

Многофункциональный синтез СПД

Лекция 01 Общие понятия

Синтез СПД — это процесс разработки систем и устройств ПД, исходя из требуемого функционала и заданных свойств.

Функциональный синтез СПД выполняется для обеспечения системой заданных функций при условии сохранения заданных свойств.

Синтез является неотъемлемой частью более общей процедуры — системного анализа технического задания (ТЗ), который включает в себя компоновку системы, подбор устройств для построения системы, анализ их функционала и свойств целиком и в отдельности и синтез, т. е. построение системы. При этом, процедура синтеза системы зачастую сводится к выбору из конечного множества уже апробированных решений, наилучших с точки зрения выполнения требуемых функций, — такие решения называют типовыми.

Для оценки качества выполнения заданных функций вводятся специальные критерии (параметры системы), соответствие которым проверяется при построении системы.

Процедура разработки СПД может быть разбита на несколько этапов:

1. Разработка ТЗ на СПД.
2. Выбор архитектуры СПД (например, в зависимости от количества источников и приемников данных, от требуемой надежности системы, от функционала).
3. Синтез структуры системы.
4. Синтез параметров системы (реально выполняется на всех этапах и корректируется по необходимости).
5. Разработка модели требуемой системы (выбор математического аппарата, моделирование, оценка модели по критериям адекватности, простоты, соответствия между точностью и сложностью, многовариантности реализаций, блочности построения).
6. Оценивание вариантов синтезированной системы (обоснование схемы оценивания, реализация модели, проведение эксперимента по оценке, обработка результатов оценивания, анализ результатов, выбор наилучшего варианта).

При построении системы необходимо решать ряд связанных друг с другом задач — алгоритмическую, информационную, техническую, программную и организационную.

Под системой передачи данных понимают совокупность действующих технических средств, предназначенных для передачи и приема информации по каналам связи, а также для передачи и приема команд управления и дистанционного контроля.

Основная функция СПД — передача и прием информации по каналам связи. Исходя из этой функции и должна строиться СПД, а критерии оценки должны быть направлены на определение качества передачи и приема информации.

Информацией называется совокупность сведений о каких-либо событиях, явлениях или предметах. Формально любое сведение является информацией.

Сообщение — форма представления информации, предназначенная для передачи от источника к получателю. Может представляться в виде текста, звука, изображения и т. д.

Для передачи сообщений от источника к получателю с помощью электрической связи используют сигналы.

Сигнал это физический процесс, отображающий (несущий) передаваемое сообщение. Может быть представлен изменением параметров физических величин — тока, напряжения, электромагнитного поля, световой волны и т. д.).

Различают первичные и вторичные сигналы. Первичные электрические сигналы (ПЭС) возникают в результате непосредственного преобразования сообщения в электромагнитное колебание, обычно на выходе оконечных устройств. К ним относятся изменение тока микрофона, тока на выходе телеграфного аппарата и т. п. Характерным для первичных сигналов является относительно малая скорость их изменения и, следовательно, возможность передачи по низкочастотным каналам связи, например таким, как проводные.

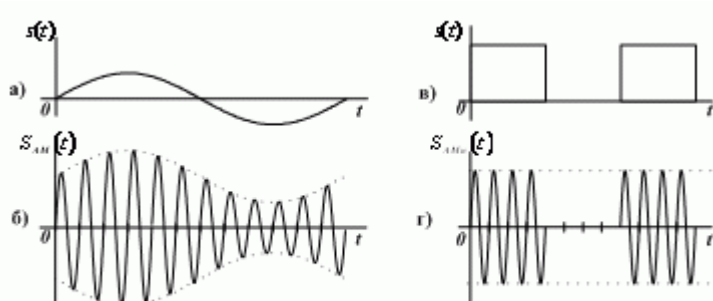
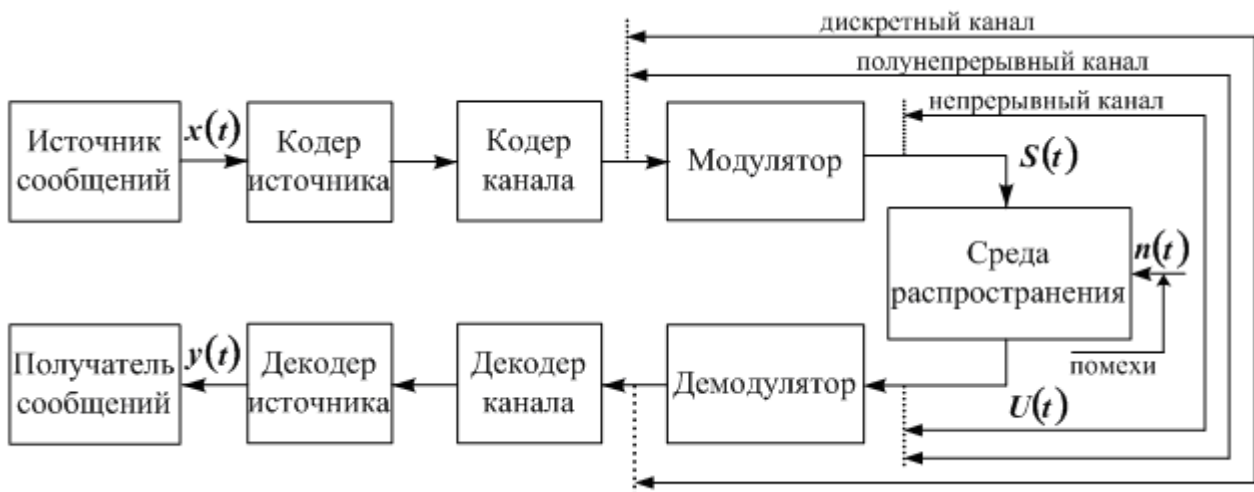


