

из терминалов подключен к локальной сети через Wi-Fi-роутер Zyxel Keenetic II и USB-адаптер WiFi D-Link DWA-120, стандарт беспроводной связи 802.11g. Результаты представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Время отклика УАС, тест 4

Номер теста	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время отклика, мс	59	64	71	60	69	65	67	66	63	60

Среднее время отклика составило 64,4 мс.

Таким образом, по проведенным тестам можно сделать вывод, что использование разработанного программного обеспечения на базе существующей ЛВС возможно, при этом время отклика программных терминалов по проведенным тестам составляет менее 75 мс даже при использовании беспроводного соединения.

По результатам тестирования разработанное программное обеспечение обеспечивает заявленные функциональные и технические характеристики, а также соответствует ГОСТ Р ИСО / МЭК 9126-93 по функциональности, удобству использования, надежности и мобильности.

#### Заключение

Результаты работы предлагается использовать при дальнейшей разработке и технической реализации программно-аппаратного комплекса цифровой диспетчерской громкоговорителя и телефонной связи, вещания и оповещения. Разработанные протоколы также могут быть использованы в качестве основы для модернизации существующих цифровых телекоммуникационных систем.

#### Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-2378.2020.9.

#### Литература

1. Директоров Н. Ф., Катанович А. А. Современные системы внутрикорабельной связи. СПб.: Судостроение, 2001. С. 256.
2. Бейлекчи Д.В. Передача синхронных потоков данных по асинхронным сетям пакетной связи со случайным множественным доступом / Д.В. Бейлекчи, А.А. Белов, В.А. Ермолаев, Ю.А. Кропотов // Системы управления, связи и безопасности. – 2017. – № 1. – С. 1-15.
3. Kropotov Yu.A. On the transmission of asynchronous data streams over packet switched networks with random multiple access / Yu.A. Kropotov, A.A. Kolpakov // International journal of computer networks and communications, vol. 10, no. 2, pp. 107-117a, 2018.
4. Протокол Пользовательских Датаграмм [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tools.ietf.org/html/rfc768> (19.08.2020).
5. Бейлекчи Д.В. Передача синхронных потоков данных по асинхронным сетям пакетной связи со случайным множественным доступом / Д.В. Бейлекчи, А.А. Белов, В.А. Ермолаев, Ю.А. Кропотов // Системы управления, связи и безопасности. – 2017. – № 1. – С. 1-15.

#### ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ФИЛЬТРОВОЙ АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНЫХ ШУМОВ

Копылова О.А.\*, Добродородный В.И.\*\*\*, Хайретдинов М.С.\*\*\*\*\*

\*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, \*\*Тюменское высшее военно-инженерное командное училище им. маршала инженерных войск А.И. Прошлякова,

\*\*\*Новосибирский государственный технический университет

Одной из задач пассивного геофизического мониторинга движущихся источников транспортных шумов является определение их местоположения на фоне помех в текущие моменты времени при трехкомпонентной регистрации. Рассматривается применение метода поляризационной обработки с предварительной фильтрацией сигналов в информативных полосах частот. Ориентация получаемого при поляризационной обработке эллипса рассеяния позволяет определить азимутальное направление на источник. Рассматривается оптимизационная задача выбора параметров предварительной полосовой фильтрации для повышения точности определения направления. Получены численные оценки точности решения задачи в условиях натурального эксперимента.

Ключевые слова: транспортный шум, поляризационный анализ, полосовая фильтрация, точность локации, полевые эксперименты.

Influence of frequency filtering parameters in polarization analysis of transportation noises. Kopylova O.A.\*, Dobrorodny V.I.\*\*\*, Khairtudinov M.S.\*.\*\*\*\*. \*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, \*\*Tyumen Higher Military Engineering Command School named after Marshal of Engineering Troops A.I. Proshlyakov, \*\*\*Novosibirsk state technical university.

One of the passive geophysical monitoring tasks for transport noise moving sources is to determine their location against a background noise at current time moments using three-component registration. The polarization processing method with preliminary signal filtering in informative frequency bands is considered. The orientation of the polarization-processed scattering ellipse allows us to determine the azimuthal direction to the source. The optimization problem of preliminary band-pass filtering parameter choice to increase the accuracy of direction finding is considered. Numerical estimates of the accuracy of solving the problem under field experiment conditions are obtained.

