УДК 614.8

Б.Б. Поспелов, д.т.н., профессор, н.с., НУГЗУ,
В.А. Андронов, д.т.н., профессор, проректор, НУГЗУ,
Е.А. Рыбка, к.т.н., зам. нач. центра – нач. отдела, НУГЗУ

АЛГОРИТМЫ И УСТРОЙСТВА ОПТИМАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОБНАРУЖЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ В СЛУЧАЕ НЕИЗВЕСТНЫХ ФУНКЦИЙ ПОТЕРЬ

Рассмотрен неклассический подход к синтезу алгоритмов и устройств оптимального прогнозирования и обнаружения опасных состояний объектов по наблюдаемым данным в случае невозможности точного задания функций потерь. Основным отличием полученных алгоритмов и устройств оптимального прогнозирования и обнаружения является то, что разделяющая функция определяется функциями потерь, зависящих от наблюдаемых данных, восстанавливаемого составного вектора параметров и априорной информации о наблюдаемых опасных состояниях объектов.

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация, алгоритм оптимального прогнозирования, устройство оптимального обнаружения, состояние, опасный объект.

Постановка проблемы. Общая тенденция роста частоты и интенсивности чрезвычайных ситуаций (ЧС), а также материальных убытков от них свидетельствуют о неэффективности средств обнаружения ЧС и мероприятий по их ликвидации, а также несовершенству реагирования на опасности [1]. Поэтому в последнее время в теории и практике защиты населения и территорий от различных опасностей акцент смещается от традиционного факта обнаружения ЧС в сторону обнаружения опасных состояний объектов различной сферы, которые способны приводить к появлению ЧС – прогнозированию с совместным обнаружением ЧС. В этой связи одной из актуальных остается проблема определения алгоритмов и устройств оптимального прогнозирования и обнаружения ЧС по наблюдаемым данным.

Анализ последних исследований и публикаций. Несмотря на достаточное развитие и широкое освещение в литературе статистической методологии, ее использование в практике защиты населения и территорий от различных опасностей в настоящее время оказывается недостаточным. Классическая статистическая методология, впервые рассматриваемая В.А. Котельниковым, используя байесовский подход, базируется помимо критериев на использовании большого объема априорной информации о наблюдаемых данных (данных мониторинга). Однако большинство реальных задач защиты населения и территорий характеризуется либо отсутствием такой информации об опасностях, либо отсутствием достаточной уверенности в том, что наблюдаемые данные являются достоверными. Это служит главным ограничением на пути прямого использования классической методологии при решении реальных задач гражданской защиты от ЧС. Попытки применения классической статистической методологии для решения реальных частных задач гражданской защиты от ЧС рассматривались в работах [2, 3]. Полученные в них результаты основывались на достаточно полной априорной информации об оцениваемых событиях, характерных для разомкнутых систем.

Реальные потенциально опасные объекты мониторинга, по сути, представляют замкнутые системы, неприводимые к разомкнутым системам. Поэтому недостаток априорной информации об опасности объекта вынуждает прибегать к совмещению процессов изучения такого объекта и управления им. Впервые возможности такого оптимального управления (дуального управления) на основе теории статистических решений рассматривались в А.А. Фельдбаумом и Я.З. Цыпкиным. К сожалению, большинство известных в литературе результатов в этой области касается радиотехнических приложений. Однако формализация общих результатов позволяет распространить их на другие приложения. В частности это касается одной из проблемных задач гражданской защиты от ЧС, связанной с оптимальным прогнозированием и обнаружением ЧС по данным мониторинга в случае невозможности точного задания функций потерь.

Постановка задачи и ее решение. Целью настоящей работы является рассмотрение неклассического подхода, развиваемого Я.З. Цыпкиным, к решению проблемной задачи определения алгоритмов и устройств оптимального прогнозирования и обнаружения ЧС на объектах технической и природной сферы по данным мониторинга при отсутствии информации о функциях потерь.

