УДК 614.842.435

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА К ДЕТЕКТИРОВАНИЮ ПОЖАРА

Малышев К.С.

Дзержинский политехнический институт филиал Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева, Дзержинск, e-mail: malyshevks@gmail.com

В статье представлены результаты исследования системы детектирования пожара, построенной с использованием вероятностного подхода. Использование данной системы позволяет исключить ложные срабатывания многокритериальных автоматических пожарных извещателей при сохранении времени детектирования пожара на уровне традиционных систем. В статье произведена оценка эффективности применения наивного Байесовского классификатора, в котором признаки объекта полагаются независимыми параметрами. Дополнительным требованием к системе классификации является недопустимость возникновения ошибок второго рода. Обучение и тестирование системы производится с использованием математических моделей динамики опасных факторов пожара, построенных в программе Fire Dynamics Simulator, а также моделей ложных факторов. Результаты тестирования классификатора показали, что вероятность ошибки первого рода существенно ниже, чем у традиционных алгоритмов детектирования пожара.

Ключевые слова: пожарная сигнализация, опасные факторы пожара, Байесовский классификатор

APPLICATION OF A PROBABILISTIC APPROACH TO FIRE DETECTION

Malyshev K.S.

Dzerzhinsk Polytechnic Institute branch of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev, Dzerzhinsk, e-mail: malyshevks@gmail.com

The paper presents the results of the study of fire detection system, built using a probabilistic approach. Using this system allows to exclude false alarms multisensor detector automatic fire alarms while maintaining the time of fire detection on the level of traditional systems. The efficiency of the naive Bayesian classifier which considers the object indications to be independent parameters has been evaluated here. An additional requirement for the system of classification is inadmissibility of the Type II errors. Training and testing of the system is realized using mathematical models of fire hazards dynamics, built in the program Fire Dynamics Simulator as well as models of false factors. The results of testing the classifier showed that probability of Type I error is substantially lower than for traditional algorithms of fire detection.

Keywords: fire alarm, dangerous factors of a fire, Bayes classifier

В настоящее время при разработке устройств автоматической пожарной сигнализации все большее внимание уделяется необходимости применения многофакторного детектирования пожара. Извещателей, позволяющих контролировать несколько факторов пожара (повышение температуры, оптической плотности среды, концентрации угарного и углекислого газа), принято называть многокритериальными. Использование нескольких каналов обнаружения в многокритериальных извещателях позволяет снизить вероятность ложного срабатывания системы, а также сократить время детектирования пожара. К ложным срабатываниям извещателей могут приводить такие воздействия, как запыление дымовой камеры, выпадение тумана, наличие технологических аэрозолей, резкое повышение температуры, связанное с особенностями технологического процесса, и т.д. Действие этих факторов на чувствительные элементы пожарных извещателей сходно с действием факторов пожара, однако, поскольку процесс горения характеризуется совокупным проявлением нескольких факторов, многокритериальные извещатели имеют большую возможность его детектирования.

Для надежного детектирования пожара информация, поступающая от каждого канала многокритериальных пожарных извещателей, должна быть соответствующим образом обработана. Большинство современных средств обнаружения пожара производят обработку информации о различных факторах пожара внутри извещателя. Такой подход приводит к существенному удорожанию самого извещателя, но позволяет сократить время, требуемое на обработку информации, поскольку большая часть вычислений производится распределенными средствами. При этом за основу алгоритма все же принимают информацию одного из каналов обнаружения (чаще всего уровень задымления), а информация с остальных каналов лишь корректирует процесс принятия решения. В данной работе, напротив, предлагается использовать многокритериальные извещатели без предварительной обработки информации. Их задача сводится лишь к измерению контролируемых параметров среды и передаче их значений на приемно-контрольный прибор. Обработка информации со всех каналов всех извещателей будет производиться непосредственно в самом приемно-контрольном приборе.