Рис. Образцы первичных (а, в) и вторичных (б, г) сигналов

Для передачи сообщения по радиоканалам необходимо его «записать» на высокочастотном колебании. Такая запись осуществляется в результате модуляции (манипуляции) первичным сигналом высокочастотного колебания. В результате образуется сигнал, который называют вторичным.

Модуляция — это изменение во времени одного или нескольких параметров высокочастотного электрического колебания в соответствии с законом изменения передаваемого сообщения. Вариант модуляции для дискретных сообщений принято называть манипуляцией. На приведенном рисунке (а) и (б) демонстрируют процедуру амплитудной модуляции (АМ), а (в) и (г) — процедуру амплитудной манипуляции (АМн, АСК).

Общая структура СПД показана на рисунке.



Кодер источника является непосредственным формирователем сообщения с учетом требуемых свойств сообщения и характеристик канала, например, он выполняет АЦП и преобразование сообщений в кодовые символы с целью уменьшения избыточности источника сообщения, т. е. обеспечения минимума среднего числа символов на одно сообщение и представления в удобной форме (например, в виде двоичных чисел).

Кодер канала предназначен для формирования сообщения для передачи по каналу с выполнением заданного функционала. Он формирует сигнал для модулятора. Сюда можно отнести помехоустойчивый кодер для введения избыточности, позволяющей обнаруживать и исправлять ошибки в канальном декодере, с целью повышения достоверности передачи. Системы защищенной ПД содержат блок шифрования/дешифрования, а для улучшения характеристик СПД могут использоваться алгоритмы (и устройства) расширения спектра и/или скремблеры/дескремблеры.

Расширение спектра — способ повышения эффективности передачи информации с помощью модулированных сигналов через канал с сильными линейными искажениями (замираниями), приводящий к увеличению базы сигнала.

Скремблирование — обратимое преобразование цифрового потока без изменения скорости передачи с целью получения свойств случайной последовательности. После скремблирования появление «1» и «0» в выходной последовательности равновероятны. Скремблирование — обратимый процесс, то есть исходное сообщение можно восстановить, применив обратный алгоритм — дескремблирование.

Декодер канала обеспечивает обратное преобразование кодированного сигнала в сообщение кодера источника.

Декодер источника — это устройство для преобразования кодового сообщения в исходное сообщение.

Принято различать две группы относительно самостоятельных устройств: кодеки и модемы.

Кодеком называется совокупность кодера и декодера, которые при двухсторонней связи конструктивно объединены в одно устройство.

Модемом называется конструктивно совмещенная совокупность модулятора и демодулятора.

Важнейшей частью СПД является канал связи.

Каналом связи называется совокупность средств и среды передачи, обеспечивающих передачу сигнала в пространстве от некоторой точки А до точки В. Точки А и В выбираются исходя из решаемой задачи. В зависимости от вида входных и выходных символов канал связи может быть непрерывным, дискретным и полунепрерывным. В одной и той же схеме можно выделить как дискретный так и непрерывный канал, в зависимости от выбора рассматриваемых точек системы.

Критерии оценки СПД

Для оценки СПД используются различные критерии, связанные с отдельными элементами СПД — кодеком, модемом, каналом ПД.

