

АГРЕГИРОВАННАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И МЕТРИКИ ХАУСДОРФА

К. М. Демушкина

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
riabova.ksenija@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В работе рассматривается метод неинвазивной диагностики рака молочной железы с помощью диэлектрической импедансной спектроскопии. Предлагается способ формирования по результатам обследования методом диэлектрической импедансной спектроскопии агрегатированной оценки состояния молочной железы, которая повышает достоверность обнаружения новообразований. *Материалы и методы.* Для оценки результатов биоимпедансной спектроскопии был разработан следующий алгоритм: на основе результатов многократных измерений активной и реактивной составляющих комплексного сопротивления молочной железы в информативном частотном диапазоне 20 Гц – 20 МГц рассчитываются статистические параметры и метрика Хаусдорфа частотных характеристик составляющих относительной диэлектрической проницаемости, которые нормируются методом MinMax. Агрегатированная оценка состояния молочной железы формируется из нормированных оценок статистических параметров и метрик Хаусдорфа методом PCA/LOO. *Результаты.* В результате исследования были ранжированы три объекта согласно объему неоднородных включений. Полученные результаты совпали с экспериментальными данными. *Выводы.* Применение статистических параметров и метрики Хаусдорфа позволяет провести сравнительную оценку объектов с неоднородными включениями и на основе агрегатированной оценки определить динамику развития раковой клетки.

Ключевые слова: статистические параметры, метрика Хаусдорфа, диэлектрическая импедансная спектроскопия, рак молочной железы

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по гранту Государственного задания (Рег. № 124020200015-7).

Для цитирования: Демушкина К. М. Агрегатированная оценка результатов диэлектрической импедансной спектроскопии на основе статистических параметров и метрики Хаусдорфа // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 2. С. 147–155. doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-12

AGGREGATED EVALUATION OF DIELECTRIC IMPEDANCE SPECTROSCOPY RESULTS BASED ON STATISTICAL PARAMETERS AND HAUSDORFF METRIC

K.M. Demushkina

Penza State University, Penza, Russia
riabova.ksenija@yandex.ru

Abstract. *Background.* The paper considers a method for the noninvasive diagnosis of breast cancer using dielectric impedance spectroscopy. A method is proposed for the formation of an aggregated assessment of the condition of the breast based on the results of an examination by dielectric impedance spectroscopy, which increases the reliability of the detection of neoplasms. *Materials and methods.* To evaluate the results of bioimpedance spectroscopy, the following algorithm was developed: based on the results of multiple measurements of the active and reactive components of the complex resistance of the mammary gland in the informative frequency range of 20 Hz – 20 MHz, statistical parameters and the Hausdorff metric of the frequency characteristics of the components of the relative permittivity are calculated, which are normalized by the MINIM method. The aggregated breast condition assessment is formed from normalized estimates of statistical parameters and Hausdorff metrics using the PCA/LOO method. *Results.* As a result of the study, three objects were ranked according to the volume of heterogeneous inclusions. The results obtained coincided with the experimental data. *Conclusions.* The use of statistical parameters and the Hausdorff metric allows for a comparative assessment of objects with heterogeneous inclusions, and based on an aggregated assessment, to determine the dynamics of cancer cell development.

Keywords: statistical parameters, Hausdorff metric, dielectric impedance spectroscopy, breast cancer

Financing: the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the grant of the State Assignment (Reg. № 124020200015-7).

For citation: Demushkina K.M. Aggregated evaluation of dielectric impedance spectroscopy results based on statistical parameters and Hausdorff metric. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2025;(2):147–155. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-2-12

Введение

В настоящее время рак молочной железы является самым распространенным видом рака у женщин. По данным сведений Росстата за 2022 г., 23,8 % приходится на рак молочной железы [1]. На сегодняшний день наиболее информативными способами диагностики патологии молочных желез являются контрастная мультиспиральная компьютерная томография (МСКТ), позитронно-эмиссионная томография / компьютерная томография (ПЭТ/КТ) – это виды лучевой диагностики. За время лечения пациент проходит большое количество ПЭТ/КТ обследований, что негативно сказывается на состоянии организма. В связи с этим требуется разработка такого подхода, который бы обеспечивал постоянный мониторинг состояния пациента без воздействия рентгеновских лучей.

