

## АСПЕКТЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА В ПРИКЛАДНОЙ ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

**Ключевые слова:** *системный анализ, телекоммуникации, прикладная теория информации.*

С началом XXI века человечество обратилось к принципиально обновившейся концепции своего глобального развития, а именно к концепции построения «информационного общества», в котором главными продуктами производства становятся информация и знания. Реальным отображением воплощения такой концепции являются процессы, объединенные понятием «информатизация» и направленные на построение и развитие телекоммуникационной инфраструктуры, которая связывает территориально распределенные информационные ресурсы.

Возрастание роли знаний и информационных технологий в жизни общества объективно делают информатизацию инструментом создания глобального информационного пространства, обеспечивающего эффективное взаимодействие людей, их доступ к мировым информационным ресурсам и потребности в информационных продуктах и услугах.

В основе информатизации лежат инструментарии информационных и коммуникационных технологий. Безусловно, тенденция к неуклонному росту объемов создаваемой, обрабатываемой и хранимой информации не может быть нарушена, и разрешить эту часть проблемы призваны компьютерные технологии.

Другая часть проблемы растущих информационных ресурсов заключается в требовании перемещения этих ресурсов с большей скоростью, на большие расстояния, для большего числа потребителей. Эта сторона проблемы возложена на новейшие волоконно-оптические, спутниковые, беспроводные широкополосные технологии, на Интернет, т.е. на телекоммуникационные системы, или, иначе, на телекоммуникации [1], которые являются неотъемлемой частью глобального процесса информатизации. Однако ни одна транспортная система не проектируется, не строится и не развивается без количественных характеристик тех объектов, для транспортировки которых она создается.

Таким образом, новая проблема заключается в существующем противоречии между фактическим использованием телекоммуникационных систем для передачи информации и отсутствием методологических принципов использования количественной меры информации для анализа и синтеза современных телекоммуникационных систем.

Разрешить сформулированную проблему призвана прикладная теория информации для телекоммуникаций как совокупность обобщенных положений, образующих раздел науки об использовании количественной меры информации в конкретной области знаний – телекоммуникациях.

Центральная задача исследования в прикладной теории информации для телекоммуникаций — формулировка методологических принципов и разработка методов, позволяющих применить положения теории информации к задачам построения и анализа современных телекоммуникационных систем.

Суть дальнейшего изложения заключается в описании нового направления исследований в области телекоммуникаций в виде прикладной теории информации, отображаемом (следуя принципам системного анализа [2]) последовательностью

действий по установлению структуры исследований информационно-телекоммуникационных систем и структурных связей между элементами этого исследования.

Следуя данному методу научного познания, необходимо прежде всего точно определить объект исследования и описать его как объект системного анализа.

Телекоммуникации – отрасль технической деятельности и научных знаний, занимающаяся вопросами транспортировки информации с использованием процедур формирования, преобразования и обработки электрических сигналов. Сигнал выступает как материальный носитель сообщений, которые, в свою очередь, являются формой отображения транспортируемой информации. Следовательно, предельные возможности телекоммуникационных систем по передаче информации ограничены их возможностями по передаче электрических сигналов.

Теория информации, сложившаяся как самостоятельная, строгая и универсальная математическая наука, связанная с количественной мерой информации, породила параллельные отрасли знаний, широко используемые в телекоммуникациях (теорию помехоустойчивости, теорию помехоустойчивого кодирования и т.п.), но не заняла достойного места в практике анализа, синтеза и конструирования телекоммуникационных систем. Причиной тому является то обстоятельство, что в моделях Шеннона — автора теории информации, и его последователей явно не представлена категория «канал» (есть подобие категории «линия связи»), а также принципиально не учтены те преобразования электрических сигналов, которые присущи телекоммуникационному каналу в его многообразных формах.

Корректно описать канал позволяет сложившаяся архитектура эталонной модели взаимодействия открытых информационных систем (ЭМВОИС), принятой Международной организацией стандартов (ISO) в виде совокупности международных стандартов. В рамках ее архитектуры сферой решения упомянутых задач являются два нижних уровня:

- физический уровень (Physical layer);
- канальный уровень (Data link layer).