В общем случае задачу прогнозирования ЧС можно представить в виде некоторой задачи обнаружения (классификации) трех гипотез (состояний объекта). При этом задача обнаружения ЧС будет представлять частный случай указанной задачи прогнозирования при числе гипотез (состояний объекта), равном двум. В этой связи вначале рассмотрим задачу прогнозирования, а затем на ее основе задачу обнаружения ЧС.

Динамику функционирования большинства существующих опасных объектов (ОО) с учетом прогнозирования их состояний можно рассматривать в виде некоторого ситуационного процесса с тремя возможными состояниями. Первое из них связано с ситуацией X_1^o, когда состояние ОО полностью соответствует заданным условиям его функционирования и в принципе появление опасности, приводящей к ЧС маловероятно. Второе связано с ситуацией X_2^o, когда состояние ОО не соответствует заданным условиям его функционирования и может привести к

ЧС, но пока не требуется применение активных мер по ликвидации этого состояния. Третье состояние связано с ситуацией X_3^o, когда состояние ОО приводит к появлению ЧС, требующей применение активных воздействий по ее прекращению и ликвидации последствий. При этом в реальных условиях каждая из упомянутых ситуаций ОО является событием случайным.

Обозначим через X пространство рассматриваемых выше ситуаций ОО. Данное пространство разобьем на три непересекающиеся области X_k, где $k = 1,2,3$. Тогда для синтеза оптимального алгоритма прогнозирования (решающего правила) необходимо сформулировать критерий качества прогнозирования состояний ОО, т. е. обнаружения ситуаций X_k^o, $k = 1,2,3$. При этом оптимальный алгоритм должен быть таким, чтобы сформулированный критерий достигал некоторого экстремума. При этом задача синтеза алгоритма оптимального прогнозирования и обнаружения состояний ОО сводится к отысканию алгоритма, который, в смысле заданного критерия, реализует наилучшее разбиение пространства ситуаций X на области X_k, $k = 1,2,3$.

С целью конкретизации понятия «наилучшего разбиения» в условиях отсутствия априорной информации будем рассматривать матрицу произвольных функций потерь прогноза $F_{km}(x,c)$ для значений $k,m = 1,2,3$. В рассматриваемом случае функции потерь имеют произвольный вид, который определяется с точностью до составного вектора параметров $c = [c_1 \quad c_2 \quad c_3]$ и зависит от наблюдаемых данных. Пусть функции $F_{km}(x,c)$, $k,m = 1,2,3$ характеризуют риски прогноза ЧС, связанные с отнесением ситуации X_k^o к классу ситуаций X_m^o или попаданием ситуации X_k^o в область X_m. Тогда на главной диагонали матрицы потерь будут расположены риски при правильном прогнозировании состояний ОО, а по обеим сторонам от главной диагонали будут располагаться риски (потери) при ошибочном прогнозировании состояний ОО. Будем полагать, что для всех $k = 1,2,3$ функции потерь прогноза $F_{kk}(x,c) < 0$. При этом такие отрицательные риски можно рассматривать как некие выигрыши при правильном прогнозировании рассматриваемых состояний ОО.

Пусть ситуация для каждого класса X_k^o из пространства X характеризуется условной плотностью распределения $p(x/k) = p_k(x)$ и заданной априорной вероятностью P_k этих ситуаций. Тогда, вводя для указанных выше данных вектор $P(x) = [p_1(x)P_1 \quad p_2(x)P_2 \quad p_3(x)P_3]^T$, средний риск прогнозирования состояний ОО будет представлять собой некий функционал, зависящий от границ Λ_{km} между соответствующими областями X_k и X_m для всех $k,m = 1,2,3$ и составного вектора c функций потерь. В случае фиксированного составного вектора c прогнозируемые состояния ОО будут разделяться по соответствующим границам Λ_{km}.

