

К ВОПРОСУ О СТРУКТУРНОЙ ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ

Л.Б. Петришин, профессор;

А.А. Борисенко, д-р техн. наук, профессор*

Технический университет «AGN», г. Краков;

**Сумский государственный университет, г. Сумы*

В данной статье проведен сравнительный анализ основных понятий статистической теории информации и находящейся на сегодня в процессе становления структурной теории. Выявлены основные отличия в условиях решаемых задач и сходные черты в используемых понятиях и методах. Ставится задача дальнейшего развития теории информации как единого целого путем объединения структурной и статистической теории информации. Выделяется структурная теория информации как составная часть общей теории информации, и рассматриваются ее особенности и специфические черты.

Ключевые слова: *структура, информация, анализ, часть.*

У цій статті проведений порівняльний аналіз основних понять статистичної теорії інформації та інформації і структурної теорії, яка перебуває сьогодні у процесі становлення. Виявлені основні відмінності в умовах задач, які вирішуються і подібні риси в поняттях і методах. Постає завдання подальшого розвитку теорії інформації як єдиної шляхом об'єднання структурної і статистичної теорії інформації. Виокремлена структура теорії інформації як складова частина загальної теорії інформації. Розглядаються її особливості та специфічні риси.

Ключові слова: *структура, інформація, аналіз, частина.*

Теория информации в настоящее время переживает определенный застой. Если еще какие-то 30 лет назад в период расцвета кибернетики о ней говорили везде и всюду, то сегодня, после того как теория информации столкнулась с некоторыми на то время непреодолимыми трудностями, о ней замолчали. Резко уменьшилось число статей на тему теории информации, и совсем редко выходят монографии. Правда, больше стали работать с понятием информации в практическом плане, и на этой основе появилась новая дисциплина “Информатика” и родственные ей дисциплины, связанные с информационными технологиями. Такой поворот дел в области информационных наук может быть только временным, потому что задачи теории информации никуда не исчезли и ждут своих исследователей. А без решения этих задач не могут эффективно решаться и практические задачи, связанные с областями, где применяется понятие информации. Поэтому автор ставит эти задачи на повестку дня и пытается, хотя бы частично, на некоторые из них найти ответ. В целом же данная статья является программной для автора в его работе над структурной теорией информации.

В данной работе исследуются лишь некоторые, но наиболее важные, понятия структурной теории информации как новой науки, выделившейся из статистической теории информации. Одной из задач данной работы является также привлечение внимания к данной проблеме - построение структурной теории информации - молодых исследователей.

Теория информации как самостоятельная наука существует уже с сороковых годов прошлого века, но на начальном этапе своего развития была представлена как математическая теория связи [1]. Такое, более чем скромное отношение к вновь создаваемой науке, объяснялось существовавшей в то время неопределенностью понятия информации. В то же время большое значение информационных задач для многих наук,

от философии до конкретных технических наук, заставляло ставить вопрос о создании теории информации.

Понятие информации и на сегодня до конца не определено. Имеется немало определений этого понятия, что как раз и говорит о сложности его разработки. Автор данному вопросу посвятил целую монографию, однако сказать окончательно, что такое информация, так и не смог [2]. Но этого не смогли сказать и другие авторы, которые пытались ответить на этот важный вопрос [3,4]. Интуитивно под информацией, обычно, понимается *содержание* сообщений, а сами сообщения предполагают наличие для них *источника* и *приемника* информации, между которыми находится канал связи.

Под *сообщением* можно понимать любое взаимодействие источника и приемника информации, в качестве которых могут выступать как одушевленные, так и неодушевленные объекты. Камень, например, вполне может выступать источником информации для исследователя. Он же может в неодушевленном мире взаимодействовать и со стеклом оконной рамы, передавая таким образом ему свою информацию движения и преобразуя при этом под ее воздействием стекло в грудку осколков, то есть понятие информации по своей сути всеобъемлюще и распространяется не только на живые кибернетические объекты, а и на неодушевленные. Обычно предполагается, что при передаче сообщения передается информация, хотя это далеко не всегда так. Сообщение может быть передано, а информация при этом будет отсутствовать, то есть в сообщении не будет содержания.

