

ПРИНЦИПЫ СИСТЕМНОГО ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПО ЦИФРОВЫМ РАДИОКАНАЛАМ

© 2014 Е. В. Чучин

*канд. техн. наук, доцент,
ст. науч. сотрудник каф. программного обеспечения
и администрирования информационных систем
e-mail: chew42@yandex.ru*

Курский государственный университет

Сформулированы принципы системного построения моделей качества передачи информации по цифровым каналам связи с переменными и постоянными параметрами. Изложены основы построения обобщённых моделей качества. Вскрыты проблемы моделирования и способы их разрешения.

Ключевые слова: цифровая связь, канал связи, качество канала, релейские замирания, моделирование качества, обобщённая модель качества.

Основной мерой, характеризующей качество передачи информации по цифровому радиоканалу, служит вероятность ошибочного приёма сообщения. Эта вероятность обладает достаточной степенью объективности и универсальности. Она не зависит от содержания передаваемой информации. С ней связаны такие характеристики канала, как пропускная способность, скорость передачи информации, надёжность связи, и ряд других параметров.

Расчёт вероятности ошибки осуществляется путём построения аналитических моделей.

На основе анализа этих моделей исследуются методы повышения помехоустойчивости приёма сигналов, эффективность применяемых видов модуляции, влияние различных помех на качество связи, а также многие другие проблемы. Созданию моделей посвящено множество монографий и научных статей.

Несмотря на существенные успехи в области моделирования, традиционный подход к построению аналитических моделей качества приёма дискретных сигналов исчерпал свои возможности. Причиной этому являются следующие факторы.

Во-первых, с появлением цифровых систем связи число возможных ситуаций настолько возросло, что проводить их анализ, базируясь на получении отдельных формул для расчёта вероятности ошибки, не представляется возможным. Здесь необходимы системные методы, позволяющие объединять в агрегированные подмножества группы моделей, отвечающие определённым признакам эквивалентности. При этом исследование целесообразно проводить на основе использования обобщённых свойств этих подмножеств.

Во-вторых, трудности использования современного арсенала знаний, необходимых для построения моделей качества, в ряде случаев настолько велики, что не позволяют традиционными способами получать аналитические формулы, адекватные реальной обстановке. Недоступными оказываются и другие методы моделирования (например, имитационного). Возможный путь построения надлежащих моделей в этих условиях состоит в отыскании системной связи между соотношениями,

полученными в области, доступной для исследования, и их изоморфного отображения в интересующую область.

В-третьих, это сложности численного расчета аналитических моделей, представленных множеством специальных функций и медленно сходящимися рядами, что часто имеет место при описании каналов связи со структурной помехой. Помимо того, что это требует значительных усилий в процессе программирования, здесь также возникают определённые сложности с обеспечением требуемой точности вычислений. В этих условиях целесообразно синтезировать иерархически структурированные системы моделей, параметрически связанные с параметрами реальных каналов связи. В результате удаётся создать унифицированную процедуру расчёта и анализа для целого ряда ситуаций, отличающихся только значениями отдельных параметров.

Наиболее эффективным способом построения моделей, обеспечивающим вычисление вероятности ошибки в различных условиях, является системное моделирование.

Системное моделирование качества передачи сигналов в цифровой радиосвязи является новым научным направлением общей теории связи, сконцентрированным на формировании неизвестных в настоящее время аналитических соотношений на основе анализа взаимосвязей между ранее полученными формулами помехоустойчивости.

Задачи системного моделирования можно сформулировать как *логическое объединение известных и формируемых в процессе моделирования аналитических соотношений в единую систему, элементы которой связаны между собой отношениями эквивалентности, на основе которых обеспечивается дальнейшее построение новых моделей качества, определяемых целью исследования.*

Прагматизм такого объединения состоит в том, что при построении новых моделей удаётся избежать сложностей, возникающих в процессе моделирования помехоустойчивости систем, требующих учёта множества частных показателей. При этом каждая новая модель является результатом логического вывода, сделанного на основе анализа взаимосвязей, существующих между смежными подмножествами моделей. В свою очередь, объединение множества локальных решений позволяет получить обобщённую модель, пригодную для исследования качества цифровой связи при произвольных видах сигналов, параметрах среды передачи и способах обработки сигнала в приёмнике.

