



DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2017.6.4>

УДК 519.23

ББК 2.2.22.172

ОБ УНИФИКАЦИИ МЕТОДА АНАЛИЗА ДАННЫХ МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОТЕРМОМЕТРИИ¹

Елена Алексеевна Мазепа

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
кафедры математического анализа и теории функций,
Волгоградский государственный университет
lmazepa@rambler.ru, matf@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Ольга Викторовна Гришина

Магистрант кафедры компьютерных наук и экспериментальной математики,
Волгоградский государственный университет
grishina.ov@mail.ru, kiem@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Владислав Викторович Левшинский

Магистрант кафедры математического анализа и теории функций,
Волгоградский государственный университет
vladi.lev.email@gmail.com, matf@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Хеди Мовладовна Сулейманова

Аспирант кафедры математического анализа и теории функций,
Волгоградский государственный университет
hedi.medi@mail.ru, matf@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. Одним из важных этапов создания эффективной консультативной интеллектуальной системы в медицине является математическое описание известных диагностических признаков, нахождение их количественных характеристик, а также выявление новых диагностических признаков. В работе представлен унифицированный метод анализа данных микроволновой радиотермометрии. В частности, предложен универсальный алгоритм формирования пространства высокоинформативных признаков, предназначенных для диагностики различных заболеваний на основе термометрических данных. Также приведена классификация диагностических признаков, описывающих различные аномалии поведения температурных полей.

Ключевые слова: интеллектуальный анализ данных, микроволновая радиотермометрия, консультативные интеллектуальные системы, высокоинформативные признаки.

Введение

Современные методы и возможности лечения очень многих видов заболеваний таковы, что достижение положительного результата возможно только при их обнаружении на максимально ранней стадии развития. Кроме того, известно, что многие патологические процессы меняют нормальное распределение температуры как на поверхности тела, так и внутри него. Более того, многим структурным изменениям ткани предшествует аномальное изменение температуры. Именно этот факт положен в основу метода диагностики – микроволновая радиотермометрия (РТМ-метод), который представляет исключительный интерес для ранней диагностики онкологических заболеваний и ряда других патологий.

Микроволновая радиотермометрия – это биофизический метод неинвазивного обследования, заключающийся в измерении внутренних и поверхностных температур тканей по интенсивности их теплового излучения, соответственно, в микроволновом (РТМ) и инфракрасном (ИК) диапазоне, с последующей их регистрацией в виде числовых данных.

Выделяют несколько направлений, где имеется определенный опыт использования РТМ-метода, а именно в маммологии (см.: [2; 3; 14]), флебологии (см.: [4; 8]), онкологии [6], хирургии [1] и в других областях медицины [12].

Цель исследования

Целью данной работы является унификация метода анализа информации, нахождение универсального алгоритма поиска высокоинформативных диагностических признаков по данным микроволновой радиотермометрии.

Методика обследования

Обобщая известные диагностические методики, основанные на данных микроволновой радиотермометрии, отметим, что обследование пациентов проводится посредством последовательного измерения кожной (ИК) и внутренней (РТМ) температур в симметричных точках измеряемого парного или непарного органов. Точки измерения выбираются исходя из анатомического строения исследуемого органа, кровотока и т. д. В каждой области медицины зафиксированы рабочие точки, которые позволяют построить характеристики, описывающие физиологическое состояние исследуемого органа. В ходе исследований и анализа данных специалистами были выявлены качественные признаки диагностики различных заболеваний, в том числе и рака в разных областях медицины [12]. При наличии заболевания в исследуемом органе отмечаются следующие особенности поведения температурных полей: повышенная величина термоасимметрии между одноименными точками парного органа; повышенный разброс температур между отдельными точками в пораженном органе; повышенная дисперсия разности температур между парным органом и другие.

Одним из важных этапов создания эффективной консультационной интеллектуальной системы является математическое описание выявленных признаков, нахождение их количественных характеристик, а также выявление новых диагностических признаков, основанных на математической формализации исследуемых процессов. Заметим, в задачах медицинской диагностики объектами являются пациенты, а в качестве признаков выступают показатели состояния их здоровья. Различают следующие типы признаков: количественные – это признаки, измеренные в некоторой числовой шкале; качественные (порядковые, балльные) – признаки, используемые для выражения терминов и понятий, не имеющих числовых значений (например, тяжесть заболевания). Учитывая и анализируя накопленные результаты (см.: [4; 5; 7; 8; 10; 12; 13]) за последние несколько лет, попытаемся классифицировать существующие термометрические диагностические признаки на несколько групп.

1. *Группа признаков, которая содержит качественное и количественное описание диагностических признаков для парных органов.*

Данный набор признаков характеризует асимметрию температурных полей парных органов. Представленный класс признаков исходит из гипотезы о «зеркальной» симметрии температурных полей правого и левого органа здоровых пациентов. Данная гипотеза используется при анализе термометрических данных практически всех парных органов человека.