Например, если читатель данной статьи, которая по идее должна быть для него источником информации, знает ее содержание, то, очевидно, ее чтение не принесет ему информации и соответственно реальной пользы. Однако, очевидно, что могут найтись читатели, для которых данная статья будет содержать информацию и, возможно, даже интересную и полезную. Снаряд, движущийся параллельно курсу летящего самолета и имеющий при этом такую же скорость, как и самолет, не сможет передать ему информацию и тем самым его разрушить. Другими словами, вопрос количества информации, содержащейся в передаваемой информации, зависит не только от источника, а и от ее приемника. В целом - это очевидные факты, но они то как раз и составляют основу современной теории информации и их нельзя недооценивать при ее построении.

Наличие у приемника знаний предполагает у него присутствие особого вида информации, которую называют *априорной*. Именно она придает субъективный характер различным приемникам информации. Из-за ее наличия приемники или не получают в передаваемых сообщениях новую информацию вообще, или получают ее частично. Другими словами, знание, о котором так много говорят в философии и других науках, – это априорная информация. Именно она определяет ценность и полезность передаваемой в сообщениях информации, а также расшифровывает их смысл. Однако далеко не сразу приемник овладел имеющейся у него априорной информацией. Было время, когда он ее и не имел, и тогда эта априорная информация поступала к нему от источника в форме *апостериорной* информации.

Апостериорная информация – это информация, которая поступает от источника к приемнику непосредственно в *момент* ее передачи. Как только передача закончилась и переданная информация была запомнена приемником, она превращается для него в априорную информацию. С апостериорной информацией мы встречаемся везде и всюду. Это и ученые, исследующие те или иные объекты и процессы, например физики, сидящие за электронным микроскопом, это и фотографии, поступающие с марсианских вездеходов в момент их поступления, это и

последние известия, передаваемые по телевизору. Так что апостериорная информация – это не что-то абстрактное и далекое, а содержание конкретных сообщений о разных явлениях и объектах окружающего мира, поступающих на вход приемника в *данный* момент времени. Вся информация, которая была у приемника до такого поступления, это уже будет не апостериорная информация, а априорная. В дальнейшем апостериорную информацию будем называть просто информацией, так как именно она содержится в сообщениях и создает окружающую природу. Она же находится в непрерывном *движении*, переходя от источника к приемнику.

Априорная же – это та же апостериорная информация, только хранящаяся в состоянии относительного *покоя* в памяти материальных объектов, – человека, кибернетического устройства, камне, земле, солнце и т. д. Она создает эти материальные объекты и придает им соответствующую форму. Все эти объекты могут в природе выступать как в качестве источников информации, так и в качестве ее приемников, то есть могут или передавать информацию, или ее принимать. Таким образом, весь существующий реальный мир – это проявление информации в виде ее априорной формы или знаний, а передаваемая с помощью этой формы апостериорная информация, существующая также в материальных процессах и явлениях, – это содержание или сущность этой формы.

Таким образом, разница между двумя указанными видами информации состоит в том, что апостериорная информация появляется во время *передачи* сообщения, а априорная – во время *хранения* полученной в сообщении апостериорной информации. Однако оба эти два вида информации представляют одну и ту же сущность – информацию. Если источник передал один раз апостериорную информацию приемнику, и он ее запомнил в форме какого-то сообщения, то при второй передаче этого же сообщения оно уже апостериорную информацию нести не будет, потому что в памяти приемника хранится идентичная ей априорная информация. Также, если первый раз с помощью апостериорной информации камень разбил окно, то во второй раз его посылать будет бессмысленно, так как содержащаяся в нем апостериорная информация ранее превратилась в априорную информацию и хранится в памяти разбитого стекла, в виде его осколков.