При такой схеме можно оперативно изменять настройки алгоритма, адаптируя всю систему к условиям конкретного защищаемого объекта. Основная роль в этом случае отводится алгоритмам обработки информации и детектирования пожара внутри прибора. Целью данной работы является создание такого алгоритма обработки информации от многокритериальных извещателей, позволяющего снизить количество ложных срабатываний систем автоматической противопожарной защиты.

По своей сути любая система обнаружения пожара является системой классификации. На входы системы подается информация о параметрах среды от автоматических пожарных извещателей и система должна отнести данную конкретную ситуацию состояния измеряемой среды к классам «пожар» или «норма». В данной работе предлагается создать экспертную систему классификации, используя вероятностный подход, а конкретнее – вероятностный классификатор на основе теоремы Байеса. Один из примеров применения вероятностного подхода для решения задачи детектирования пожара описывается в [3].

Для простоты будем рассматривать два класса состояния контролируемой среды и полагать, что вероятность пожара (Fire) $P(F)$ и вероятность нормального состояния среды (Normal) $P(N)$ образуют полную группу событий $P(F) + P(N) = 1$.

Многокритериальный извещатель через равные промежутки времени передает на приемно-контрольный прибор вектор состояния контролируемых параметров среды $\overline{w} = (w^1, w^2..., w^n)$. Так, например, w^1 – температура среды, w^2 – оптическая плотность среды и т.д. Для детектирования пожара в этих условиях необходимо принять решение: принадлежит ли данное состояние среды к классу «пожар»? Для ответа на поставленный вопрос в контексте вероятностного подхода нам необходимо вычислить условную вероятность $P(F|\overline{w})$, т.е. вычислить, какова вероятность того, что в контролируемой зоне возникнет пожар при данных значениях измеренных факторов.

Используя теорему Байеса, можем получить следующее выражение:

$$P(F|\overline{w}) = \frac{P(F)(P|\overline{w})F}{P(\overline{w})}, \qquad (1)$$

где $P(F|\overline{w})$ – вероятность пожара при условии состояния среды $\overline{w}$; $P(F)$ – вероятность пожара; $P(\overline{w}|F)$ – вероятность состояния среды $\overline{w}$ при условии пожара; $P(\overline{w})$ – вероятность состояния среды $\overline{w}$.

Аналогично можно оценить вероятность отсутствия пожара

$$P(N|\overline{w}) = \frac{P(N)\,P(\overline{w}\,|N)}{P(\overline{w})}. \qquad (2)$$

Для удобства классификации чаще всего рассматривают отношение правдоподобия и сравнивают его с порогом классификации h:

$$\frac{P(F|\overline{w})}{P(N|\overline{w})} = \frac{P(F)P(\overline{w}|\,F)}{P(N)P(\overline{w}|\,N)} \geq h. \qquad (3)$$

Логарифмируя выражение (3) получим т.н. характеристическую функцию:

$$F(\overline{w}) = \theta\left[\ln(P(\overline{w}|F)) - \ln(P(\overline{w}|N)) + \ln\frac{P(F)}{P(N)}\right], \qquad (4)$$

где θ() – функция Хевисайда.

Получив распределение плотности вероятностей $P(\overline{w}|F)$, $P(\overline{w}|N)$ и зная отношение априорных вероятностей $\ln\frac{P(F)}{P(N)}$, можно определить оптимальное правило классификации. В данной формуле $\ln\frac{P(F)}{P(N)} = \text{const}$ и может быть вычислено на основе известных статистических данных о частоте возникновения пожара в зданиях рассматриваемого типа, используемых при расчете пожарных рисков [2]. Поскольку заранее о характере закона распределения нам ничего не известно, будем считать, что параметры вектора $\overline{w} = (w^1, w^2..., w^n)$ независимы. Кроме того, если использовать непрерывные величины, нам придется численно интегрировать выражения с интегралами высокой кратности, что проблематично, поэтому в дальнейшем будем оперировать дискретными переменными.

