота и фаза.

Таким образом, применяются амплитудная модуляция, частотная модуляция и фазовая модуляция. В новейших системах связи переносчиком служит периодическая последовательность коротких импульсов. Так возникла импульсная модуляция.

При передаче сообщений нервными импульсами человека происходит частотная модуляция, так как амплитуда

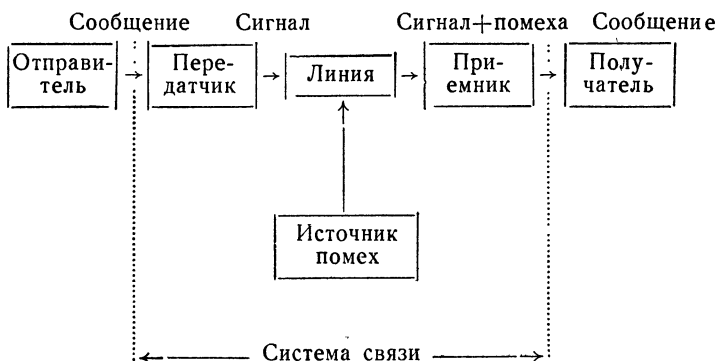
нервных импульсов остается неизменной, — изменяются только временные интервалы между ними.

Сигналы, посланные из передатчика, должны быть получены адресатом.

Среду, в которой распространяются эти сигналы, будем называть каналом. Каналом может быть провод, кабель, волновод, у человека — нервные волокна. При всех передачах сообщений возникают всевозможные помехи, которые накладываются на посланные сигналы и, следовательно, искажают их.

Для обратного преобразования сигналов в сообщения, которые должен получить адресат, необходимо иметь устройство, называемое приемником; кроме того, требуется обратное математическое преобразование, то есть расшифрование, или декодирование.

Следовательно, схему передачи и преобразования сообщения в живых организмах и машинах можно изобразить так:



Основной задачей средств информации является передача по различным каналам наибольшего количества сообщений, обладающих определенным количеством устойчивости в области влияния помех, увеличение пропускной способности каналов и прием различных сообщений без искажений.

Для решения главной задачи необходимо знать меру для определения количества передаваемых сообщений и изучить математический аппарат кодирования и пропускную способность каналов.

КАК ИЗМЕРИТЬ ИНФОРМАЦИЮ

Для оценки свойств различных систем связи, например телеграфа, телефона, радио, телевидения, необходимо иметь какую-то общую единицу измерения.

Каждому ясно, что по телефону можно передать больше сообщений, чем по телеграфу, по радио больше, чем по телефону. Это различное количество сообщений нужно выразить числом. Допустим, мы хотим передать музыкальное произведение из одного города в другой.

В нашем распоряжении имеются телеграф, телефон, радио и телевидение.

По телеграфу мы можем передать только либретто произведения, по телефону можно передать музыку, но она будет искажена, однако мелодию уловить можно. Передача по радио искажает музыку меньше.

Более полное представление о музыкальном произведении мы получим от передачи по телевизионному каналу. Передача будет еще богаче и полнее, когда она будет осуществлена по каналу цветного телевидения.

Количественная мера сведений должна быть универсальной, общей для всех сообщений.

В основе измерения количества сообщений лежит представление процесса передачи сообщений как некоего случайного процесса, развивающегося во времени. Слово «случайный» подчеркивает то обстоятельство, что предсказать заранее точное протекание процесса невозможно. Однако совершенно ясно, что степень этой неопределенности в различных случаях будет совершенно разной. Рассмотрим следующие неопределенности.

1) Монета подбрасывается кверху. Как упадет она на землю, гербом или решеткой? — Это будет неопределенность одного вида.

2) На стол брошена игральная кость (кубик). У кости шесть граней. Неопределенностью будет падение ее на некую грань.

3) В урне лежат один белый и 99 черных шаров. Неопределенностью будет — какого цвета шар нам достанется при извлечении шара из урны.

Ни одно из этих неопределенных событий нельзя заранее гарантировать, но все же степень неспределенности будет в каждом случае разная.

Если мы реализуем какое-нибудь испытание, то мы тем самым получаем некоторую информацию (узнаем, какое из событий действительно наступило), и неопределенность данной системы полностью ликвидируется. Можно, таким образом, сказать, что информация, которую дает нам реализация какого-либо испытания, состоит в снятии той неопределенности, которая предшествовала испытанию. Чем больше была неопределенность, тем выше мы должны оценивать информацию, полученную нами в результате ее ликвидации. Те же неопределенности, которые можно заранее предсказать, содержат очень мало информации, и поэтому не имеют смысла создавать каналы для их передачи.