В философском понимании сообщение представляет собой некий *феномен*, а его содержание или апостериорная информация – *ноумен* или вещь в себе, хотя, как указывалось ранее, непосредственно само сообщение – это тоже информация, только априорная, формирующая также и овеществленные объекты. Но она не воспринимается приемником как информация. Другими словами, сообщение, представляя априорную информацию, является носителем апостериорной информации, но не является при этом для приемника непосредственно самой информацией.

Формирует сообщение всегда источник информации, а на вопрос, содержит ли в себе переданное сообщение информацию и в каком количестве, отвечает приемник. Однако очевидно, что без наличия источника приемник получить информацию не сможет. Для разных приемников источник может давать разное количество информации (апостериорной), но есть максимальный предел передаваемого ее количества, который зависит только от источника. Этот предел равен той величине информации, которую приемник, имеющий неограниченную память, может принять, если у него в памяти полностью отсутствует априорная информация.

Возникает, вообще-то, непростой вопрос об отличии сообщения от его содержания, которое собственно и представляет собой передаваемую

информацию. Ответ был уже дан ранее. Но в силу его важности, повторим его. Сообщение - это *форма* представления, содержащейся в нем информации, а содержание – это непосредственно сама передаваемая информация. В науке применительно к форме представления информации выработано соответствующее понятие, которое известно как *код*. Кодом будет *набор* или *конечное множество* возможных сообщений, каждое из которых передает *апостериорную* информацию об одном из *состояний* источника информации.

От понятия кода произошло понятие *кодирование*. Кодирование – это *процесс* перехода информации о *состоянии* источника в *сообщение* о нем. В результате такого перехода состояние источника приобретает овеществленную форму в виде некоторого набора материальных признаков – световых сигналов, напряжений, токов, цветовых тонов красок и тому подобного. Эти признаки образуют символы (знаки), которые кодируют состояния источника. Каждое из них может кодироваться одним символом, а может и конечной последовательностью символов, которые могут рассматриваться как один сложный символ.

В статистической теории информации символы образуют бесконечную последовательность, а в структурной теории, обычно, конечную последовательность. Источник в процессе работы последовательно выдает информацию о своих состояниях, представленную после кодирования в материализованной кодовой форме. Например, человеческий мозг может выдать информацию о своем состоянии только в виде овеществленных признаков – речи, письма и так далее. Вне материальной формы генерируемая им информация не может быть воспроизведена. Она, как таковая, остается за пределом материального мира и потому носит *идеальный* характер. В этом состоит сложность понятия информации.

И все же в конечном итоге, невзирая на все сложности с пониманием понятия информации, предложенная в [1] Шенноном математическая теория связи, вошла в науку под названием *статистическая* теория информации. Такое название данной науки было вызвано тем, что рассматриваемая в ней модель передачи информации предполагала наличие источников информации, генерирующих последовательности символов (сообщения) в принципе неограниченной длины. Каждый из этих символов генерировался источником с *разной* вероятностью, а между символами при этом наблюдалась *статистическая* связь. Таким образом, статистическая теория информации была представлена в терминах теории вероятностей и даже иногда рассматривалась как ее специальный раздел.

Однако со временем появились практически полезные задачи, особенно в теории кодирования и теории автоматов, в которых источники информации генерировали последовательности символов с *равной* вероятностью. Информация, получаемая в таких задачах, носила название *структурной* информации [5]. Кроме того, эти последовательности могли иметь ограниченную длину. Последние задачи особенно часто встречались в конечной (дискретной) математике. При этом между символами в генерируемых последовательностях отсутствовала статистическая связь. Подобные источники, которые генерировали структурную информацию, в ряде случаев назывались *комбинаторными* или, для случая генерирования последовательностей символов с ограниченной длиной, *автоматными* источниками информации [6]. Задач, где применялись такие источники, оказалось на практике довольно много, и происходящие в них информационные процессы в полной мере не могли быть описаны методами статистической теории информации. Поэтому возникла необходимость на основе уже существующих идей и понятий этой теории таких, например, как

энтропия, неопределенность, мера информации и других разработать теорию информации, которая бы могла решать и такие задачи.