1. Повышенное значение разности температур между одноименными точками правого и левого органа. В качестве характеристик, описывающих этот эффект, могут быть использованы функции вида

$$|t_{i,np} - t_{i,л}|, \text{ или } t_{i,np} - t_{i,л},$$

где $t_{i,np}$ и $t_{i,л}$ – температуры в i -х точках правого и левого органа.

2. Повышенное среднеквадратичное значение разностей температур между одноименными точками правого и левого исследуемого органа:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(t_{i,np} - t_{i,л})^2}{n}},$$

где n – количество измеряемых точек.

3. Разница средних значений температур в «зеркально-симметрично» расположенных подобластях правого и левого исследуемого органа, например:

$$\left| \frac{t_{i-1,PTM,np} + t_{i,PTM,np} + t_{i(\text{mod } n)+1,PTM,np}}{3} - \frac{t_{i-1,PTM,л} + t_{i,PTM,л} + t_{i(\text{mod } n)+1,PTM,л}}{3} \right|, i = 1, \dots, n.$$

4. Разница колебаний температур в «зеркально-симметрично» расположенных подобластях пораженных органов, например:

$$\left| (\max_{i=1,n} t_{i,PTM} - \min_{i=1,n} t_{i,PTM})_{np} - (\max_{i=1,n} t_{i,PTM} - \min_{i=1,n} t_{i,PTM})_{л} \right|,$$

где $t_{i,PTM}$ – глубинные температуры в i -й точке исследуемого органа. Аналогичную формулу можно записать, используя кожные температуры в i -й точке исследуемого органа $t_{i,ИК}$.

5. Разница среднеквадратичных отклонений температур парного органа:

$$\left| \left(\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(t_{i,PTM} - t_{PTM,cp})^2}{n}} \right)_{np} - \left(\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(t_{i,PTM} - t_{PTM,cp})^2}{n}} \right)_{л} \right|.$$

Обобщая, можно отметить, что асимметрия полей температур парных органов может быть описана различными функциями вида [7]

$$g(f(t_{i,np}, \dots, t_{n,np}) - f(t_{i,л}, \dots, t_{n,л})),$$

где $f(t_{i,np}, \dots, t_{n,np})$ – значение функции температур для точек t_i, \dots, t_n правого парного органа; $f(t_{i,л}, \dots, t_{n,л})$ – значение аналогичной функции температур для точек t_i, \dots, t_n левого парного органа, а $g(x)$ – некоторая функция одного переменного.

Следующие группы содержат описание диагностических признаков как для парных, так и непарных органов.

II. *Группа признаков, характеризующих повышенный разброс температур в пораженном органе.*

1. Повышенное среднеквадратичное отклонение температур:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(t_i - t_{cp})^2}{n}},$$

где $t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$, t_i – температура в i -й точке парного или непарного органа.

2. Повышенный разброс температур между отдельными точками в пораженном органе:

$$t_{cp} - t_i.$$

3. Повышенные средние значения температур соседних точек вплоть до средней температуры исследуемого органа, то есть функции вида:

$$t_{cp} - \frac{t_i + t_{i(\text{mod } n)+1} + t_{i(\text{mod } n)+2}}{3} \text{ и т. п.}$$

Крайне важным элементом методики микроволновой радиотермометрии является изучение изменения температуры по различным направлениям. Отметим, что наиболее значимые направления определяются исходя из анатомо-физиологического строения исследуемого органа. При этом медики выделяют температуры в особых точках или в подобластях (например, в маммологии температура в соске, во флебологии – в подколенной ямке) и далее исследуется изменение температурного поля в направлениях, исходящих из этих точек или центров подобластей.

III. *Группа признаков, характеризующих аномальное изменение температур по различным направлениям.*

1. Перепад температур между верхней и нижней частями пораженного органа, так называемый «осевой градиент». В качестве примера можно привести одну из функций, описывающих «осевой градиент» (ОГ) на голени (рис. 1) [4; 8].

$$g^{ax}(t_1, \dots, t_n) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 t_i - \frac{1}{3} \sum_{i=10}^{12} t_i,$$

где в первой сумме стоят температуры в трех точках подколенной области, а во второй сумме – температуры в трех точках на щиколотке.