Если какое-либо литературное произведение написано так, что с первых страниц становится ясно, как будут развиваться события в будущем, чем они закончатся, читать такую книгу неинтересно, так как она содержит мало информации. С другой стороны, полное незнание также исключает возможность информации. Так, например, человек, не знающий языка, на котором написана взятая им книга, не получит никакой информации, как бы ни было интересно и важно ее содержание.

Следовательно, за меру количества информации надо принять величину, которая бы разумным образом характеризовала степень неопределенности.

Каналы связи нужны для передачи информации тогда, когда заранее неизвестно, какое именно сообщение будет передаваться.

От чего же зависит степень неопределенности?

Во-первых, от числа возможных значений, которые способна принимать данная величина. Чем больше различных значений может она принять, тем больше ее неопределенность. Например, при бросании монеты имеются две неопределенности — герб или решетка. При бросании же игральной кости имеются уже шесть возможностей.

Неопределенность второго примера больше первого.

В этих примерах вероятность выпадения герба или решетки одинакова, вероятность выпадения двойки такая же, как шестерки.

В иных случаях можно утверждать, что вероятности отдельных событий больше других. Например, если в урне находится 99 белых шаров и один черный, то

вероятность извлечения белого шара будет 0,99, а черного 0,01. В этом случае, если нам достанется белый шар, степень неопределенности небольшая, так как мы это явление заранее предвидели.

Исходя из этих соображений, за меру количества передаваемых сообщений принята следующая величина:

$$H = -[p_1 \log p_1 + p_2 \log p_2 + \dots + p_n \log p_n].$$

Величина, подсчитанная таким образом, называется энтропией сообщения, которая будет пропорциональна степени неопределенности сообщения и, следовательно, будет характеризовать передаваемую информацию. Единицей измерения принято считать энтропию элементарного случайного сообщения.

Элементарным считается такое событие, где имеются две ситуации с одинаковыми вероятностями, например выпадение герба или решетки.

Подсчитаем энтропию такого события:

$$H = -\left[\frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2}\right] = 1.$$

Эту единицу принято называть двоичной единицей информации или «бид» (от начальных букв термина «binary digit», что означает двоичная цифра).

Сравним эту элементарную информацию с игрой в метание кости.

Пусть конечная схема состоит из шести событий, каждое из которых представляет выпадение одного из указанных чисел при метании кости. Если кость изготовлена из однородного материала с возможной степенью точности, то все события можно считать равновероятными.

Схема имеет вид:

$$\begin{pmatrix} A_1, & A_2, & A_3, & A_4, & A_5, & A_6 \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} \end{pmatrix}$$

Сообщение о результате метания кости содержит следующее количество информации:

$$\begin{aligned} \frac{1}{6} \log_2 \frac{1}{6} + \frac{1}{6} \log_2 \frac{1}{6} + \frac{1}{6} \log_2 \frac{1}{6} + \frac{1}{6} \log_2 \frac{1}{6} + \frac{1}{6} \log_2 \frac{1}{6} + \frac{1}{6} \log_2 \frac{1}{6} = \\ = \log_2 6 \approx 2,585 \text{ бид.} \end{aligned}$$

Количественное измерение сообщений будет служить основой для сравнения показателей различных систем связи. Можно подсчитать количество бидов, получаемое человеком от органов зрения и слуха. Количество информации, передаваемое органами зрения, превосходит примерно в 30 раз количество информации, передаваемое органами слуха.

Этот подсчет основан на том, что в среднем по нерву может пройти примерно 300 импульсов в секунду. От каждого глаза идет в кору мозга 1 нерв, имеющий около 1 миллиона нервных волокон. Следовательно, 1 нерв может максимально передать 300 миллионов бидов информации. Два глаза передают 600 миллионов бидов информации.

От каждого уха идет нерв, имеющий 300 тысяч нервных волокон, а два уха имеют 600 тысяч нервных волокон; таким образом, можно подсчитать, что от органов слуха идет 18 миллионов бидов информации.

Понятие количества — численной меры информации — не следует путать с житейским пониманием слова «информация», связывающего его со смысловым значением сообщения.

ИНФОРМАЦИЯ СЛОЖНЫХ СОБЫТИЙ

Чему равна информация сложного события, состоящего из объединения двух простых событий A и B ?

Легко показать, что в случае независимости этих сообщений энтропия объединенного сообщения равна сумме энтропий сообщений A и B .

$$H(AB) = H(A) + H(B).$$

В случае зависимости сообщения B от реализации события A энтропия объединенного события будет меньше суммы энтропий сообщений A и B .

В самом деле, представим себе, например, тот крайний случай, когда знание исхода A с достоверностью предрешает и исход события B . Тогда после реализации события A событие B полностью теряет свою неопределенность; в этом случае реализация события B не дает нам никакой дополнительной информации. Если же не брать такой крайний случай, когда события A и B строго

согласованы, но все же учитывать их существующую взаимосвязь, тогда легко установить, что энтропия объединенного события меньше суммы энтропий зависимых событий.