К основным критериям можно отнести

- надежность;
- достоверность;
- помехоустойчивость;
- управляемость.

Это качественные характеристики системы.

Критерии оцениваются параметрами оценки, которые могут характеризовать один или несколько критериев:

- время наработки на отказ [надежность];
- время бесперебойной работы [надежность];
- отношение сигнал/шум [надежность, достоверность, помехоустойчивость];
- вероятностные характеристики помехоустойчивости [помехоустойчивость, достоверность];
- скорость ПД (пропускная способность) [достоверность, надежность, помехоустойчивость].

Параметры дают количественную оценку критериям.

Эти параметры тесно связаны между собой. Например, увеличение вероятностных характеристик по помехоустойчивости, т. е. по исправлению ошибок, позволяет улучшить скорость ПД при том же отношении С/Ш. Из-за наличия такой взаимосвязи часто в качестве параметра качества СПД задают требуемую скорость ПД при фиксированном отношении С/Ш или требуемые вероятностные характеристики помехоустойчивости при фиксированном отношении С/Ш.

Рассмотрим эти параметры подробнее.

Отношение сигнал/шум

Отношение сигнал/шум (signal-to-noise ratio, SNR) — безразмерная величина, равная отношению мощности полезного сигнала к мощности шума.

$$\text{SNR} = P_{\text{signal}}/P_{\text{noise}} = (A_{\text{signal}}/A_{\text{noise}})^2,$$

где P — средняя мощность, а A — среднеквадратичное значение амплитуды. Оба сигнала измеряются в полосе пропускания системы.

Обычно SNR выражается в децибелах (дБ). Чем больше это отношение, тем меньше шум влияет на характеристики системы.

$$\text{SNR}_{(\text{dB})} = 10 \log_{10}(P_{\text{signal}}/P_{\text{noise}}) = 20 \log_{10}(A_{\text{signal}}/A_{\text{noise}})$$

В цифровых системах связи чаще используется нормированная версия SNR, обозначаемая как E_b/N_0 , где E_b — энергия бита. Ее можно описать как мощность сигнала P_{signal} , умноженную на время передачи бита информации T_b , N_0 — это спектральная плотность мощности шума, и ее можно выразить как мощность шума P_{noise} , деленную на ширину полосы пропускания W . Поскольку время передачи бита и скорость передачи битов взаимно обратны, T_b можно заменить на $1/R$: (где R — это битовая скорость).

Отношение E_b/N_0 представляет собой SNR, нормированное на ширину полосы и скорость передачи битов:

$$E_b/N_0 = \text{SNR} (W/R)$$

или

$$E_b/N_0 (\text{dB}) = \text{SNR}_{(\text{dB})} + 10 \log_{10}(W/R)$$

Вероятностные характеристики помехоустойчивости

Одной из важнейших вероятностных характеристик является *скорость битовой ошибки* (Bit Error Rate, BER) — число битовых ошибок за единицу времени. Схожий параметр *доля битовых ошибок* (Bit Error Ratio, BER) определяется как отношение числа ошибочно принятых бит к общему числу бит, переданных за рассматриваемый интервал. Является безразмерной величиной и представляется либо долей, либо процентом. Приблизительная (ожидаемая) оценка BER выражается *вероятностью битовой ошибки* p_b (Bit Error Probability, BEP) — вероятностью того, что бит кодового слова на выходе декодера отличается от соответствующего бита кодового слова на входе кодера. На практике эти понятия часто смешивают и используют термин Bit Error Rate (Ratio) — BER — для обозначения и доли, и вероятности. Исходя из общей схемы СПД, BER зависит от используемого кодека, канала ПД (точнее, от модели ошибок в канале) и всех частей СПД между кодеком и каналом, в частности метода модуляции/манипуляции.

Часто используется связанный с BER параметр *доля пакетов с ошибкой* (Packet Error Ratio, PER), который определяется как отношение числа пакетов, принятых с ошибкой, к общему числу переданных по каналу пакетов. Его ожидаемое (оценочное) значение называется *вероятностью пакета с ошибкой* p_p (Packet Error Probability) и для пакета длиной N бит может быть определено через BER как

$$p_p = 1 - (1 - p_b)^N$$

Одной из важнейших метрик качества в системах цифровой связи является график зависимости вероятности битовой ошибки p_b от E_b/N_0 .