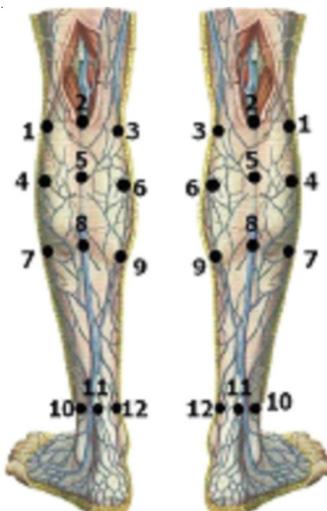


Рис. 1. Точки измерения температур

2. Колебания относительно центральной оси пораженного органа – «латерально-медиальный градиент» (ЛМГ). Например, во флебологии используют функцию вида

$$g^{lm}(t_1, \dots, t_{12}) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 t_{3i-2} - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 t_{3i},$$

где в первой сумме стоят температуры в точках внешней поверхности голени, а во второй сумме – температуры в точках внутренней поверхности голени (см. рис. 1).

3. Радиальная симметрия. Например, в диагностике рака молочной железы значимым параметром является величина $t_0 - t_i$, которая представляет собой разностный аналог производной в радиальном направлении – «радиальный градиент» (рис. 2).

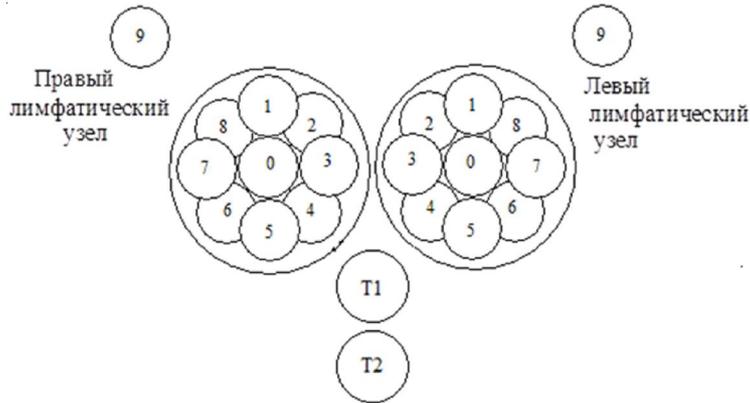


Рис. 2. Точки измерения температур

4. К данной группе признаков также относятся признаки, характеризующие соотношение кожной и глубинной температур. А именно аномальное значение разности между кожной и глубинной температурами точки пораженного органа – «внутренний градиент»: $t_{i,PTM} - t_{i,ИК}$. Данная величина $t_{i,PTM} - t_{i,ИК}$ является разностным аналогом производной во внутреннем направлении.

IV. Группа признаков, основанных на разностных аналогах вторых производных функции температур.

За последние годы было построено несколько математических моделей, описывающих поведение температурных полей исследуемых органов с помощью уравнений в частных производных второго порядка (см.: [11; 12]). Таким образом, для обнаружения аномалий температурных полей пациентов может оказаться интересным изучение поведения разностных аналогов вторых производных функции температур.

Наиболее яркий представитель данной группы признаков был обнаружен в диагностике рака молочных желез. А именно, серьезный эффект дало исследование функций вида:

$$\nabla(t_0 - f(t_1, \dots, t_n)) = t_{0,PTM} - f(t_{1,PTM}, \dots, t_{n,PTM}) + t_{0,ИК} - f(t_{1,ИК}, \dots, t_{n,ИК}).$$

Заметим, что в данном случае было получено решение особенно важной, хотя и достаточно сложной задачи – выявление новых медицинских знаний.

Еще раз отметим, что набор функций из первых трех групп представляет собой расширенное описание известных качественных признаков и получен на базе уже известных медицинских фактов. Функции из четвертой группы получены на основе известных в математической физике уравнений в частных производных и представляют собой новое медицинское знание.

Характеристические и высокоинформативные признаки

Введем следующие обозначения. Пусть $t_j^i, i = 1, \dots, n$ – температуры i -й точки правого органа j -го пациента в диапазоне РТМ; $t_j^i, i = n + 1, \dots, 2n$ – температура $[i - (n + 1)]$ точки правого органа j -го пациента в диапазоне ИК; $t_j^i, i = 2n + 1, \dots, 3n$ – температура $[i - (2 + n)]$ точки левого органа j -го пациента в диапазоне РТМ; $t_j^i, i = 3n + 1, \dots, 4n$ – температура $[i - (3n + 1)]$ точки левого органа j -го пациента в диапазоне ИК.

Тогда обучающую выборку можно представить в виде матрицы

$$S = \begin{pmatrix} t_i^1 & \dots & t_{4n}^1 \\ M & O & M \\ t_i^k & \dots & t_{4n}^k \\ t_i^{k+1} & \dots & t_{4n}^{k+1} \\ M & O & M \\ t_i^N & K & t_{4n}^N \end{pmatrix},$$

где t_j^i при $j = 1, \dots, k$ – температуры измеряемых органов класса «Здоровые», t_j^i при $j = k + 1, \dots, N$ – температуры измеряемых органов пациентов класса «Больные».