Говоря о восстановлении функции распределения вероятностей в контексте статьи, мы подразумеваем нахождение

$$P(w,p) = P(p^{11},w) \times ... \times P(p^n,\ w^n),$$

где

$$P(p^i,\ w^i) = \begin{cases} p^1(1), & \text{если } w^i = c^i(1), \\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot & \\ p^i(\tau_i), & \text{если } w^i = c^i(\tau_i) \end{cases}, \text{ при } \sum_{j=1}^{\tau_i} p^i(j)=1, \qquad (5)$$

где $p^i(k)$ – вероятность того, что x^i примет значение $c^i(k)$.

Для восстановления функции распределения вероятности можно еще раз прибегнуть к формуле Байеса. В [1] показано, что в этом случае для малого объема выборки

$$P(p^i, w^i) = \begin{cases} p^1(1) = \dfrac{m_i(1)+1}{l+\tau_i}, & \text{если } w^i = c^i(1), \\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot \\ p^i(\tau_i) = \dfrac{m_i(\tau_i)+1}{l+\tau_i}, & \text{если } w^i = c^i(\tau_i). \end{cases} \quad (6)$$

где $m_i(k)$ – число векторов выборки, у которых координата принимает значение $x^i = c^i(k)$, а l – объем выборки, так что

$$\sum_k m_i(k) = l.$$

Оптимальным решающим правилом будет:

$$F(\overline{x}) = \theta\left(\sum_{k=1}^{\tau} \overline{x}^k \cdot \ln\frac{p_F^k}{p_N^k} + \ln\frac{P(F)}{P(N)} + H\right), \quad (7)$$

где $\overline{x} = (x^1, \ldots x^\tau)$ – n-мерный бинарный вектор размерности $\tau = \sum_{i=1}^{n} \tau_i$ полученный из вектора $\overline{w}$ последовательной записью

$$\hat{x}_i^k = \begin{cases} 0, & \text{если } w^i \neq (c^i)\,k \\ 1, & \text{если } w^i = (c^i)\,k \end{cases}$$

для всех w^k; p_F^k – вероятность того что $x^k = 1$ для класса «Пожар»; p_N^k – вероятность того что $x^k = 1$ для класса «Норма».

Правило (7) при $H = 0$ оптимально для равноценных ошибок классификации первого и второго рода [4]. В нашем случае ошибки второго рода неприемлемы, т.е. экспертная система должна работать таким образом, чтобы полностью исключить возможность принятия пожара за нормальное состояние. В таких условиях при наличии двух непересекающихся, линейно разделимых классов, Байесовская классификация сводится к поиску значения порога классификации H, доставляющего минимум функции потерь.

Количественную оценку $m_i(k)$ для каждого класса можно получить в ходе обучения классификатора, т.е. оценить количество срабатывания канала извещателя w^i при условии нахождения в помещении с пожаром или без пожара (при воздействии ложных факторов) соответственно. С этой целью можно провести огневые испытания или использовать математическую модель горения. Поскольку при развитии пожара срабатывание извещателя произойдет в любом случае (вопрос лишь во времени срабатывания от начала горения), то для практической оценки частоты срабатывания канала извещателя необходимо рассматривать ограниченный промежуток времени, сопоставимый с предельным временем реакции извещателя, установленного нормативными документами.

Поскольку горение различных веществ характеризуется различной интенсивностью проявления того или иного фактора пожара, обучение классификатора необходимо проводить на моделях как можно более широкого типа. В данной работе было проведено моделирование шести типовых очагов горения, используемых для огневых испытаний по ГОСТ Р 53325–2009 в программной среде Fire Dynamics Simulator [5]. Примеры полученных зависимостей изображены на рис. 1, 2. Помимо моделей динамики факторов пожара типовых очагов горения, для цели обучения классификатора использовались модели ложных факторов пожара. В работе использовались следующие модели ложных факторов пожара: запыление дымовой камеры, технологические испарения, включение мощного нагревательного прибора (промышленная тепловая пушка), попадание в дымовую камеру мелкого насекомого и грозовой разряд.

