

Предисловие

Эта книга по теории и практике спектрального анализа стационарных случайных процессов предназначена для тех, кто начинает изучать теорию спектральной обработки случайных сигналов. Для понимания книги требуется знание основ теории случайных величин, их свойств и числовых характеристик, а также основ теории комплексного переменного и теории линейных непрерывных и дискретных систем.

Мощный начальный импульс в развитие теории цифровой обработки сигналов по праву необходимо отнести к моменту появления (в 1965 г.) статьи Кули и Тьюки о быстром методе вычисления дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Позднее метод был развит и стал широко известен как быстрое преобразование Фурье (БПФ). Его практическая ценность определяется, прежде всего, существенным сокращением (на один-два порядка) вычислительных затрат, необходимых для реализации ДПФ сигналов в большинстве практических приложений. Фундаментальное значение метода БПФ состояло в том, что он наглядно продемонстрировал значительное преимущество цифровых методов спектрального оценивания по сравнению с аналоговыми. Метод БПФ в значительной мере способствовал интенсификации исследований в области цифровой фильтрации. В настоящее время цифровые методы в их программном и аппаратном виде широко используются для спектрального анализа самых разнообразных сигналов, начиная с низкочастотных колебаний в сейсмологии, гидролокации и заканчивая видеосигналами в радиолокации. Научно-технический прогресс дает много примеров применения оценки спектра для решения задач медицинской диагностики, распознавания речи и изображений, анализа нефтеносных слоев, прогнозирования финансовых временных рядов и т. п.

Развитие этих исследований привело к тому, что в настоящее время во многих вузах в студенческие и аспирантские учебные программы электро- и радиотехнических специальностей включены курсы цифровой обработки сигналов.

Классические методы оценки энергетических спектров дискретизованных детерминированных и случайных процессов обычно ос-

нованы на применении процедур, использующих БПФ. обстоятельному изложению этих методов посвящены различные учебные руководства, к числу наилучших из которых следует отнести книги Блэкмана и Тьюки, Дженкинса и Ваттса, а также С.Л. Марпл-мл. Классический подход к спектральному анализу эффективен в вычислительном отношении и обеспечивает получение асимптотически достоверных оценок для весьма обширного класса сигналов, удовлетворяющих гипотезе стационарности, эргодичности и ограничению выборки большого объема. Указанные допущения являются, к сожалению, не типичными для большинства практических приложений. Поэтому неудивительно, что подходу, основанному исключительно на вычислении ДПФ, присущ ряд принципиальных ограничений. Наиболее важное из них — ограничение частотного разрешения, т. е. способности различать спектральные пики двух и более сигналов. Второе существенное ограничение обусловлено наличием экспериментальной реализации сигнала, как правило, малой длины. Это обстоятельство неизбежно приводит исследователя к необходимости грубого пренебрежения фундаментальной операцией усреднения по ансамблю реализаций (в силу отсутствия такового) в классическом определении спектральной плотности мощности процесса и, как следствие этого факта, к получению несостоятельных спектральных оценок для конечных объемов выборки. Далее, применение операции усреднения единственной реализации по времени с неизбежностью ставит вопрос о достоверности гипотезы эргодичности анализируемых данных. Наконец, их конечный объем приводит к наличию весовой функции при вычислении ДПФ. Неявное умножение данных на прямоугольную функцию окна (операция взвешивания) в исходном пространстве приводит в частотном пространстве к свертке (операции сглаживания) истинного спектра плотности мощности (СПМ) с Фурье-образом окна данных (функцией Дирихле). Иными словами, квадрат модуля ДПФ процесса, т. е. выборочный спектр (или периодограмма) является не только не состоятельной, но и смещенной спектральной оценкой. Дополнительный нежелательный эффект наличия прямоугольного окна проявляется в виде «просачивания» в частотной области энергии главного лепестка функции Дирихле через ее боковые лепестки. В результате это приводит к наложению и искажению спектральных линий других присутствующих гармонических сигналов. Правильный выбор функции окна, значения которого спадают по краям, позволяют ослабить утечку в боковые лепестки, однако лишь за счет снижения разрешающей способности.