Следовательно, количество информации, даваемое реализацией любой схемы B , может только уменьшиться, если мы предварительно реализуем какую-нибудь другую схему A . Эта разность энтропий будет показывать, насколько осуществление одного события уменьшает неопределенность другого, то есть сколько нового узнаем мы об исходе второго события, производя реализацию первого.

Эту величину называют количеством информации относительно второго события, содержащемся в первом.

Внутренние связи, существующие между элементами сообщения, приводят к тому, что вероятность появления следующего элемента зависит от предшествующих ему и различна для различных элементов. Это дает нам возможность предугадать, предсказать, каким будет следующий элемент сообщения.

При передаче сообщения мы убеждаемся, что не все содержащееся в нем необходимо для его полного восстановления на приемном устройстве. Поэтому сообщение можно передавать без ущерба для дела в сокращенном виде.

Эта практика давно используется при передаче телеграмм: предлоги и союзы устраняются из текста. Можно бы сжать текст телеграммы значительно больше; исследования показывают, что возможность безошибочного восстановления текста еще сохраняется при сокращении первоначального текста вдвое.

В связи с этим возникает важное понятие об избыточности сообщения.

Наибольшей избыточностью обладают телевизионные сообщения; важной проблемой является сокращение объема телевизионного сигнала, используя вероятности связи между соседними кадрами.

Сокращая избыточность сообщений, надо иногда учитывать ее положительную роль: она при наличии помех уменьшает возможность ошибок. Если бы избыточность была полностью устранена, то исправление ошибок стало бы невозможным.

КАНАЛЫ СВЯЗИ И ИХ ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ

Канал связи — это совокупность устройств, передающих сигналы. Совокупность сигналов, которые будет принимать канал, будем называть входным алфавитом. Выпускаемые каналом сигналы имеют совсем иную природу, чем отправляемые. Поэтому наряду с входным алфавитом мы должны знать и выходной алфавит канала, то есть список сигналов, которые этот канал способен выпускать. Если каждый отправляемый сигнал дает на выходе точно определенную букву выходного алфавита, то данный канал будет каналом без помех. Вообще говоря, наличие помех порождает явление, при котором отправленный один и тот же сигнал в разных случаях на выходе становится иным. Следовательно, помехами мы называем всевозможные причины искажений, приводящие к несовпадению сигнала на выходе с поданным сигналом на входе. Всякий канал связи характеризуется своей пропускной способностью.

Пропускной способностью называется отношение наибольшего возможного количества информации, могущей быть переданной по каналу связи без искажений при наличии помех, к времени передачи, когда это время неограниченно возрастает. Согласно этому определению, пропускная способность C_0 выражается формулой:

$$C_0 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\log_2 M}{T} \frac{\text{двоичных единиц}}{\text{сек.}},$$

где M — общее количество всех возможных сообщений за время T .

Теорема о пропускной способности утверждает, что при достаточно сложных системах кодирования через канал связи при наличии флуктуационных помех можно передавать сообщения со скоростью

$$C_0 = \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{P}{N} \right) \frac{\text{дв. ед.}}{\text{сек.}},$$

где C_0 — пропускная способность канала связи, выраженная в двоичных единицах в секунду; Δf — полоса частот канала связи в герцах, P и N — соответственно средние мощности сигнала и шумов.

На основании этой теоремы можно установить возможные резервы в передаче информации по различным каналам связи. Так, например, в последние годы экспериментальными психофизиологическими исследованиями, проведенными в различных странах, установлено, что передача и восприятие речи с учетом ее тембра, высоты тона и изменений громкости соответствует скорости передачи информации всего лишь от 25 до 60 двоичных единиц в секунду. Применяя же формулу для пропускной способности канала связи и полагая в ней $\Delta f = 3000$ герц и $\frac{P}{N} = 100$, получим $C = 19\,950$ двоичных единиц в секунду.

Сравнивая эту пропускную способность с приведенной выше скоростью передачи речи, полученной из психофизиологических исследований, видим, что первая превышает вторую более чем в 300 раз.

Это значит, что при надлежащем кодировании речи через канал связи с полосой в 3000 герц вместо одного телефонного разговора можно провести более 300 телефонных разговоров. Вот какие резервы вскрыты при помощи теории информации. Точно такие же большие резервы имеются при передаче телевизионных программ.

