

Б.И. Шахтарин, В.А. Ковригин

МЕТОДЫ СПЕКТРАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

2-е изд., исправленное

*Рекомендовано учебно-методическим объединением вузов
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений*

«Горячая линия—Телеком»

Москва
2011

УДК 621.37:621.391
ББК 32.849
Ш32

Р е ц е н з е н т ы:

д.т.н., проф. Н.Н. Удалов;
д.ф-м.н., проф. А.И. Козлов

Ш32 Шахтарин Б.И., Ковригин В.А. Методы спектрального оценивания случайных процессов: Учеб. пособие. 2-е изд, исправ. — М.: Горячая линия—Телеком, 2011. — 256 с.: ил.

ISBN 978-5-9912-0168-1

Излагаются основы спектрального анализа случайных процессов. Рассматриваются свойства параметрических и непараметрических методов оценки энергетического спектра, а также алгоритмы их реализации. Приводятся методы спектрального оценивания путем экстраполяции автокорреляционной последовательности и алгоритмы оценивания частоты, основанные на анализе собственных значений. Оцениваются потенциальные возможности спектральных методов по разрешающей способности и вычислительной эффективности. Книга содержит машинные программы на языке MATLAB и примеры с результатами численного моделирования, поясняющие применение спектральных методов для решения практических задач.

Для студентов вузов. Может быть полезна аспирантам и преподавателям, а также специалистам-практикам, занимающимся обработкой сигналов.

ББК 32.849

Предисловие ко второму изданию

Предлагаемая книга является переработанной версией первого издания учебного пособия, выпущенного издательством «Гелиос АРВ» в 2005 г. В новом издании исправлены опечатки и описки, вкравшиеся в первое издание, а также внесены изменения, улучшающие изложение отдельных вопросов. В частности, в главе 10 более последовательно изложены основы декомпозиционных, или подпространственных, методов, получивших широкое признание в последние годы. В главе 11 рассмотрен популярный метод ESPRIT, нашедший практическое применение не только при спектральном анализе случайных процессов, но и при обработке пространственно-временных сигналов в антенных решетках. В главе 12 эффект улучшения авторегрессионной оценки спектральной плотности мощности при использовании аппроксимации главных компонентов для большей наглядности описывается в рамках задачи линейного предсказания. Изменен состав приложений.

Предисловие к первому изданию

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

Оглавление

Предисловие ко второму изданию	3
Предисловие к первому изданию	3
Глава 1. Математические основы анализа энергетического спектра стационарных случайных процессов	7
1.1. Периодограмма реализации непрерывного случайного процесса	7
1.2. Первое определение СПМ непрерывного случайного процесса	8
1.3. Соотношение между СПМ и АКФ непрерывного случайного процесса. Второе определение СПМ	9
1.4. Периодограмма дискретного случайного процесса	14
1.5. Соотношение между СПМ и АКП дискретного случайного процесса	18
1.6. Соотношение между периодограммой и выборочной АКФ	20
1.6.1. Непрерывный случай	20
1.6.2. Дискретный случай	20
1.7. Применение тестовых сигналов при исследовании характеристик спектральных оценок	22
1.8. Свойства периодограммы	25
1.8.1. Смещение периодограммы	25
1.8.2. Дисперсия периодограммы	29
1.9. Разрешающая способность методов спектрального оценивания	37
1.9.1. Спектральное разрешение детерминированных сигналов	37
1.9.2. Разрешающая способность и статистическая устойчивость методов спектрального оценивания случайных процессов	42
Глава 2. Классические методы спектрального оценивания ...	46
2.1. Коррелограммные методы оценки СПМ	46
2.1.1. Две формы оценки АКП	46
2.1.2. Вычислительные алгоритмы коррелограммных методов	48
2.2. Применение окон при спектральном оценивании	49
2.2.1. Влияние корреляционного окна на среднее значение периодограммы	50

2.2.2. Применение операции взвешивания в классических методах спектрального оценивания.....	52
2.3. Периодограммные методы оценки СПМ стационарного СП	54
2.3.1. Модифицированные периодограммы.....	54
2.3.2. Метод Бартлетта: усреднение периодограмм.....	58
2.3.3. Метод Уэлча: усреднение модифицированной периодограммы	63
2.3.4. Метод Блекмана–Тьюки: сглаживание периодограммы	67
2.3.5. Сравнение статистических характеристик периодограммных методов	72
Глава 3. Параметрические модели случайных процессов.....	75
3.1. Параметрический метод спектрального оценивания и его основные этапы.....	75
3.2. АР-, СС-, АРСС-модели случайных процессов.....	76
3.2.1. Дискретные линейные системы и их реакция на случайные сигналы	76
3.2.2. Три типа параметрических моделей случайных процессов	80
3.3. Связь коэффициентов АР-, СС- и АРСС-моделей	85
3.4. Связь параметров АР-, СС- и АРСС-модели с АКП.....	88
3.5. Спектральная факторизация.....	91
Глава 4. Представление авторегрессионного процесса с помощью фильтров специальных классов	93
4.1. Линейное предсказание АР-процесса.....	93
4.2. Минимально-фазовое свойство фильтра ошибки предсказания	96
4.3. Рекурсивная процедура решения уравнений Юла–Уокера .	99
4.4. Коэффициенты отражения.....	106
4.5. Алгоритм Левинсона.....	110
4.6. Решетчатые фильтры.....	111
4.7. Взаимосвязь альтернативных представлений авторегрессионных процессов.....	113
Глава 5. Авторегрессионное спектральное оценивание на основе блочной обработки данных.....	116
5.1. Оценка СПМ авторегрессионного процесса и методы блочной обработки данных.....	116
5.2. Оценивание авторегрессионных параметров и коэффициентов отражения методом максимального правдоподобия	118
5.3. Алгоритм Юла–Уокера.....	122