Пусть f^q – q -я исследуемая функция, рассматриваемая на множестве векторов $\Omega_q = \{(t_1^j, \dots, t_{4n}^j)\}$, где $j = 1, \dots, N$. Обозначим $f_j^q = f^q(t_1^j, \dots, t_{4n}^j)$.

Пусть X_a – некоторое множество числовой прямой \mathbb{R} такой, что $f_j^q \in X_a$ для некоторых $j = k + 1, \dots, N$ и $f_j^q \in \mathbb{R} \setminus X_a$ для всех $j = 1, \dots, k$. «Характерной» областью множества значений f^q будем называть такое подмножество числовой прямой X , что $X_a \in X$ для всех возможных значений индекса a , но при этом $f_j^q \in \mathbb{R} \setminus X_a$ для всех $j = 1, \dots, k$.

Характеристическим признаком будем называть пару (f^q, X) , где X – «характерная» область множества значений f^q .

Алгоритм поиска характеристических признаков заключается в нахождении «максимальных» подобластей, которым принадлежат значения функции, соответствующие исследуемым органам одного класса, но не принадлежат значения функции, соответствующие исследуемым органам другого. Отметим также, что зачастую удобнее вместо всей «характерной» области множества значений f^q рассматривать ее связные подмножества.

Для оценки эффективности отдельных элементов признакового пространства и алгоритмов классификации, в частности, и диагностических методов в медицине, традиционно используются следующие показатели.

Прежде всего чувствительность (*Sensitivity*). Данный показатель вычисляется по формуле:

$Sens = \frac{TP}{TP + FN}$, где TP – количество органов класса «Больные», которые были классифицированы как «Больные»; FN – количество органов класса «Больные», которые не были классифицированы как «Больные».

Во-вторых, специфичность (*Specificity*). Данный показатель вычисляется по формуле:

$Spec = \frac{TN}{TN + FP}$, где TN – количество органов класса «Здоровые», которые не были классифицированы как «Больные»; FP – количество органов класса «Здоровые», которые были классифицированы как «Больные».

Также используется достоверность (*Accuracy*), которая вычисляется по формуле:

$$Acc = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN}.$$

Отметим, что важнейшими и наиболее часто употребляемыми характеристиками диагностических методов считают чувствительность и специфичность. Для характеристических признаков, очевидно, выполнено $Spec = 1$.

Представим некоторые характеристические признаки в диагностике заболеваний молочных желез с лучшими показателями истинно-положительных результатов диагностики (см. табл. 1).

Очевидно, что характеристические признаки в состоянии обнаружить лишь достаточно серьезные аномалии поведения температурных полей. При использовании набора наиболее значимых характеристических признаков было обнаружено только 43 % молочных желез класса «Больные». При попытке классификации больных раком молочных желез использование только характеристических признаков дало еще более низкую эффективность [7].

Таблица 1

Характеристические признаки в маммологии

Признак	Диапазон	Sens	Acc
$\nabla \left(t_0 - \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3} \right), (-\infty, -1.0)$		0.08	0.27
$t_{1,n} - t_{1,n}, (-\infty, -1.0)$	РТМ	0.07	0.26
$\sqrt{\sum_{i=0}^8 \frac{(t_{i,n} - t_{i,n})^2}{9}}, (1.08, \infty)$	РТМ	0.07	0.26

По описанному выше алгоритму был также осуществлен поиск характеристических признаков в заболеваниях нижних конечностей. Представим некоторые из наиболее значимых элементов данного пространства признаков (табл. 2).

Таблица 2

Характеристические признаки во флебологии

Признак	Диапазон	Sens	Acc
$\sqrt{\sum_{i=0}^{12} \frac{(t_{i,n} - t_{i,n})^2}{12}}, (0.66, \infty)$	ИК	0.6	0.67
$\frac{t_{10} + t_{11} + t_{12}}{3} - t_2, (0.07, \infty)$	ИК	0.39	0.49
$\max t_{i,n} - \max t_{i,n}, (-\infty, -0.40)$	ИК	0.36	0.47

Далее, учитывая невозможность построения эффективного алгоритма классификации исключительно на базе характеристических признаков, необходимо построить пространство высокоинформативных признаков. Дадим основные определения.

Высокоинформативным признаком будем называть тройку (f^q, V, X) , где f^q – функция, описывающая поведение температурных полей, $V = I(f^q, X)$ – информативность признака; X – «информативная» область множества значений функции f^q .

Определим указанные характеристики. Под информативностью традиционно понимается количественный параметр, определяющий, насколько хорошо закономерность описывает различия между искомой и отделяемой группами.

Определим указанные характеристики. Под информативностью традиционно понимается количественный параметр, определяющий, насколько хорошо закономерность описывает различия между искомой и отделяемой группами.

В качестве информативности $I(f^q, X)$ в данном исследовании использовались следующие характеристики.