Исходя из этой теории, устанавливается возможность передачи по каналу заданного сообщения с заданной точностью. Однако нужные для этого оптимальные методы кодирования и декодирования оказываются очень сложными, и, кроме того, теория не дает эффективных методов их построения. Поэтому общие методы теории не могут обычно служить основой для расчета конкретных систем передачи информации. Из формулы следует, что предельная пропускная способность (скорость передачи) также зависит от соотношения между мощностью сигнала и мощностью помех.

В радиолокационных сообщениях, полученных от спутников, мы имеем слабые сигналы на фоне сильных помех; мы должны принимать эти сигналы, если они по своей мощности значительно меньше мощности помех.

Общая задача обнаружения такого слабого сигнала в присутствии помех состоит в том, чтобы по результатам наблюдения некоторой переменной величины, которая может представлять собой или результат наложения помехи на сигнал, или просто помеху в чистом виде, —

наилучшим образом определить, содержит наблюдаемая величина сигнал или нет.

Задача же воспроизведения сигнала в присутствии помех состоит в том, чтобы по результатам наблюдения некоторой переменной величины, представляющей собой результат наложения помехи на сигнал, наилучшим образом определить сигнал или некоторую величину, получаемую в результате заданного преобразования сигнала.

В связи с необходимостью приема слабых сигналов на фоне больших помех используется аппарат теории вероятностных процессов. Понятие вероятностного процесса служит развитием понятия случайной величины. Оно возникает в тех случаях, когда результат некоторого наблюдения определяет не конечное число чисел, а какую-то функцию времени, причем в многократных повторениях нашего наблюдения при сходных условиях эта функция принимает различные значения.

Примеры подобных «случайных» функций впервые появились в научных исследованиях в начале настоящего века (в связи с созданием теории броуновского движения); в настоящее время они встречаются на каждом шагу, и их роль в науке очень значительна.

Достаточно указать, что напряжение на концах любого проводника и сила тока в нем всегда испытывают неконтролируемые пульсации из-за наличия теплового движения электронов («тепловые шумы»), так что изменение напряжения и силы тока во времени всегда представляет случайный процесс.

Еще более выражен «случайный характер» процесса протекания тока при наличии в схеме радиоламп: это объясняется в первую очередь «дробовым эффектом», а кроме того, и некоторыми другими причинами (например, эффектом «мерцания» катода).

В радиоприемных устройствах к флуктуационным помехам в электрической цепи добавляются еще замирания (фединги) принимаемых сигналов, связанные со случайными процессами, имеющими место при распространении радиоволн; в радиолокационных устройствах значительную роль играют шумы, вызванные пульсациями ее коэффициента отражения, и т. д.

КОДИРОВАНИЕ

Теория кодирования — сердцевина теории информации.

Под кодированием надо понимать операцию перевода сообщения в последовательно различные сигналы. При этом коды, использующие только два различных элементарных сигнала (например, посылку тока и паузу), называются двоичными кодами; коды, использующие три различных элементарных сигнала, — троичными кодами и т. д. В телеграфном коде Морзе каждой букве или цифре соответствует некоторая последовательность кратковременных посылок тока («точек») и в три раза более длинных посылок тока («тире»); этот сигнал можно рассматривать как совокупность трех элементарных посылок тока, следующих непосредственно один за другим, разделяемых кратковременными паузами той же длительности, что и «точки».

Желательно, чтобы средняя длина комбинации для передачи букв была наименьшей. Для этого, очевидно, нужно присвоить короткие кодовые комбинации более часто встречающимся буквам и сохранить длинные комбинации для редких букв. По такому принципу и был составлен код Морзе.

Вероятности букв в разных языках существенно различны. Например, в английском языке чаще всего встречается буква «е». Код Морзе присваивает ей наиболее короткое кодовое обозначение — точку. В русском же языке чаще всего встречается буква «о» ($P = 0,11$), имеющая в коде Морзе довольно длинное обозначение — три тире.

А. А. Марков вычислил вероятность того, что буква, наугад взятая из русского текста, окажется гласной. Эта вероятность различна в зависимости от того, гласной или согласной является предшествующая буква.

А. А. Марков подсчитал, используя 20 000 букв текста «Евгения Онегина», что вероятность появления гласной после гласной равна $p_4 = 0,128$, вероятность же появления гласной после согласной равна $P_{13} = 0,663$.

Следовательно, принятый у нас код Морзе необходимо усовершенствовать. Это дало бы сокращение длин комбинации примерно на 8%.

Основной вопрос кодирования заключается в том, чтобы определить, каково при данной статической структуре текста наименьшее значение коэффициента сжатия, которого можно достичь с помощью надлежащего кода, и как создать новый, «оптимальный» код. На эти вопросы в основном полностью отвечает следующая теорема.

Если энтропия поступающего текста равна H , то нижняя грань коэффициента сжатия по всем возможным кодам равна $\frac{H}{\log_2 m}$, где m — число различных между собой символов текста. При любой передаче сообщений мы имеем дело с помехами, которые искажают посланную передачу.