5.4. Ковариационный метод	124
5.5. Модифицированный ковариационный метод	126
5.6. Метод Берга	129
5.7. Рекурсивное оценивание по методу максимального правдоподобия	132
5.8. Результаты численного исследования алгоритмов блочной обработки данных	134
5.9. Выбор порядка АР-модели	137
Глава 6. Блочные алгоритмы спектрального оценивания на основе модели скользящего среднего	141
6.1. Оценивание СПМ процесса скользящего среднего	141
6.2. Оценивание СС-параметров методом максимального правдоподобия	143
6.3. Выбор порядка СС-модели	147
6.4. Некоторые результаты компьютерного моделирования алгоритмов спектрального оценивания на основе СС-модели ...	148
Глава 7. Блочные алгоритмы спектрального оценивания на основе моделей авторегрессии — скользящего среднего	151
7.1. Оценивание АРСС-параметров методом максимального правдоподобия	151
7.2. Совместное оценивание АРСС-параметров методом максимального правдоподобия Акаике	154
7.3. Раздельное оценивание АР- и СС-параметров методом модифицированных уравнений Юла–Уокера	157
7.4. Раздельное оценивание АР- и СС-параметров модифицированным методом наименьших квадратов Юла–Уокера	160
7.5. Выбор порядка АРСС-модели	162
7.6. Некоторые результаты компьютерного моделирования алгоритмов спектрального оценивания на основе АРСС-моделей	164
Глава 8. Спектральное оценивание по методу минимума дисперсии	167
8.1. Фильтровая интерпретация спектральной оценки по методу МД	167
8.2. Приложение метода МД к оценке частот комплексных экспонент на фоне шума	172
8.3. Реализация метода спектральной оценки по критерию МД	174
8.4. Некоторые результаты компьютерного моделирования алгоритмов спектрального оценивания по МД-методу	177

Глава 9. Методы спектрального оценивания, основанные на экстраполяции АКП	179
9.1. Проблема, обусловленная конечным числом значений АКП	179
9.2. Постановка задачи вычисления СПМ по конечному числу значений АКП	180
9.3. Разрешающая способность и ограничения классических спектральных оценок	181
9.4. Спектральное оценивание по методу максимальной энтропии	183
9.5. Интерпретация случайного процесса с максимальной энтропией как процесса авторегрессии	186
9.6. Связь АКП с параметрами АР-модели	187
9.7. Процедура вычисления МЭ-оценки СПМ	188
9.8. Метод МЭ как метод спектрального оценивания высокого разрешения	189
9.9. МЭ-оценка мощности гармонических составляющих	190
9.10. Связь между спектральными МД- и МЭ-оценками	192
Глава 10. Основы декомпозиционных методов оценивания дискретных компонентов спектра	195
10.1. Представление АКМ гармонической модели случайного процесса	196
10.2. Анализ собственных значений АКМ для случая $M = 1$	198
10.3. Анализ собственных значений АКМ для случая $M = 2$	200
10.4. Анализ собственных значений АКМ в общем случае	201
10.5. Псевдоспектры декомпозиционных методов	205
Глава 11. Алгоритмы оценки частоты в подпространстве шума	209
11.1. Метод гармонического разложения Писаренко	209
11.2. Метод MUSIC	215
11.3. Методы EV и MN	218
11.4. Алгоритмы инвариантного вращения ESPRIT	221
11.4.1. Исходный метод ESPRIT	222
11.4.2. Алгоритмы LS ESPRIT и TLS ESPRIT	225
11.5. Сводка результатов	230
Глава 12. Алгоритмы оценки частоты в подпространстве сигнала	233
12.1. Применение аппроксимации РС для улучшения авторегрессионных оценок СПМ	234
12.2. Применение аппроксимации РС для улучшения коррелограммных оценок частоты	238

12.3. Применение аппроксимации РС для улучшения оценок метода минимума дисперсии	239
Заключение	241
Приложения	242
1. Тестовые последовательности данных	242
2. Автокорреляционная матрица случайного вектора и ее оценка	243
3. Линейные преобразования случайных векторов	245
Литература	246
Список основных сокращений	250