Keywords: transport noise, polarization analysis, bandpass filtering, location accuracy, field experiments.

### Введение

Проблема геоэкологического мониторинга окружающих техногенных и природных шумов в связи с их возрастающим воздействием на социальную среду приобретает все более высокую актуальность. Это обусловлено высокими темпами автомобилизации, развитием производств, строительством авто- и железнодорожных трасс, активизацией природных процессов, происходящих в мире. Одной из ключевых задач здесь является выявление источников шумов и определение их местоположения, в частности, определения направления на источник. В случае использования пространственно распределенных сейсмических датчиков для регистрации сейсмических колебаний от источников – малых сейсмических групп (МСГ) – для определения направления может быть использован поляризационный метод анализа, основанный на трехкомпонентной регистрации сейсмических колебаний от источника в прямоугольной системе координат  $X, Y, Z$  [1,2]. Это позволяет определить векторное направление прихода колебаний от источника [3]. Данный метод связан с использованием поляризации волн и является общим методом сейсмических исследований [4, 5]. Транспортные колебания описываются квазигармоническими функциями с переменными параметрами на фоне широкополосного шума. В этом случае трехмерный вектор сейсмических колебаний описывает эллипсоид вращения по траекториям, рассеянным в пространстве («эллипсоид рассеяния»). Измеряемые при этом поляризационные характеристики сейсмоакустических волн используются в качестве информативного параметра для определения азимутального направления на источник шумов.

В работе рассматривается проблема повышения точности определения направления на непрерывно движущийся источник сейсмических колебаний в текущие моменты времени методом поляризационного анализа. Для решения данной проблемы предлагается использование предварительной полосовой фильтрации, основанной на выделении основных частотных составляющих, характеризующих источники шумов. По результатам натурных экспериментов приводятся оценки точности определения азимутального направления в зависимости от выбора частотных параметров предварительной цифровой фильтрации.

### Постановка проблемы

Поляризационный метод заключается в нахождении направления распространения волны и основывается на данных об изменении траектории движения частиц упругой среды во времени. Положение частицы на траектории в каждый момент времени может характеризоваться различными параметрами в зависимости от выбранной системы координат. В прямоугольной системе координат – это проекции  $A_x, A_y, A_z$  полного вектора колебания  $A$  на оси  $x, y, z$ . Если положительное направление оси  $x$  совместить с направлением на север, оси  $y$  – на восток, а оси  $z$  – к зениту, то

$$\begin{aligned} A_x(t) &= |A(t)| \sin \varphi(t) \cos \omega(t), \\ A_y(t) &= |A(t)| \sin \varphi(t) \sin \omega(t), \\ A_z(t) &= |A(t)| \cos \varphi(t) \end{aligned} \quad (1)$$

где  $|A(t)|$  – величина вектора  $A$  или смещение в момент  $t$ ;  $\omega(t)$  – азимут направления колебания;  $\varphi(t)$  – угол между вектором  $A$  и вертикалью в каждый момент времени [4].

В скользящем временном окне, размеры которого выбираются в зависимости от длины волны, зашумленности трассы и шага дискретизации, по записям трёхкомпонентного приёмника вычисляется амплитуда главной компоненты смещения частицы в волне. Для каждого положения временного окна вычисляется ковариационная матрица [6].

Данные измерений представляются как набор точек, или радиус-векторов  $\vec{x}_i \equiv (x_i, y_i, z_i)$ . Ставится задача определения направления, задаваемого единичным вектором  $\vec{p} \equiv (p_x, p_y, p_z)$  поляризации такое, чтобы сумма квадратов расстояний всех точек от прямой, проведённой в этом

направлении, была минимальна. Собственные числа и собственные векторы матрицы ковариации исходных данных определяются из уравнения [6, 7]:

$$\begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}, \quad (2)$$

Определяемым из (2) вектором поляризации является собственный вектор  $\vec{p}_1$  ковариационной матрицы, соответствующий максимальному собственному числу. Два других собственных вектора,  $\vec{p}_2$  и  $\vec{p}_3$ , дают два ортогональных направления. Собственные числа  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$  показывают значение отклонения поляризации от линейной.