С целью отыскания оптимального, в смысле минимума рассматриваемого среднего риска прогнозирования состояний ОО, алгоритма определения границ и составного вектора, воспользуемся характеристическими функциями $\Theta_m(x,c) = \begin{cases} 1, \text{если } X \in X_m \\ 0, \text{если } X \notin X_m \end{cases}$, $m = 1,2,3$, которые для удобства представим в виде некоторого вектора $\Theta(x,c) = \left[\Theta_1(x,c) \quad \Theta_2(x,c) \quad \Theta_3(x,c)\right]^T$ характеристических функций решений. С учетом этого величину среднего риска прогнозирования и обнаружения рассматриваемых состояний ОО удобно представить в виде соответствующего интегрального векторно-матричного уравнения следующего вида

$$R(c) = \int_X \Theta^T(x,c) F^T(x,c) P(x) dx . \quad (1)$$

В представлении (1) средний риск прогнозирования и обнаружения состояний ОО не зависит от границ между областями в пространстве X. Это означает, что условие минимума среднего риска (1) будет определяться равенством нулю градиента $\nabla_c R(c)$ по составному вектору c, т. е.

$$\nabla_c R(c) = \int_X \nabla_c \Theta^T(x,c) F^T(x,c) P(x) dx + \int_X \Theta^T(x,c) \nabla_c F^T(x,c) P(x) dx = 0 . \quad (2)$$

В выражении (2) матрица $\nabla_c F(x,c)$ характеризует чувствительность соответствующих функции потерь прогноза по вектору c, а вектор $\nabla_c \Theta(x,c)$ – чувствительность характеристических функций по указанному вектору.

Полагая, что характеристические функции $\Theta_m(x,c)$ для всех $m = 1,2,3$, определяют при каждом фиксированном векторе c границы Λ_{km} между областями X_k и X_m в пространстве наблюдений X, доставляющие минимум среднему риску (1), вектор чувствительности $\nabla_c \Theta(x,c)$ должен быть нулевым. С учетом этого первый интеграл в выражении (2) должен равняться нулю, т. е. $\int_X \nabla_c \Theta^T(x,c) F^T(x,c) P(x) dx = 0$.

Это означает, что и второй интеграл в (2) $\int_X \Theta^T(x,c) \nabla_c F^T(x,c) P(x) dx = 0$.

Градиент $\nabla_c \Theta(x,c)$ представляет собой вектор многомерных δ – функций, которые за исключением точек, принадлежащих границам Λ_{km} между областями X_k и X_m для всех $k,m=1,2,3$, равны нулю. Это означает, что для границы Λ_{sm} между областями X_s и X_m в пространстве X градиент $\nabla_c R(c) = \int\limits_{\Lambda_{sm}} \Delta_{sm}(x,c)^T P(x)dx = \int\limits_{\Lambda_{sm}} f_{sm}(x,c)dx = 0$. При этом вектор $\Delta_{sm}(x,c) = F_s(x,c) - F_m(x,c)$ представляет собой вектор разности векторов потерь прогнозирования (обнаружения) $F_s(x,c) = [F_{1s}(x,c) \quad F_{2s}(x,c) \quad F_{3s}(x,c)]^T$ и $F_m(x,c) = [F_{1m}(x,c) \quad F_{2m}(x,c) \quad F_{3m}(x,c)]^T$ для соответствующих областей X_s и X_m. Функция $f_{sm}(x,c) = \Delta_{sm}(x,c)^T P(x)$ представляет собой разделяющую функцию прогнозирования (обнаружения) состояний ОО, знак которой является признаком принимаемого решения о прогнозе (обнаружении) рассматриваемых состояний ОО. В этом случае уравнение

$$f_{sm}(x,c) = \Delta_{sm}(x,c)^T P(x) = 0, \tag{3}$$

будет определять поверхность, оптимально разделяющую области X_s и X_m.

Условие (3) означает, что общий алгоритм оптимального прогнозирования и обнаружения рассматриваемых состояний ОО можно сформулировать в следующей форме:

наблюдаемые данные x (данные мониторинга) о состояниях ОО соответствуют состоянию X_k, $k=1,2,3$, т. е. $x \in X_k$ или они относятся к классу X_k^o, если величина $\Delta_{km}(x,c)^T P(x) < 0$, для всех $m=1,2,3$ при условии $m \neq k$.

