
ФИЗИКА

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

PHYSICS

OF ELECTROMAGNETIC PHENOMENA

УДК 537.87

АНАЛИЗ ДИФРАКЦИОННЫХ СПЕКТРОВ ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕШЕТОК, ПРОФИЛЬ КОТОРЫХ ОПИСЫВАЕТСЯ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММАМИ

А. С. МИГЕЛЬ¹⁾, С. В. МАЛЫЙ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Рассмотрено использование модельной задачи о взаимодействии плоской линейно-поляризованной электромагнитной волны с границей раздела двух сред, профиль которой описывается периодическим сигналом, для формирования вектора признаков (дифракционного дескриптора) в виде амплитуд распространяющихся пространственных гармоник рассеянного поля. Объектом исследования являются сигналы электрокардиограмм. Предложены алгоритмы предварительной обработки сигналов электрокардиограмм для выделения нормированных кардиоциклов, используемых для формирования моделей периодических решеток с заданными коэффициентами вертикального и горизонтального масштабирования по отношению к длине волны. Приведены результаты расчетов дифракционных дескрипторов для трех типов электрокардиограмм, соответствующих разным состояниям сердечно-сосудистой системы, при различных режимах масштабирования, фиксированных угле падения и поляризации электромагнитной волны. Установлено, что дифракционные дескрипторы обладают высокой чувствительностью к особенностям сигналов электрокардиограмм и при одинаковых коэффициентах масштабирования кардиоциклов могут использоваться в процессе построения автоматизированных диагностических систем.

Ключевые слова: обработка сигналов; периодическая решетка; дифракционный спектр; электрокардиограмма; ЭКГ; дескриптор ЭКГ-сигнала.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф23М-043).

Образец цитирования:

Мигель АС, Малый СВ. Анализ дифракционных спектров периодических решеток, профиль которых описывается электрокардиограммами. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2025;1:49–56.
EDN: RFMDTI

For citation:

Migel AS, Maly SV. Analysis of diffraction spectra of periodic gratings, the profile of which is described by electrocardiograms. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2025;1:49–56. Russian.
EDN: RFMDTI

Авторы:

Антон Сергеевич Мигель – аспирант кафедры радиофизики и цифровых медиатехнологий факультета радиофизики и компьютерных технологий. Научный руководитель – С. В. Малый.

Сергей Владимирович Малый – кандидат физико-математических наук, доцент; заведующий научно-исследовательской лабораторией радиофизики и информационных технологий кафедры радиофизики и цифровых медиатехнологий факультета радиофизики и компьютерных технологий.

Authors:

Anton S. Migel, postgraduate student at the department of radiophysics and digital media technologies, faculty of radiophysics and computer technologies.

mihelas@bsu.by

Sergei V. Maly, PhD (physics and mathematics), docent; head of the laboratory of radiophysics and information technologies, department of radiophysics and digital media technologies, faculty of radiophysics and computer technologies.

maly@bsu.by



ANALYSIS OF DIFFRACTION SPECTRA OF PERIODIC GRATINGS, THE PROFILE OF WHICH IS DESCRIBED BY ELECTROCARDIOGRAMS

A. S. MIGEL^a, S. V. MALY^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: A. S. Migel (mihelas@bsu.by)

Abstract. The use of a model problem on the interaction of a plane linearly polarised electromagnetic wave with the interface of two media, the profile of which is described by a periodic signal, for the formation of a feature vector (diffraction descriptor) in the form of amplitudes of propagating spatial harmonics of a scattered field is considered. The object of the study is electrocardiogram signals. Algorithms for preprocessing electrocardiogram signals to isolate normalised cardiocycles used to form periodic grating models with specified vertical and horizontal scaling coefficients with respect to wavelength are proposed. The results of calculations of diffraction descriptors for three types of electrocardiograms corresponding to different states of the cardiovascular system, obtained under different modes of scaling, fixed angle of incidence and polarisation of the electromagnetic wave, are presented. It has been established that diffraction descriptors are highly sensitive to the peculiarities of electrocardiogram signals and, with the same scaling coefficients of cardiocycles, can be used in the construction of automated diagnostic systems.

Keywords: signal processing; periodic grating; diffraction spectrum; electrocardiogram; ECG; ECG signal descriptor.

Acknowledgements. This work was carried out with the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant No. F23M-043).

Введение

Электрокардиография – важнейший метод диагностики состояния сердечно-сосудистой системы человека. В настоящее время широко применяются различные методы анализа электрокардиограмм (ЭКГ) и технологии диагностики на их основе. Наиболее распространенным методом анализа ЭКГ является ручная обработка, требующая существенных временных затрат и высокой квалификации специалиста.