Физический и канальный уровни ЭМВОИС определяют объект исследования прикладной теории – канал телекоммуникаций. При этом категория «канал» выступает как одно из наиболее многогранных понятий в телекоммуникациях.

На канальном уровне канал представляет, прежде всего, топологическое понятие, заключающееся в совокупности действий, связанных с передачей сигналов и информации между двумя объектами, соединенными средой передачи без промежуточных объектов. Центральными на канальном уровне выступают задачи моделирования доступа, занятия канала, пребывания канала в состоянии занятости и разъединения. Выходными характеристиками выступают вероятностно-временные параметры: производительность (объем обслуженной нагрузки) и своевременность.

На физическом уровне канал представляет совокупность устройств и линии связи, также предназначенных для передачи сигналов и информации между двумя объектами, однако без решения задач доступа, занятия и высвобождения канала. Центральными на физическом уровне выступают задачи определения потребности в частотном и энергетическом ресурсах для достижения заданной скорости передачи символов при заданной достоверности. Выходными характеристиками являются достоверность и параметры физических ресурсов.

Совокупность направлений исследований информационных свойств телекоммуникационных каналов здесь объединена понятием прикладной теории информации для телекоммуникаций. Такая теория сочетает в себе, с одной стороны, идею объединения качественных и количественных характеристик канала на физическом уровне на базе количественной меры информации, а с другой — идею объединения задач физического и канального уровней на базе все той же количественной меры информации.

Целью реализации данных направлений исследования с позиции теории является формулировка методов и принципов оценки информационных ресурсов и информационных возможностей каналов телекоммуникаций для использования этих оценок в процедурах анализа и синтеза свойств телекоммуникационных каналов на основе количественной меры информации. С позиций практической целью реализаций данных направлений является выявление соотношений между информационными свойствами источников сообщений, объемами информации, которые необходимо передать по каналу связи, и требуемыми для этого характеристиками систем передачи с учетом реальных процессов формирования и обработки сигналов, каналообразования и организации доступа к каналам.

Следующим этапом развития принципов системного анализа является задача построения методологии (формулировка методологических принципов) описания количественных и качественных характеристик каналов телекоммуникаций.

Теория информации как самостоятельное научное направление сформировалось на основе введения К. Шенноном способа измерения количества информации. Исследование количественной стороны информации определило главную задачу этой теории: максимизацию средней скорости передачи (пропускной способности канала), или, иначе, достижение наибольшего количества информации, переданного за единицу времени при заданных условиях.

Параллельно на основе работ В. А. Котельникова развивалось другое научное направление исследования свойств каналов связи – теория помехоустойчивости. Главной задачей теории помехоустойчивости является отыскание таких способов передачи и приема, при которых обеспечивалась бы наивысшая достоверность принятого сообщения – наилучшее качество передачи при заданных условиях.

Использование результатов работ К. Шеннона и В.А. Котельникова дало возможность определить, насколько конкретная технология близка к идеальной по своей способности выделять сигнал из смеси его с помехами, сохраняя информационные признаки сигнала.

Обе задачи являются, по сути, различными сторонами одного и того же процесса транспортировки информации при ее передаче и приеме. Однако в действующей практике анализа и синтеза телекоммуникационных систем информационный подход уступает подходу на основе критериев достоверности. Прикладная теория информации призвана установить диалектическую связь между этими подходами.

Рассмотрим выражение для вычисления пропускной способности  $C$  симметричного дискретного канала, определяемое в соответствии с принципами Шеннона,

$$C = V_C \cdot [\log M + p_{\text{ош}} \cdot \log \frac{p_{\text{ош}}}{M-1} + (1-p_{\text{ош}}) \cdot \log(1-p_{\text{ош}})] = V_C \cdot \varphi[M, p_{\text{ош}}], \quad (1)$$

где  $V_C = 1/\tau_c$  – скорость передачи последовательности символов в линии связи длительностью  $\tau_c$ ;  $M$  – позиционность дискретного сигнала, передаваемого по линии связи;  $\varphi[M, p_{\text{ош}}]$  — удельная пропускная способность канала на символ источника. Значение вероятности ошибки  $p_{\text{ош}}$  является функцией, убывающей с ростом значения энергетических параметров линии связи

$$h^2 = E_S / N_0 = P_S / (V_C \cdot N_0) = \alpha / V_C, \quad (2)$$

где  $\alpha = P_S / N_0$  определяется при известных значениях мощности  $P_S$  (или энергии  $E_S$ ) сигнала и спектральной плотности помех  $N_0$  в точке приема.

