

В. С. ПОПЕНКО, канд. техн. наук

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ СИГНАЛОВ

Вопросам синтеза сигналов посвящено много исследований. К их числу следует отнести работы Вакмана [1], Варакина [2], Размахнина [3], Кука, Бернфельда и др.

В результате исследований, проведенных в области теории сигналов, как в нашей стране, так и за рубежом, достаточно хорошо разработана практика синтеза одиночных сигналов [1] и некоторых разновидностей систем дискретных сигналов (импульсные последовательности, одночастотные дискретно-кодированные сигналы) по одному из показателей.

Однако известные методы синтеза весьма разнородны и не могут быть использованы для синтеза ансамблей систем сигналов различных классов по совокупности показателей, случай весьма характерный для реальных систем связи. Следует отметить, что разнообразным задачам синтеза сигналов свойственна общность, позволяющая формулировать их с единой точки зрения. Такой универсальный подход открывает дополнительные возможности в решении ряда задач, труднодоступных для методов, разработанных ранее.

Цель работы — развитие единого подхода к синтезу систем сигналов различных классов по совокупности показателей, основанного на использовании аппарата теории систем и ультрасистем.

В общем случае задача синтеза заключается в выборе системы сигналов, удовлетворяющих определенному набору требований и аналитическому описанию этих сигналов. Решение такой задачи опирается на знание основных свойств синтезируемых функций, описывающих сигналы.

Согласно работе [2] сущность решения задачи синтеза состоит в том, что сначала для произвольного фиксированного сигнала (системы сигналов) определяется оптимальный способ приема, а затем отыскиваются сигналы, минимизирующие вероятность ошибки приема (для вновь полученных сигналов приемник по-прежнему оптимальный).

С учетом изложенного задача синтеза может быть сформулирована следующим образом. Для заданных способов передачи и приема, скорости передачи, числа источников сообщений и параметров канала, выбрать систему сигналов, обеспечивающую требуемую достоверность передачи.

В общем случае качество передачи, оцениваемое достоверностью, зависит от характера и интенсивности помех в канале; уровня переходных помех; отношения средних мощностей сигнала и помехи на входе приемника; величины искажений сигналов в динамическом и частотном диапазонах канала.

Перечисленные показатели определяются статистическими характеристиками помехи, функциями взаимной корреляции (ВКФ), автокорреляции (АКФ), частотными спектрами и динамическим диапазоном сигналов системы. Исходя из этого, сформулируем основные требования к сигналам, которые могут быть положены в основу синтеза.

1. Огибающая каждого сигнала должна быть близка к постоянной в течение всей длительности сигнала. В этом случае у сигнала будет наибольшая энергия при ограниченной пиковой мощности передатчика. Это требование является особенно важным для радиосистем, при ограниченных энергетических ресурсах. Его выполнение также обеспечивает минимальные искажения в заданном динамическом диапазоне.

2. Система сигналов должна занимать наименьшую допустимую полосу частот. Это требование является определяющим при ограниченных частотных ресурсах канала (кабельные системы, системы коротковолновой радиосвязи).

3. Боковые пики функций взаимной корреляции должны быть малы. Такое требование является особо важным в асинхронных системах, когда различные абоненты работают независимо друг от друга.

4. Боковые пики функций автокорреляции сигналов должны быть малы. Необходимость в этом возникает в системах с защитой от искусственных помех и работающих по многолучевым каналам, ибо задача распознавания пиков функций автокорреляции в системах с большой разрешающей способностью при плохо выбранных сигналах теряет всякий смысл.

Следует отметить, что требования, предъявляемые к сигналам, весьма разнообразны и в каждом конкретном случае их совокупность будет определяться назначением системы и спецификой ее работы.

Для оценки эффективности систем сигналов X рассмотрим пространство показателей $Y = \{y\}$, элементы которого представляют собой набор показателей соответствующих требованиям, предъявляемым к системе сигналов. Y — арифметическое пространство, размерность которого равна числу выбранных показателей. При этом y по отношению к X является сверхсистемой. Каждой системе X ставится в соответствие сверхсистема y заданием оператора контроля: $C : X \rightarrow Y$.

Пусть y_0 набор показателей, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к системам сигналов, $\{y_0\} = Y_0$ образует некоторое подмножество пространства Y , удовлетворяющее предъявляемым требованиям, в частности Y_0 может быть:

параллелепипедом, если показатели находятся в заданных пределах

$$Y_0 = \{y \mid a_i \leq y_i \leq b_i\};$$

шаром, если заданы оптимальные требования — y_0 и допустимое отклонение

$$Y_0 = \{y \mid \|y - y_0\| < \varepsilon\};$$

конечным множеством, состоящим из отдельных точек:

$$Y_0 \{y_1; y_2; \dots; y_n\}.$$

Выбором X_0 такого, что $c(x_0) = y_0$ исчерпывается синтез системы сигналов по заданным показателям. Следовательно, задача синтеза эквивалентна решению операторного уравнения: $C(x) = y; y \in Y_0$.