В результате появилась самостоятельная наука – *структурная* теория информации, основной характерной особенностью которой было *равенство* вероятностей, генерируемых ею последовательностей символов [5,6]. Хотя эта теория и имеет много общего со статистической теорией информации и методы ее похожи на уже существующие методы, используемые в статистической теории информации, однако она все же имеет существенные отличия в своих методах, особенно когда речь идет, кроме равной вероятности генерируемых последовательностей, еще и о конечной их длине. Поэтому структурная теория информации совместно со статистической образует единую общую теорию информации. Она решает как вероятностные, так и структурные практические задачи по переработке информации.

Вообще-то можно утверждать, что сначала, в 1928 году, американским инженером Хартли была образована *структурная* теория информации, и лишь затем, в 1948 году, Шенноном - *статистическая* теория. Именно Хартли впервые ввел логарифмическую меру информации, которая исходила из условия *равенства* вероятностей генерируемых источником информации сообщений, чем предвосхитил логарифмическую меру информации Шеннона для вероятностных источников информации. Более того, можно показать, что для структурной теории информации логарифмическая мера Хартли обобщает логарифмическую меру Шеннона [7]. Такое обобщение дало возможность рассматривать структурную теорию информации как науку, независимую от статистической теории, и тем самым поддержать ее претензии на самостоятельность в рамках общей теории информации, использующей основные идеи, введенные еще Шенноном.

Дополнительные новые идеи в структурную теорию информации внес, уже после создания Шенноном своей теории информации, американский ученый и кибернетик Эшби. По сути, он создал основы структурной теории информации, введя в нее новые понятия, которые встречаются в теории цифровых автоматов, такие, например, как преобразование, разнообразие, ограничение разнообразия и др. [8]. Однако наличие этих и других аналогичных идей, тогда и позже, еще не сформировали окончательно структурную теорию информации как новую науку. Поэтому и сегодня необходимо продолжать вести дальнейшую работу по разработке ее методов и расширять области их приложения. Именно эту задачу преследует данная работа, которая является очередной из серии работ автора в области структурной теории информации.

Теория информации в современном виде могла появиться только тогда, когда появилась практическая необходимость в измерении количества информации. Это произошло в середине 20-го века, когда появилась вычислительная техника, а вместе с ней и первые информационные технологии. Первым вопросом, который стоял перед новой теорией, был вопрос выбора меры информации. Такая мера, как уже указывалось выше, интуитивно была предложена вначале Хартли. В качестве ее меры был выбран логарифм числа n возможных равновероятных состояний (символов) источника информации:

$$i = \log_2 n . \quad (1)$$

Исходя из этой меры, взятой для случая $n = 2$, в качестве единицы измерения был предложен 1 бит:

$$i = \log_2 2 = 1 \text{ бит} . \quad (2)$$

Сегодня это самая распространенная в цифровой технике и информатике единица измерения количества информации. Это вызвано не в последнюю очередь использованием в цифровой технике двоичных чисел, в которых каждый символ, равный 1 или 0, несет в себе 1 бит информации. Так, в последовательности 11010101, которая еще называется байтом, содержится 8 бит информации. Последовательность, состоящая из $2^{10} = 1024$ битов, называется килобитом, а состоящая из $(2)^{10} = 1024$ килобит – мегабитом. Далее $(2)^{10} = 1024$ мегабит называется гигабитом. Соответственно с выше приведенными единицами измерения были получены килобайты, мегабайты и гигабайты.

Шеннон предложил использовать для определения количества информации также логарифмическую меру информации, но в ней, в отличие от меры Хартли, величина информации измерялась логарифмом *вероятности* P_j , j -го события или состояния, в котором мог находиться источник информации, взятого с отрицательным знаком:

$$i = -\log_2 P_j. \quad (3)$$

При этом, должно быть выполнено равенство

$$\sum_{j=1}^n P_j = 1. \quad (4)$$

Полученная в (3) информация называлась *частной* или *собственной*.

