

BIOMEDICAL SIGNAL ANALYSIS

A Case-Study Approach

Rangaraj M. Rangayyan

University of Calgary
Calgary, Alberta, Canada

АНАЛИЗ БИОМЕДИЦИНСКИХ СИГНАЛОВ

Подход, основанный на примерах

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел	Заголовок	стр.
	Посвящение	vii
	Предисловие	ix
	Об авторе	xiv
	Благодарности	xvii
	Содержание	xxi
	Символы и аббревиатуры	xxix
1	Введение в биомедицинские сигналы	1
1.1	ПРИРОДА БИОМЕДИЦИНСКИХ СИГНАЛОВ	1
1.2	ПРИМЕРЫ БИОМЕДИЦИНСКИХ СИГНАЛОВ	5
1.2.1	Потенциал действия	5
1.2.2	Электронейрограмма (ЭНГ)	9
1.2.3	Электромиограмма (ЭМГ)	11
1.2.4	Электрокардиограмма (ЭКГ)	14
1.2.5	Электрэнцефалограмма (ЭЭГ)	28
1.2.6	Потенциал, вызванный событием (ПВС)	30
1.2.7	Электрогастрограмма (ЭГГ)	31
1.2.8	Фонокардиограмма (ФКГ)	34
1.2.9	Каротидный пульс (КП)	38
1.2.10	Сигналы с катетерных датчиков	40
1.2.11	Речевой сигнал	40
1.2.12	Вибромиограмма (ВМГ)	46
1.2.13	Виброартрограмма (ВАГ)	46
1.2.14	Сигналы отоакустической эмиссии	48
1.3	ЦЕЛИ АНАЛИЗА БИОМЕДИЦИНСКИХ СИГНАЛОВ	48
1.4	ТРУДНОСТИ, ВСТРЕЧАЮЩИЕСЯ ПРИ СНЯТИИ И АНАЛИЗЕ БИОМЕДИЦИНСКИХ СИГНАЛОВ	52
1.5	КОМПЬЮТЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА	55
1.6	ЗАМЕЧАНИЯ	57
1.7	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ	58
1.8	ЛАБОРАТОРНЫЕ УПРАЖНЕНИЯ И ПРОЕКТЫ	59
2	Анализ одновременных, парных и коррелированных процессов	61
2.1	ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ	62
2.2	ИЛЛЮСТРАЦИЯ ПРОБЛЕМЫ НА ПРИМЕРАХ	62
2.2.1	Электрокардиограмма и фонокардиограмма	62
2.2.2	Фонокардиограмма и каротидный пульс	63
2.2.3	ЭКГ и электрограмма предсердий	64