При этом вектор c в представлении $\Delta_{km}(x,c)$ определяется из условия равенства нулю второго интеграла в (2).

На основании общего алгоритма оптимального прогнозирования и обнаружения можно записать частный алгоритм оптимального прогнозирования ЧС (обнаружение состояния X_2) по данным x мониторинга состояний ОО в следующей форме:

наблюдаемые данные x соответствуют прогнозу состояния X_2, т. е. $x \in X_2$ или они относятся к классу X_2^o, если величина $\Delta_{2m}(x,c)^T P(x) < 0$, для всех $m=1,2,3$ при условии, что $m \neq 2$.

Из общего алгоритма оптимального прогнозирования и обнаружения можно записать также частный алгоритм оптимального обнаружения ЧС (обнаружение состояния X_3) по данным x мониторинга состояний ОО в следующей форме:

наблюдаемые данные x соответствуют обнаружению состояния X_3, т. е. $x \in X_3$ или они относятся к классу X_3^o, если величина $\Delta_{3m}(x,c)^T P(x) < 0$, для всех $m = 1,2,3$ при условии, что $m \neq 3$.

Представим скалярное произведение $\Delta_{km}(x,c)^T P(x)$ в следующем виде

$$\Delta_{km}(x,c)^T P(x) = \left\|\Delta_{km}(x,c)\right\| \left\|P(x)\right\| \cos(\sphericalangle g_{km}(x,c)), \tag{4}$$

где $\|*\|$ – означает норму для соответствующего вектора, а $\sphericalangle g_{km}(x,c)$ – угол между векторами $\Delta_{km}(x,c)$ и $P(x)$. Поскольку нормы соответствующих векторов в (4) положительные, то общий алгоритм оптимального прогнозирования и обнаружения можно представить в иной форме: наблюдаемые данные x (данные мониторинга) о состояниях ОО соответствуют состоянию X_k, $k = 1,2,3$, т. е. $x \in X_k$ или они относятся к классу X_k^o, если величина $\cos(\sphericalangle g_{km}(x,c))$ для всех $m = 1,2,3$ при условии, что $m \neq k$.

С учетом этого алгоритм оптимального прогнозирования ЧС может быть представлен в виде

наблюдаемые данные $x \in X_2$, если $\cos(\sphericalangle g_{2m}(x,c)) < 0$ для всех $m = 1,3$. (5)

Алгоритм (5) оптимального прогнозирования ЧС может быть реализован в виде устройства, структурная схема которого приведена на рис. 1.

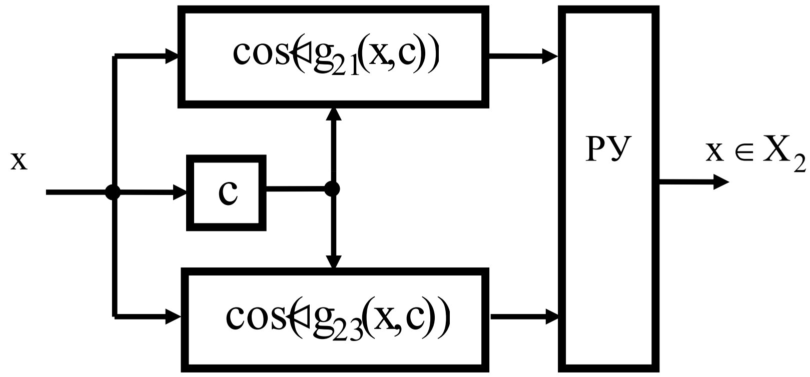

Рис. 1. Структурная схема устройства оптимального прогнозирования ЧС при отсутствии информации о функциях потерь

В схеме на рис. 1 решающее устройство (РУ) формирует на своем выходе сигнал только в случае отрицательных значений сигналов на его входах, действующих на выходах соответствующих функциональных преобразователей данных наблюдения. Наличие сигнала на выходе РУ означает, что наблюдаемые данные соответствуют ситуации X_2^o, при которой состояние ОО не соответствует заданным условиям его функционирования, и наблюдаемая ситуация может привести к появлению ЧС. Во всех остальных случаях сигнал на выходе РУ отсутствует, и устройство продолжает наблюдение за входными данными x.