Итак, значение пропускной способности  $C$  определяется в виде произведения скорости  $V_C$  передачи символов в канале, которая имеет тенденцию к возрастанию в силу стремления передать больше символов в единицу времени, и множителя  $\varphi[M, p_{\text{ош}}]$ , убывающего с ростом скорости  $V_C$  за счет увеличения вероятности ошибки  $p_{\text{ош}}$ .

Две встречные тенденции порождают ожидание экстремума  $C_{\max}(\alpha)$ , зависящего не только от энергетического параметра  $\alpha$ , но и от позиционности сигнала  $M$ , избранного вида манипуляции и способа обработки.

Применительно к задаче достижения рациональной границы пропускной способности дискретного канала критерием достижения целевой функции является функционал

$$C^*(\alpha, V_C)_{\text{доп}} : \{ C^*(\alpha, V_C) - C_{\max}(\alpha) \leq \Delta \varepsilon_{C_{\text{доп}}} \}, \quad (3)$$

где  $C^*(\alpha, V_C)_{\text{доп}}$  — искомое допустимое значение пропускной способности дискретного канала.

Компромисс между стремлением достичь наибольшего значения пропускной способности канала  $C(\alpha, V)$  (например, на величину  $\Delta \varepsilon_{C_{\text{доп}}}$  ниже экстремума) и допустимым значением достоверности приема символов в канале  $p_{\text{ош}}$  выражается соотношением (3).

Новизна подхода к известному выражению (1) в рамках прикладной теории информации на основе функционала (3) заключается в том, что шенноновская пропускная способность  $C$  не рассматривается как фиксированная граница, а исследуется как динамичная величина, возрастающая с увеличением скорости передачи символов на фоне ниспадающей достоверности приема символов в линии связи. Обеспечить требуемую достоверность символов для получателя при высоких значениях  $C$  позволяют методы помехоустойчивого кодирования. Именно в рамках теории помехоустойчивого кодирования удается установить количественные соотношения между вероятностью ошибочного приема символов на выходе линии связи  $p_{\text{ош}}$  и вероятностью ошибочного приема символов на выходе декодера  $p_{\text{дек}}$ :  $p_{\text{дек}} \ll p_{\text{ош}}$ . С этих позиций одновременное достижение высокой скорости передачи и требуемой достоверности в каналах с заданными энергетическими свойствами перестает быть противоречивой задачей.

Традиционно группа задач, связанных с теорией информации, теорией помехоустойчивости и теорией помехоустойчивого кодирования замыкаются на физическом уровне. Между тем исследования последних лет показали, что вопросы, связанные с передачей информации: помехоустойчивостью, выбором сигнала, способом кодирования, модуляции и обработки, тесно переплетаются с вопросами организации доступа к каналу, обслуживанию, числу участников. Такие задачи плавно перерастают в каналные задачи.

Так, обращение к теории массового обслуживания [3] позволяет на канальном уровне определить и оптимизировать параметры производительности (через объем обслуженной нагрузки  $Y_{\text{обсл}}$ ) и своевременности (через среднее время пребывания заявки в системе  $\tau_{\text{сист}}$ ).

Однако в сложившейся практике исследований специалисты в рамках физического и канального уровней не взаимодействуют, оперируют независимыми моделями, определяют характеристики телекоммуникационных систем, которые в явном виде не связаны.

Специалисты в области теории телетрафика в рамках канального уровня оперируют категориями доступа к каналу, интенсивности заявок, интенсивности обслуживания, не исследуя при этом природу сигнала как переносчика информации. Специалисты в области помехоустойчивости и других задач физического уровня исходят из предпосылки, что канал связи всегда доступен, при этом они исследуют характеристики: энергию сигнала, помехи и т.д.