Зная параметры осей мгновенного эллипсоида поляризации, можно найти тангенциальный и азимутальный углы, а также коэффициент эллиптичности. Последний характеризует "вытянутость" эллипсоида поляризации. Направление главной оси эллипсоида поляризации определяется по компонентам вектора  $\vec{p}_1$ . Азимутальный угол находится из выражения:

$$\Phi = \arctan\left(\frac{p_{1y}}{p_{1x}}\right) \quad (3)$$

где  $p_{1x}, p_{1y}$  – x и y компоненты  $p_1$  соответственно. Тангенциальный угол вычисляется по формуле

$$\Theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{p_{1x}^2 + p_{1y}^2}}{p_{1z}}\right), \quad (4)$$

где  $p_{1x}, p_{1y}, p_{1z}$  – x, y и z компоненты  $p_1$  соответственно. Коэффициент эллиптичности вычисляется по формуле:

$$e = \sqrt{\frac{3\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}}, \quad (5)$$

Точность азимутального направления связана с минимизацией коэффициента (5). В связи с этим, в статье рассматривается оптимизационная задача нахождения его минимума:

$$e^* = \min(e) \quad (6)$$

#### Решение проблемы

Для повышения точности определения направления на источник колебаний необходимо предварительно решить задачу подавления шумов и выделения полезных сигналов. Это можно сделать с помощью процедуры цифровой фильтрации, основанной на применении фильтра Баттерворта. Данный фильтр характеризуется максимально плоской амплитудно-частотной характеристикой отклика в полосе пропускания и монотонной в полосе задерживания. Рассматриваемый фильтр можно описать уравнением:

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{2n}}}, \quad (7)$$

где  $\omega_0$  – граничная частота, n – порядок фильтра.

Границы фильтрации могут быть определены эмпирическим путем с использованием данных полевых экспериментов. В рамках такого подхода были проведены экспериментальные работы, связанные с регистрацией сейсмических колебаний от тяжелой гусеничной техники.

#### Методика проведения работ

В ходе работы экспериментальным путем были получены записи сейсмических колебаний, создаваемых тяжелым гусеничным транспортом.

Регистрация колебаний осуществлялась на расстояниях приблизительно от 430 до 1090 м от 1 сейсмостанции до источника и, соответственно, на расстояниях от 475 до 645 м от 2 сейсмостанции до источника (Рис.1). На рисунке отображены места установки регистраторов, а также траектория движения источника. Регистрация сигналов осуществлялась с помощью двух сейсмических датчиков GS-3.

В данной работе анализируется участок движения на расстояниях приблизительно от 478 до 1060 м от 1 сейсмостанции до источника и, соответственно, на расстояниях от 475 до 605 м от 2 сейсмостанции до источника при движении гусеничной техники по направлению от 1 сейсмостанции на восток.

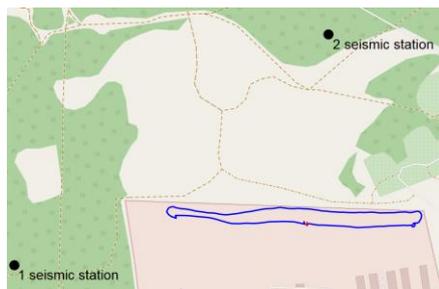


Рисунок 1 – Схема эксперимента.

#### Экспериментальные результаты

В ходе работы был проведен спектральный анализ полученных в ходе эксперимента записей транспортных шумов с целью выбора информативных частотных составляющих. Данный анализ показал, что для тяжелого гусеничного транспорта наиболее характерной является частота колебаний около 16-19 Гц, что видно из рис. 2-3.