Также могут использоваться и другие вероятностные характеристики

- Вероятность обнаружения ошибки $P_{оо}$ — вероятность того, что в принятом кодовом слове будут обнаружены (но не исправлены) ошибки.
- Вероятность необнаруженной ошибки $P_{но}$ — вероятность того, что ошибка в принятом кодовом слове будет не обнаружена.
- Вероятность правильного декодирования $P_{пд}$ — вероятность того, что кодовое слово на выходе декодера совпадает с кодовым словом на входе кодера.
- Вероятность неправильного декодирования $P_{нд}$ (Word Error Rate, WER) — вероятность того, что кодовое слово на выходе декодера отличается от кодового слова на входе кодера.
- Вероятность отказа в декодировании $P_{од}$ — вероятность того, что декодер не может каким-либо образом декодировать принятый вектор, но способен определить эту ситуацию и отказаться от дальнейшего декодирования. Данная характеристика применима к алгоритмам, которые позволяют обнаружить часть ошибок, не подлежащих исправлению.

На практике для оценки СПД чаще используются соответствующие этим вероятностным характеристикам экспериментально полученные значения — доли. Например, доля правильно декодированных комбинаций $D_{пд}$.

Если необходимо сравнивать между собой различные СПД, в которых используются разные методы кодирования, пакеты разной длины и/или разные методы модуляции, использовать вышеуказанные параметры для сравнения не всегда удобно и корректно. Для этого Л.М. Финком было предложено использовать эквивалентную вероятность ошибки $P_{эkv}$, т. е. вероятность ошибки в постоянном симметричном двоичном канале без памяти, в котором система с примитивным кодированием (кодированием без избыточности) оказывается эквивалентной рассматриваемой системе. Согласно формулам, введённым Финком, для систем с блочным кодом эквивалентная вероятность вычисляется через вероятность правильного декодирования $P_{пд}$ по формуле:

$$P_{эkv} = 1 - [P_{пд}]^{1/i},$$

где i — количество двоичных единиц информации, содержащихся в кодовой комбинации.

Скорость ПД и пропускная способность

Под *скоростью передачи* понимают количество информации или количество сведений, которое передается в данной системе в единицу времени. В общем случае скорость передачи связывают со скоростью передачи знаков, символов, используемых при отображении состояний конкретного источника сообщений. При передаче дискретных сообщений скорость измеряют количеством двоичных символов в секунду (бод).

При передаче сведений от источника непрерывных сообщений техническая скорость передачи определяется *пропускной способностью системы*, под которой понимают максимально возможное количество полезной информации, передаваемое в единицу времени:

$$C = I_{\max}/T, \text{ бит/с}$$

Теорема Шеннона (1948–49) ограничивает предельную пропускную способность канала C с заданной полосой пропускания F и отношением сигнал/шум SNR:

$$C = F \log_2(1 + \text{SNR})$$

$$C/F \approx 1,44 \text{ SNR}$$

Способы построения элементов СПД

Основными методами построения элементов СПД, т. е. отдельных составляющих СПД, на сегодня являются программно-аппаратный метод, т. е. использование аппаратной схемы на основе набора микроконтроллеров под управлением программы-прошивки, и «аппаратный» метод, когда устройство создается как совокупность логических элементов как правило на основе ПЛИС (также возможно построение на основе микросхем, содержащих отдельные логические элементы — логические умножители, сумматоры, регистры и пр.).

На практике эти способы часто применяются совместно. Производители ПЛИС, такие как, например, Altera и Xilinx, выпускают микросхемы, содержащие как ПЛИС, так и программно-управляемый процессор. Также отдельные составляющие СПД могут быть представлены отдельными блоками, связанными между собой по какому-либо интерфейсу.

Также возможен и условно «программный» способ построения, когда в качестве аппаратной части используется, например, ПК или микрокомпьютер с некоторым набором стандартных интерфейсов, а вся логика работы СПД — скремблирование, кодирование, модуляция (не всегда) описываются программно или реализованы в стандартных драйверах. Такой способ может быть удобен для создания опытных или единичных образцов СПД (или ее элементов).

Выбор того или иного способа построения зависит от требуемых функций СПД, а также от возможностей разработчика. Например, если разработчик хорошо умеет

работать с ПЛИС, то, возможно, ему будет проще построить на них всю СПД, тем не менее, могут возникнуть ситуации, когда построение СПД только на ПЛИС сильно усложнит или удорожит конструкцию. В этом случае применение программно-аппаратных схем может окупить изучение соответствующих инструментов или привлечение соответствующего специалиста. То же самое верно и в обратную сторону.

Моделирование СПД

Как уже отмечалось, неотъемлемым этапом синтеза СПД является построение ее модели, которая позволяет отработать предполагаемую конструкцию СПД и ее элементов и предварительно оценить ее соответствие предъявляемым требованиям.