Указанные ограничения классических спектральных оценок особенно сильно проявляются при анализе коротких записей данных. Однако именно такая ситуация является типичной для большинства

практических приложений, поскольку многие измеряемые процессы обладают малой длительностью или же быстро изменяющимися во времени спектрами. В радиолокации, например, по каждому отраженному сигналу можно получить лишь ограниченное множество отсчетов. В гидролокации движение объекта приводит к плавному изменению во времени спектра принимаемого эхо-сигнала за счет эффекта Доплера.

Закономерно поэтому, что в течение последних двух десятилетий стал расти интерес к альтернативным методам спектрального оценивания, обладающих лучшими характеристиками по частотному разрешению и критерию среднего квадрата ошибки (суммы квадрата смещения и дисперсии оценки) при анализе последовательностей данных малой длины. В данном учебном пособии основное внимание уделяется достаточно полному и методически последовательному изложению именно таких современных методов цифрового спектрального анализа стационарных случайных процессов. Пособие охватывает практически весь традиционный круг проблем одномерного анализа данных. В определенном смысле пособие органично дополняет серию руководств по классическим методам и опирается на цифровую форму представления конечной выборки экспериментальных данных, наиболее распространенную в настоящее время на практике.

Пособие разбито на три части. В первой представлено теоретическое обоснование и описаны потенциальные характеристики классических периодограммных и коррелограммных непараметрических методов спектрального оценивания. К достоинствам этих методов следует отнести прежде всего отсутствие каких бы то ни было априорных гипотез относительно модельных представлений анализируемых процессов. На наглядных числовых примерах проиллюстрированы значение и физическое содержание различных вариантов процедур «псевдоусреднения» временных рядов, обеспечивающих разумный баланс между частотным разрешением и средним квадратом ошибок непараметрических спектральных оценок. К разряду недостатков следует отнести все еще достаточно жесткие ограничения относительно объема выборочных данных.

Вторая глава в первой части пособия в значительной степени отражает те существенные преобразования, которые произошли в области цифрового спектрального анализа за последние два десятилетия благодаря применению новых подходов, связанных с широким использованием модельных представлений об анализируемых процессах. Применение моделей авторегрессии, скользящего среднего и их комбинаций в значительной мере способствует преодолению эффекта «окна» и, как следствие, кардинальному улучшению характеристик спектральных оценок сверхкоротких записей данных.

Методически последовательно рассмотрены теоретические свойства и рекомендации по практическому применению обширного арсенала параметрических спектральных оценок. Необходимо отметить, что в классе параметрических методов акцент сделан на спектральном оценивании блоков накопленных данных фиксированного объема. Их замечательной особенностью является рекурсивный характер оценки параметров по порядку модели дискретного случайного процесса, обеспечивающий возможность применения весьма эффективной в вычислительном отношении процедуры Левинсона–Дурбина.

Цель каждой главы — обеспечить читателю понимание тех допущений, которые положены в основу того или иного метода. В пособие помещены исходные коды программ, наглядно иллюстрирующих реализацию рассмотренных методов спектрального оценивания в интегрированной среде пакета MATLAB. Для лучшего усвоения материала читателю следовало бы, вероятно, опробовать некоторые из них по серии практических задач, также включенных в текст.

Во второй части пособия последовательно изложены основы декомпозиционных, или подпространственных, методов, получивших широкое признание в последние годы. Рассмотрен популярный метод ESPRIT, нашедший практическое применение не только при спектральном анализе случайных процессов, но и при обработке пространственно-временных сигналов в антенных решетках.

Наконец, в третьей части изложено применение вейвлет-преобразования для обработки коротких записей данных.

Авторы надеются, что данное пособие в методическом и практическом плане будет весьма полезным введением в современные методы спектрального анализа и органично дополнит серию руководств по цифровым методам обработки сигналов.