2.2.4	Кардио-респираторное взаимодействие	66
2.2.5	Электромиограмма и вибромиограмма	67
2.2.6	Сигналы коленного сустава и мышечной вибрации	67
2.3	ПРИМЕНЕНИЕ: СЕГМЕНТАЦИЯ ФКГ НА СИСТОЛИЧЕСКУЮ И ДИАСТОЛИЧЕСКУЮ ЧАСТИ	69
2.4	ЗАМЕЧАНИЯ	71
2.5	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ	71
2.6	ЛАБОРАТОРНЫЕ УПРАЖНЕНИЯ И ПРОЕКТЫ	71
3	Фильтрация для устранения артефактов	73
3.1	ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ	73
3.1.1	Случайный шум, структурированный шум и физиологические помехи	74
3.1.2	Стационарные и нестационарные процессы	81
3.2	ИЛЛЮСТРАЦИЯ ПРОБЛЕМЫ НА ПРИМЕРАХ	85
3.2.1	Помехи в потенциалах, вызванных событиями	85
3.2.2	Высокочастотные помехи в ЭКГ	85
3.2.3	Двигательные артефакты в ЭКГ	87
3.2.4	Сетевая наводка в ЭКГ	87
3.2.5	Помеха от ЭКГ матери в ЭКГ плода	90
3.2.6	Помеха от мышечных сокращений в сигнале ВАГ	91
3.2.7	Возможные подходы к решению проблемы	93
3.3	ФИЛЬТРАЦИЯ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ	93
3.3.1	Синхронное усреднение	94
3.3.2	Фильтры скользящего среднего	99
3.3.3	Операторы для устранения низкочастотных артефактов, основанные на производной	109
3.4	ФИЛЬТРАЦИЯ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ	115
3.4.1	Устранение высокочастотных шумов: фильтры нижних частот Баттерворта	118
3.4.2	Устранение низкочастотных шумов: фильтры верхних частот Баттерворта	127
3.4.3	Устранение периодических артефактов: режекторные и гребенчатые фильтры	130
3.5	ОПТИМАЛЬНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ: ФИЛЬТР ВИНЕРА	137
3.6	АДАПТИВНЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ПОМЕХ	146
3.6.1	Адаптивное подавление шумов	147
3.6.2	Адаптивный фильтр на основе метода наименьших средних квадратов	150
3.6.3	Адаптивный фильтр на основе метода рекурсивных наименьших квадратов	151
3.7	ВЫБОР ПОДХОДЯЩЕГО ФИЛЬТРА	158
3.8	ПРИМЕНЕНИЕ: УСТРАНЕНИЕ АРТЕФАКТОВ ИЗ ЭКГ	162
3.9	ПРИМЕНЕНИЕ: АДАПТИВНОЕ УСТРАНЕНИЕ ЭКГ МАТЕРИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭКГ ПЛОДА	165
3.10	ПРИМЕНЕНИЕ: АДАПТИВНОЕ УСТРАНЕНИЕ ПОМЕХИ МЫШЕЧНЫХ СОКРАЩЕНИЙ ИЗ СИГНАЛА ВИБРАЦИИ КОЛЕННОЙ ЧАШЕЧКИ	166
3.11	ЗАМЕЧАНИЯ	171
3.12	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ	171
3.13	ЛАБОРАТОРНЫЕ УПРАЖНЕНИЯ И ПРОЕКТЫ	175
4	Обнаружение событий	177
4.1	ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ	177
4.2	ИЛЛЮСТРАЦИЯ ПРОБЛЕМЫ НА ПРИМЕРАХ	178
4.2.1	P, QRS и T волны ЭКГ	178
4.2.2	Первый и второй тоны сердца	179
4.2.3	Дикротическая выемка в каротидном пульсе	180
4.2.4	Ритмы, волны и переходящие события в ЭЭГ	180
4.3	ОБНАРУЖЕНИЕ СОБЫТИЙ И ВОЛН	182
4.3.1	Методы обнаружения QRS-комплекса, основанные на производной	183
4.3.2	Алгоритм обнаружения QRS-комплекса Пана-Томпкинса	187
4.3.3	Обнаружение дикротической выемки	191
4.4	КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ КАНАЛОВ ЭЭГ	191