Использование систем компьютерной электрокардиографии позволило сформировать базы данных в виде сигналов и (или) изображений ЭКГ для набора стандартных отведений (датчиков). Часть данных в этих базах размечены и классифицированы. Помимо автоматизации процесса диагностики, важной задачей является максимально полное использование информации, содержащейся в сигналах и изображениях, на основе корректного и системного формирования набора диагностических признаков.

Существующие методы обработки и анализа ЭКГ можно разделить на три группы: 1) традиционные методы (цифровая фильтрация [1; 2], вейвлет-преобразование [3; 4]); 2) алгоритмы машинного обучения (скрытые марковские модели [5], метод опорных векторов [6], разложение на главные компоненты [7; 8]); 3) алгоритмы глубокого обучения (сверточные нейронные сети [9–11], рекуррентные нейронные сети [12; 13]).

Основным недостатком первой группы методов, базирующихся на цифровой обработке сигналов, является искажение формы ЭКГ в процессе обработки. К недостаткам двух других групп методов можно отнести необходимость использования большого объема верифицированных и размеченных данных для обучения. По этой причине разработка компактных и информативных векторов диагностических признаков считается важной и актуальной задачей.

Одним из перспективных подходов к обработке информации является использование натуральных или численных моделей физических процессов и систем. В работе [14] предложен подход к анализу ЭКГ, в рамках которого решалась задача дифракции плоской электромагнитной волны на металлической периодической решетке, описываемой этим сигналом. Установлено, что форма периода решетки, задаваемая ЭКГ-сигналом, влияет на амплитуды распространяющихся пространственных гармоник рассеянного на периодической решетке электромагнитного поля. Однако не было проведено систематическое исследование влияния режимов формирования модели решетки и ее возбуждения электромагнитной волной на чувствительность дифракционного спектра к параметрам анализируемого сигнала. Практический интерес представляет разработка автоматической диагностической системы на основе дифракционных дескрипторов.

Целью настоящей работы являлось исследование факторов, влияющих на чувствительность дифракционного спектра электромагнитного поля, рассеянного на периодической решетке, профиль которой совпадает с ЭКГ-сигналом.

Моделирование взаимодействия плоской электромагнитной волны с периодической решеткой, профиль которой описывается ЭКГ-сигналом

Рассмотрим периодические решетки в виде границы раздела двух сред с различными электромагнитными параметрами. Периоды решеток описываются кардиоциклами (периодами), соответствующими отведению II ЭКГ здорового сердца, ЭКГ при блокаде левой и правой ножек пучка Гиса. На рис. 1 схематически показана периодическая решетка, профиль которой соответствует ЭКГ здоровой сердечно-сосудистой системы.

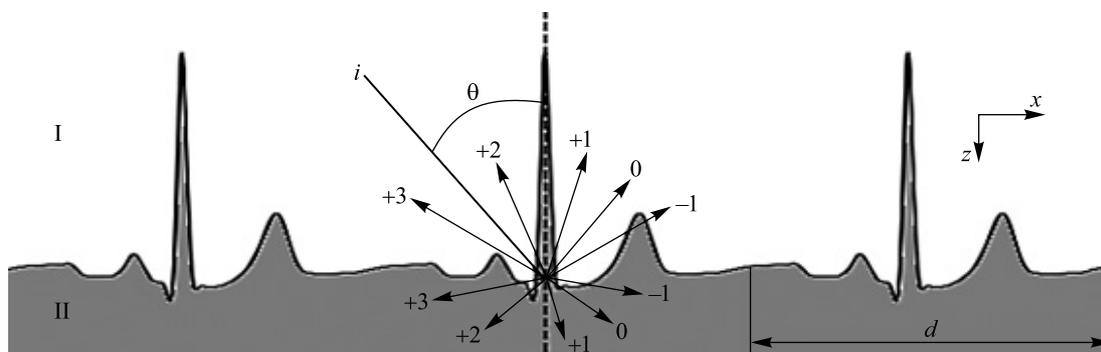


Рис. 1. Периодическая решетка в виде границы раздела двух сред, профиль которой описывается ЭКГ-сигналом, и схема дифракционных порядков

Fig. 1. A periodic grating in the form of an interface between two media, whose profile is described by an electrocardiogram (ECG) signal, and schematic representation of the diffraction orders

В качестве примера рассмотрим следующую двумерную задачу дифракции: на решетку под углом θ к оси z в плоскости xz падает плоская электромагнитная волна ТЕ- или ТМ-поляризации единичной амплитуды с длиной волны λ . В результате рассеяния электромагнитной волны образуется дифракционный спектр распространяющихся пространственных гармоник, направления которых задаются соотношениями [15]

$$n_I \sin[\theta(m)] = n_I \sin \theta - m \frac{\lambda}{d},$$

$$n_{II} \sin[\theta(m)] = n_I \sin \theta - m \frac{\lambda}{d},$$

где n_I и n_{II} – показатели преломления первой и второй сред; $\theta(m)$ – направление распространения m -го дифракционного порядка; θ – угол падения первичной электромагнитной волны; m – порядок дифракции; λ – длина волны; d – период решетки.

