

BIOMEDICAL SIGNAL ANALYSIS

A Case-Study Approach

Rangaraj M. Rangayyan

University of Calgary
Calgary, Alberta, Canada

АНАЛИЗ БИОМЕДИЦИНСКИХ СИГНАЛОВ

Подход, основанный на примерах

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предыстория и мотивация

Внедрение электрокардиограммы (ЭКГ) в клиническую практику датским врачом Уильямом Эйнтховеном в 1903 году ознаменовало начало новой эры в методах медицинской диагностики, связанной с использованием электроники в здравоохранении. С тех пор электроника, а в последствии и компьютеры, стали неотъемлемыми компонентами систем анализа биомедицинских сигналов, выполняя различные задачи от съёма данных и предварительной обработки от устранения артефактов до выделения диагностических признаков и интерпретации. Электронное оборудование и компьютеры начали применяться для исследования широкого спектра биологических и физиологических систем и феноменов, таких как электрическая активность сердечно-сосудистой системы, мозга, нейромышечной системы и системы пищеварения; изменения давления в сердечно-сосудистой системе; звуки и сигналы вибрации от сердечно-сосудистой, мышечно-скелетной и дыхательной систем; магнитные поля мозга. И это далеко не полный перечень.

Первым шагом в исследовании физиологических систем является разработка соответствующих датчиков и аппаратуры для преобразования изучаемых феноменов в электрический сигнал, поддающийся измерению. Следующий шаг - анализ сигналов - не всегда является простой задачей для врача или специалиста в области биологической науки. Клинически важная информация в сигнале часто замаскирована шумами и наводками. Кроме того, как правило, параметры сигналов не могут быть непосредственно восприняты визуальной и звуковой системами человека-наблюдателя. Большая часть энергии звуков сердца, например, сосредоточена на границе или за пределами границ восприятия звука большинством людей. Вид поверхностного электромиографического (ЭМГ) сигнала слишком сложен, чтобы был возможен его визуальный анализ. Некоторые многократно повторяющиеся или требующие непрерывного внимания задачи, такие как текущий мониторный контроль ЭКГ тяжелых кардиологических больных с нарушениями сердечного ритма, могут оказаться скучными и утомительными для человека-наблюдателя. Более того, в сигналах такого типа наблюдается изменчивость от одного пациента к другому. Кроме того, вариабельность, порождаемая субъективностью анализа различных врачей или аналитиков, делает надёжную и состоятельную оценку и понимание наблюдаемых феноменов затруднительной или даже невозможной задачей. Эти факторы определяют потребность не только в более совершенной аппаратуре, но также и в разработке методов для объективного

анализа сигналов с использованием алгоритмов обработки, реализованных с помощью электронной аппаратуры или компьютеров.

Обработка биомедицинских сигналов до недавнего времени была в основном направлена на решение следующих видов задач: фильтрацию шумов или сетевой наводки; спектральный анализ для понимания частотных характеристик сигнала; моделирование для представления свойств и параметризации исследуемых процессов. Тенденции последнего времени направлены на количественный и объективный анализ физиологических систем и феноменов через анализ сигналов. Направление анализа биомедицинских сигналов достигло уровня практического применения методов обработки сигналов и распознавания образов для эффективной и совершенной неинвазивной диагностики, текущего мониторингового наблюдения за состоянием тяжело больных пациентов, реабилитации и сенсорной поддержки инвалидов. Методы, разработанные инженерами, находят всё большее применение у практических врачей, а роль техники в диагностике и лечении завоевала заслуженное уважение.

Основные усилия при применении компьютеров для анализа биомедицинских сигналов направлены на использование обработки сигналов и методов моделирования для количественного или объективного анализа. Анализ сигналов наблюдателем-человеком почти всегда сопряжён с ограничениями восприятия, межличностными различиями, ошибками, вызванными утомлением, ошибками, вызванными очень низкой частотой встречаемости определенных признаков аномальностей, отвлечением внимания из-за окружающей обстановки и так далее. Интерпретация сигнала экспертом в большой степени определяется опытом и квалифицированностью аналитика; следовательно, такой анализ почти всегда субъективен. Компьютерный анализ биомедицинских сигналов, если он выполняется с использованием адекватной логики, потенциально способен усилить объективную составляющую интерпретации, даваемой экспертом. Таким образом, становится возможным усилить достоверность или точность диагностики даже эксперта с многолетним опытом. Этот подход к повышению уровня здравоохранения может быть назван *диагностикой, поддерживаемой компьютером*.