Таким методом может стать биоимпедансная спектроскопия (БИС) – диэлектрическая импедансная спектроскопия (ДИС). Метод ДИС исследует

различия параметров комплексного сопротивления здоровой и больной клеток [2]. Относительная диэлектрическая проницаемость раковых и здоровых клеток различна [3, 4], на этой основе строится анализ состояния пациента.

Материалы и методы

Биоимпедансная спектроскопия – это метод неинвазивного исследования, который исследует компоненты тела (вода, жир, мышцы), анализируя их электрические свойства. Она широко применяется во многих сферах медицины, позволяя расширять диагностические параметры с целью уточнения данных [5]. Основная идея применения данного метода к диагностике рака молочной железы состоит в следующем: применение датчика в форме сферы, исключая контакт электродов с кожей. Для проведения экспериментальных исследований будут использоваться фантомы и двухэлектродный датчик [6]. Основная задача ДИС состоит в исследовании кривых амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), которые сформированы из активной (R) и реактивной (X) составляющих относительной диэлектрической проницаемости. Исходные данные получены с помощью LCR-метра на частотах 20 Гц – 20 МГц. Таким образом, исходные данные для анализа представляют собой двумерный массив чисел с плавающей точкой: 200 отсчетов для компонента R и 200 отсчетов для компонента X , т.е. 400 элементов.

Для анализа результатов биоимпедансной спектроскопии используются общепринятые статистические параметры, а также метрика Хаусдорфа:

- MAE – средняя абсолютная ошибка;
- MAPE – средняя абсолютная ошибка в процентах;
- MSE – средняя квадратичная ошибка;
- RMSE – квадратный корень из среднеквадратичной ошибки;
- Метрика Хаусдорфа – расстояние между двумя подмножествами метрического пространства.

Для нормализации будет использован метод MinMax [7, 8], а для агрегации оценок – метод главных компонент (PCA) [9, 10] или LOO (Leave One Out) [11].

Укрупненная схема анализа кривых АЧХ представлена на рис. 1.

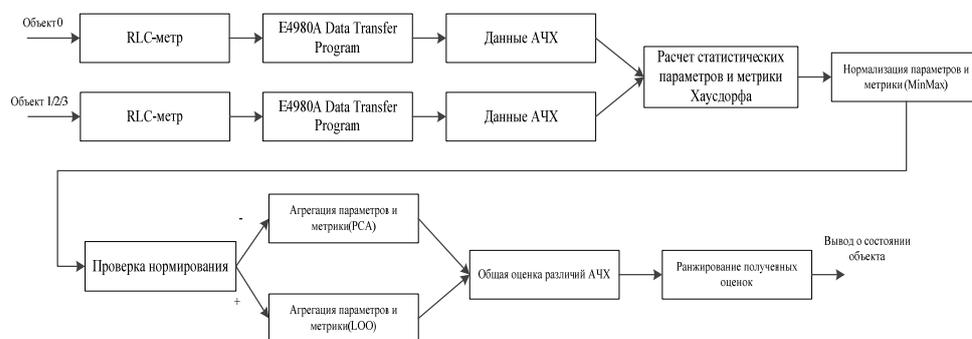


Рис. 1. Общая схема анализа статистических показателей ДИС

Для получения кривых АЧХ необходимо провести измерения с помощью аппаратно-программного комплекса, который представляет собой систему RLC-метра и программы E4980A для записи данных кривых АЧХ в Excel. Все исследуемые объекты сравниваются с контрольным объектом (объект 0), который представляет собой однородное тело. После этого с помощью

данных активного и реактивного сопротивлений относительной диэлектрической проницаемости рассчитываются статистические параметры и метрика Хаусдорфа для последующего определения состояния исследуемого объекта. Для нормирования статистических параметров и метрики Хаусдорфа используется метод MinMax. Если хотя бы один объект будет иметь по всем показателям оценку 0, то использовать метод PCA некорректно. Объект, имеющий по всем показателям оценку 0, будет считаться аномальным и при расчете главной компоненты будет иметь наихудшие значения. В данном случае лучше использовать агрегацию методом LOO. Затем в результате агрегации получается общая оценка состояния объекта на основе статистических параметров и метрики Хаусдорфа. Данная оценка позволит ранжировать объекты по возрастанию оценки, что соответствует возрастанию неоднородных включений в объект.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 приведены значения статистических параметров для трех объектов, которые представляют собой фантомы с неоднородными включениями: объект 1 – включение 1 см³; объект 2 – включение 2 см³; объект 3 – включение 3 см³. Под неоднородным включением будем понимать объект с отличающейся от эталонного объекта диэлектрической проницаемостью. Расчеты будут проводиться для активного (R) и реактивного (X) сопротивления, а также их общего значения.