Очевидно, что при $P_j = \frac{1}{n}$

$$i = -\log_2 \frac{1}{n} = \log_2 n, \quad (5)$$

что совпадает с мерой Хартли.

Если теперь найти математическое ожидание собственной информации для различных вероятностей появления символов на выходе источника информации, то будет получено среднее значение количества информации, приходящееся на один символ. В результате Шенноном была получена его знаменитая формула среднего значения количества информации, приходящегося на одно состояние источника, кодируемого одним символом или их последовательностью:

$$J = -\sum_{j=1}^n P_j \log_2 P_j. \quad (6)$$

Именно ей было суждено стать одной из основных формул современной теории информации.

Эту формулу (6) для количества информации Шеннон ввел через понятие *энтропии*, которое явилось важнейшим понятием статистической теории информации, а в дальнейшем и структурной. Оно, по сути, вместе с вероятностной мерой информации и создало статистическую теорию информации Шеннона. Энтропия у него – это *мера* степени *неопределенности* приемника по отношению к состоянию, в котором находится источник информации. Неопределенность приемника и соответственно ее мера - энтропия напрямую зависят от *количества* априорной информации, имеющейся у приемника на момент передачи ему новой информации от источника. Чем больше будет у приемника этой информации, тем меньше будет степень его неопределенности по

отношению к источнику и соответственно меньшей будет его энтропия. Очевидно, что если приемник информации будет иметь всю информацию о состоянии источника, то неопределенность приемника и соответственно его энтропия упадет до нуля. В результате у источника не будет необходимости передавать информацию приемнику, ведь он ее уже имеет.

Здесь следует различать понятие “энтропия источника” и понятие “энтропия приемника”. Энтропия *источника* введена искусственно, так как никакой неопределенностью, а значит и энтропией, источник не может обладать по определению. Он может лишь передавать информацию, снимая тем самым неопределенность у приемника. Однако статистическая теория информации все же оперирует с понятием энтропии источника. Это энтропия, которую имел бы приемник, если бы получил всю возможную вероятностную информацию об источнике информации, то есть информацию о распределении вероятностей состояний источника и вероятностных связях между ними в процессе их последовательного генерирования. Эти вероятностные характеристики источника представляют его вероятностные ограничения. Их получают в результате проведения предварительных статистических исследований источника. Именно по этой причине теория информации Шеннона была названа статистической теорией.

В результате передачи вероятностных ограничений приемнику он станет обладать соответствующей априорной информацией, и его максимальная энтропия упадет от величины, равной логарифму от числа n его состояний, до величины, определяемой вероятностями состояний ее источника. Другими словами, энтропией источника называется энтропия приемника, который имеет полные знания о вероятностных характеристиках источника информации. Очевидно, что при этом до передачи информации будет достигнута минимально возможная неопределенность приемника по отношению к источнику и соответствующая ей минимальная величина энтропии. Именно такую энтропию, являющуюся исходной, в основном и пытаются в процессе исследований найти в статистической теории информации.

В дальнейшем, при передаче информации, энтропия приемника постепенно уменьшается от величины энтропии источника и может в принципе стать равной нулю. Как видим, исходная энтропия *приемника* напрямую зависит от его предварительных знаний, и чем больше имеется у него этих знаний, тем меньше информации может передать приемнику источник. Если же таких знаний у приемника нет, то тогда исходная энтропия приемника, основанная на равной вероятности для него получаемых им сообщений, может быть даже больше исходной энтропии источника, у которого вероятности состояний, в которых он находится, не равны между собой.

В структурной теории информации, где генерируемые последовательности равновероятны и имеют ограниченную длину, приемники имеют более конкретные знания о структурах, в которые входят эти последовательности. Эти структуры задаются *детерминированными* ограничениями, работающими по принципу “да – нет”, и в этом состоит принципиальное отличие структурной теории информации от статистической теории. Например, в условиях задачи структурной теории информации может быть указано число разрешенных кодовых комбинаций (сообщений) и число запрещенных, и при этом требуется оценить методами этой теории эффективность обнаружения ошибок в разрешенных комбинациях и скорость их передачи. Или требуется оценить время решения комбинаторной оптимизационной задачи, в которой есть запрещенные и разрешенные возможные решения, типа задачи коммивояжера.