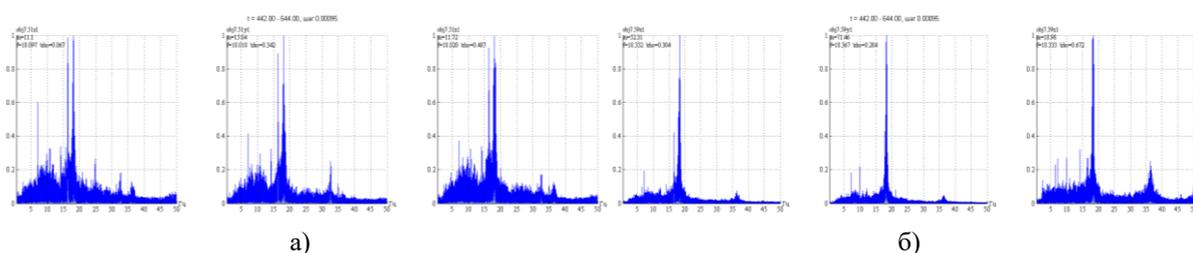


Рисунок 2 – Графики спектрального анализа записей колебаний от тяжелой гусеничной техники, зарегистрированных а) на 1 сейсмостанции. б) на 2 сейсмостанции.

Чтобы проследить динамику изменения частотного спектра во времени используется спектрально-временной анализ. В качестве примера графики спектрально-временного анализа шумов, возникающих при непрерывном движении тяжелой гусеничной техники, представлены на рис. 3.

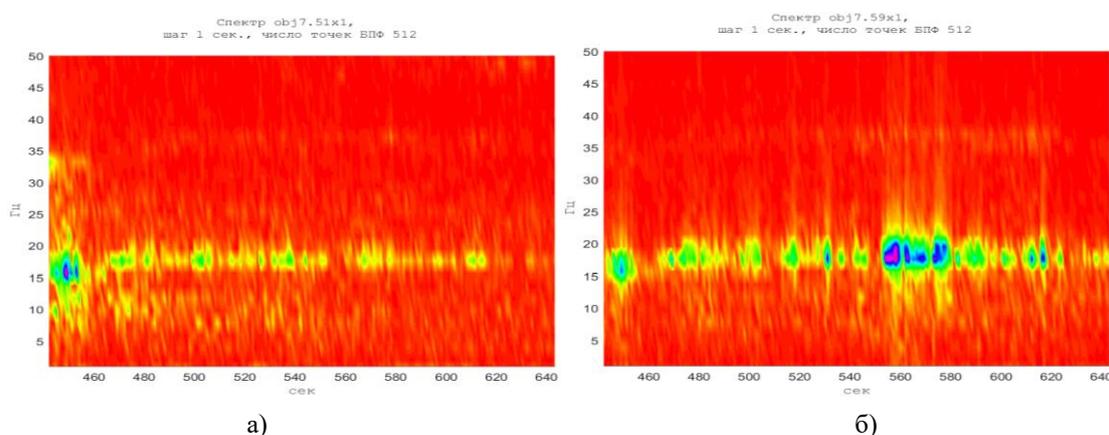


Рисунок 3 – Графики спектрально-временного анализа записей колебаний. а) зарегистрированных на 1 сейсмостанции. б) зарегистрированных на 2 сейсмостанции.

Из графиков видно, что постоянство выделенных преобладающих частот сохраняется на всем интервале записи. На более близком расстоянии – около 475-515м – помимо основной частоты видна субгармоника на частотах около 32 – 38 Гц. Отсюда следует, что выбор информативных частот должен быть увязан с расстоянием. На основании полученных данных для полосовой фильтрации были выбраны соответствующие частотные области, определяющие параметры (7) предварительной фильтрации колебаний.

В соответствии с (5) были получены значения коэффициентов эллиптичности для азимутальной плоскости XY и для вертикальных плоскостей YZ и XZ. Коэффициенты эллиптичности рассчитывались для данных, полученных на удалении около 474м от источника для 2 сейсмостанции (рис. 4(а)) и на удалении около 844 м от источника для 1 сейсмостанции (рис. 4(б)).