Симптоматично, что такая ключевая категория как «пропускная способность» в этих двух разных уровнях ЭМВОИС имеет совершенно разное определение и смысл. На физическом уровне пропускная способность — это мера предельных возможностей физического канала с заданными характеристиками по передаче информации (в едини-

цах количества информации). На канальном уровне пропускная способность – это категория, эквивалентная показателю объема обслуженной нагрузки (в единицах времени обслуживания независимо от количества переданной информации).

Следовательно, важной методологической задачей является соединение исследований в этих смежных уровнях для прорыва «блокады невосприятости» между знаниями специалистов физического уровня и специалистов канального уровня.

В рамках разрешения этой задачи методологический базис прикладной теории информации для телекоммуникаций составляют смежные образующие теории: информации (И), помехоустойчивости (П), помехоустойчивого кодирования (К), телетрафика (Т) (см. табл. 1).

Объединение указанных областей знания порождает задачу синтеза объединенной модели оценки информационных возможностей каналов телекоммуникаций, включающую направления исследования:

- построение модели процесса передачи информации с использованием параметров телетрафика на канальном уровне и характеристик достоверности приема символов на физическом уровне;
- анализ информационных возможностей каналов с учетом объединения характеристик и свойств каналов телекоммуникаций на физическом и канальном уровнях;
- установление закономерностей изменения производительности канала связи от его пространственно-энергетических параметров с учетом требований к достоверности передаваемых по линии связи символов.

**Таблица 1.** Принципы объединения методологических признаков образующих теорий в прикладной теории информации для телекоммуникаций

Методологические признаки	Характеристики признаков	Связь с теориями
Уровень модели	Физический, канальный	И, П, К, Т
Объект рассмотрения	Информация	И
Классификационные признаки информации	Непрерывная, дискретная	И, П
Элементы системы передачи	Источник, линия передачи, получатель	И, П, К
Количественный признак	Количество информации	И
Характеристики передаваемой информации	Энтропия источника, избранный вид модуляции, код канала, энергетические характеристики передатчика, способ каналообразования	И, П, К
Характеристики линии	Ослабление сигнала, отношение энергии сигнала к спектральной плотности шума в точке приема, пропускная способность, производительность системы передачи	И, П, К, Т
Критерии оптимизации	Максимум взаимной информации, минимум частотно-энергетических ресурсов	И, П
Инструменты оптимизации	Кодирование источника, выбор кода канала, вида модуляции, способа доступа к каналу	И, П, К, Т

Одна из моделей процесса передачи информации с использованием параметров телетрафика на канальном уровне и характеристик достоверности приема символов

на физическом уровне синтезируется на основе исследования систем с конфликтом доступа. Так, конфликт доступа можно наблюдать в радиосистемах с обобществленным частотным ресурсом и децентрализованным доступом к нему абонентов.

Адекватным для таких систем является аппарат описания СМО для случая, когда состояния системы занят–свободен применительно к прибору обслуживания нельзя определить достоверно. Тогда под конфликтом доступа следует понимать ситуацию, когда при поступлении очередной заявки прибор обслуживания оценивается как свободный, но в момент занятия оказывается, что он занят другой заявкой и поэтому поступившая заявка теряет право на обслуживание. Вероятность такого конфликта оценивается вероятностью  $p$ . Интерпретация конфликта доступа может отображаться также случаем, когда прибор обслуживания (физически) остается единственным, но с некоторой вероятностью  $q = 1 - p$  он может одновременно обслуживать и другую заявку, формально отображая работу нескольких приборов обслуживания.

Неопределенность состояний системы занят–свободен, выраженная через вероятностную меру  $q$ , не только «прореживает» поток поступающих заявок, но и меняет структуру и статистику состояний при известном допустимом числе заявок в системе [4].