В этих и подобных задачах, например поисковых, особую роль играет априорная информация, задаваемая условиями задачи, которые в соответствующей интерпретации играют роль приемников информации. Поэтому в структурной теории значительно больше внимания, чем в статистической, уделяется исследованиям приемников информации и их энтропиям, которые за счет детерминированных ограничений могут значительно отличаться в меньшую сторону от исходной энтропии источника. Максимальное значение энтропии приемника, равное исходной энтропии источника, в структурной теории информации достигается тогда, когда оно равно логарифму от возможного числа n символов, генерируемых источником информации.

Из всего сказанного выше вытекает, что уменьшение энтропии приемника всегда сопровождается получением им определенного количества информации от источника, по отношению к которому у него существовала ранее неопределенность, и чем больше будет получено приемником информации, тем меньше будет его энтропия. Именно в уменьшении энтропии приемника состоит цель передачи информации источником. Исходя из приведенных выше рассуждений, и была в теории информации предложена формула для вычисления количества переданной приемником информации:

$$J = H - H_0. \quad (7)$$

В нее входит исходная H и остаточная H_0 энтропии приемника. Разность между этими энтропиями и представляет то количество информации, которое получит приемник при передаче сообщения. В случае, если $H = 0$, то

$$J = H. \quad (8)$$

Тогда из формулы (6) следует, что исходная энтропия

$$H = -\sum_{j=1}^n P_j \log_2 P_j. \quad (9)$$

Максимального значения H_{\max} энтропия H достигает при равенстве вероятностей символов источника информации между собой:

$$H_{\max} = \log_2 n. \quad (10)$$

Это и полученные выше выражения для количества информации и энтропии составляют основу статистической и структурной теорий информации. Без них эти теории не смогли бы существовать как самостоятельные научные дисциплины. Все, что сделано в этих теориях, есть лишь развитие идей, содержащихся в приведенных выражениях и придание им нового качественного смысла.

Подводя итоги данной статьи, можно предположить, что в ближайшее время будет продолжаться работа над систематизацией материала в области теории информации с целью использования его для решения информационных задач. Особое место среди них в настоящее время занимают задачи, имеющие детерминированные ограничения, и очевидно, что их число имеет тенденцию к увеличению, что приведет к разработке на данной основе полноценной науки – структурной теории информации. Жизнеспособность этой теории будет определяться разработанными в ее рамках методами решения детерминированных задач и их непосредственными практическими приложениями. Эта, пока

что только становящаяся в настоящее время научная дисциплина, использует на сегодня основные понятия статистической теории информации, давая при этом им свою интерпретацию. К этим понятиям относятся логарифмическая мера информации, энтропия, априорная и апостериорная информация. К ним добавляются и новые понятия, связанные с детерминированными ограничениями.

SUMMARY

ON THE STRUCTURAL INFORMATION THEORY

*L.B. Petrishin, A.A. Borysenko**

Krakow

**Sumy State University, Sumy*

In the paper comparative analysis of basis concepts of statistie information theory is conducted. At present the structure information theory is in process of forming. The basic differences under the problem to be sowed and similarities in the concepts and methods to be used are uncovered. The problem of further development of information theory as an unified whole. The structure of information theory is singled out as a component and its features and specific peculiarities are considered.

Key words: *structure, information, analisys, part.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. - 167 с.
2. Борисенко А.А. К определению понятия информации / А.А. Борисенко // Вестник Сумского государственного университета. - 2003. - №11(57). - С.67-74.
3. Эшби У.Р. Введение в кибернетику / У.Р. Эшби. - М.: Изд-во иностр. лит., 1959. - 419 с.
4. Борисенко А.А. О некоторых аспектах современной теории информации / Борисенко А.А. // Вестник Сумского государственного университета. – 1994. – №1. - С.93-96.

Поступила в редакцию 8 мая 2009 г.