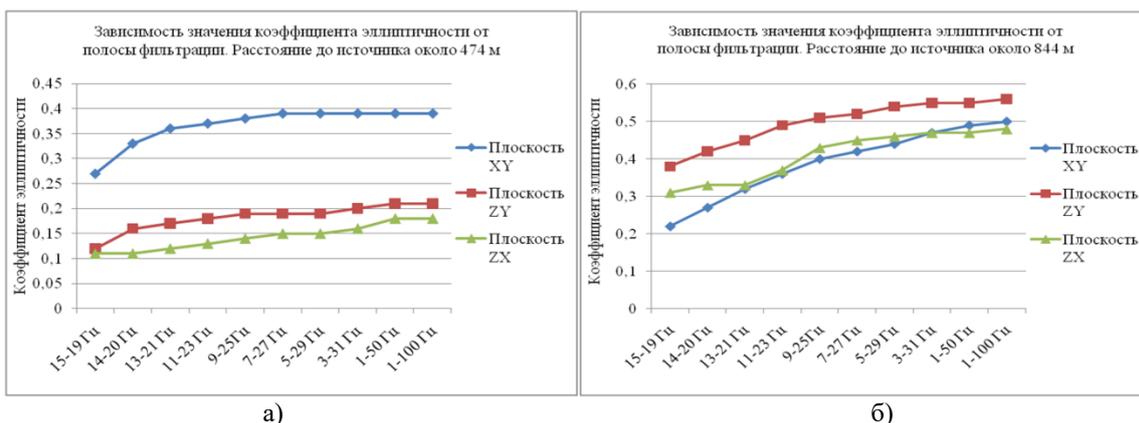


Рисунок 4 – График зависимости коэффициента эллиптичности от полосы фильтрации. а) для записей колебаний, полученных на удалении около 474м от источника для 2 сейсмостанции. б) для записей колебаний, полученных на удалении около 844м от источника для 1 сейсмостанции.

Из графиков видно, что предварительная фильтрация в полосе частот 15-19Гц для рассматриваемого источника при его непрерывном движении позволяет существенно уменьшить коэффициент эллиптичности эллипса поляризации. При дальнейшем расширении полосы фильтрации происходит существенное увеличение коэффициента эллиптичности (рис. 4). На большем удалении влияние фильтрации в выбранной полосе частот оказывает более существенное влияние на уменьшение коэффициента эллиптичности, и, следовательно, на повышение точности определения направления на источник.

В соответствии с (3) были получены значения углов поляризации для азимутальной плоскости XY и для вертикальных плоскостей YZ и XZ. Значения углов поляризации, полученные на удалении около 474м от источника для 2 сейсмостанции представлены на рис. 5(а) и на удалении около 844 м от источника для 1 сейсмостанции представлены на рис. 5(б). Из графиков видно, что с увеличением расстояния определяемый угол поляризации более чувствителен к выбранным параметрам полосовой фильтрации.

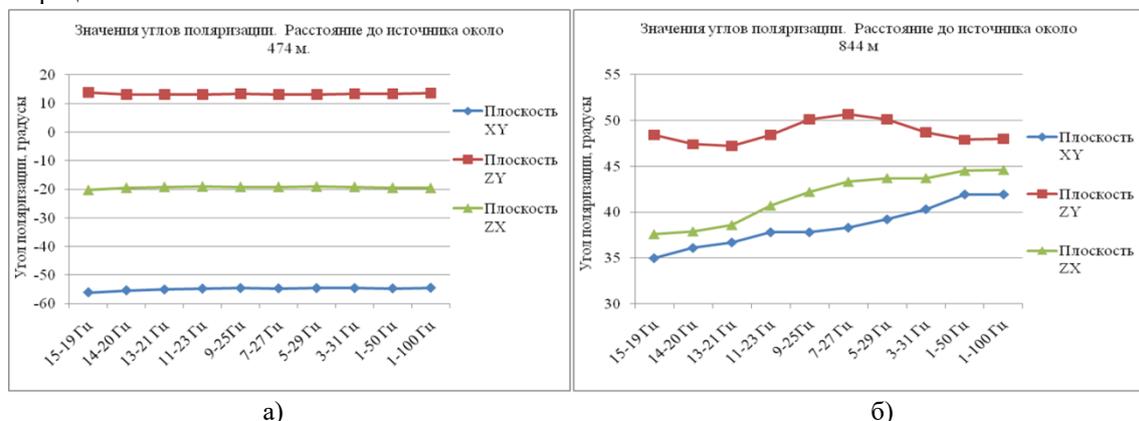


Рисунок 5 – Значения углов поляризации. а) для записей колебаний, полученных на удалении около 474м от источника для 2 сейсмостанции. б) для записей колебаний, полученных на удалении около 844м от источника для 1 сейсмостанции.