Таблица 1

Результаты расчета статистических параметров для R

Параметры	Объекты		
	1	2	3
MAPE	8,472	212,845	210,033
MAE	229,333	3991,856	3930,687
RMSE	686,919	8478,198	8853,33
MSE	471 857,342	71 879 844,77	78 381 452,1
Hausdorff distance (manhattan)	5713,467	5748,433	63 479,833

По результатам расчета статистических параметров видно, что объект 1 по всем показателям лучше объектов 2 и 3. Однако разрозненность используемых параметров требует проведения нормализации для сведения имеющихся показателей к единым нормированным значениям.

С помощью метода MinMax была проведена процедура нормализации, результаты которой представлены в табл. 2.

По результатам нормирования получилось следующее: объект 1 по-прежнему остается лучшим. Важно отметить, что отклонение объекта 1 от объекта 2 по метрике Хаусдорфа незначительно, хотя остальные параметры показывают больший шаг. Ввиду того, что при нормализации некоторые параметры объектов могут отклоняться в большую или меньшую сторону, необходима агрегированная оценка всех имеющихся параметров.

Таблица 2

Результаты нормализации методом MinMax

Параметры	Объекты		
	1	2	3
MAPE	0,000	0,000	0,986
MAE	0,000	1	0,984
RMSE	0,000	0,954	1
MSE	0,000	0,917	1
Hausdorff distance (manhattan)	0,000	0,0006	1

Оценка будет даваться с помощью двух методов; в случае если доля объясненной дисперсии методом главных компонент составит меньше 90 %, то будет применяться метод LOO.

Расчеты показали, что доля объясненной дисперсии составила 86 %, а значит, метод главных компонент (PCA1) не в полной мере отражает дисперсию исходных данных. Более того, один из объектов имеет по всем показателям оценку 0, что делает его аномальным по отношению к другим объектам.

Результаты расчета агрегированной оценки методом LOO представлены в табл. 3.

Таблица 3

Общие оценки объектов (LOO)

Исключенный объект	Оценки оставшихся объектов	Среднее	Оценка исключенного объекта
Объект 1	[0,774; 0,994]	0,884	0
Объект 2	[0; 0,994]	0,497	0,774
Объект 3	[0,0; 0,774]	0,387	0,994

Таким образом, оценка объекта 1 составила 0,0, что делает его идеальным в выборке. При его исключении оставшиеся объекты (0-2 и 0-3) получают высокие оценки (~0,77 и ~0,99). Объект 2 имеет оценку 0,774 – это делает его худшим вариантом по сравнению с объектом 1. При его исключении объект 0-1 сохраняет оценку 0,0, а объект 3 остается худшим с оценкой 0,994. Соответственно, объект 3 имеет оценку 0,994, а при его исключении остальные объекты сохраняют свои значения.

Результаты расчета статистических параметров для оценки реактивного сопротивления представлены в табл. 4.

По результатам расчета статистических параметров видно, что объект 1 по всем показателям лучше объектов 2 и 3, результаты нормирования представлены в табл. 5.

Результаты нормирования следующие: объект 1 – лучший; объект 2 – чуть лучше объекта 3; объект 3 – самый худший. Поскольку объект 1 по всем оценкам показал 0, а доля объясненной дисперсии составила 99 %, рекомендуется использовать метод агрегации LOO для того, чтобы объект 1 не представлял собой аномальные значения (табл. 6).