Количество и направления распространения пространственных гармоник зависят от материальных параметров сред, угла падения и отношения периода решетки к длине волны. Профиль решетки влияет только на амплитуды гармоник рассеянного поля.

Для моделирования взаимодействия плоской электромагнитной волны с периодической решеткой осуществляется переход к электродинамически эквивалентной задаче волноводной дифракции на неоднородности, совпадающей с периодом решетки и размещенной в волноводе, на стенках которого задаются периодические граничные условия. Отраженное и прошедшее в дальней по отношению к неоднородности зоне электромагнитное поле представляется в виде системы распространяющихся гармоник Флоке.

Для решения задачи дифракции использовался метод конечных элементов.

Алгоритм формирования периодической решетки, профиль которой совпадает с ЭКГ-сигналом, включал в себя следующие основные этапы:

- выбор ЭКГ-сигналов из баз данных;
- фильтрацию помех;
- нахождение опорных точек (R-зубцов);
- вычисление RR-интервалов;
- сегментацию ЭКГ на кардиоциклы;
- формирование усредненного кардиоцикла.

Для коррекции дрейфа изолинии применялась фильтрация сигнала методом скользящего среднего [2], а для подавления высокочастотных помех – полиномиальный сглаживающий фильтр Савицкого – Голея (размер окна 21, порядок фильтра 3).

Для нахождения R-зубцов кардиограммы использовалась фильтрация с помощью дискретного вейвлет-преобразования (его параметры: симлет 4, 4-й уровень декомпозиции, аппроксимирующие коэффициенты $cA4$ и детализирующие коэффициенты $cD1$ и $cD2$ равны нулю).

Усредненный кардиоцикл рассчитывался на основе нескольких форм кардиоциклов в пределах одного ЭКГ-сигнала с последующей нормализацией.

Таким образом, полученный профиль решетки представляет собой усредненный и откалиброванный по длительности и амплитуде кардиоцикл, диапазон значений которого изменялся от 0 до 1.

На рис. 2 представлен пример формирования профиля решетки, период которой совпадает с кардиоциклом отведения II ЭКГ здорового сердца.

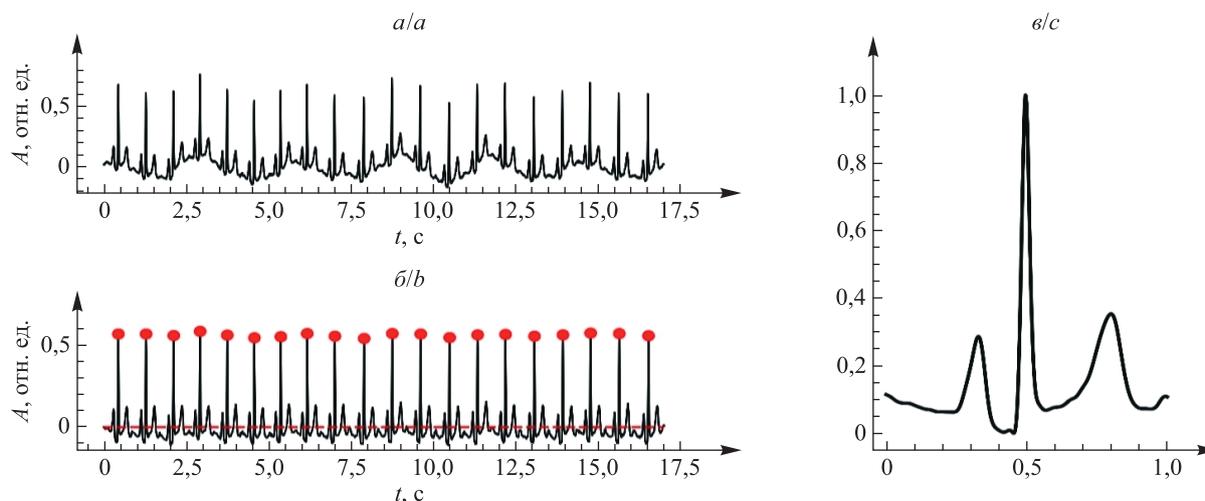


Рис. 2. Формирование профиля решетки, период которой совпадает с кардиоциклом отведения II нормальной ЭКГ: a – исходный ЭКГ-сигнал; b – сигнал, прошедший процедуру обработки, с выделенными R-зубцами и изолинией (пунктирная линия); $в$ – период решетки

Fig. 2. The formation of the grating profile, the period of which coincides with the cardiocycle of leads II of normal ECG: a – initial ECG signal; b – the signal that has undergone the processing procedure, with selected R-peaks and isoline (dotted line); c – grating period

На рис. 3 представлены периоды решеток, соответствующих отведению II ЭКГ здорового сердца, ЭКГ при блокаде левой и правой ножек пучка Гиса.