Традиционно критерии оптимизации на канальном уровне связаны с избранной дисциплиной обслуживания  $D$  и интенсивностью входящей нагрузки  $\rho$ :

$$\max_{(D, \rho)} \{Y_{\text{обсл}}\} = \min_{(D, \rho)} \{p_{\text{отказ}}\}. \quad (4)$$

Если принять, что условия доступа к среде передачи на канальном уровне зависят от требований к качеству связи (через допустимую в канале вероятность ошибки  $p_{\text{доп}}$  при соответствующем значении энергетического фактора физического уровня  $h^2 = E_S / N_0$ ), то на канальном уровне производительность системы  $Y_{\text{обсл}}$ , а также ресурсы пребывания заявки в системе  $Z_{\text{сист}}$  и в очереди  $r_{\text{очер}}$  оказываются функцией параметров физического уровня:

$$Z_{\text{сист}} = Y_{\text{обсл}}(q) + r_{\text{очер}}(q), \quad (5)$$

где  $q$  – вероятностная мера успешности реализации процедуры доступа к среде передачи на канальном уровне с учетом требований к качеству связи на физическом уровне:

$$q = f(h^2, p_{\text{доп}}). \quad (6)$$

Количественная мера информации оказывается задействованной в функционале оптимизации, выступающим в объединенной модели аналогом критерия (4), в виде

$$\max_{(D, h^2, q)} \{I_{\text{сист}}\} = \max_{(D, h^2, q)} \{I(h^2) \cdot Y_{\text{обсл}}(q)\}, \quad (7)$$

где  $I_{\text{сист}}$  — количество информации, передаваемой в рассматриваемой системе за нормированный промежуток времени (например, один час в «час наибольшей нагрузки» — ЧНН), бит;  $I(h^2)$  — количество информации, передаваемой в рассматриваемой системе за единицу времени, исходя из показателей физического уровня (вне процедур доступа), бит/с;  $Y_{\text{обсл}}(q)$  — интенсивность обслуженной нагрузки, исходя из показателей канального уровня с учетом процедур доступа (дисциплины обслуживания  $D$ ) за нормированный промежуток времени (например, за один час в ЧНН), Эрл.

Таким образом, функционал оптимизации (7) исчерпывает проблематику построения методологии описания количественных и качественных характеристик каналов телекоммуникаций в соответствии с рассматриваемой совокупностью задач.



В рамках представленной модели функционал для оценки выигрыша в производительности системы (выраженный в процентах) от ужесточения требований к достоверности связи (через допустимое значение  $h_{\text{доп}}^2$ ) имеет вид

$$i_{\text{сист}} = \{I(h_{\text{доп}}^2) / I(h_{\text{макс}}^2)\} \cdot \{Y_{\text{обсл}}(h_{\text{доп}}^2) / Y_{\text{обсл}}(h_{\text{макс}}^2)\} - 1. \quad (8)$$

Функционал (8) отображает методологию описания количественных и качественных характеристик каналов телекоммуникаций в рамках объединенной модели оценки информационных возможностей каналов телекоммуникаций, дополняя функционал (7).

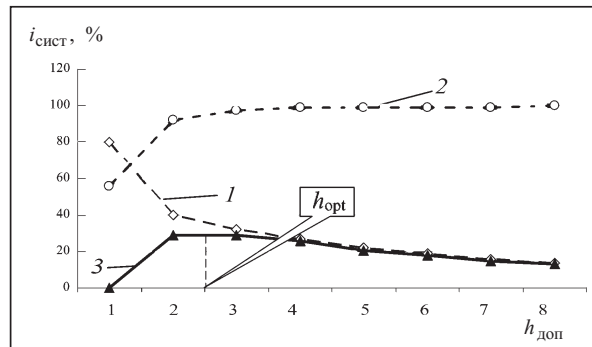


Рис. 1. Графическое отображение производительности системы в рамках объединенной модели: 1 — относительная производительность, 2 — относительная пропускная способность, 3 — относительная обобщенная производительность  $i_{\text{сист}}$

На рис. 1 представлено графическое отображение реализации функционала (8) в одной из исследованных телекоммуникационных систем с когерентной обработкой сигналов фазовой манипуляции, которое содержит экстремум исследуемой зависимости  $i_{\text{сист}}$  (%).