Для практической оценки эффективности предложенного алгоритма использовались модели комбинированного извещателя с дымовым и тепловым каналом. С целью повышения характеристик экспертной системы по каждому каналу обнаружения выделялись максимальная и дифференциальная составляющая. Таким образом, для каждого комбинированного извещателя рассчитывались четыре параметра: текущая температура (T, °C), скорость изменения температуры (ΔT, °C/c), текущая оптическая плотность среды (μ, дБ/м), скорость изменения оптической плотности среды (Δμ, дБ/(м·с)).

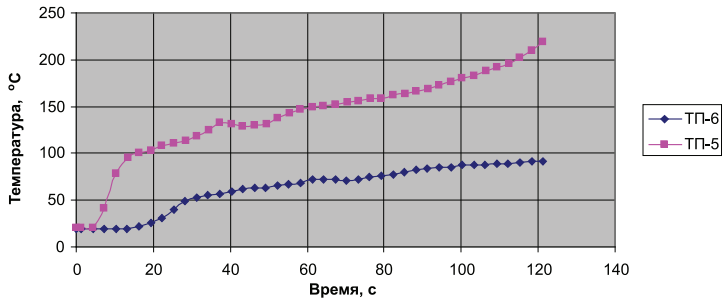

Рис. 1. Динамика опасных факторов пожара (температура) для тестовых очагов горения ТП-5 и ТП-6

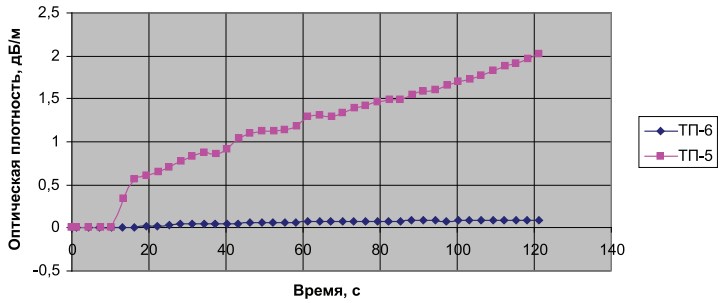

Рис. 2. Динамика опасных факторов пожара (оптическая плотность среды) для тестовых очагов горения ТП-5 и ТП-6

Как было указано выше, для упрощения процедуры вычислений необходимо перейти от непрерывных к дискретным входным величинам. Переход к дискретным значениям величин можно выполнить следующим образом. Нормативными документами в области пожарной безопасности установлено, что оптический пожарный извещатель должен срабатывать при оптической плотности среды $\mu = 0{,}05\ldots0{,}2$ дБ/м. Очевидно, что при оптической плотности среды $\mu < 0{,}05$ дБ/м состояние извещателя можно назвать «норма», а при оптической плотности среды более $\mu > 0{,}2$ дБ/м – «пожар». Пограничное состояние при оптической плотности среды $0{,}05 < \mu < 0{,}2$ дБ/м условно назовем «внимание», поскольку нельзя однозначно отнести его ни к состоянию «пожар», ни к состоянию «норма». Таким образом, произведена дискретизация входной величины по уровню. Аналогичный подход применяется и к оставшимся трем параметрам.

$$\mu = \begin{cases} \text{“норма”}, & \text{при } \mu < 0{,}05 \\ \text{“внимание“}, & \text{при } 0{,}05 \le \mu \le 0{,}2 \\ \text{“пожар”}, & \text{при } \mu > 0{,}2 \end{cases}$$

$$\Delta\mu = \begin{cases} \text{“норма“}, & \text{при } \Delta\mu < 0{,}005 \\ \text{“пожар“}, & \text{при } \Delta\mu \ge 0{,}005 \end{cases}$$

$$T = \begin{cases} \text{“норма”}, & \text{при } T < 30 \\ \text{“внимание“}, & \text{при } 30 \le T \le 70 \\ \text{“пожар”}, & \text{при } T > 70 \end{cases}$$

$$\Delta T = \begin{cases} \text{“норма“}, & \text{при } \Delta T < 2 \\ \text{“пожар“}, & \text{при } \Delta T \ge 2. \end{cases}$$

Статистические оценки $P(w_i|F)$ и $P(w_i|N)$ по данным математических моделей определяются как частота наблюдения события за ограниченный промежуток времени. Стоит отметить, что обучающий набор данных должен быть достаточно большим и придерживаться соотношения $\frac{P(F)}{P(N)}$, т.е. количество обучающих данных для моделей «пожар» и «нормальное состояние» должны соответствовать отношению априорных вероятностей.