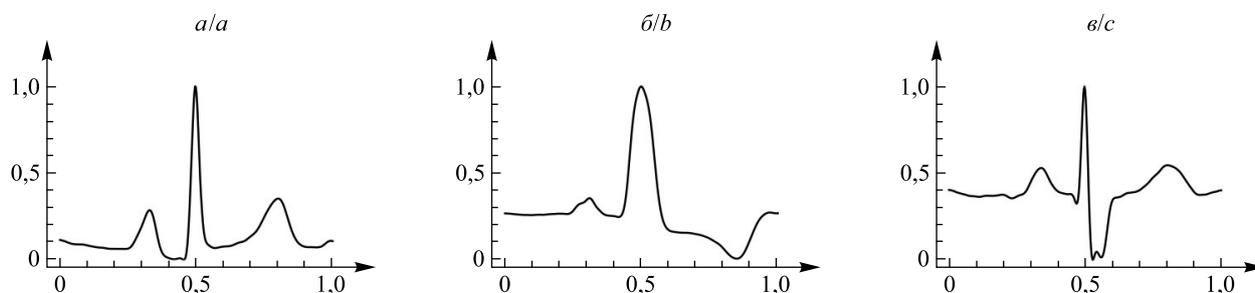


Рис. 3. Профили периодов исследуемых решеток: a – норма; b – блокада левой ножки пучка Гиса; $в$ – блокада правой ножки пучка Гиса

Fig. 3. Profiles of the periods of the studied gratings: a – normal; b – left bundle branch blockade; c – right bundle branch blockade

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим периодические решетки в виде границы раздела воздух – идеальный проводник, периоды которых описываются кардиоциклами отведения II, соответствующими норме, блокаде левой и правой ножек пучка Гиса (см. рис. 3). В связи с тем что второй средой является идеальный проводник, в спектре рассеянных волн будут присутствовать только отраженные дифракционные гармоники.

Проанализируем влияние профиля периода решетки, режимов масштабирования, направления распространения и поляризации плоской электромагнитной волны на спектр и амплитуды распространяющихся пространственных гармоник.

Исследуем влияние вертикального и горизонтального масштабирования на дифракционный спектр. Горизонтальному масштабированию соответствует изменение отношения периода решетки к длине волны, а вертикальному – изменение отношения высоты решетки к длине волны. Отношение периода решетки к длине волны $\left(\frac{d}{\lambda}\right)$ и отношение высоты решетки к длине волны $\left(\frac{h}{\lambda}\right)$ изменялись в пределах от 1 до 5.

В случае нормального падения ($\theta = 0^\circ$) количество распространяющихся гармоник равно 3 (гармоники 0-го и ± 1 -го порядков) и 9 (гармоники 0, ± 1 , ± 2 , ± 3 и ± 4 -го порядков) для $\frac{d}{\lambda} = 2$ и $\frac{d}{\lambda} = 5$ соответственно, а в случае наклонного падения ($\theta = 30^\circ$) число гармоник составляет 2 (гармоники 0-го и -1 -го порядков) и 10 (гармоники 0, ± 1 , ± 2 , -3 , -4 , -5 , -6 и -7 -го порядков) для $\frac{d}{\lambda} = 1$ и $\frac{d}{\lambda} = 5$ соответственно.

В качестве примера на рис. 4 представлено сравнение дифракционных спектров решеток, профили которых совпадают с кардиоциклами, соответствующими ЭКГ здорового сердца, ЭКГ при блокаде левой и правой ножек пучка Гиса, для случаев ТЕ- и ТМ-поляризации при $\theta = 0^\circ$, $\frac{h}{\lambda} = 4$ и $\frac{d}{\lambda} = 4$.

Спектры рассеянных на решетках гармоник, соответствующие различным типам ЭКГ, существенно отличаются друг от друга.

На рис. 5 представлены дифракционные спектры для групп ЭКГ здорового сердца и ЭКГ при блокаде левой ножки пучка Гиса для случая ТЕ-поляризации при $\theta = 0^\circ$, $\frac{h}{\lambda} = 1,5$ и $\frac{d}{\lambda} = 3$.