Одним из путей обеспечения высокой помехоустойчивости и пропускной способности каналов является использование корректирующих кодов.

Общий принцип построения таких кодов заключается в том, что к кодовой комбинации обычного типа добавляются дополнительные знаки, предназначенные для обнаружения и исправления вызванных помехами ошибок.

Проектируя метод передачи информации, нельзя не учитывать того факта, что среди сообщений могут быть как редкие, так и более часто повторяющиеся.

Ясно, что наши оптимальные методы кодирования и декодирования должны быть устроены так, чтобы наиболее быстрой и беспрепятственной была передача самых частых сообщений. В то же время можно примириться с трудностями, возникающими при передаче более редких сообщений.

ПЕРЕРАБОТКА, ПЕРЕДАЧА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ

Есть две формы существования информации: статическая информация, сохраняемая в виде письменного текста, записи на киноленте, магнитофоне, и информация, передаваемая в данное время с помощью электрических, звуковых, механических или других колебаний.

Задача хранения информации по существу сводится к ее представлению. Какую бы форму хранения информация ни принимала — букв, цветов, записанных на магнитофоне сигналов, — ее представление должно быть таким, чтобы при желании можно было восстановить

оригинал или его эквивалент. Поэтому обратимость есть основное требование при хранении информации.

Процесс хранения информации можно трактовать как процесс передачи информации, но только не в пространстве, из одной его точки в другую, а во времени, от одного момента времени к другому. При этом шумам соответствуют всевозможные причины для забывания и искажения хранящейся информации.

Понятие информации в настоящее время приобретает такое же большое значение, как и понятие энергии.

Если в науке и технике до XX века преобладал энергетический подход к рассматриваемым явлениям, при котором изучались различные виды энергии, закономерности их преобразования и обращалось внимание на коэффициент полезного действия, то в настоящее время приобретает значение «информационный подход», связанный с качественной стороной изменений и взаимодействий между отдельными элементами системы.

Характерной особенностью всех систем управления является передача информации от одних элементов системы к другим в самых различных процессах (химических, биологических и т. п.).

В системах, предназначенных для управления производственными станками и агрегатами, выпускаемой продукции придаются закономерные формы, то есть продукция содержит определенное количество информации. В управляющем устройстве при этом перерабатывается «внешняя» информация, получаемая от объекта через измерительное устройство, а объекту передается информация управления (команды).

Большое научное и практическое значение имеет исследование систем автоматического управления, работающих в условиях помех.

Увеличение точности систем управления и соответствующее повышение их чувствительности приводят к тому, что сигналы, порождаемые внешними и внутренними помехами, начинают ограничивать точность системы управления. Это требует разработки статистических методов синтеза автоматических систем, решения задач прохождения случайного воздействия через линейные и нелинейные цепи, а также синтеза оптимальных фильтров, позволяющих отделять сигналы от помех.

Вопросы автоматического управления и передача сообщений по каналам связи имеют существенное значение.

Ни отправитель, ни получатель сообщения не принимают активного участия в работе системы связи. Наоборот, в системах автоматического управления как отправитель, так и получатель сообщения представляют собой как бы неотъемлемые элементы системы, играющие активную роль в процессе передачи сообщений.

Практически это сводится к установлению обратных связей между каналом и отправителем, а также между получателем сообщения (например, отделом технического контроля), передатчиком и приемником (производственным процессом).

Обратные связи вводятся при помощи управляющей машины.

Для решения основных задач теории передачи сообщений и теории автоматического управления необходимо привлечь математическую логику и теорию игр.

Раздел математической логики — алгебра логики — рассматривает только два различных количества или величины: нуль и единица. Арифметические операции с «числами», которые могут быть только нуль и единица, малопохожи по смыслу на арифметические операции в обычной алгебре, хотя во многих случаях правила производства операций одни и те же. Сложению, в частности, присвоен смысл «или», а умножению «и».

Сложение и умножение нулей и единиц в различных комбинациях приводит к следующим результатам:

$$\begin{array}{l|l} 0 + 0 = 0 & 0 \times x = 0 \\ 0 + 1 = 1 & 0 \times 1 = 0 \\ 1 + 1 = 1 & 1 \times 1 = 1 \end{array}$$

Простым примером функции «или» может служить устройство для объявления пожарной тревоги, которое может быть приведено в действие сигналами из двух различных пунктов.

Сигнал из каждого пункта представлен через единицу; а отсутствие сигнала через нуль. Линии сигналов из обоих пунктов должны быть объединены так, чтобы тревога раздавалась, как только сигнал поступает из того или иного пункта. Конечно, если сигналы будут получены из обоих пунктов одновременно, то сигнал тревоги раздастся и в этом случае, однако он не будет в два раза сильнее.