Алгоритм оптимального обнаружения ЧС в этом случае может быть записан в виде

$$\text{наблюдаемые данные } x \in X_3, \text{ если } \cos(\triangleleft\, g_{3m}(x,c)) < 0 \text{ для всех } m = 1,2. \quad (6)$$

Данный алгоритм оптимального обнаружения ЧС (6) может быть реализован в виде устройства, структурная схема которого аналогична рис. 1. При этом схема оптимального обнаружителя ЧС будет отличаться используемыми функциональными преобразователями, которые должны будут выполнять в этом случае вычисление $\cos(\triangleleft\, g_{31}(x,c))$ и $\cos(\triangleleft\, g_{32}(x,c))$ соответственно.

В случае алгоритма совместного оптимального прогнозирования и обнаружения ЧС по наблюдаемым данным необходимо объединить алгоритмы (5) и (6). При этом структурная схема устройства совместного прогнозирования и обнаружения ЧС по наблюдаемым данным может быть представлена на рис. 2.

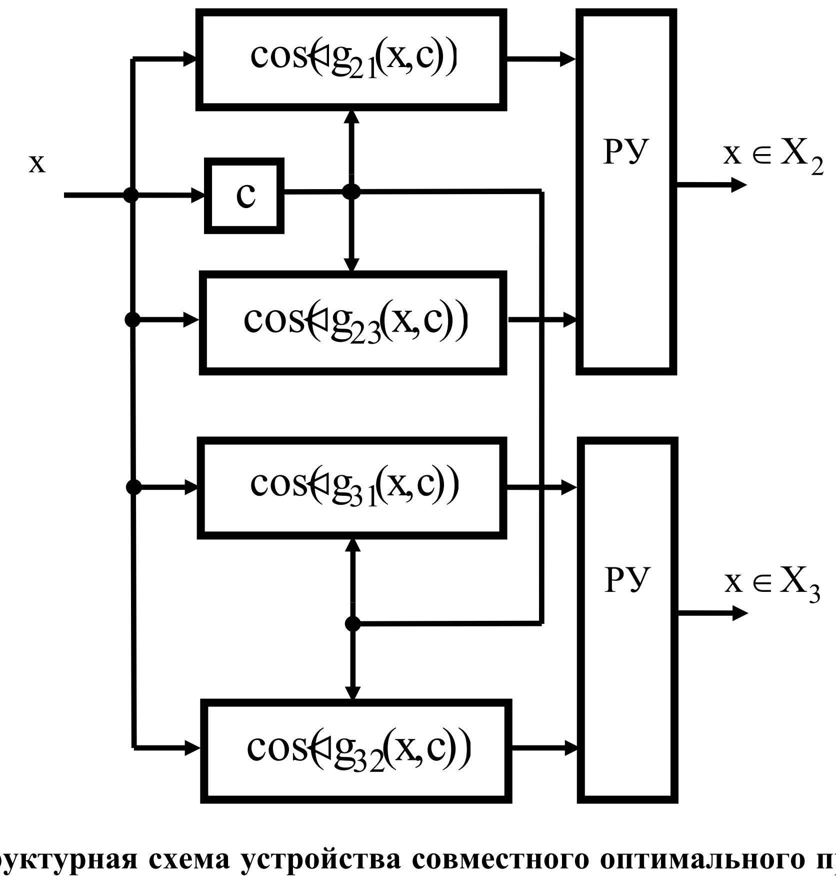

Рис. 2. Структурная схема устройства совместного оптимального прогнозирования и обнаружения ЧС при отсутствии информации о функциях потерь

Схема устройства, представленного на рис. 2, состоит из двух независимых каналов обработки данных (верхний – канал прогноза) и нижний канал (канал – обнаружения). Указанные каналы объединены общим сигналом, определяемым составным вектором, вычисляемым из условия равенства нулю второго интеграла в выражении (2) и зависящим от наблюдаемых данных. Каналы прогноза и обнаружения ЧС функционируют параллельно и независимо. Сигналы на выходе РУ этих каналов позволяют различать состояния ОО, связанные с опасными ситуациями – предвестниками ЧС и ситуациями наличия самих ЧС, требующими активных действий для их ликвидации.