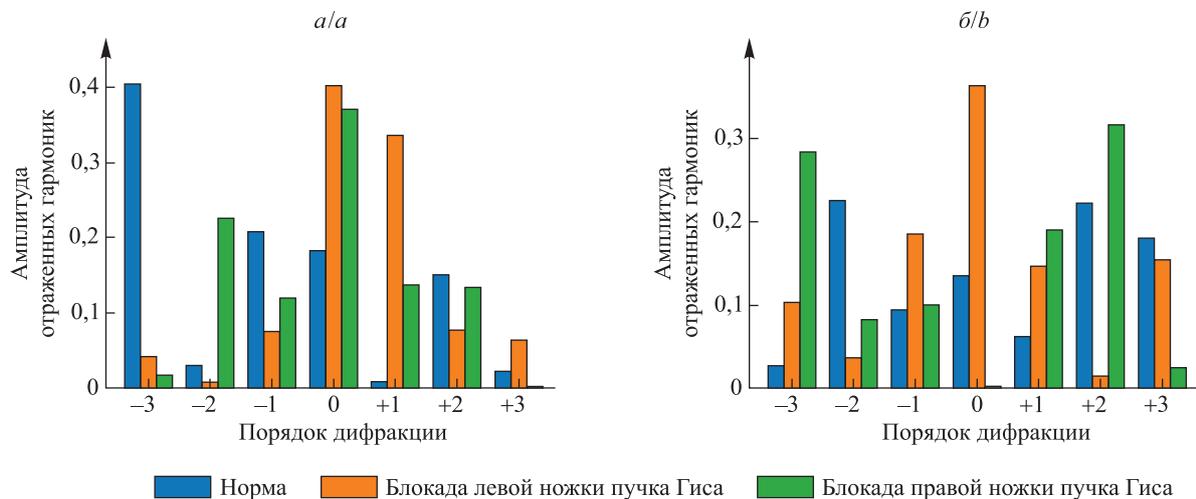


Рис. 4. Сравнение дифракционных спектров: *a* – ТЕ-поляризация; *b* – ТМ-поляризация

Fig. 4. A comparison of diffraction spectra: *a* – TE-polarisation; *b* – TM-polarisation

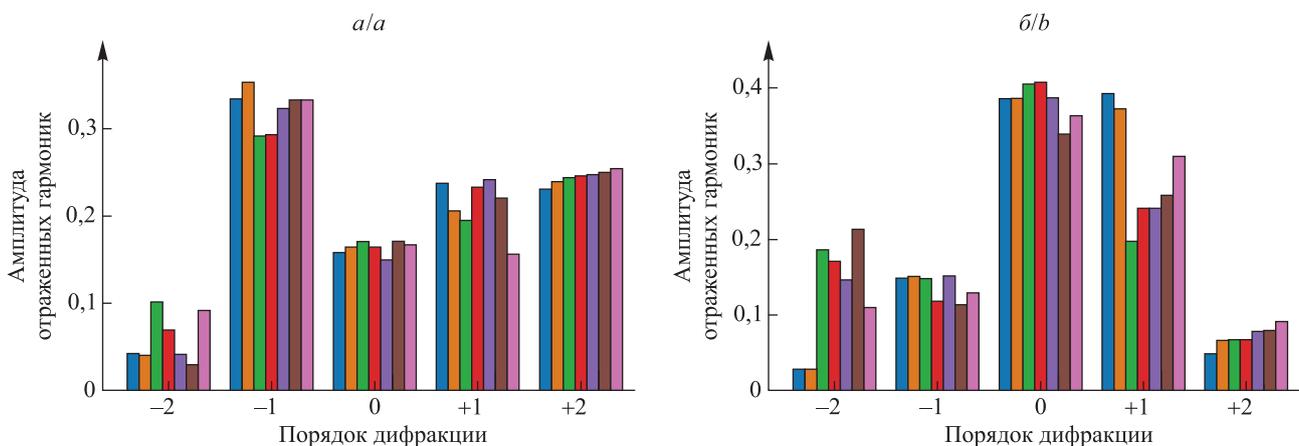


Рис. 5. Дифракционные спектры, соответствующие двум группам ЭКГ-сигналов: *a* – норма; *b* – блокада левой ножки пучка Гиса

Fig. 5. Diffraction spectra corresponding to two groups of ECG signals: *a* – normal; *b* – left bundle branch blockade