Функция «и» означает, что результирующая величина равна единице только тогда, когда обе данные величины равняются единице.

Элементарным примером функции «и» может служить устройство для воспламенения взрывчатого заряда с помощью двух сигналов, когда в интересах безопасности требуется, чтобы только одновременное наличие обоих сигналов вызывало взрыв заряда. Заряд взорвется только тогда, когда сигнал получен из одного пункта и из другого пункта также.

В настоящее время математический аппарат логики находит широкое применение при анализе и синтезе релейно-контактных схем в электронно-счетных машинах, автоматических устройствах, в телефонии и в других областях.

Большой интерес для теории передачи сообщений имеет математическая теория игр. В этой теории показано, что игра, ведущаяся по определенной системе правил между двумя противниками, может рассматриваться как противодействие двух сил и описана математически. Основная цель передачи сообщений рассматривается как игра между «передатчиком» сообщений, который старается отправить как можно больше сообщений, и противником (помехами), который старается помешать и навредить источнику сообщений.

Теория игр представляет интерес для решения задач автоматического управления. В качестве одного из оппонентов в данном случае выступают предсказываемые заранее изменения внешней обстановки, на которые должна реагировать система автоматического управления, а в качестве второго оппонента — самая система.

Задача машин для обработки информации состоит в анализе и выделении небольшого количества информации из большого числа данных. Такая машина классифицирует явления, делает отбор из них по заданной группе признаков, что чрезвычайно облегчает обработку результатов статистической переписи. Но такая машина способна не только обработать статистические результаты, но и сделать больше. В химии ее можно использовать для анализа сложных органических соединений, молекулы которых насчитывают многие сотни и тысячи атомов. Такие машины можно использовать для проектирования новых химических соединений. Как известно,

молекулы некоторых органических соединений — так называемых изомеров, — имея одинаковый атомный состав, отличаются пространственным расположением в молекуле атомов, благодаря чему свойства этих молекул весьма различны. Число изомеров быстро возрастает с числом атомов, составляющих молекулу; например, $C_{40}H_{82}$ — свыше $62 \cdot 10^{12}$. Разумеется, даже если бы все химики занимались лишь исследованием изомеров, они не смогли бы их испытать. Машина же сможет отобрать по заданной ей программе из всех возможных изомеров те, которые обладают определенными свойствами, значительно облегчив химику их получение.

Машина работает по схеме: человек — машина — человек.

Общие особенности машины: выходные устройства должны быть приспособлены к введению большого объема данных, к их преобразованию и пересортировке; поэтому особое значение приобретает организация так называемой внешней памяти. Машины этого класса должны быть достаточно быстродействующими, так как объем перерабатываемой информации весьма велик.

ТЕОРИЯ ИНФОРМАЦИИ В БИОЛОГИИ

За последнее время идеи теории информации начали проникать в биологию. Органы чувств человека являются механизмами сбора, передачи и переработки определенной информации. В этом состоит их биологическое значение.

Наиболее сложным и тонким является аппарат зрения.

Несколько упрощая, можно представить этот механизм следующим образом: светочувствительные рецепторы сетчатки через ряд промежуточных клеток связаны с отдельными волокнами зрительного нерва. Информация, получаемая каким-либо рецептором, передается по соответствующему нервному волокну в центральную нервную систему.

Исходя из способности глаза различать мелкие детали, можно показать, что центральная нервная система получает информацию о состоянии возбуждения каждого из рецепторов в отдельности. Поэтому каждый рецеп-

тор — ряд промежуточных клеток и соответствующее волокно зрительного нерва — можно в известных пределах рассматривать как самостоятельный канал передачи информации.

Центральная нервная система, перерабатывающая получаемую информацию, использует сообщения, идущие по разным каналам и даже от различных органов чувств. У человека есть около миллиона таких каналов, более или менее независимых один от другого; в то же время имеются многосторонние связи.

Установлено, что передача возбуждения всегда связана с появлением в нервных волокнах электрических импульсов, которые после некоторого усиления могут быть записаны. Эти импульсы являются сигналами, передающими информацию об излучениях, действующих на рецептор сетчатки.

В результате изучения преобразования информации, получаемой глазом, удалось построить читающее устройство для слепых, которое либо передает текст сигналами азбуки Морзе (слепой надевает на голову приспособление, передающее слабые импульсы прямо в лобную кость), либо переводит с обыкновенного шрифта в брайловский выпуклый шрифт и печатает сразу текст. Это большое гуманное дело, имеющее возможность еще шире приобщить слепых к культурной жизни.