Таблица 4

Результаты расчета статистических параметров для X

Параметры	Объекты		
	1	2	3
MAPE	7,701	207,864	224,973
MAE	1235,771	34 511,497	37 942,577
RMSE	1940,964	57 437,345	64 173,283
MSE	3 767 342,11	3 299 048 600,649	4 118 210 251
Hausdorff distance (manhattan)	10 213	349 213,333	392 643,333

Таблица 5

Результаты нормализации методом MinMax

Параметры	Объекты		
	1	2	3
MAPE	0,000	0,921	1
MAE	0,000	0,907	1
RMSE	0,000	0,891	1
MSE	0,000	0,800	1
Hausdorff distance (manhattan)	0,000	0,886	1

Таблица 6

Общие оценки объектов (LOO)

Исключенный объект	Оценки оставшихся объектов	Среднее	Оценка исключенного объекта
Объект 1	[0,881; 1]	0,940	0
Объект 2	[0; 1]	0,5	0,881
Объект 3	[0,0; 0,881]	0,441	1

Оценка объекта 1 составила 0, поэтому данный объект считается лучшим решением. При исключении объекта 1 остальные объекты сохраняют свои значения. Объект 2 имеет оценку 0,881, что выше объекта 1. При исключении объекта 2 значения оставшихся сохраняются. Аналогичная ситуация с объектом 3, только его оценка равна 1, что делает его худшим объектом в выборке.

Полученные результаты позволяют утверждать, что применение агрегированной оценки статистических параметров и метрики Хаусдорфа допускает сравнение объектов с неоднородными включениями. Нормирование имеющихся параметров делает оценку более объективной за счет приведения к единой единице измерения и обобщенному диапазону значений. Агрегированная оценка предоставляет возможность объективно оценить удаленность исследуемых объектов от однородного объекта.

Тем не менее в рассмотренном экспериментальном исследовании объекты не могли быть агрегированы с помощью метода PCA, что обусловлено возможной аномалией объекта 1 при агрегации. В то же время метод LOO при обобщении использует среднеарифметическое всех оценок объекта, что тоже не является объективным в полной мере.

Дальнейшие исследования в этой области могут быть направлены на поиск объективной оценки результатов биоимпедансометрии. Для этого могут быть использованы обученные нейросетевые модели или разработан алгоритм, включающий в себя известные способы нормирования и агрегации с учетом набора данных реактивной и активной составляющих относительной диэлектрической проницаемости.

Заключение

В результате исследования были получены статистические показатели и метрики Хаусдорфа для активной и реактивной составляющих диэлектрической проницаемости, их нормированные значения методом MinMax, а также агрегированная оценка по каждому объекту с помощью метода LOO. Полученные оценки показали, что объект 1 является наилучшим из имеющейся выборки неоднородных объектов, это позволяет утверждать, что его отклонение от однородного самое минимальное. Данный алгоритм позволяет оценить развитие раковой клетки в молочной железе, предоставляя врачам информацию о динамике заболевания. С перспективой развития персонализированной медицины пациенты смогут самостоятельно отслеживать изменения в раковой опухоли и своевременно реагировать на ухудшение ситуации.

Список литературы

1. Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 17.03.2025).
2. Jossinet J. The impedivity of freshly excised human breast tissue // *Physiol. Meas.* 1998. Vol. 19, № 1. P. 61–75.
3. Zarafshani A. Feasibility Test of Quantitative Assessment of Breast Density Based on Dielectric Impedance Spectroscopy // *JABB.* 2017. Vol. 2, № 6.
4. Grzegorzczuk T. M. [et al.]. Fast 3-D Tomographic Microwave Imaging for Breast Cancer Detection // *IEEE Trans. Med. Imaging.* 2012. Vol. 31, № 8. P. 1584–1592.
5. Safronov M. [et al.]. Mobile ECG Monitoring Device with Bioimpedance Measurement and Analysis // 2019 24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). Moscow, 2019. P. 375–380. doi: 10.1109/DSPA60853.2024.10510118
6. Kuzmin A., Baranov V. Bioimpedance spectroscopy of breast phantoms // *Journal of Electrical Bioimpedance.* 2025. Vol. 16, № 1. P. 50–55. doi: 10.2478/joeb-2025-0007
7. Косякова Н. В. Оценка регионального здравоохранения методом Minmax с целью изучения опыта организации лекарственного обеспечения больных с орфанными заболеваниями // *Здоровье и образование в XXI веке.* 2017. № 12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-regionalnogo-zdravoohraneniya-metodom-minmax-s-tselyu-izucheniya-opyta-organizatsii-lekarstvennogo-obespecheniya-bolnyh-s> (дата обращения: 09.06.2025).
8. Rodriguez A., Wright G., Emrich S., Clark P. L. MinMax: A versatile tool for calculating and comparing synonymous codon usage and its impact on protein folding // *Protein Sci.* 2018. № 27 (1). P. 356–362. doi: 10.1002/pro.3336

