

А. А. Певзнер, С. С. Шахназаров

Синтез звукового сигнала для коррекции психофизиологического состояния человека

Работа посвящена программному комплексу синтеза звукового сигнала для коррекции психофизиологического состояния человека. Для обеспечения синтеза звукового воздействия требуемой частоты необходимо провести спектральный анализ исходного биоэлектрического сигнала, выделить локальные экстремумы полученной спектральной функции, вычислить желаемую частоту звукового воздействия в соответствии с полученными экстремумами спектральной функции и синтезировать звуковое воздействие требуемой частоты.

Ключевые слова: электроэнцефалограмма, биоэлектрическая активность мозга, алгоритм, синтез, гармонический звук, преобразование Фурье, спектральный анализ, экстремумы спектра, кратные частоты, программный комплекс, немедикаментозная коррекция психофизиологического состояния человека.

A. A. Pevzner, S. S. Shakhnazarov

Synthesis of a Sound Signal to Correct the Person's Psychophysiological Condition

The work is devoted to the programme complex of the synthesis of a sound signal to correct the person's psychophysiological condition. To ensure the synthesis of sound influence of the demanded frequency it is necessary to provide the spectral analysis of the initial bioelectric signal, allocation of local extrema of the received spectral function, calculation of the desirable frequency of sound influence according to the received extrema of the spectral function and the synthesis of sound influence of the demanded frequency.

Keywords electroencephalogram, a bioelectric activity of brain, an algorithm, a synthesis, a harmonious sound, Fourier's transformation, a spectral analysis, extrema of spectrum, multiple frequencies, a programme complex, non-medicinal correction of the person's psychophysiological condition.

Проблема медикаментозной коррекции психофизиологического состояния человека в связи с побочными действиями препаратов, а также возросшим количеством контрафактных медицинских средств обуславливает необходимость поиска и создания немедикаментозных средств коррекции психофизиологического состояния человека.

В работе [4] показано, что при воздействии гармоническим звуком, частота которого кратна частоте экстремума спектральной функции биоэлектрического сигнала, полученного до звукового воздействия, где коэффициент кратности $k = 2^n$, происходит синхронизация, десинхронизация или перестройка биоэлектрического сигнала, что позволяет медицинским работникам осуществлять коррекцию психофизиологического состояния человека соответственно установленной методике.

Для реализации синтеза звукового воздействия, соответствующего выбранным частотам экстремумов спектральной функции, необходимо создание программно-аппаратного комплекса.

Данная статья посвящена программному комплексу синтеза звукового сигнала для коррекции психофизиологического состояния человека.

Для обеспечения синтеза звукового воздействия требуемой частоты необходимо провести спектральный анализ исходного биоэлектрического сигнала, выделить локальные экстремумы полученной спектральной функции, вычислить желаемую частоту звукового воздействия в соответствии с полученными экстремумами спектральной функции и синтезировать звуковое воздействие требуемой частоты.

Алгоритмически данная задача решается следующим образом:

- осуществляется анализ спектра фонового биоэлектрического сигнала;
- в спектре выделяются локальные экстремумы;
- вычисляется необходимый коэффициент кратности для формирования звукового воздействия в выбранном частотном диапазоне;
- синтезируется звуковое воздействие.

Ниже приводится описание блоков и алгоритмов программного комплекса для решения перечисленных подзадач.

1. Алгоритм расчета спектральной функции

Спектральная функция рассчитывается для отрезка времени T , в течение которого осуществляется регистрация биоэлектрического сигнала. Для определения спектральной функции задается интервал спектрального разложения T_{sub} – минимальный отрезок времени регистрации биоэлектрического сигнала, величина которого определяется из условия обеспечения требуемого разрешения спектральной функции по частоте Δf : $T_{sub} = \frac{1}{\Delta f}$.

С целью снижения влияния случайных помех таких, как артефакты и др., целесообразно произвести усреднение спектральных функций, полученных для группы интервалов спектрального разложения за время T .