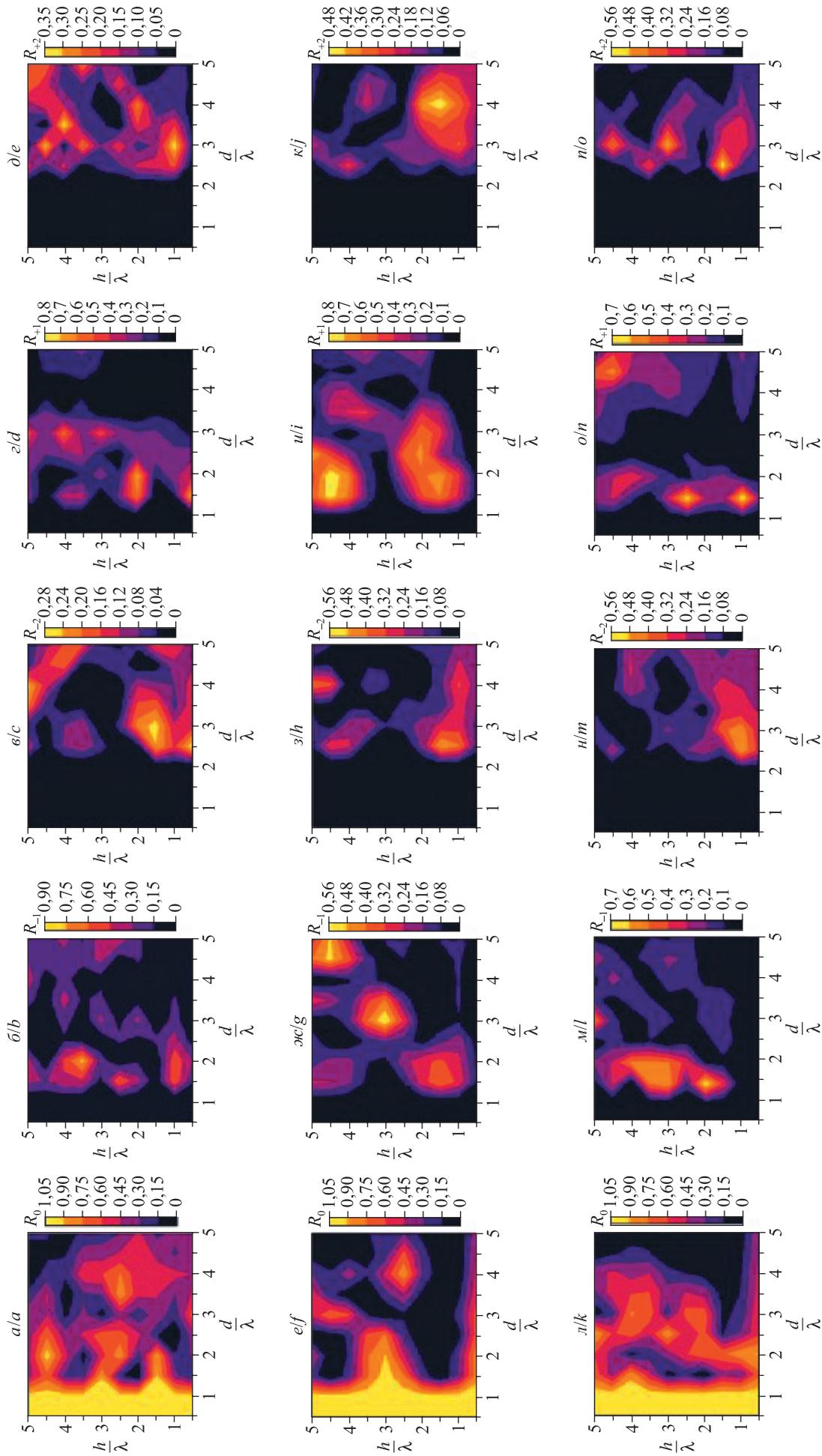


Рис. 6. Распределение интенсивности отраженных гармоник 0, ± 1 и ± 2 -го порядков для случая нормального падения: $a-o$ – норма; $e-k$ – блокада левой ножки пучка Гиса;

$l-n$ – блокада правой ножки пучка Гиса
 Fig. 6. Intensity distribution of reflected harmonics of 0, ± 1 and $\pm 2^{\text{th}}$ orders for the case of normal incidence: $a-e$ – normal; $f-j$ – left bundle branch blockade; $k-o$ – right bundle branch blockade