На рис. 6(а) в качестве примера приведены полярограммы записей колебаний, зарегистрированных 2 сейсмостанцией на удалении около 474 метров, полученные после фильтрации в полосе частот 15-19Гц метров от источника. На рис. 6(б) приведены полярограммы записи колебаний, отфильтрованной на тех же частотах, зарегистрированных 1 сейсмостанцией на удалении около 844 метра. Данные рисунки наглядно показывают, как влияет расстояние от источника колебаний до сейсмоприемника на форму эллипса поляризации. Видно, что увеличение расстояния приводит к увеличению коэффициента эллиптичности (5), т.е. размытости эллипса рассеяния.

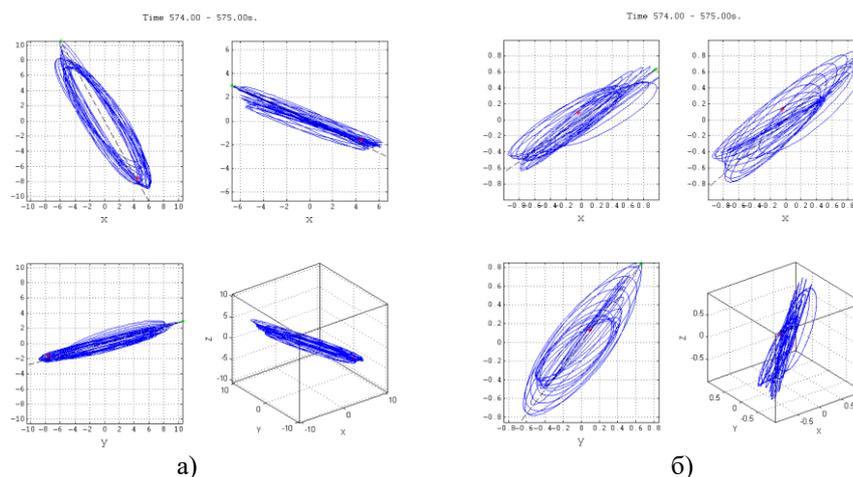


Рисунок 6 – Полярограммы, полученные после фильтрации в полосе частот 15-19Гц. а) для записей колебаний, полученных на удалении около 474м от источника для 2 сейсмостанции. б) для записей колебаний, полученных на удалении около 844м от источника для 1 сейсмостанции.

#### Заключение

В статье рассмотрена задача повышения точности оценивания одного из параметров локации источника сейсмических колебаний – азимутального направления – в условиях регистрации сейсмических колебаний малыми сейсмическими группами. В качестве примера источника рассматривалась тяжелая гусеничная техника. Для решения задачи определения азимутального направления рассмотрен метод поляризационного анализа. Исследовано влияние выбора параметров предварительной полосовой фильтрации записей сейсмических данных на повышение точности определения направления на источник колебаний с помощью данного метода. Получены численные оценки точностей решения задачи на основе оценивания азимутального направления и коэффициентов эллиптичности в условиях натурального эксперимента. Показано, что использование полосовой фильтрации позволяет существенно повысить точность определения направления на источник, что становится более заметным с увеличением расстояния до него.

#### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 18-47-540006р\_а, 20-07-00861А)

#### Литература

1. Гурвич И.И., Боганик Г.Н. Сейсмическая разведка: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. – М.: Недра, 1980, 551с
2. Alessandrini B, Cattaneo M, Demartin M, Gasperini M, Lanza V. A simple P-wave polarization analysis: its application to earthquake location. *Annals of Geophysics* 5(5). 1994. pp. 883-897
3. Azik I, Perelberg, Scott C. Hornbostel; *Applications of seismic polarization analysis. Geophysics* 1994;; 59 (1): 119–130
4. Гальперин Е.И. Поляризационный метод сейсмических исследований. М., «Недра», 1977. 277 с
5. Гальперин Е.И., Иванов Л.И., Мирзоян Ю.Д., Поляризационный метод – Общий метод сейсмической разведки. – Нефтегазовая геология и геофизика. Реф. научн.-техн. сборник ВНИИОЭНГ, №9,1978, с. 38-43.
6. А. П. Григорюк, В. В. Ковалевский, Л. П. Брагинская. Исследование поляризации сейсмических волн при вибросейсмическом мониторинге. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля 2018 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»: сб. материалов в 2 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2018. Т.2. С. 10-16
7. Каханер Д., Моулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение: Пер. с. Англ. – Изд. второе, стереотип. – М.: Мир, 2001. – 575 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЛЯ ОТБОРА НАИБОЛЕЕ  
ВАЖНЫХ ПРИЗНАКОВ ПРИ КЛАССИФИКАЦИИ