Разработка алгоритма для анализа биомедицинского сигнала, однако, является непростой задачей; довольно часто это даже не целенаправленный процесс. Инженер или компьютерный аналитик часто бывает поражён изменчивостью и разнообразием признаков в биомедицинских сигналах и системах, где эти проблемы проявляются намного чаще, чем можно встретить в физических системах или наблюдениях. Доброкачественные заболевания часто маскируют признаки злокачественных; злокачественные заболевания могут проявляться в виде характерных признаков, появление которых, однако, не всегда гарантировано. Учёт всех возможностей и степеней свободы в биомедицинских системах является наиболее сложной проблемой для большинства применений. Методы, показавшие хорошую работоспособность для определённых систем или наборов сигналов, могут оказаться несостоятельными в других, на первый взгляд похожих, ситуациях.

Подход, основанный на решении практических проблем

Подход, которого я придерживался при изложении представленного в данной книге материала, заключается прежде всего в разработке алгоритмов для решения определённых

проблем. Инженеров часто называют (я полагаю – с восхищением) «решателями проблем». Однако проработка постановки проблемы и достижение её хорошего понимания может потребовать значительного объёма подготовительной работы. Для представления в этой книге я отобрал логические связанные группы проблем из многих практических задач, с которыми я сталкивался в моей исследовательской работе. Каждая глава посвящена определённому типу проблем с биомедицинскими сигналами. Каждая глава начинается с постановки проблемы, непосредственно за этим приводятся несколько иллюстраций этой проблемы с использованием реальных практических примеров и соответствующих сигналов. Затем описываются обработка сигналов, а также модели или методы анализа, начиная с относительно простых «азбучных» методов, кончая более сложными исследовательскими подходами, направленными на решение специфических проблем. Каждая глава замыкается одним или более примерами применения описанных методов для решения важных практических проблем. Книга обильно иллюстрирована реальными биомедицинскими сигналами и производными от них сигналами.

Изучение представленных в книге методов требует достаточно высокого уровня технической подготовки. Для понимания описываемых процедур и методов анализа требуется владеть хорошей базой в области анализа сигналов и систем, а также в теории вероятностей, теории случайных величин и процессов, теории стохастических процессов. Подразумевается также знакомство с теорией систем и преобразованиями Лапласа и Фурье, причём для последнего – как в непрерывной, так и в дискретной формах. Мы не будем вдаваться в детальное рассмотрение датчиков и аппаратных средств, которые, несомненно, очень важны для съёма биомедицинских сигналов; вместо этого мы будем изучать проблемы, присутствующие в сигналах после того, как они были получены, концентрируя внимание на том, как решать эти проблемы. Также настоятельно рекомендуется одновременное или предварительное изучение физиологических феноменов, связанных с анализируемыми и исследуемыми сигналами.

Для кого предназначена эта книга

Эта книга предназначена для студентов последних курсов, обучающихся по инженерным специальностям, а также для аспирантов. Студенты электротехнических специальностей с хорошей базой в области сигналов и систем являются наиболее хорошо подготовленным контингентом для материала этой книги. Студенты, специализирующиеся по другим техническим дисциплинам (по компьютерам, физике, математике или геофизике), также могут оказаться подготовленными к восприятию материала этой книги. Неплохим связующим звеном мог бы служить курс по цифровой обработке сигналов и цифровым фильтрам, но способные студенты, даже не знакомые с этой темой, не встретят больших трудностей.

Практические инженеры, специалисты по компьютерам и информационным технологиям, врачи, специалисты по обработке данных, работающие в различных сферах, таких как телекоммуникации, сейсмические и геофизические применения, биомедицинские применения, медицинские информационные системы, могут найти эту книгу полезной в их стремлении к освоению наиболее совершенных методов анализа сигналов. Они могут черпать вдохновение из других областей обработки и анализа сигналов и удовлетворять

своё любопытство по отношению к применению компьютеров в медицине и к диагностике, поддерживаемой компьютером.

План преподавания и изучения

Книга начинается с представленного в главе 1 иллюстрированного введения в биомедицинские сигналы. Глава 2 продолжает введение, но с упором на анализ многоканальных или взаимосвязанных сигналов. Эта часть книги может быть пропущена в учебном плане, если студенты ранее прослушали курс по биомедицинским сигналам и аппаратуре. В таком случае эта глава должна быть изучена лишь как обзорный материал, для того чтобы дать ориентиры по примерам, приводимым далее в книге.