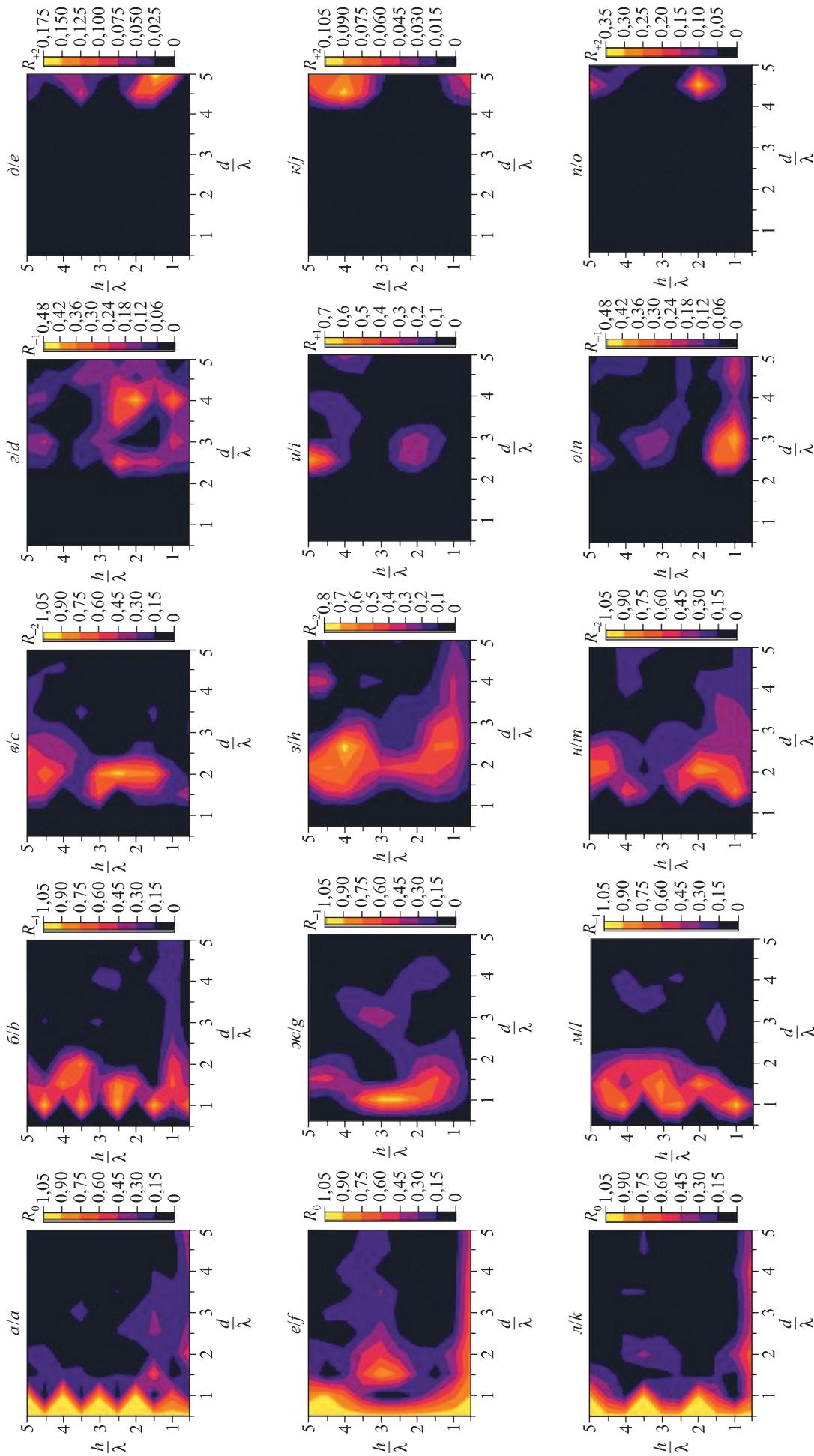


Рис. 7. Распределение интенсивности отраженных гармоник 0, ± 1 и ± 2 -го порядков для случая наклонного падения: $a-d$ – норма; $e-k$ – блокада левой ножки пучка Гюса; $l-n$ – блокада правой ножки пучка Гюса

Fig. 7. Intensity distribution of reflected harmonics of 0, ± 1 and $\pm 2^{\text{th}}$ orders for the case of oblique incidence: $a-e$ – normal; $f-j$ – left bundle branch blockade; $k-o$ – right bundle branch blockade

Дифракционные спектры, соответствующие одной группе ЭКГ-сигналов, качественно и количественно близки.

На рис. 6 представлены зависимости отраженных гармоник $0, \pm 1$ и ± 2 -го порядков от коэффициентов масштабирования для случая нормального падения плоской электромагнитной волны ТЕ-поляризации на решетку.

Результаты численного моделирования для случая наклонного падения ($\theta = 30^\circ$) представлены на рис. 7.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- интенсивности гармоник спектров, соответствующих различным ЭКГ-сигналам, при разных сочетаниях коэффициентов масштабирования отличаются;
- горизонтальное и вертикальное масштабирование, направление падения электромагнитной волны и ее поляризация могут использоваться для адаптивной подстройки чувствительности дифракционного дескриптора к особенностям ЭКГ-сигнала;
- сравнение дифракционных дескрипторов ЭКГ-сигналов необходимо проводить при одинаковых значениях коэффициента горизонтального масштабирования.