Кузьмич Р.И.

Сибирский федеральный университет  
+7 (391) 291-29-68, romazmich@gmail.com

Статья посвящена исследованию целесообразности применения метода логического анализа данных для задачи отбора признаков. Ключевым параметром при отборе признаков выступает их важность, т.е. частота использования признака в формируемых логических правилах, на базе которых принимается решение о классификации новых наблюдений. Экспериментальные исследования проводятся на задаче фибрилляции предсердий.

Ключевые слова: классификация, отбор признаков, важность, закономерность, усеченный набор.

Application of the method of logical analysis of data for selection of the most important features in classification. Kuzmich R.I. Siberian Federal University.

The paper dwells on the research of the feasibility of application of the method of logical analysis of data for the problem of feature selection. The key parameter in the selection of features is their importance, i.e. the frequency of using the feature in the built patterns, on the basis of which the decision on the classification of new observations is made. Experimental researches are carried out on the problem of atrial fibrillation.

Keywords: classification, feature selection, importance, pattern, truncated set.

Введение

Задача отбора признаков хорошо известна в статистике, на протяжении большого периода времени она являлась главной темой исследований в области машинного обучения. В [1] приведен широкий обзор методов, используемых для решения указанной задачи. В качестве методов, использующихся для отбора признаков, следует отметить: метод главных компонент [2], генетический алгоритм [3], полный перебор эвристик [1], искусственные нейронные сети [4], метод опорных векторов [5].

Представление слишком большого числа признаков в наборе данных, также как и представление признаков, не влияющих на принятие решения о принадлежности к определенному классу, таких как экспериментальный шум, может привести (в отсутствии адекватного способа отбора небольшого значимого подмножества) к ошибке любой попытки извлечения знаний из данных.

В статье рассматривается метод логического анализа данных, который относится к группе методов, выявляющих знания из данных и представляющих их в виде логических правил [6, 7]. Предлагается подход для отбора признаков на основе применения указанного метода. Эмпирическое подтверждение целесообразности применения метода логического анализа данных для отбора признаков осуществляется на задаче фибрилляции предсердий.

Теоретический анализ

Подход для отбора признаков на основе указанного метода базируется на понятии «важность признака». Согласно [8], важность признака – частота использования признака в формируемых логических правилах, на базе которых принимается решение о классификации новых наблюдений. Следовательно, количество включений признака при формировании логических правил прямо пропорционально его важности. Чем меньше количество раз признак задействован в формируемых логических правилах, тем он менее важен при принятии решения для конкретной задачи. Такой признак является кандидатом на удаление из исходного набора признаков. При удалении таких признаков из исходного набора признаков получаем новые наборы признаков, которые называются усеченными.

Таким образом, для формирования усеченного набора признаков изначально необходимо использовать исходный набор признаков для количественного определения важности каждого признака. Затем необходимо экспериментальным путем установить значение параметра «порог важности признаков», выделить признаки со значением важности ниже значения параметра. В завершении удалить выделенные признаки из исходного набора признаков.

Те признаки, которые остались в наборе, составляют усеченный набор. В результате, установка значения параметра «порог важности признака» влияет на количество оставшихся признаков в усеченном наборе. Чем выше значение данного параметра, тем меньше признаков остается в наборе и меньше размерность решаемой задачи. Однако при удалении слишком большого числа признаков может снизиться качество классификации, поскольку из сформированных логических правил, на базе оставшихся признаков, не сможет построиться классификатор с высокой обобщающей способностью.