Для каждого из интервалов спектрального разложения T_{subm} определяется спектральная функция, и затем вычисляется усредненная спектральная функция по формуле

Для каждого из интервалов спектрального разложения T_{subm} определяется спектральная функция, и затем вычисляется усредненная спектральная функция по формуле

$$\{SAS\}_p = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} \{AS_i\}_p .$$

В данном алгоритме количество интервалов M определилось как целая часть частного от деления T на T_{sub}

$$M = \left[\frac{T}{T_{sub}} \right] .$$

Расчет усредненной спектральной функции реализуется в соответствии со следующим алгоритмом:

Исходные данные к расчету:

- биоэлектрический цифровой сигнал $\{X\}$ имеет частоту дискретизации F_d ;
- длительность T секунд или $N = T \cdot F_d$ отсчетов.

1.1 Интервал измерений разбивается на участки спектрального разложения $\{X_m\}$ длительностью T_{sub} секунд и включает

$$N_{sub} = F_d \cdot T_{sub} \tag{1}$$

отсчетов,

$$m \in \left[0; \left[\frac{T}{T_{sub}} \right] \right) \tag{2},$$

где $\left[\frac{T}{T_{sub}} \right]$ – целая часть частного от деления $\frac{T}{T_{sub}}$.

Введем обозначение числа участков спектрального разложения

$$M = \left[\frac{T}{T_{sub}} \right] \quad (3).$$

1.2 Разбиение исходного интервала измерений цифрового сигнала $\{X\}$ на интервалы спектрального разложения производится без наложений интервалов: значения m -го интервала выражаются как

$$\{X_m\}_p = \{X\}_{m \cdot N_{sub} + p} \quad (4),$$

где $p \in [0; N_{sub}), m \in [0; M)$.

1.3 Учитывая, что разрядность АЦП электроэнцефалографа B равна 8 битам, динамический диапазон D сигнала $\{X\}$ составляет

$$D = 20 \cdot \log_{10} 2^B = B \cdot 20 \cdot \log_{10} 2 = B \cdot 6.02 = 8 \cdot 6.02 = 48.16 \text{ дБ},$$

поэтому в качестве сглаживающего окна $\{W\}$ было выбрано окно Блекмена, имеющее максимальный уровень боковых лепестков – 58 дБ.

Для каждого интервала спектрального разложения $\{X_m\}$ выполняется взвешивание окном Блекмена:

$$\{X_m^w\}_i = \{W\}_i \cdot \{X_m\}_i \quad (5),$$

где $m \in [0; M), i \in [0; N_{sub})$,

$$\{W\}_i = A_0 - A_1 \cdot \cos \frac{2\pi i}{N_{sub} - 1} + A_2 \cdot \cos \frac{2 \cdot 2\pi i}{N_{sub} - 1} \quad (6),$$

где

$$i \in [0; N_{sub}),$$

$$A_0 = 0.42, A_1 = 0.5, A_2 = 0.08.$$

1.4 Для каждого взвешенного окном интервала $\{X_m^w\}$ рассчитывается амплитудный спектр [2]

$$\{AS_m\}_p = \left| \frac{1}{N_{sub}} \sum_{i=0}^{N_{sub}-1} \{X_m^w\}_i \cdot e^{-j \left(\frac{2\pi}{N_{sub}} \right) pi} \right| \quad (7),$$

где $m \in [0; M), p \in [0; N_{sub}), j = \sqrt{-1}$, модуль комплексного числа

$$|c| = \sqrt{c_{re}^2 + c_{im}^2}, c \in \mathbb{C}.$$

1.5 На основе всех амплитудных спектров интервалов $\{AS_m\}$, где $m \in [0; M)$, рассчитывается усредненный амплитудный спектр

$$\{SAS\}_p = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \{AS_m\}_p \quad (8),$$

где $p \in [0; N_{sub})$.

Развернутая формула принимает следующий вид:

$$\{SAS\}_p = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \left| \frac{1}{N_{sub}} \sum_{i=0}^{N_{sub}-1} \{W\}_i \cdot \{X\}_{m \cdot N_{sub} + i} \cdot e^{-j \left(\frac{2\pi}{N_{sub}} \right) pi} \right| \quad (9),$$

где $p \in [0; N_{sub})$.