4.4.1	Обнаружение ритмов ЭЭГ	193
4.4.2	Обнаружение комплекса спайк-волна в сигнале ЭЭГ на основе сопоставления с образцом	200
4.5	МЕТОДЫ НА ОСНОВЕ ВЗАИМНОГО СПЕКТРА	200
4.5.1	Когерентный анализ каналов ЭЭГ	200
4.6	Согласованные фильтры	204
4.6.1	Обнаружение комплексов спайк-волна в ЭЭГ	204
4.7	ОБНАРУЖЕНИЕ P-ЗУБЦА	205
4.8	ГОМОМОРФНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ И КОМПЛЕКСНЫЙ КЕПСТР	212
4.8.1	Обобщённая линейная фильтрация	212
4.8.2	Гомоморфная деконволюция	213
4.8.3	Получение характеристики голосового тракта	216
4.9	ПРИМЕНЕНИЕ: АНАЛИЗ РИТМА ЭКГ	222
4.10	ПРИМЕНЕНИЕ: ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЗВУКОВ СЕРДЦА	225
4.11	ПРИМЕНЕНИЕ: ОБНАРУЖЕНИЕ АОРТАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ ВТОРОГО ТОНА СЕРДЦА	227
4.12	ЗАМЕЧАНИЯ	231
4.13	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ	233
4.14	ЛАБОРАТОРНЫЕ УПРАЖНЕНИЯ И ПРОЕКТЫ	234
5	Анализ форм волн и их сложности	237
5.1	ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ	237
5.2	ИЛЛЮСТРАЦИЯ ПРОБЛЕМЫ НА ПРИМЕРАХ	238
5.2.1	QRS-комплекс при блокаде проводящих путей	238
5.2.2	Влияние ишемии и инфаркта миокарда на форму QRS-комплекса	238
5.2.3	Эктопические комплексы	238
5.2.4	Сложность формы сигнала ЭМГ	239
5.2.5	Уровень интенсивности сигнала ФКГ	239
5.3	АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛОВ, ВЫЗВАННЫХ СОБЫТИЯМИ	240
5.4	МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЛН ЭКГ	240
5.4.1	Коэффициент корреляции	240
5.4.2	Минимально-фазовое согласование и длина сигнала	241
5.4.3	Анализ форм волн ЭКГ	248
5.5	ВЫДЕЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ОГИБАЮЩЕЙ	249
5.5.1	Амплитудная демодуляция	251
5.5.2	Синхронное усреднение огибающих ФКГ	252
5.5.3	Энвелограмма	255
5.6	Анализ активности	256
5.6.1	Среднеквадратичное значение	259
5.6.2	Частота пересечений нуля	259
5.6.3	Подсчёт поворотов	260
5.6.4	Коэффициент формы	262
5.7	ПРИМЕНЕНИЕ: ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ НОРМАЛЬНЫХ И ЭКТОПИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ЭКГ	263
5.8	ПРИМЕНЕНИЕ: АНАЛИЗ ЭКГ ПРИ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ	265
5.9	ПРИМЕНЕНИЕ: АНАЛИЗ ДЫХАНИЯ	266
5.10	ПРИМЕНЕНИЕ: ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ КОРРЕЛЯТЫ МЫШЕЧНЫХ СОКРАЩЕНИЙ	269
5.11	ЗАМЕЧАНИЯ	269
5.12	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ	272
5.13	ЛАБОРАТОРНЫЕ УПРАЖНЕНИЯ И ПРОЕКТЫ	274
6	Исследование характеристик сигналов и систем в частотной области	277
6.1	ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ	278
6.2	ИЛЛЮСТРАЦИЯ ПРОБЛЕМЫ НА ПРИМЕРАХ	279
6.2.1	Влияние эластичности миокарда на спектр звуков сердца	279
6.2.2	Частотный анализ шумов сердца для диагностики дефектов клапанов	280

6.3	СПЕКТР ФУРЬЕ	282
6.4	ОЦЕНКА ФУНКЦИИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ (СПМ)	287
6.4.1	Периодограмма	288
6.4.2	Необходимость усреднения	289
6.4.3	Использование окон: спектральное разрешение и утечка	291
6.4.4	Оценка автокорреляционной функции	297
6.4.5	Синхронное усреднение спектров ФКГ	298
6.5	ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПОЛУЧАЕМЫЕ ИЗ ФУНКЦИЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ	302
6.5.1	Моменты функций СПМ	305
6.5.2	Отношения спектральных мощностей	307
6.6	ПРИМЕНЕНИЕ: ОЦЕНКА ПРОТЕЗОВ СЕРДЕЧНЫХ КЛАПАНОВ	308
6.7	ЗАМЕЧАНИЯ	310
6.8	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ	311
6.9	ЛАБОРАТОРНЫЕ УПРАЖНЕНИЯ И ПРОЕКТЫ	312
7	Моделирование процессов и систем, порождающих биомедицинские сигналы	315
7.1	ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ	315
7.2	ИЛЛЮСТРАЦИЯ ПРОБЛЕМЫ НА ПРИМЕРАХ	316
7.2.1	Типы форм волн сокращений двигательной единицы	316
7.2.2	Сердечный ритм	317
7.2.3	Форманты и высота тона речевого сигнала	317
7.2.4	Хруст коленной чашечки	319
7.3	ТОЧЕЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ	320
7.4	ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ	327
7.5	АВТОРЕГРЕССИОННОЕ ИЛИ ПОЛЮСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	333
7.5.1	Спектральное согласование и параметризация	339
7.5.2	Оптимальный порядок модели	342
7.5.3	Взаимосвязь между авторегрессионными и кепстральными коэффициентами	346
7.6	Полусно-нулевое моделирование	355
7.6.1	Последовательная оценка полюсов и нулей	358
7.6.2	Итеративная идентификация системы	360
7.6.3	Гомоморфное предсказание и моделирование	366
7.7	ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГЕНЕРАЦИИ СИГНАЛОВ	371
7.7.1	Генерация звуков в коронарных артериях	371
7.7.2	Генерация звуков в коленных суставах	374
7.8	ПРИМЕНЕНИЕ: АНАЛИЗ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА	377
7.9	ПРИМЕНЕНИЕ: СПЕКТРАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СИГНАЛОВ ФКГ	380
7.10	ПРИМЕНЕНИЕ: ВЫЯВЛЕНИЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ КОРОНАРНЫХ АРТЕРИЙ	386
7.11	ЗАМЕЧАНИЯ	386
7.12	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ	389
7.13	ЛАБОРАТОРНЫЕ УПРАЖНЕНИЯ И ПРОЕКТЫ	390
8	Анализ нестационарных сигналов	391
8.1	ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ	392
8.2	ИЛЛЮСТРАЦИЯ ПРОБЛЕМЫ НА ПРИМЕРАХ	392
8.2.1	Сердечные звуки и шумы	392
8.2.2	Волны и ритмы ЭЭГ	393
8.2.3	Повреждение суставного хряща и вибрации коленного сустава	393
8.3	ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ	396
8.3.1	Характеристики нестационарных сигналов и динамических систем	397
8.4	ФИКСИРОВАННАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ	399
8.4.1	Преобразование Фурье для коротких интервалов	400
8.4.2	Соображения по анализу коротких интервалов	402
8.5	АДАПТИВНАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ	405
8.5.1	Мера спектральной ошибки (МСО)	408