Статистическая информативность, которая вычисляется по формуле

$$ST(f^q, X) = -\ln \left(\frac{C_k^h C_{n-k}^s}{C_{k+(n-k)}^{h+s}} \right),$$

где n – количество векторов с температурными данными пациентов в обучающей выборке; k – количество векторов с температурными данными пациентов класса «Здоровые» в обучающей выборке; h – количество пациентов класса «Здоровые», для которых $f^q \in X$, а s – количество пациентов класса «Больные», для которых $f^q \in X$.

Эвристическая информативность, вычисляемая по формуле

$$HR(f^q, X) = \frac{\max \left\{ \frac{k}{h}, \frac{n-k}{s} \right\}}{\min \left\{ \frac{k}{h}, \frac{n-k}{s} \right\}}.$$

Энтропийная информативность, вычисляемая по формуле

$$EN(f^q, X) = \left(\frac{k}{k+(n-k)}, \frac{n-k}{k+(n-k)} \right) - \frac{k+(n-k)-h-s}{k+(n-k)} H \left(\frac{k-h}{k+(n-k)-h-s}, \frac{(n-k)-s}{k+(n-k)-h-s} \right),$$

где $H(q_0, q_1) = -q_0 \log_2 q_0 - q_1 \log_2 q_1$ – математическое ожидание количества информации.

Отметим, что при формировании признакового пространства вполне возможно использование и многих других видов функций информативности. Также вполне разумным выглядит использование различных вариантов средних из них. В частности, в данной работе использовались следующие их варианты.

Комбинированная информативность, которая вычисляется по формуле

$$CI(f^q, X) = \sqrt[n]{I_1(f^q, X) I_2(f^q, X) \dots I_n(f^q, X)},$$

где I_1, I_2, \dots, I_n – другие информативности.

Среднее гармоническое информативностей, которое вычисляется по формуле

$$HM(f^q, X) = \frac{n}{\frac{1}{I_1(f^q, X) + \dots + I_n(f^q, X)}}.$$

Далее пусть

$$I_s = \sup_{X^a} I(f^q, X^a),$$

где X^a – все возможные подобласти числовой прямой, на которых указанная информативность имеет смысл. «Информативной» областью множества значений функции f^q будем называть подмножество числовой прямой, обеспечивающее достижение (или приближение с заданной точностью) величины I_s . В качестве информативности $I(f^q, X^a)$ может выступать любая из описанных выше величин.

Для исследуемого органа признак (f^q, V, X) считается выполненным, если $f^q \in X$.

Некоторые примеры высокоинформативных признаков, предназначенных для диагностики заболеваний молочных желез, приведены ниже.

Таблица 3

Высокоинформативные признаки в маммологии

Признак	Диапазон	Sens	Spec	Acc
$t_{1,n} - t_{1,n}, (-\infty, -0.9)$		0.14	0.99	0.31
$\nabla (t_0 - \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}), (-\infty, -0.89)$	ИК	0.13	0.99	0.30
$\nabla t_0 - t_9, (-\infty, -1.49)$		0.11	0.99	0.29
$t_0 - t_6, (1.4, \infty)$	РТМ	0.1	0.99	0.28
$t_{cp} - \frac{t_4 + t_5 + t_6 + t_7}{4}, (0.3, \infty)$	РТМ	0.1	0.99	0.28

В данном случае при поиске использовался показатель комбинированной информативности – статистической и эвристической.

Аналогично поиск высокоинформативных признаков производился и во флебологии. Некоторые из них представлены в таблице 4. Как и выше, был использован показатель комбинированной информативности – статистической и эвристической.

Таблица 4

Высокоинформативные признаки во флебологии

Признак	Диапазон	<i>Sens</i>	<i>Spec</i>	<i>Acc</i>
$\sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{12} (t_{i,п} - t_{i,н})^2}{12}}$ (0.51, ∞)	ИК	0.75	0.88	0.77
$\frac{t_{10} + t_{11} + t_{12}}{3} - t_4$ (-0.16, ∞)	ИК	0.57	0.94	0.63
$\frac{t_{10} + t_{11} + t_{12}}{3} - t_5$ (-0.06; inf)	ИК	0.53	0.94	0.60
$t_{cp} - t_4$ (0.18, ∞)	ИК	0.51	0.94	0.58
$t_2 - t_{12}$ (-inf; 0.10)	ИК	0.50	0.94	0.57

Алгоритм классификации

Для проверки значимости найденных диагностических признаков используем достаточно простой алгоритм классификации (см., например, [5]).

На первом этапе проводилась проверка выполнения характеристических признаков. При этом, если выполнен хотя бы один из них, то исследуемый орган относится к классу «Больные».