Моделирование — исследование объектов познания на их моделях; построение и изучение моделей реально существующих объектов, процессов или явлений с целью получения объяснений этих явлений, а также для предсказания явлений, интересующих исследователя.

Математическое моделирование — это опосредованное практическое или теоретическое исследование объекта, при котором непосредственно изучается не сам интересующий нас объект, а некоторая вспомогательная искусственная или естественная система (модель), находящаяся в некотором объективном соответствии с познаваемым объектом, способная замещать его в определенных отношениях и дающая при её исследовании, в конечном счете, информацию о самом моделируемом объекте.

Имитационное моделирование — это частный случай мат. моделирования — метод, позволяющий строить модели, описывающие процессы так, как они проходили бы в действительности. Такую модель можно просчитать во времени как для одного испытания, так и заданного их множества. При этом результаты будут определяться случайным характером процессов. По этим данным можно получить достаточно устойчивую статистику.

Компьютерное моделирование — построение модели в виде компьютерной программы, работающей на отдельном компьютере или кластере. Такая модель реализует представление системы в форме, отличной от реальной, но приближенной к алгоритмическому и структурному описанию, включая набор данных, характеризующих свойства системы и динамику их изменения со временем.

Для проведения моделирования и построения компьютерных моделей используются различные подходы и инструменты в зависимости от выбранной структуры СПД и предполагаемого метода ее построения.

Для моделирования алгоритмов работы всей СПД и отдельных ее блоков (кодеков, модемов, etc.) могут быть использованы следующие подходы:

1. Написание программной модели на том или ином ЯВУ.
2. Использование специальной системы моделирования.

Первый способ удобен тем, что можно реализовать достаточно быстродействующую модель по сравнению с моделями, построенными в специальных системах. Для наиболее распространенных ЯВУ (C/C++, Python) существуют библиотеки, содержащие модели типовых элементов СПД — кодеки, модемы, скремблеры и т. п. В качестве примеров можно привести IT++ (C++), NumPy и SciPy (Python). Однако, построение модели и ее отладка на ЯВУ может быть сложнее, нежели в специальных системах, где реализованы многие типовые решения и функции, реализующие вычисление критериев оценки. С другой стороны при построении СПД как программно-аппаратного комплекса программный код модели может быть успешно использован при написании «рабочей» прошивки, что может значительно сократить общее время на разработку решения.

К специальным системам моделирования можно отнести в первую очередь систему Matlab/Simulink и ее свободные аналоги Octave и Scilab. Большое число библиотек типовых компонентов и функций позволяет быстро создавать программные модели. Тем не менее, написание моделей, отличных от типовых может потребовать не меньше времени, чем их реализация на ЯВУ. Поэтому при выборе метода построения модели необходимо это учитывать.

К системам моделирования также можно отнести язык моделирования GPSS, используемый для имитационного моделирования различных систем, в основном систем массового обслуживания.

Для моделирования аппаратных систем на логических элементах также можно использовать как системы моделирования, такие как Logisim, так и режим моделирования средств разработки компаний Altera и Xilinx. В первом случае удобством является простой интерфейс, позволяющий быстро моделировать простые схемы. Ну а специализированные средства разработки, такие как Quartus (Altera), хоть и требуют больше времени на освоение, впоследствии позволят использовать наработки модели при построении рабочего устройства. К тому же они позволяют использовать язык описания интегральных схем VHDL/AHDL, использование которого может ускорить процесс разработки.

Источники:

1. Системы передачи информации. Курс лекций / С.В. Кунегин. М. 1997. 317 с.
2. Системотехнический и архитектурный синтез подсистемы сбора, обработки и передачи информации территориально распределённого производственного комплекса / А.В. Никонов // Омский научный вестник. № 2-80. 2009.
3. Теория электрической связи: учебное пособие / К.К. Васильев, В.А. Глушков, А.В. Дормидонтов, А.Г. Нестеренко; под ред. К.К. Васильева. — Ульяновск: УлГТУ, 2008. — 452 с.
4. Материалы с сайта <https://ru.wikipedia.org>
5. Расчет вероятности ошибки в цифровых каналах связи / С.Н. Песков, А.Е. Ищенко // Теле-Спутник». ноябрь 2010.
6. Основы цифровых технологий / С.Н. Песков, А.И. Барг, М.В. Балков.
7. Телекоммуникационные технологии / Ю.А. Семенов. <http://book.iter.ru>