Построение обобщённых моделей основано на иерархическом подходе. Вначале используются наименее детализированные представления, отражающие только некоторые общие черты и особенности канала связи, определяемые небольшим числом параметров, отображаемых в символьном виде. На следующих уровнях степень подробности возрастает. Значения каждого из параметров детализируются. Детализация может осуществляться как по классам, так и по числовому значению параметра в пределах данного класса. Соответственно все модели подразделяются по рангу и по уровню сложности. Чем большее число параметров учитывается в данной модели, тем выше её ранг. И чем большее число параметров представлено в модели в символьном виде, тем более значителен уровень её сложности.

Поскольку количество параметров в процессе исследования может варьироваться в широких пределах, а их числовые значения могут быть любыми в пределах области определения, то все модели объединяются в сложную систему аналитических соотношений, обладающей объёмной матричной структурой. Каждая модель K -го уровня является метасистемой для моделей $K-1$ уровня. В пределах K -го уровня модели R -го ранга являются метасистемой для моделей $R-1$ ранга и т.д.

Понятие «система» здесь применяется в конструктивном смысле [Чучин 2003]. Её простейшими неделимыми элементами являются модели, содержащие в

обобщённом виде только один из символьных параметров, который в этом случае выступает в роли аргумента функциональной зависимости, соответствующей условиям моделирования. Наиболее часто в качестве последнего используется либо отношение энергии сигнала к спектральной плотности белого шума h^2 , либо его среднеквадратическое значение $\overline{h^2}$.

Круг задач, решаемых в процессе системного моделирования, относится к категории интеллектуальных задач [Ющенко и др. 2004]. Эти задачи отличаются тем, что схема их решения априори неизвестна, несмотря на привлечение знаний из предметной области. Алгоритм поиска решения таких задач формируется на основе опыта и интуиции исследователя и содержит элементы эвристики. Однако несомненным достоинством такого подхода является то, что задачи, решённые системным методом, в дальнейшем переходят в разряд инженерных задач и становятся доступными широкому кругу специалистов, занятых как в области теории, так и в области практики.

Концептуально системное моделирование представляет собой нетривиальный процесс отыскания закономерностей в базах данных, накопленных к моменту решения задачи. Поэтому методология системного моделирования качества передачи цифровых сигналов содержит значительное число приёмов и методов, адекватных инженерии знаний в интеллектуальных информационных системах. В основном она базируется на индуктивно-дедуктивных методах обнаружения закономерностей. При этом проявляется цикличность эволюционного развития познания, основным принципом которой является качественный переход от обработки данных к обработке знаний [Ющенко и др. 2004].

При обычных методах исследования качества связи расчёт помехоустойчивости осуществляется на основе обработки данных о состоянии канала передачи, характера передаваемых сигналов и способов принятия решения в приёмнике. Для этих целей применяются знания, известные из теории вероятностей, математической статистики, теории игр и других фундаментальных дисциплин. Полученные на их основе модели представляют собой концентрированный результат такой обработки и, по существу, являются новыми приобретёнными знаниями.

При системном подходе к моделированию эти модели выступают уже в качестве новых исходных данных, подлежащих дальнейшему преобразованию на основе конструкций знаний, формируемых в процессе обработки. Актуализации знаний способствуют потребности практики.

Принципиальным отличием стратегии формирования знаний и преобразования данных, используемой при системном моделировании, от стратегии, принятой в системах искусственного интеллекта, является то, что здесь недопустимы методы «слепого» поиска приемлемого решения. Поиск закономерностей и построение моделей при системном моделировании осуществляется целенаправленными методами с привлечением опыта и интуиции исследователя.