На втором этапе проверяется выполнение высокоинформативных признаков для неклассифицированных на первом этапе органов. При этом для каждого исследуемого органа считается сумма информативностей выполненных признаков. Если найденная сумма выше некоторого критического значения (будем называть его критерием классификации), то исследуемый орган относится к классу «Больные», в противном случае – к классу «Здоровые». Далее приводится сравнительная таблица эффективности диагностики с наборами признаков как в маммологии, так и во флебологии. Учитывая, что в медицинской диагностике наиболее значимыми являются параметры *Sens* и *Spec*, было решено в качестве критерия эффективности данного алгоритма классификации использовать среднее гармоническое между *Sens* и *Spec*:

$$D = 2 \frac{Sens * Spec}{Sens + Spec}$$

Ниже приведены результаты расчетов для случая, когда обучающая выборка составляла 62 %, а тестовая – 38 % от всей имеющейся базы данных (см. табл. 5 и 6).

Таблица 5

Результаты работы алгоритма классификации в маммологии

Информативность	Выборка	<i>Sens</i>	<i>Spec</i>	<i>Acc</i>	<i>D</i>
Среднее гармоническое статистической, энтропийной, эвристической	Обучающая	0,87	0,86	0,87	0,86
	Тестовая	0,84	0,59	0,79	0,69
Среднее гармоническое энтропийной, эвристической	Обучающая	0,87	0,77	0,85	0,82
	Тестовая	0,82	0,43	0,74	0,57
Комбинированная статистической, энтропийной	Обучающая	0,77	0,67	0,75	0,72
	Тестовая	0,79	0,45	0,72	0,57

Таблица 6

Результаты работы алгоритма классификации во флебологии

Информативность	Выборка	<i>Sens</i>	<i>Spec</i>	<i>Acc</i>	<i>D</i>
Статистическая	Обучающая	0,95	0,8	0,92	0,87
	Тестовая	0,94	0,57	0,87	0,73
Комбинированная статистическая, эвристическая и энтропийная	Обучающая	0,94	0,85	0,92	0,89
	Тестовая	0,92	0,43	0,83	0,63
Среднее гармоническое энтропийной и эвристической	Обучающая	0,89	0,9	0,89	0,9
	Тестовая	0,97	0,29	0,85	0,53

Заключение

Таким образом, в работе была произведена унификация метода анализа информации, получаемой с помощью микроволновой радиотермометрии, и алгоритмов поиска диагностических признаков. Предлагаемый подход позволяет получить новые медицинские знания об особенностях поведения температурных полей пациентов. А именно, с помощью исследования разностных аналогов вторых производных функции температур по различным направлениям была обнаружена целая группа качественно новых диагностических признаков.

Применение на основе полученных признаков более мощных алгоритмов классификации (например, нейронных сетей) вполне может улучшить результаты классификации экспертной системы. Однако обоснование получаемых результатов будет производиться на основе полученных характеристических и высокоинформативных признаков.

Отдельно заметим, что реальная чувствительность и специфичность консультационной системы должна выявляться путем опытной эксплуатации, то есть более интересным является вопрос, насколько полученные признаки улучшат диагностику, осуществляемую специалистами.

ПРИМЕЧАНИЕ

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-47-02475-р_поволжье_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдошин, В. П. Глубинная радиотермометрия в диагностике и оценке эффективности лечения урологических заболеваний / В. П. Авдошин, М. И. Андрюхин, В. Н. Ширшов. – М. : Квантовая медицина, 2007. – 209 с.
2. Авраменко, Г. В. Использование радиотермометрии в скрининге непальпируемых новообразований молочных желез / Г. В. Авраменко // Вестник рентгенологии и радиологии. – 2007. – № 5. – С. 11–14.
3. Веснин, С. Г. Современная микроволновая радиотермометрия молочных желез / С. Г. Веснин, А. М. Каплан, Р. С. Авакян // Медицинский альманах. – 2008. – № 3. – С. 82–87.
4. Замечник, Т. В. Комбинированная радиотермометрия как метод исследования венозного кровообращения нижних конечностей / Т. В. Замечник, С. И. Ларин, А. Г. Лосев. – Волгоград : Изд-во ВолгГМУ, 2015. – 252 с.
5. Интеллектуальный анализ многомерных термометрических данных в медицинской диагностике / А. Г. Лосев, А. В. Зенович, О. А. Бочкарев, В. В. Левшинский // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1, Математика. Физика. – 2016. – № 5 (36). – С. 150–161.
6. Козлов, С. В. Сравнительный анализ методов преинвазивной диагностики меланомы кожи / С. В. Козлов // Саратовский научно-медицинский журнал. – 2013. – № 9 (1). – С. 88–91.
7. Лосев, А. Г. Интеллектуальный анализ данных микроволновой радиотермометрии в диагностике рака молочной железы / А. Г. Лосев, В. В. Левшинский // Математическая физика и компьютерное моделирование. – 2017. – № 5 (342).
8. Математическая модель верификации ранних рецидивов варикозной болезни по данным радиотермометрии / Т. А. Ставров, Е. В. Букина, А. Г. Лосев, Т. В. Замечник // Вестник новых медицинских технологий. – 2013. – Т. 20, № 2. – С. 14–18.
9. Моисеенко, В. М. Кинетические особенности роста рака молочной железы и их значение для раннего выявления опухоли / В. М. Моисеенко, В. Ф. Семиглазов // Маммология. – 1997. – № 3. – С. 3–11.
10. Мустафин, Ч. Н. Опыт использования радиотермометрии в диагностике злокачественных опухолей молочной железы / Ч. Н. Мустафин // Российский онкологический журнал. – 2009. – № 4. – С. 36–42.
11. Поляков, М. В. Математическое моделирование пространственного распределения радиационного поля в биоткани: определение яркостной температуры для диагностики / М. В. Поляков, А. В. Хоперсков // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1, Математика. Физика. – 2016. – № 5 (36). – С. 73–84.
12. Проблемы измерения и моделирования тепловых и радиационных полей в биотканях: анализ данных микроволновой радиотермометрии / А. Г. Лосев, А. В. Хоперсков, А. С. Астахов, Х. М. Сулейманова

// Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1, Математика. Физика. – 2015. – № 6. – С. 31–71.

13. Сулейманова, Х. М. Методика оптимизации количества диагностических признаков заболеваний молочных желез на основе термометрических данных / Х. М. Сулейманова, Е. А. Мазепа // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1, Математика. Физика. – 2016. – Вып. 6 (37). – С. 128–140.

14. Barrett, A. H. Microwave Thermography in the Detection of Breast Cancer / A. H. Barrett, P. C. Myers, N. L. Sadowsky // Am. J. Roentgenol. – 1980. – № 34 (2). – P. 365–368.

REFERENCES

1. Avdoshin V.P., Andryukhin M.I., Shirshov V.N. *Glubinnaya radiotermometriya v diagnostike i otsenke effektivnosti lecheniya urologicheskikh zabolevaniy* [Deep Radio Thermometry in the Diagnosis and Evaluation of the Effectiveness of Urological Diseases Treatment]. Moscow, Kvantovaya meditsina Publ., 2007. 209 p.

2. Avramenko G.V. Ispolzovanie radiotermometrii v skrininge nepalpiruemykh novoobrazovaniy molochnykh zhelez [The Use of Radio Thermometry in Screening Nonpalpable Tumors of Mammary Glands]. *Vestnik rentgenologii i radiologii*, 2007, no. 5, pp. 11-14.

3. Vesnin S.G., Kaplan A.M., Avakyan R.S. Sovremennaya mikrovolnovaya radiotermometriya molochnykh zhelez [Advanced Microwave Radio Thermometry of Mammary Glands]. *Meditsinskiy almanakh*, 2008, no. 3, pp. 82-87.

4. Zamechnik T.V., Larin S.I., Losev A.G. *Kombinirovannaya radiotermometriya kak metod issledovaniya venoznogo krovoobrashcheniya nizhnikh konechnostey* [Combined Radio Thermometry as a Method of Investigating of Venous Circulation of the Lower Limbs]. Volgograd, Izd-vo VolgGMU, 2015. 252 p.

5. Losev A.G., Zenovich A.V., Bochkarev O.A., Levshinskiy V.V. Intellektualnyy analiz mnogomernykh termometricheskikh dannykh v meditsinskoj diagnostike [Intellectual Analysis of Multidimensional Thermometric Data in Medical Diagnostics]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1, Matematika. Fizika* [Science Journal of Volgograd State University. Mathematics. Physics], 2016, no. 5 (36), pp. 150-161.

6. Kozlov S.V. Sravnitelnyy analiz metodov preinvazivnoy diagnostiki melanomy kozhi [Comparative Analysis of Methods of Preinvasive Diagnosis of Skin Melanoma]. *Saratovskiy nauchno-meditsinskiy zhurnal*, 2013, no. 9 (1), pp. 88-91.

7. Losev A.G., Levshinskiy V.V. Intellektualnyy analiz dannykh mikrovolnovoy radiotermometrii v diagnostike raka molochnoy zhelezy [Intelligent Analysis of Microwave Radio Thermometry Data in the Diagnosis of Breast Cancer]. *Matematicheskaya fizika i kompyuternoe modelirovanie*, 2017, no. 5 (342) (in print).

8. Stavrov T.A., Bukina E.V., Losev A.G., Zamechnik T.V. Matematicheskaya model verifikatsii rannikh retsidivov varikoznoy bolezni po dannykh radiotermometrii [Mathematical Model of Verification of Early Recurrences of Varicose Vein Disease According to Radio Thermometry Data]. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy*, 2013, vol. 20, no. 2, pp. 14-18.