Наиболее сложным вопросом по сравнению с передачей и преобразованием зрительной информации является проблема фиксации человеческой мысли, преобразование мозгом и всей нервной системой информации, получаемых человеком от воздействия внешней среды. При передаче сигналов от чувствительных органов к мозгу в нервных клетках (нейронах) вначале наступает активная фаза, передаваемая из одного конца нейрона в другой с определенной скоростью. В течение этого времени нейрон уже не способен возбуждаться. По окончании активной фазы нейрон переходит в пассивное состояние, которое опять может быть переведено в активное пришедшим сигналом.

Сигналы в нейроны поступают от других нейронов через точки контакта между ними, называемые синапсами. Сработает нейрон или нет, зависит от характера импульсов, приходящих в различные синапсы, и от предыдущего состояния самого возбуждаемого нейрона. Ней-

рон не отвечает на раздражение, если оно ниже порога раздражения, а на раздражение, равное и большее пороговой величины, он отвечает с максимальной силой. Этот закон «все или ничего» использовался идеалистами для мнимого «обоснования» антинаучных выводов о независимости реакции организма и его эволюции от влияний среды и с этой целью неправомерно распространялся на весь организм как целое.

Человек является частью природы, поэтому в работе нервной системы его действуют те же физические законы, что и во всей природе, но между работой нервной системы человека и управляющим устройством машины имеется огромная принципиальная разница.

В то время как машина состоит из жестких элементов, наш мозг и нервная система построены из коллоидных клеток, способных к взаимозаме­не, регенерации. Они несравненно более сложны и несравненно более взаимосвязаны, чем части любой сложной машины. Это отличие является существенным, но не единственным.

Самый смелый и дерзкий вопрос — чтение чужой мысли — с точки зрения теории информации состоит в том, чтобы принять закодированное сообщение на фоне сильных помех биотоков мозга. Эта проблема родственна задаче о приеме в теории связи слабых радиолокационных сигналов на фоне сильных помех.

Одним из методов решения этой задачи является фильтрация сигналов от помехи при помощи корреляционного анализа.

Теория информации за последнее время нашла применение в генетике — в науке о передаче свойств организма по наследству.

Последние работы в этом направлении дали существенные факты для понимания процессов передачи наследственной информации, которая, как оказалось, закодирована в нескольких кубических микро­нах. Представляет большой интерес изучение специальной структуры молекул нуклеиновых кислот и условий, при которых производится зашифровка информации в родительском организме под влиянием внешних факторов, а также восстановление ее в потомстве.

Замечательно, что количество информации, заключенное в одной такой молекуле, настолько велико, что его

можно сравнить с количеством информации, содержащейся во многих томах научных работ.

Способы кодирования наследственной информации, выработанные самой природой в процессе ее эволюционного развития, оказываются чрезвычайно экономными. Они неизмеримо экономнее тех способов кодирования, которые используются техникой связи. Поэтому изучение преобразования и кодирования наследственной информации может принести пользу для теории передач сообщений по различным каналам.

На Международном конгрессе по кибернетике в г. Намюре (Бельгия) Франсуа Пейша (Франция) обосновал необходимость создания машины, которая заменяла бы врача при диагнозе болезни. Для этого он предлагал использовать цифровую вычислительную машину с большим объемом памяти. Чтобы получить ответ, в машину необходимо ввести результаты измерений температуры больного, давления крови и т. п. Если исходных данных для диагноза недостаточно, машина может указать на необходимость дополнительных сведений. Несмотря на то, что вопросы машинной диагностики изучены еще мало, диагностические машины интересны с двух точек зрения. Во-первых, при создании этих машин будут систематизированы знания по диагностике на основе определенной логической системы и опыта накопления в других областях науки. Подобный процесс происходит сейчас в языкознании в связи с разработкой переводных машин. И, во-вторых, из-за многообразия болезней один человек уже не в состоянии изучить и освоить накопленные знания, особенно по редко встречающимся болезням — таким, как например, тропические.

Поэтому диагностическая машина может быть полезной как для лечащих врачей, так и непосредственно для больного.

Ответ на запрос может, например, выдаваться по телефону.

Уже сейчас, в наши дни, построена электронная машина, служащая моделью человеческого сердца и кровеносной системы. Эта машина вычерчивает кривую, которая в точности совпадает с кардиограммой — графиком сердечной деятельности. Сначала врач задает машине программу, соответствующую работе здорового сердца, затем вводит изменения, «изображающие» то

или иное заболевание. При этом врач всякий раз сравнивает кривую, вычерчиваемую машиной, с кардиограммой больного. Совпадение кривых свидетельствует о правильности диагноза. Такой же метод пригоден и для диагностики нервных и психических болезней.