8.5.2	Расстояние по АКФ	413
8.5.3	Обобщённое отношение правдоподобия (ООП)	414
8.5.4	Сравнительный анализ методов АКФ, МСО и ООП	416
8.6	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ	419
8.6.1	Мониторинг РНК фильтра	420
8.6.2	Решётчатый РНК фильтр	421
8.7	ПРИМЕНЕНИЕ: АДАПТИВНАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ СИГНАЛОВ ЭЭГ	431
8.8	ПРИМЕНЕНИЕ: АДАПТИВНАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ СИГНАЛОВ ФКГ	438
8.9	ПРИМЕНЕНИЕ: ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА	438
8.10	ЗАМЕЧАНИЯ	444
8.11	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ	444
8.12	ЛАБОРАТОРНЫЕ УПРАЖНЕНИЯ И ПРОЕКТЫ	444
9	Классификация образов и диагностические решения	445
9.1	ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ	446
9.2	ИЛЛЮСТРАЦИЯ ПРОБЛЕМЫ НА ПРИМЕРАХ	446
9.2.1	Диагностика блокады проводящих путей	446
9.2.2	Нормальный или эктопический QRS-комплекс?	447
9.2.3	Имеется ли альфа-ритм?	448
9.2.4	Имеется ли шум?	448
9.3	КЛАССИФИКАЦИЯ ОБРАЗОВ	449
9.4	КОНТРОЛИРУЕМАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ОБРАЗОВ	450
9.4.1	Дискриминантные и решающие функции	450
9.4.2	Функции расстояния	451
9.4.3	Правило ближайшего соседа	452
9.5	НЕКОНТРОЛИРУЕМАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ОБРАЗОВ	453
9.5.1	Методы поиска кластеров	453
9.6	ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ	457
9.6.1	Функции правдоподобия и статистические решения	457
9.6.2	Классификатор Байеса для образцов с нормальным распределением	460
9.7	ЛОГИСТИЧЕСКИЙ РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ	462
9.8	ЭТАПЫ ОБУЧЕНИЯ И ТЕСТИРОВАНИЯ	463
9.8.1	Метод исключения	463
9.9	НЕЙРОННЫЕ СЕТИ	464
9.10	ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОЧНОСТИ И ЦЕНЫ ДИАГНОСТИКИ	466
9.10.1	Характеристическая кривая (ROC-кривая)	469
9.10.2	Тест симметрии Макнемара	472
9.11	НАДЁЖНОСТЬ КЛАССИФИКАТОРОВ И СИСТЕМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ	473
9.12	ПРИМЕНЕНИЕ: НОРМАЛЬНЫЕ И ЭКТОПИЧЕСКИЕ QRS-КОМПЛЕКСЫ ЭКГ	474
9.13	ПРИМЕНЕНИЕ: ВЫЯВЛЕНИЕ ПАТОЛОГИИ ХРЯЩА КОЛЕННОГО СУСТАВА	480
9.14	ЗАМЕЧАНИЯ	483
9.15	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ	485
9.16	ЛАБОРАТОРНЫЕ УПРАЖНЕНИЯ И ПРОЕКТЫ	487
	Литература	489
	Предметный указатель	509