Глава 3 посвящена исключительно фильтрации для устранения артефактов – важному предварительному этапу перед анализом сигналов. Там, где это требуется, и в той мере, в которой это требуется, приводятся обзор и описание основных свойств систем и преобразований, а также методов обработки сигналов. Данная глава написана с таким расчетом, чтобы люди, имеющие базовую подготовку по сигналам, системам и преобразованиям, могли без труда освоить этот материал. Упор сделан на практическом применении для решения определённых проблем методов анализа биомедицинских сигналов, а не на самих методах. Для обеспечения визуального восприятия проблем и возможности оценки эффективности описываемых методов фильтрации в главе приведено большое количество иллюстраций.

В главе 4 представлены методы, которые особенно полезны для обнаружения событий в биомедицинских сигналах. Глава 5 фокусируется на анализе форм и отдельных волн, связанных с событиями и информативными компонентами в сигналах. В главе 6 представлены методики оценки параметров биомедицинских сигналов в частотной области. Основное внимание уделено характеристике проблем, с которыми приходится сталкиваться при анализе и интерпретации биомедицинских сигналов, а не специфическим вопросам, связанным с применением анализа определённых сигналов для диагностики.

Материал первой части книги, включая главу 6, более чем достаточен для курса лекций на один семестр, рассчитанного на уровень инженерной подготовки на старших курсах (4-ый год обучения). Мой собственный опыт преподавания показывает, что этот материал требует примерно 36 часов лекций, дополненных 12-ю часами практических занятий (рассмотрение решения проблем) и 10-ю лабораторными работами.

Темой главы 7 является моделирование процессов порождения биомедицинских сигналов и систем для их параметрического представления и анализа. Глава 8 посвящена анализу нестационарных сигналов. Темы, рассматриваемые в этой главе, имеют гораздо более высокую математическую сложность, чем это принято для курсов, читаемых студентам. Некоторые разделы могут быть выборочно включены в первоначальный курс по анализу биомедицинских сигналов, если к данным темам по каким-либо причинам существует особый интерес. В противном случае эти две главы могут быть предложены для самостоятельного изучения тем, кто нуждается в данных методах, либо включены в продвинутый курс.

В главе 9 представлен финальный аспект анализа биомедицинских сигналов и даётся введение в методы распознавания образов и принятия диагностических решений. Хотя эта

тема относится по уровню к продвинутому курсу и может сама по себе служить основой для курса, ориентированного на аспирантов, материал подаётся так, чтобы представить завершённый пример практического использования, демонстрирующий процесс анализа биомедицинских сигналов вплоть до финальной стадии – принятия диагностического решения. Стоит порекомендовать включить некоторые разделы этой главы даже в первоначальный курс, для того чтобы студенты имели возможность ощутить вкус конечного результата.

Тема сжатия данных была намеренно оставлена за пределами круга вопросов, рассматриваемых в данной книге. Более сложные темы, такие как нелинейная динамика, частотно-временные распределения, анализ на основе вейвлет-преобразований, теория хаоса и фракталы, не рассматриваются в этой книге. По адаптивным фильтрам и методам анализа нестационарных сигналов в книге дана только вводная информация, хотя эти темы заслуживают более внимательного, глубокого и широкого рассмотрения. Перечисленные вопросы будут предметом следующей книги, которую я намерен ещё написать.

Каждая глава содержит некоторое количество контрольных вопросов и заданий для обеспечения подготовки к тестам и экзаменам. Кроме того, в конце каждой главы предлагаются лабораторные работы, которые могут быть использованы как готовые упражнения с записями реальных сигналов. Файлы данных, относящиеся к заданиям и упражнениям в конце каждой главы, доступны на сайте

<ftp://ftp.ieee.org/uploads/press/rangayyan/>

В случаях, где это необходимо, предлагаются также программы для чтения данных на MATLAB.

Настоятельно рекомендуется, чтобы первые одно или два лабораторных занятия по курсу были визитами в местную клинику, центр медицинских исследований или клиническую лабораторию, для того чтобы увидеть съём и анализ биомедицинских сигналов в реальных (клинических) условиях. Сигналы, снимаемые с самих студентов и преподавателей, могут также представлять интересный и мотивирующий материал для лабораторных упражнений и должны использоваться для дополнения файлов данных, доступных с указанного сайта. Необходимо также включить в курс несколько семинаров, которые будут проведены врачами, нейрофизиологами и кардиологами, для того чтобы представить студентам не только инженерную, но и медицинскую перспективу по данному предмету.

Практический опыт работы с реальными сигналами является ключевым элементом для понимания и оценки важности методов анализа биомедицинских сигналов. Этот аспект иногда может оказаться трудным и обескураживающим, но даёт в результате профессиональное удовлетворение и удовольствие от учёбы.

Рангарадж Мандаям Рангайян
Rangaraj Mandayam Rangayyan

Calgary, Alberta, Canada
Сентябрь 2001