9. Haque Md. S. Hassan Md. R., Binmakhashen G. M. [et al.]. Breast Density Classification for Cancer Detection Using DCT-PCA Feature Extraction and Classifier Ensemble // *Intelligent Systems Design and Applications*. 2018. March. P. 702–711. doi: 10.1007/978-3-319-76348-4_68
10. Ibrahim S., Nazir S., Velastin S. Feature Selection Using Correlation Analysis and Principal Component Analysis for Accurate Breast Cancer Diagnosis // *Journal of Imaging*. 2021. Vol. 7. P. 225. doi: 10.3390/jimaging7110225
11. Yuan J., Li Y., Liu C., Zha X. Leave-One-Out Cross-Validation Based Model Selection for Manifold Regularization // *7th International Symposium on Neural Networks*. 2010. P. 457–464.

References

1. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki = Federal State Statistics Service*. (In Russ.). Available at: <https://rosstat.gov.ru/> (accessed 17.03.2025).
2. Jossinet J. The impedivity of freshly excised human breast tissue. *Physiol. Meas.* 1998;19(1):61–75.
3. Zarafshani A. Feasibility Test of Quantitative Assessment of Breast Density Based on Dielectric Impedance Spectroscopy. *JABB*. 2017;2(6).
4. Grzegorzczak T.M. et al. Fast 3-D Tomographic Microwave Imaging for Breast Cancer Detection. *IEEE Trans. Med. Imaging*. 2012;31(8):1584–1592.
5. Safronov M. et al. Mobile ECG Monitoring Device with Bioimpedance Measurement and Analysis. *2019 24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*. Moscow, 2019:375–380. doi: 10.1109/DSPA60853.2024.10510118
6. Kuzmin A., Baranov V. Bioimpedance spectroscopy of breast phantoms. *Journal of Electrical Bioimpedance*. 2025;16(1):50–55. doi: 10.2478/joeb-2025-0007
7. Kosyakova N.V. Assessment of regional healthcare using the Minmax method in order to study the experience of organizing drug provision for patients with orphan diseases. *Zdorov'e i obrazovanie v XXI veke = Health and education in the 21st century*. 2017;(12). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-regionalnogo-zdravoohraneniya-metodom-minmax-s-tselyu-izucheniya-opyta-organizatsii-lekarstvennogo-obespecheniya-bolnyh-s> (accessed 09.06.2025).
8. Rodriguez A., Wright G., Emrich S., Clark P.L. MinMax: A versatile tool for calculating and comparing synonymous codon usage and its impact on protein folding. *Protein Sci.* 2018;(27):356–362. doi: 10.1002/pro.3336
9. Haque Md.S. Hassan Md.R., Binmakhashen G.M. et al. Breast Density Classification for Cancer Detection Using DCT-PCA Feature Extraction and Classifier Ensemble. *Intelligent Systems Design and Applications*. 2018;March:702–711. doi: 10.1007/978-3-319-76348-4_68
10. Ibrahim S., Nazir S., Velastin S. Feature Selection Using Correlation Analysis and Principal Component Analysis for Accurate Breast Cancer Diagnosis. *Journal of Imaging*. 2021;7:225. doi: 10.3390/jimaging7110225
11. Yuan J., Li Y., Liu C., Zha X. Leave-One-Out Cross-Validation Based Model Selection for Manifold Regularization. *7th International Symposium on Neural Networks*. 2010:457–464.

Информация об авторах / Information about the authors

Ксения Михайловна Демушкина
аспирант,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: riabova.ksenija@yandex.ru

Kseniya M. Demushkina
Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
The author declares no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 02.04.2025

Поступила после рецензирования/Revised 03.06.2025

Принята к публикации/Accepted 17.06.2025