Данная задача относится к типу неклассических из-за имеющих место многопараметричности и многокритериальности, ее необходимо рассматривать как задачу оптимального проектирования с учетом задания на проект и проекта.

Определение 1. Задание на проект — это набор отдельных требований z к векторным показателям y :

Определение 2. Проект — набор сведений π модели X .

Задача оптимального проектирования систем сигналов:

дано: $X, Y, C : X \rightarrow Y; Z(y) = z$. Найти $\Pi(X) = \{\pi\}$.

По теории систем и ультрасистем задание на проект — это данные о сверхсистеме, а проект — это данные о системе.

Решение поставленной задачи соответствует построению ультраоператора синтеза $\check{S} : Z(y) \rightarrow \Pi(x)$ (1) по этапам в определенной последовательности.

1. Построение пространства моделей. Модель системы сигналов строится для данного класса.

2. Построение пространства показателей. Выбор показателей и построение пространства существенным образом зависят от вида связи и требований к ней, в этой связи выбор показателей целесообразно осуществлять для каждой системы отдельно.

3. Построение оператора контроля. Данный оператор оценивает эффективность различных систем сигналов. В случае равноправия канальных сигналов в системе, каждой координате X оператор контроля — C , ставит в соответствие элемент пространства показателей. При оценке системы в целом, необходимо оценивать экстремальные значения показателей для координат и поэтому построение оператора контроля связано с большим объемом вычислений. В этой связи, целесообразно выбрать форму оператора контроля, обеспечивающую минимум вычислений. Назовем такую форму нормальной. Необходимо также для построения нормальной формы оператора контроля оценить зависимость показателей от номера сигнала (канала) — т. е. задать элемент пространства показателей в виде $y = \{y_1(k); y_2(k); \dots y_e(k)\}$.

4. Построение регуляризатора для оператора контроля. При построении S центральную роль играет оператор C , в зависимости от его свойств построение может иметь различный характер трудности. В задачах синтеза сигналов для систем передачи информации оператор контроля интегральный и не имеет обратного непрерывного оператора, поэтому для его построения вводится дополнительное пространство U — пространство управлений и оператор $R, R: U \rightarrow X$ — регуляризатор. Главная роль регуляризатора — выделение в X компактного множества, ограничивающего возможный разброс моделей систем сигналов с одинаковыми показателями. В частности, при синтезе сигналов по корреляционным свойствам корреляционная функция (КФ) рассматривается как элемент пространства управлений, а регуляризатор — как метод восстановления сигнала по КФ.

Исходя из того, что задача проектирования многокритериальная (система сигналов оценивается по ряду показателей), необходимо строить многопараметрический регуляризатор. Так, для случая ортогональных или квазиортогональных сигналов регуляризатор может быть построен следующим образом. Пусть A — самосопряженный (квазисопряженный) оператор из пространства $L_2 [0; T]$ в пространство $L_2 [0; T]$, $A: L_2 [0; T] \rightarrow L_2 [0; T]$.

Рассмотрим уравнение $A[X(t)] = \lambda X(t)$. Множество собственных функций $\{X_k(t) | k=1, 2, \dots\}$ данной задачи образует базис пространства $L_2 [0; T]$. Поэтому для ограничения перебора точек пространства управлений введем оператор выбора терминального управления.

5-й этап — построение оператора выбора терминального управления G . С этой целью требуется вывести зависимость элемента пространства управлений от показателей $\bar{U} = \bar{U}(y_1 y_2, \dots y_e)$ (2).

Затем определить множество U_k такое, что $CR(U_k) \subset Z_k$. Согласно (2) построение оператора определяется показателями, поэтому его необходимо строить для каждой конкретной системы сигналов.

6-й этап — построение сведений о проекте $\pi_k = R(U_k)$. Построением $\{\pi_k\} = \Pi(X)$ задача синтеза исчерпывается. Как следует из соотношения (1), совокупность G, U, R составляет ультраоператор синтеза, отображающий данные о точке прообраза в данные о точке образа. Ультраоператор представляет собой пакет алгоритмов, каждый из которых действует только для одного требования z_k к системе из задания на проект $Z(y)$ и перерабатывает его в одно сведение о проекте Π_k из проекта $\Pi(X)$.

В результате многоэтапного решения задачи получается окончательный набор сигналов, удовлетворяющих заданию. Предложенная схема построения ультраоператора синтеза позволяет получать проекты по любым видам задания или в виде заданных ограничений на показатели, в виде однокритериальной или, наконец, в виде многокритериальной задачи.

Список литературы: 1. Вакман Д. Е., Седлецкий Р. М. Вопросы синтеза радиолокационных сигналов. М., 1973. 250 с. 2. Варакин Л. Е. Теория систем сигналов. М., 1978. 206 с. 3. Размахин А. Ф. Функции с двойной ортогональностью в радиоэлектронике и оптике. М., 1971. 118 с. 4. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. М., 1971. 244 с.

Поступила в редколлегию 03.10.83