Процесс формирования пирамиды знаний распадается на три стадии [Ростовцев 1984]: индуктивную, дедуктивную и вновь индуктивную – от первоначального накопления исходных моделей на первой стадии, объединения совокупности исходных моделей в единую систему на второй стадии до проверки соответствия применяемых теорий в расширенном поле исходных данных в ходе третьей стадии.

Основная процедура системных методов построения новых моделей качества состоит в порождении и проверке гипотез, определяемых на элементах многомерных матриц, размерность которых перманентно увеличивается по мере расширения класса решаемых задач. При построении гипотезы используются планирующие эвристики «от цели к средству её достижения». Элементы матрицы анализируются на предмет

подтверждения или отклонения соответствующей гипотезы. Если требуемое средство достижения цели не найдено, то формируется новая гипотеза. Основой для формирования гипотезы обычно служат принципы, используемые в теории силлогизмов.

Главной проблемой индуктивно-дедуктивного метода обнаружения закономерностей в процессе системного моделирования качества передачи сигналов является проблема поиска гипотез, удовлетворяющих множеству вариантов, возникающих при передаче сигнала. Принципиально эта проблема может быть решена только для отдельных конкретных ситуаций. В связи с этим вводится понятие зоны покрытия обобщённой модели. Эта зона количественно определяет непротиворечивость принятой гипотезы по отношению к общему числу рассматриваемых примеров. Непротиворечивая гипотеза приводит к истинному результату моделирования для всей совокупности исходных данных, в качестве которых выступают модели нижерасположенных уровней иерархии. При расхождении результатов моделирования на некотором числе рассматриваемых примеров, не превышающих заданного порога, модель характеризуется «слабой непротиворечивостью» и может быть использована в пределах своей зоны покрытия.

Алгоритм построения системы моделей может быть представлен в виде **И/ИЛИ** графа. Существо такого построения состоит в следующем. Вначале при слиянии различных исходных моделей нижнего уровня в единую обобщённую модель отыскиваются возможные варианты построения этой модели. Их может быть несколько. Все они представляют дизъюнктивно связанные вершины (**ИЛИ** – вершины), из которых при выполнении определённых условий следуют исходные модели. По мере введения новых условий число таких вершин убывает. Некоторые из них отпадают, а остаются те, которые обеспечивают покрытие совокупности моделей с учётом новых условий. В пределе остаётся одна модель, имеющая максимальную область покрытия, равную единице. Полученная модель представляет собой **И** вершину графа, отображающего систему аналитических соотношений, и отвечает принципу конъюнкции в том смысле, что она является истинной в смысле её соответствия всем исходным решениям.

Практическая реализация системного моделирования возможна только при наличии исходного набора моделей. Поэтому оно не заменяет, а развивает известные способы моделирования. Развитие состоит не только в построении обобщённых моделей качества, но и в возможности получения новых неизвестных соотношений в пределах каждого иерархического уровня. Для этого могут использоваться методы взаимно однозначного отображения из одной области исследований в другую. Такими отображениями являются известные [Чучин 2003] преобразования всех моделей при когерентном приёме сигналов в область некогерентного приёма и обратно (**E** и **E**⁻¹ преобразование); отображение моделей качества передачи сигналов при воздействии синхронных структурных помех в область скользящих структурных помех и обратно (**B** и **B**⁻¹ преобразование) и другие. Существо этих преобразований состоит в трансформации отношения сигнал/шум (или помеха/шум в случае **B** преобразования) до величины, обеспечивающей то же значение вероятности ошибки, что и при когерентном приеме или при воздействии синхронных помех.

На возможность подобного пересчёта отношения сигнал/шум при переходе от когерентного приёма к некогерентному впервые обратил внимание Л.М. Финк [Финк 1970]. Однако предложенный им переход осуществляется путём введения постоянных коэффициентов при значении h^2 , что, в принципе, справедливо лишь при постоянных параметрах канала и большом уровне сигнала. На самом деле здесь необходимо осуществлять функциональное преобразование модели по аргументу h^2 .