Полученные оптимальные алгоритмы и устройства отличаются от обычных алгоритмов, полученных на основе классической теории решений тем, что в них фигурируют не фиксированные функции потерь, а функции потерь, заданные с точностью до восстанавливаемого составного вектора параметров.

Таким образом, рассмотрен неклассический подход к решению задач синтеза алгоритмов и устройств оптимального прогнозирования и обнаружения состояний ОО по наблюдаемым данным (данным мониторинга) в случае невозможности точного определения функций потерь. Основным отличием полученных алгоритмов оптимального прогнозирования и обнаружения ЧС на ОО является то, что разделяющая функция определяется произвольным видом функций потерь с точностью до восстанавливаемого по наблюдаемым данным составного вектора параметров и априорной информацией об опасных состояниях. Сформулирован оптимальный в смысле минимума среднего риска алгоритм и предложено устройство оптимального совместного прогнозирования и обнаружения ЧС в случае невозможности точного определения функций потерь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аналітичний огляд стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2015 рік. – К.: Укр. НДІЦЗ ДСНС України, 2016. – 356 с.

2. Поспелов Б.Б. Выбор показателей качества и критерии оптимизации современных систем раннего обнаружения чрезвычайных ситуаций / Б.Б. Поспелов, Р.И. Шевченко, Е.А. Басманов, А.А. Федцов // Проблеми надзвичайних ситуацій. – Харків: НУЦЗУ. – 2012. – Вип. 15. – С. 122-131. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfEmergencies/vol15/Pospelov.pdf.

3. Поспелов Б.Б. Гарантированное оценивание состояний потенциально опасных объектов в условиях неопределенности / Б.Б. Поспелов, В.А. Андронов // Проблеми надзвичайних ситуацій. – Харків: НУЦЗУ. – 2016. –

Вип. 24. – С.87-92. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfEmergencies/vol24/ pospelov.pdf.

Получено редколлегией 06.03.2017

Б.Б. Поспєлов, В.А. Андронов, Є.А. Рибка

Алгоритми і пристрої оптимального прогнозування та виявлення надзвичайних ситуацій в разі невідомих функцій втрат

Розглянуто некласичний підхід до синтезу алгоритмів і пристроїв оптимального прогнозування і виявлення небезпечних станів об'єктів по спостережуваних даними в разі неможливості точного завдання функцій втрат. Основною відмінністю отриманих алгоритмів і пристроїв оптимального прогнозування і виявлення є те, що розділяє функція визначається функціями втрат, що залежать від спостережуваних даних, відновлюваного складеного вектора параметрів і апріорної інформації про спостережувані небезпечних станах об'єктів.

Ключові слова: надзвичайна ситуація, алгоритм оптимального прогнозування, пристрій оптимального виявлення, стан, небезпечний об'єкт.

B.B. Pospelov, V.A. Andronov, E.A. Ribka

Algorithms and devices of optimum forecasting and detection of extreme situations in the case of unknown functions of losses

Considered non-classical approach to the synthesis of algorithms and devices for optimal prediction and detection of dangerous states of objects from the observed data in the case of impossibility of exact specification of loss functions is considered. The main difference between the obtained algorithms and devices for optimal prediction and detection is that the separating function is determined by loss functions that depend on the observed data, the reconstructed composite parameter vector, and a priori information about the observed dangerous states of objects.

Keywords: emergency situation, optimal prediction algorithm, optimal detection device, state, dangerous object.