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что дифракционные спектры решеток, профили которых совпадают с ЭКГ-сигналами, могут использоваться в качестве вектора признаков для автоматизированных диагностических систем.

Возможно применение объединенного дифракционного дескриптора, состоящего из дескрипторов, полученных для ЭКГ-сигналов со всех учитываемых отведений.

Заключение

Исследовано взаимодействие электромагнитной волны с периодическими решетками в виде границы раздела двух сред, периоды которых описываются ЭКГ-сигналами, соответствующими ЭКГ здорового сердца, ЭКГ при блокаде левой и правой ножек пучка Гиса.

Предложен алгоритм формирования профиля решетки, представляющего собой усредненный и откалиброванный по длительности и амплитуде кардиоцикл, коэффициенты масштабирования которого находятся в пределах от 0 до 1.

Результаты работы могут быть использованы для формирования массивов данных с дифракционными дескрипторами и создания диагностических систем на основе искусственных нейронных сетей.

Библиографические ссылки

1. Berkaya SK, Uysal AK, Gunal ES, Ergin S, Gunal S, Gulmezoglu MB. A survey on ECG analysis. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2018;43:216–235. DOI: 10.1016/j.bspc.2018.03.003.
2. Rangayyan RM. *Biomedical signal analysis*. 2nd edition. Piscataway: IEEE Press; 2015. XLI, 672 p. (Akay M, editor. IEEE Press series in biomedical engineering). Co-published by the Wiley. DOI: 10.1002/9781119068129.
3. Aqil M, Jbari A, Bourouhou A. ECG signal denoising by discrete wavelet transform. *International Journal of Online and Biomedical Engineering*. 2017;13(9):51–68. DOI: 10.3991/ijoe.v13i09.7159.
4. Fedotov AA. Analysis of parameters for smoothing electrocardiographic signals. *Measurement Techniques*. 2020;62(12):1079–1083. DOI: 10.1007/s11018-020-01737-9.
5. Pan S-T, Hong T-P, Chen H-C. ECG signal analysis by using hidden Markov model. In: *2012 International conference on fuzzy theory and its applications; 2012 November 16–18; Taichung, Taiwan*. [S. l.]: IEEE; 2012. p. 288–293. DOI: 10.1109/IFUZZY.2012.6409718.
6. Venkatesan C, Karthigaikumar P, Paul A, Satheeskumaran S, Kumar R. ECG signal preprocessing and SVM classifier-based abnormality detection in remote healthcare applications. *IEEE Access*. 2018;6:9767–9773. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2794346.
7. Martis RJ, Acharya UR, Mandana KM, Ray AK, Chakraborty C. Application of principal component analysis to ECG signals for automated diagnosis of cardiac health. *Expert Systems with Applications*. 2012;39(14):11792–11800. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.04.072.
8. Gupta V, Saxena NK, Kanungo A, Kumar P, Diwania S. PCA as an effective tool for the detection of R-peaks in an ECG signal processing. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2022;13(5):2391–2403. DOI: 10.1007/s13198-022-01650-0.
9. Huang J, Chen B, Yao B, He W. ECG arrhythmia classification using STFT-based spectrogram and convolutional neural network. *IEEE Access*. 2019;7:92871–92880. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2928017.
10. Gliner V, Keidar N, Makarov V, Avetisyan AI, Schuster A, Yaniv Y. Automatic classification of healthy and disease conditions from images or digital standard 12-lead electrocardiograms. *Scientific Reports*. 2020;10:16331. DOI: 10.1038/s41598-020-73060-w.
11. Cai W, Hu D. QRS complex detection using novel deep learning neural networks. *IEEE Access*. 2020;8:97082–97089. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2997473.
12. Faust O, Shenfield A, Kareem M, San TR, Fujita H, Acharya UR. Automated detection of atrial fibrillation using long short-term memory network with RR interval signals. *Computers in Biology and Medicine*. 2018;102:327–335. DOI: 10.1016/j.combiomed.2018.07.001.
13. Alharbi NS, Jahanshahi H, Yao Q, Bekiros S, Moroz I. Enhanced classification of heartbeat electrocardiogram signals using a long short-term memory – convolutional neural network ensemble: paving the way for preventive healthcare. *Mathematics*. 2023;11(18):3942. DOI: 10.3390/math11183942.
14. Maly SV, Liventseva MM. Diffraction analysis of ECG. In: *Medicon and health telematics – 2004. Health in the information society. X Mediterranean conference on medical and biological engineering; 2004 July 31 – August 5; Ischia, Italy*. [S. l.]: [s. n.]; 2004. p. 120 (IFMBE proceedings; volume 6).
15. Palmer C. *Diffraction grating handbook*. 8th edition. [S. l.]: MKS Instruments; 2020. 251 p.