Когда диагноз поставлен, составление рецепта не представляет уже трудностей. Для этой цели в памяти машины имеется «словарь», который в соответствии с названием болезни выдает определенный рецепт.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ К ЯЗЫКОЗНАНИЮ

За последнее время теория информации нашла свое применение в вопросах автоматизации перевода с одного языка на другой.

Этот вопрос, помимо практического значения, приобретает и большой теоретический интерес в языкознании.

Принципиальная возможность составления правил автоматического перевода и соответствующих словарей вытекает из того обстоятельства, что в языке идеи и понятия находят свое материальное выражение; значение слов и любые изменения этих значений отражаются в языке средствами лексики и грамматики.

Во всех языках в качестве элементов используются слова, состоящие из одного, двух, трех и более слогов. Возникает возможность математического описания процесса образования слов из слогов. Можно установить формулу, описывающую с некоторым приближением распределение частот слогов в словах для разных языков.

Разные авторы, пишущие на одном языке, обладают индивидуальными различиями в распределении относительных частот числа слогов в слове. Даже разные книги одного автора обнаруживают некоторые различия, которые приобретают особый интерес при изучении свойств стиля.

Так, было установлено, что одно из произведений, которое некоторое время приписывалось Шекспиру, на самом деле принадлежит не ему. За сравнительный основной текст были приняты произведения: «Отелло», «Гамлет», «Король Лир».

Последние достижения языкознания, теории информации и цифровой вычислительной техники сделали воз-

можным машинный перевод с одного языка на другой.

Теория перевода основана на законах теории информации, а именно — кодирования, декодирования, хранения и преобразования информации.

Для автоматического перевода с одного языка на другой, например с немецкого на русский, в запоминающем устройстве машины хранится в закодированном виде словарь немецких слов, переведенных на русский язык, а также отдельные обороты речи, связующие предложения и т. д.

Для перевода сравнительно простого текста машина по известным правилам, записанным в виде программы, находит в словаре нужные слова и производит обработку их в соответствии с заданными и синтаксическими правилами. После этого в определенном порядке из слов образуется предложение, которое печатается на бумаге.

С этой точки зрения, по словам Винера, «книга, написанная по-китайски, попросту есть книга, написанная по-английски, но закодированная китайским кодом».

Правила для декодирования языков не являются в точности обратными правилами для кодирования. Если бы это было так, то механический перевод был бы гораздо легче, чем это можно ожидать. Только в переводе трудности декодирования вызваны не помехами, а являются следствием некоторых характерных особенностей схемы кодирования. Декодирование легко можно осуществить с помощью корректирующих кодов.

Вопрос о возможности машинного перевода с одного языка на другой разрешен полностью, — сейчас решается проблема качества полученного машинного перевода. В самом деле — может ли машина самостоятельно справиться с переводом или в помощь должен быть привлечен человек-редактор для обработки как вводимого текста, так и получаемого перевода (так называемый «пред-» и «постредактор»).

Это проблемы очень тонкие и трудные.

Люди, чувствующие всю красоту русского языка, понимают, как трудно перевести стихи Пушкина на какой-нибудь другой язык не только вычислительной машине, но и поэту, владеющему обоими языками.

В настоящее время ставится вопрос о возможности перевода устной речи с одного языка на другой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теория информации — это наука об основных принципах и закономерностях переработки, хранения и передачи сигналов и команд от человека к машине и обратно, от машины к машине, от человека к человеку.

Эта теория дает возможность с единой точки зрения подойти к изучению передачи сообщений независимо от их конкретного содержания.

Теория информации объединяет общие элементы различных областей науки: теории связи, теории фильтров и учреждения, теории следящих систем, теории автоматического регулирования с обратной связью, теории электронных счетных машин, физиологии, биологии и других.

В теории информации установлены новые методы кодирования, позволяющие увеличить пропускную способность каналов.

Замечательные результаты кодирования позволили установить методы приема слабых сигналов при наличии различных помех.

Теория информации нашла широкое применение в автоматизации производственных процессов.

Особое значение приобретают самоуправляемые и саморегулирующие системы. Применение их на производстве позволит не только увеличить выпуск готовой продукции, но и значительно повысить качество изделий. Достигается это тем, что управляющие машины, в отличие от обычных регуляторов, обладают способностью учитывать изменяющиеся условия технологического процесса. Следовательно, в этом случае процесс не только стабилизируется в каком-либо заданном режиме, но периодически как бы приспосабливается к новым, изменяющимся условиям.

Перспективы развития и возможности теории информации поистине огромны.

Одной из больших задач является комплексная автоматизация, создание полностью автоматизированных цехов, технологических процессов и предприятий.

Разработка теории информации окажет значительную помощь в решении этой задачи.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
20	15 снизу	$0 \times x = 0$	$0 \times 0 = 0$
28	11 сверху	учреждения	упреждения

Цена 55 коп.