При наличии в канале связи структурных помех интегро-дифференциальное преобразование отношения помеха/шум позволяет определить, насколько снизится эффект воздействия помехи при изменении её структуры на протяжении сеанса связи.

До настоящего времени E и B преобразования аналитических функций математиками не рассматривались. Поэтому их появление является новейшим знанием, приобретённым в процессе системного моделирования. Использование этих преобразований позволяет расширить поле исходных аналитических моделей и на этой основе осуществить рекурсивный синтез моделей высших уровней иерархии. Основу прямых E и B преобразований составляют интегралы дробного порядка Римана – Лиувилля. Обратные преобразования основаны на применении производных от этих интегралов [Бейтмен, Эрдейи 1969].

Использование методов теории силлогизмов при построении обобщённых моделей требует определённой осторожности при формулировании логического вывода. Даже полное соответствие синтезируемой обобщённой модели всем означенным примерам на основе I критерия не означает её истинности на расширенной базе данных. Системное моделирование, как и все известные методы аппроксимации, позволяет получать не *точное* решение, а *наиболее правдоподобное* решение. Точным оно является только на совокупности рассматриваемых примеров. Степень отличия результатов, полученных на основе синтезированной модели, от истинного результата должна устанавливаться численным расчётом в пределах всего континуального множества числовых значений параметров, учитываемых при моделировании.

Достоинством системного моделирования по отношению к известным методам является возможность параметрического представления моделей, когда обобщённая модель содержит группу параметров, отвечающих характеристикам реальных каналов связи, таких как закон распределения коэффициента передачи канала, степень ортогональности сигналов, метод приёма и других. Обычно это удаётся сделать при представлении модели с помощью гипергеометрических рядов. В этом случае модель приобретает наглядное физическое содержание, а её исследование сводится к анализу параметрических зависимостей, непосредственно отражающих состояние канала связи.

Так, при передаче сигналов по - однородным параллельным каналам вероятность ошибки может быть записана так:

$$p\langle N \rangle = p^N C_{2N-1}^N {}_2F_1(1-N, N, N+1; p), \quad (1)$$

где p – вероятность ошибки при одиночном приёме равномошных сигналов;

$p\langle N \rangle$ – вероятность ошибки при приёме по N – параллельным каналам;

C_{2N-1}^N – число сочетаний из $2N-1$ по N ;

${}_2F_1(, , ,)$ – гипергеометрическая функция Гаусса [Прудников и др. 1986].

Как следует из выражения (1), вероятность ошибки при приёме по N параллельным каналам однозначно выражается через вероятность ошибки при одиночном приёме сигналов p . Эта вероятность системно формируется с учётом знания закона флуктуаций коэффициента передачи канала, метода приёма сигнала, степени подобия структуры помехи различным вариантам передаваемых сигналов. Для этого вводится система коэффициентов, означающих:

- степень когерентности приёма - α ;
- глубину замираний сигнала (помехи) – q_c (q_n);
- корреляцию i -го и j -го сигналов – ρ_{ij} ;
- подобие помехи i -му сигналу – g_i ;
- подобие помехи j -й совокупности сигналов G_j .

С помощью этих коэффициентов формируется система аргументов аналитических моделей качества, охватывающих множество ситуаций, сопутствующих приёму сигнала. Структура аргументов зависит от метода приёма сигнала, закона флуктуаций сигнала и помехи, числа позиций, занимаемых сигналом и количества воздействующих на них помех.

Вычисление вероятности ошибки для равномошных сигналов возможно как традиционными, так и системными методами. К системным методам следует отнести:

- усреднение условной вероятности ошибки при фиксированном значении случайного параметра;
- применение методов операционного исчисления.

В частности, в работе Н.П. Хворостенко показано, что при любом характере замираний сигнала целесообразно вычислить вначале вероятность ошибки для случая релейских замираний, а затем, с помощью прямого или обратного преобразования Лапласа, найти искомую вероятность.