Смысл синтезированного экстремума заключается в нахождении такого значения энергетического параметра канала  $h_{\text{доп}} = h_{\text{опт}}$ , при котором достигается максимум объема передаваемой информации

$I_{\text{сист}}$  в канале телекоммуникаций при ужесточении требований к достоверности связи за счет компромисса между ростом производительности одной линии без учета фактора доступа и ограничением на доступ к ресурсам канала связи других пользователей.

Таким образом, совокупность сформулированных методологических принципов новой прикладной теории позволяет определить класс ее проблем как хорошо структурированные (*well-structured*) или количественно сформулированные проблемы, в которых точно выявлены существенные зависимости. В соответствие с действующими принципами именно в этом случае достигается наивысшая эффективность решения проблем с помощью методов системного анализа.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Совокупность направлений исследований информационных свойств телекоммуникационных каналов объединена понятием прикладной теории информации для телекоммуникаций. Такая теория сочетает в себе, с одной стороны, идею объединения качественных и количественных характеристик канала на физическом уровне на базе количественной меры информации, с другой — идею объединения задач физического и канального уровней на базе все той же количественной меры информации.

В рамках прикладной теории информации для телекоммуникаций впервые рассмотрена совокупность преобразований электрических сигналов, сформированных на выходе непрерывных и дискретных источников и передаваемых по непрерывным, дискретным и цифровым каналам. Такая совокупность соответствует всему множеству возможных сочетаний свойств источников и линий связи, образуя единую информационно-телекоммуникационную систему на физическом и канальном уровнях ее описания.

2. Основные методологические принципы изложенной прикладной теории информации для телекоммуникаций сводятся к следующим формулировкам:

— новая теория охватывает задачи как физического, так и канального уровней, создавая предпосылки для использования количественной меры информации в задачах ЭМВОИС более высоких уровней;

— объектом рассмотрения выступает телекоммуникационный канал, по которому передается информация посредством сигналов, содержащих признаки транспортируемой информации;

— количественная мера информации применима как к дискретной, так и непрерывной формам информации в дискретных, непрерывных и цифровых каналах телекоммуникаций;

— критерием эффективности и оптимизации параметров системы является максимум взаимной (транспортируемой) информации при минимальных частотно-энергетических ресурсах;

— инструментами оптимизации выступают:

- средства кодирования сообщений источника с целью повышения помехоустойчивости;
- выбор вида модуляции;
- выбор способа обработки сигнала;
- выбор способа доступа к обобществленным ресурсам канала связи.

3. Перспективность исследований в рамках прикладной теории информации для телекоммуникаций заключается в том, что, преодолев методологическую преграду между задачами физического и канального уровней, соединив эти уровни в одной методологии, можно решать задачу построения прозрачной методологии создания телекоммуникационных систем от физического уровня к высшим уровням в рамках эталонной модели ОИС на базе общего критерия – информационной эффективности.

4. В представленном виде концепция прикладной теории информации для телекоммуникаций полностью отвечает принципам системного анализа и развивает одно из его актуальных прикладных направлений, предлагая для решения хорошо структурированных, количественно выражаемых проблем точно сформулированные критерии оптимизации и методы их достижения.

В новой теории отображены наиболее существенные аспекты системного анализа:

- описание телекоммуникационной системы как объекта системного анализа;
- формулировка проблематики и определение целей исследования;
- определение критериев достижения целей;
- построение моделей для обоснования решений;
- разработка методов для поиска оптимальных (или допустимых) вариантов решения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильченко М.Ю., Кравчук С.О. Сучасні телекомунікаційні системи. — К.: Наук. думка, 2008. — 328 с.
2. Згуровський М.З., Панкратова Н.Д. Системний аналіз: проблеми, методологія застосування. — К.: Наук. думка, 2005. — 744 с.
3. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. – М.: Наука, 1987.—336 с.
4. Урывский Л.А. Обобщение процесса «размножения и гибели» на системы с «конфликтом доступа» // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку: Науково-виробничий збірник. — 2009. — 7, № 1. — С. 97–104.

*Поступила 08.05.2010*