2. Алгоритм поиска локально кратных экстремумов

Для поиска локальных экстремумов дискретного цифрового сигнала $\{X\} = \{x_i, i \in [0; N), N \in \mathbb{N}\}$ выполняются следующие шаги:

2.1 Определяется численная производная сигнала $\{X\}$ вперед

$$\{X\}'_i = x_{i+1} - x_i, i \in [0; N - 1) \quad (10),$$

далее для всех $i \in [1; N - 1)$:

2.2 Отсчет x_i считается локальным максимумом при выполнении условия

$$\left(\{X\}'_{i-1} > 0 \wedge \{X\}'_i < 0 \right);$$

2.3 Отсчет x_i считается локальным минимумом при выполнении условия

$$\left(\{X\}'_{i-1} < 0 \wedge \{X\}'_i > 0 \right).$$

2.4 Локально кратными друг другу считаются экстремумы x_i и x_j , если $\frac{x_i}{x_j} \in \mathbb{Z}, i \neq j$.

3. Выбор частоты звукового гармонического воздействия в соответствии с выделенными экстремумами в заданном диапазоне частот

Для множества найденных экстремумов $\{X_E\} = \{ex_i, i \in [0; N_E), N_E \in \mathbb{N}\}$, где N_E – число найденных экстремумов и заданного частотного диапазона $[f_{low}; f_{high}]$,

где $f_{low}, f_{high} \in \mathbb{R}, 0 < f_{low} \leq f_{high}$, выполняется поиск кратных звуковых частот

$$f_j \in \{F_{кр}\}, \{F_{кр}\} = \{f_{i,n} = ex_i \cdot 2^n, i \in [0; N_E), n \in \mathbb{Z}, n \geq 0\} \quad (11),$$

таких, что $f_j \in [f_{low}; f_{high}]$.

Для решения настройки биоэлектрической активности на заданную частоту необходимо обеспечить небольшое отклонение (девиацию) d частоты относительно заданной. С одной стороны, это позволяет настроить фазу воздействия, а с другой – компенсировать погрешность при вычислении кратной звуковой частоты.

4. Синтез звукового гармонического воздействия в соответствии с выбранными параметрами

Звуковое воздействие для частоты f синтезируется с частотой дискретизации F_{dS} в течение времени T_S . Воздействие имеет гармонический вид с линейно изменяющейся частотой в соответствии с девиацией.

Звуковое воздействие выражается следующим образом:

$$\{S\}_i = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \{F_S\}_i \cdot \{x\}_i) \quad (12),$$

где A – амплитуда,

$$i \in [0; N_S),$$

$$N_S = F_{dS} \cdot T_S \quad (13),$$

$$\{F_S\}_i = f - d + \frac{i \cdot (f + d - (f - d))}{2 \cdot N_S} = f - d + \frac{i \cdot d}{N_S} \quad (14),$$

$$\{x\}_i = i \cdot \Delta x \quad (15),$$

$$\Delta x = \frac{1}{F_{dS}} \quad (16).$$

Порядковый номер отсчета звукового буфера i в этой формуле соотносится со временем t следующим образом:

$$t \in [0; T_S],$$

$$i \in [0; F_{dS} \cdot T_S],$$

$$(\{x\}_i = i \cdot \Delta x = \frac{i}{F_{dS}}) \in [0; T_S].$$

Далее синтезированный буфер S воспроизводится при помощи надстройки над программной библиотекой OpenToolKit, основанной на OpenAL.

Полученные результаты:

На основе предложенного алгоритма разработана программа для расчета кратной звуковой частоты на основе экстремальных частот спектра биоэлектрического сигнала. Разработанная программа включена в состав программно-аппаратного комплекса для аудиокоррекции психофизиологического состояния человека [3, 4]

Библиографический список

1. Григорьева, Е. А. Певзнер, А. А. Шахназаров, С. С. Программа для анализа зависимости ЭЭГ от звукового воздействия [Текст] / Е. А. Григорьева, А. А. Певзнер, С. С. Шахназаров // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010613540, в Реестре программ для ЭВМ 28.05.2010
2. Григорьева, Е. А. Певзнер, А. А. Шахназаров, С. С. Программа для определения моментов синхронизации и десинхронизации ЭЭГ / Е. А. Григорьева, А. А. Певзнер, С. С. Шахназаров // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010615245, в Реестре программ для ЭВМ 13.08.2010

3. Оппенгейм, А., Шафер, Р. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А. Оппенгейм, Р. Шафер. – М. : Техносфера, 2006. – 856 с.

4. Певзнер, А. А. Григорьева, Е. А. Закономерность реакции организма на звуковое воздействие [Текст] / А. А. Певзнер, Е. А. Григорьева // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации. Распознавание . Междунар. конф. : сб. материалов VIII. Ч. 2. – Курск, 2008. – С. 47–48.