Сказанное справедливо и для аддитивных помех. «Поэтому для любого демодулятора целесообразно вычислить вероятность при гауссовых аддитивных и мультипликативных помехах в качестве основной исходной вероятности, из которой могут быть получены вероятности для всех остальных помех» [Хворостенко 1968: 124].

В случае райсовских замираний в канале связи возможен непосредственный переход от моделей для релейских флуктуаций коэффициента передачи к моделям при райсовских замираниях. Последовательно применяя процедуру прямого и обратного преобразования

Лапласа для сигнала и структурной помехи, можно получить модели качества в случае:

- незамирающего сигнала и релейских замираний помехи;
- незамирающей помехи и релейских замираний сигнала;
- незамирающего сигнала и райсовских замираний помехи;
- незамирающей помехи и райсовских замираний сигнала;
- райсовских замираний сигнала и райсовских замираний помехи;
- незамирающего сигнала и незамирающей помехи;
- релейских замираний сигнала и райсовских замираний помехи;
- релейских замираний помехи и райсовских замираний сигнала.

Все эти модели образуют иерархически связанную систему с возможностью перехода между смежными состояниями. Для некоторых ситуаций эта возможность до настоящего времени отсутствовала.

Подобное представление вызывает необходимость по-новому подойти к построению знаковой системы, обозначающей эти состояния. В отличие от существующего подхода, когда вероятность ошибки во всех случаях обозначается единым символом p , в дальнейшем следует использовать многоиндексную систему, аналогичную принятой в математике для обозначения тензоров, многомерных матриц, гипергеометрических рядов и других специальных функций. Это обеспечивает придание вероятности ошибки свойств информационной единицы, обладающей гибкой структурой, обеспечивающей её использование в составе других информационных единиц и извлечение из каждой единицы её составляющих.

Принципы построения такой знаковой системы изложены в нашей работе [Чучин 2013]. По своим свойствам она удовлетворяет требованиям структурированности, связности и развития. Отлаженная с позиции принципов **синтактики** и **семантики**, такая знаковая система позволяет формировать компактные и доступные для понимания метасистемы моделей высокого уровня сложности.

Обычно это имеет место в случае моделирования качества параллельного приёма, приёма многопозиционных сигналов при воздействии комплекса аддитивных и мультипликативных помех и в ряде других случаев.

Таким образом, путём системного моделирования удаётся сконцентрировать в одной аналитической системе множество зависимостей, отражающих влияние различных факторов на качество передачи сигналов по каналам цифровой связи. В дальнейшем это может быть использовано при поиске оптимальных решений для качественного приёма сигналов в сложной помеховой обстановке. Зная вероятность ошибки, можно оценить корректирующую способность используемого кода, помехоустойчивость разнесённого приёма сигналов в зависимости от числа ветвей разнесения, степень влияния на качество приёма помех с различными структурными свойствами и другие факторы.

Библиографический список

- Бейтмен Г., Эрдейи А.* Таблицы интегральных преобразований. Т. 2. М.: Наука, 1969.
- Прудников А. П., Брычков Ю. А., Маричев О. И.* Интегралы и ряды. Дополнительные главы. М.: Наука, 1986. 800 с.
- Ростовцев Ю. Г.* Общие принципы моделирования. МО СССР, 1984.
- Финк Л. М.* Теория передачи дискретных сообщений. М.: Сов. Радио, 1970. 728 с.
- Хворостенко Н. П.* Статистическая теория демодуляции дискретных сигналов. М.: Связь, 1968. 335 с.
- Чучин Е. В.* Концептуальные основы системного моделирования качества передачи цифровых сигналов по каналам радиосвязи // Науч.-техн. сб. / под ред. А.И. Захаренкова. МО РФ, 2003. 121 с.
- Чучин Е. В.* Логико-лингвистические принципы системного построения моделей качества передачи цифровых сигналов по каналам радиосвязи // Информационные системы: Теория и практика: сб. науч. работ КГУ. Курск, 2013. 176 с.
- Ющенко С. П., Родионов И. Б., Потапов А. В.* Интеллектуальные информационные системы. Курск: КГТУ, 2004.