Тестирование обученной системы производилось на образах, зарезервированных в генеральной выборке и не предъявляемой системе во время обучения. При тестировании экспертной системы математическое ожидание ошибки первого рода (система приняла ложный фактор пожара за настоящий пожар) составило ≈36 %, в то время как при использовании традиционного алгоритма (логическое «ИЛИ») этот показатель находится на уровне ≈66 %. Среднее время детектирования тестовых очагов пожара экспертной системой не превышало аналогичного показателя традиционного алгоритма «ИЛИ».

К достоинствам предлагаемой экспертной системы следует отнести существенное снижение количества ложных срабатываний по сравнению с традицион-

ными алгоритмами детектирования пожара. К сожалению, не лишена данная система и недостатков. Полагая опасные факторы пожара независимыми друг от друга характеристиками среды и проводя обучение на ограниченной выборке ситуаций (моделей), Байесовская система классификации теряет свойство оптимальности. В общем случае надежная классификация достигается только в области ситуаций, предъявляемых системе в ходе обучения. Кроме того, алгоритм предназначен для обработки информации поступающей с нескольких каналов одного извещателя. Для получения алгоритма, учитывающего информацию нескольких мультикритериальных извещателей, требуется дополнительно использовать корреляционные методы. В этом случае требуемое быстродействие процессора обработки информации растет экспоненциально.

Список литературы

1. Вапник В.Н., Червоненкис А.Я. Теория распознавания образов (статистические проблемы обучения). – М.: Наука, 1974. – 416 с.

2. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности: Приказ МЧС РФ от 30.06.2009 N 382 // Российская газета. – 2009. – №161.

3. Членов А.Н. Новые методы и технические средства обнаружения пожара: монография. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2007. – 185 с.

4. Шлезингер М., Главач В. Десять лекций по статистическому и структурному распознаванию. – Киев: Наукова думка, 2004.

5. McGrattan K.B., Hostikka S., Floyd J.E., Baum H.R., Rehm R.G. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide. NIST SP 1018; NIST Special Publication 1018-5; 100 p. October 2007.

References

1. Vapnik V.N., Chervonenkis A.Ja. Teorija raspoznavanija obrazov (statisticheskie problemy obuchenija) [The theory of pattern recognition (statistical learning problems)]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 416 p.

2. Ob utverzhdenii metodiki opredelenija raschetnyh velichin pozharnogo riska v zdanijah, sooruzhenijah i stroenijah razlichnyh klassov funkcional'noj pozharnoj opasnosti: Prikaz MChS RF ot 30.06.2009 N 382, Rossijskaja gazeta N 161 – 2009.

3. Chlenov A.N. Novye metody i tehnicheskie sredstva obnaruzhenija pozhara. Monografija. [New methods and technical means of fire detection. Monograph] Moscow, Akademija GPS MChS Rossii, 2007. 185 p.

4. Shlezinger M., Glavach V. Desjat' lekcij po statisticheskomu i strukturnomu raspoznavaniju. [Ten lectures on statistical and structural pattern recognition] Kiev Naukova dumka, 2004.

5. McGrattan K.B., Hostikka S., Floyd J.E., Baum H.R., Rehm R. G. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide. NIST SP 1018; NIST Special Publication 1018-5; 100 p. October 2007

Рецензенты:

Добротин С.А., д.т.н., директор ООО «НТЦ «Безопасность», г. Дзержинск;

Луконин В.П., д.т.н., генеральный директор Федерального государственного унитарного предприятия «Научно-исследовательский институт химии и технологии полимеров имени академика В.А. Каргина с опытным заводом», г. Дзержинск.

Работа поступила в редакцию 19.03.2012