9. Moiseenko V.M., Semiglazov V.F. Kineticheskie osobennosti rosta raka molochnoy zhelezy i ikh znachenie dlya rannego vyyavleniya opukholi [Kinetic Features of Breast Cancer Growth and Their Importance for Early Detection of Tumor]. *Mammologiya*, 1997, no. 3, pp. 3-11.

10. Mustafin Ch.N. Opyt ispolzovaniya radiotermometrii v diagnostike zloka-chestvennykh opukholey molochnoy zhelezy [Experience in the Use of Radio Thermometry in the Diagnosis of Malignant Tumors of Breast]. *Rossiyskiy onkologicheskij zhurnal*, 2009, no. 4, pp. 36-42.

11. Polyakov M.V., Khoperskov A.V. Matematicheskoe modelirovanie prostranstvennogo raspredeleniya radiatsionnogo polya v biotkani: opredelenie yarkostnoy temperatury dlya diagnostiki [Mathematical Modeling of Radiation Field in Biological Tissue: the Definition of the Brightness Temperature for Diagnosis]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1, Matematika. Fizika* [Science Journal of Volgograd State University. Mathematics. Physics], 2016, no. 5 (36), pp. 73-84.

12. Losev A.G., Khoperskov A.V., Astakhov A.S., Suleymanova Kh.M. Problemy izmereniya i modelirovaniya teplovykh i radiatsionnykh poley v bio-tkanyakh: analiz dannykh mikrovolnovoy radiotermometrii [Problems of Measurement and Modeling of Thermal and Radiation Fields in Biological Tissues: Analysis of Microwave Radio Thermometry Data]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1, Matematika. Fizika* [Science Journal of Volgograd State University. Mathematics. Physics], 2015, no. 6, pp. 31-71.

13. Suleymanova Kh.M., Mazepa E.A. Metodika optimizatsii kolichestva diagnosticheskikh priznakov zabolevaniy molochnykh zhelez na osnove termometricheskikh dannykh [Technique of optimization of the number of diagnostic signs of breast diseases on the basis of thermometric data]. *Vestnik Volgogradskogo*

gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1, Matematika. Fizika [Science Journal of Volgograd State University. Mathematics. Physics], 2016, no. 6 (37), pp. 128-140.

14. Barrett A.H., Myers P.C., Sadowsky N.L. Microwave Thermography in the Detection of Breast Cancer. *Am. J. Roentgenol.*, 1980, no. 34 (2), pp. 365-368.

THE UNIFICATION OF MICROVAWE RADIO THERMOMETRY METHOD

Elena Alekseevna Mazepa

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher,
Department of Mathematical Analysis and Function Theory,
Volgograd State University
lmazepa@rambler.ru, matf@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Olga Viktorovna Grishina

Master Student, Department of Computer Science and Experimental Mathematics,
Volgograd State University
grishina.ov@mail.ru, kiem@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Vladislav Viktorovich Levshinsky

Master Student, Department of Mathematical Analysis and Function Theory,
Volgograd State University
vladi.lev.email@gmail.com, matf@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Khedi Movladovna Suleymanova

Postgraduate Student, Department of Mathematical Analysis and Function Theory,
Volgograd State University
hedi.medi@mail.ru, matf@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Abstract. Mathematical description of the diagnostic features, finding their quantitative characteristics, as well as identifying new diagnostic features are very important stages in creating an effective intelligent advisory system. The paper presents a unification method of analyzing information and finding a universal algorithm for searching highly informative diagnostic features from the data of microwave radiometry. The classification of thermometric diagnostic features indicating different anomalies of temperature fields have been classified.

Modern methods and possibilities of treating many types of diseases are such that achieving a positive result is possible only if they are detected at the earliest possible stage of development. In addition, it is known that many pathological processes change the normal temperature distribution both on the surface of the body and inside it. Moreover, many structural changes in tissue are preceded by an abnormal temperature change. This fact is the basis of the diagnostic method – microwave radio thermometry (RTM-method), which is of exceptional interest for the early diagnosis of cancer and a number of other pathologies.

The proposed approach allows to obtain new medical knowledge regarding the behavior of the temperature fields of patients. Namely, the study of differential analogues of second

derivatives of temperature's functions has discovered a whole group of qualitatively new diagnostic signs. The application may well improve the results of classification of the expert system. However, the justification of the results will be based on high information characteristics. The authors also note that the real sensitivity and specificity of the advisory system should be identified through trial operation, i.e. more interesting is the question of how much they improve the diagnostics performed by specialists.

Key words: data mining, microwave radio thermometry, intelligent advisory systems, highly informative features.