

Модель системы управления борьбой с природными пожарами

Г.А. Доррер,
проф. каф. ИУС, д.т.н., проф.
И.А. Буслов,
С.В. Яровой,

СибГУ им. М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск

Предложена иерархическая модель системы управления локализацией природного пожара, предназначенная для использования при принятии решений оперативным персоналом. На верхнем уровне системы по поступившей информации о пожаре, природных и погодных условиях производится определение общей стратегии управления на основе теории аналитического конструирования оптимального регулятора Калмана-Летова с использованием простой модели, описывающей динамику площади пожара. На последующих уровнях осуществляется реализация закона управления путем воздействия на пожар и оценка его фактического состояния по данным съемки пожара со спутника или БВС, а также путем моделирования с помощью специальной ГИС-ориентированной системы, которая прогнозирует конфигурацию пожара и определяет в динамике величину его площади, длину горящей кромки и другие параметры.

The hierarchical model of a control system of localization of the wildfire intended for use at decision-making by operation personnel is offered. At the top level of system on the arrived information on the fire, natural and weather conditions definition of the general strategy of management on basis of the theory of analytical designing of the optimum regulator of Kalman-Letov with use of the simple model describing dynamics of the fire area is made. At the subsequent levels the realization of the law of management by impact on the fire and assessment of its actual state according to shooting of the fire from the satellite or BVS and also by modeling by means of a special GIS-oriented system which predicts a configuration of the fire and determines the size of its area, length of the burning edge and other parameters in dynamics is enabled.

Введение

Стихийные природные пожары, к которым относятся пожары в лесах, степях, на торфяниках и других природных объектах – опасные и динамичные процессы, наносящие большой ущерб природе и объектам инфраструктуры, часто приводящие к гибели людей. Пожары возникают, как правило, случайно во времени и пространстве, зачастую в труднодоступных местах и являются весьма неудобным объектом для изучения и воздействия. С точки зрения теории управления – это объекты с распределенными параметрами типа движущейся волны в нестационарной и анизотропной среде на поверхности Земли. Управление такими объектами также носит пространственно-распределенный характер. При этом, возникают задачи рационального планирования и управления этими силами и средствами. Для их решения разработан ряд регламентирующих документов [1], [2]. Кроме того, ведутся работы по созданию теории управления процессами борьбы с природными пожарами. К этому направлению относятся работы по локализационному управлению, в которых ставится задача расчета путей движения противопожарных команд, осуществляющих локализацию пожара [3], [4]. Другое направление исследований – расчет оптимального использования сил и средств для ликвидации природных пожаров – рассматривалась в работах [5] и [6]. В этих работах на основе принципа максимума Понтрягина получены выражения для оптимального закона наращивания противопожарных сил при постоянной скорости фронта пожара. Во всех указанных работах предполагалось, что управление осуществляется в разомкнутом режиме, без учета фактического состояния системы. Не учитывались также возможные помехи и неполнота информации об объекте управления.

В последние годы в связи с созданием космических систем мониторинга природных пожаров, а также с быстрым развитием технологии использования беспилотных воздушных судов (БВС) появилась возможность в режиме реального времени оценивать параметры природных пожаров, что открывает путь к созданию систем управления с обратной связью.

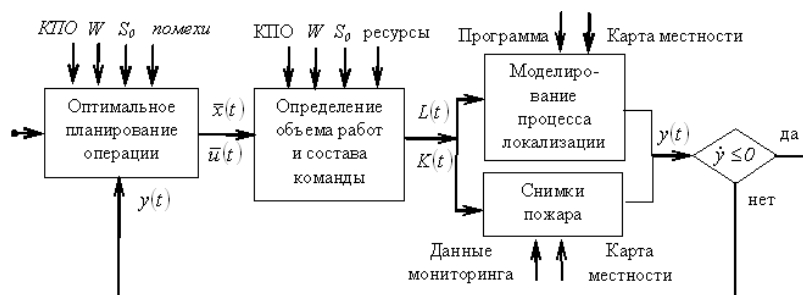


рис.1 Структурная схема системы оптимального управления противопожарными силами и средствами

В данной работе задачу управления противопожарными силами и средствами предлагается разделить на несколько уровней, схематически показанных на рис. 1.

На первом уровне рассматривается модель с единственной фазовой переменной – площадью, пройденной пожаром. Динамика площади пожара является наиболее важным показателем, определяющим, с одной стороны, ущерб от пожара, а с другой – успешность борьбы с ним. Для этой переменной составляется уравнение динамики, на основе которого возможно получение алгоритма оптимального управления с помощью теории аналитического

конструирования регуляторов (АКОР) [7], [8]. Полученное решение служит планом-заданием для реализации и корректировки решений на последующих уровнях.

На втором уровне происходит переход к новой переменной, которая определяет объем работы по ликвидации пожара. Такой переменной служит протяженность горящей кромки, которую необходимо потушить. Этот параметр может быть оценен либо путем обработки снимка реального пожара, либо путем расчета и прогнозирования на основе геометрической модели процесса распространения пожара [3], [4]. Здесь же решается задача по выбору состава и необходимого количества противопожарных сил и средств.

Далее производится моделирование процесса локализации и ликвидации пожара на карте местности с помощью специальной ГИС-ориентированной системы, которая прогнозирует конфигурацию пожара и определяет в динамике величину его площади, длину горящей кромки и другие параметры. Эти данные также могут получаться и корректироваться путем непосредственной съемки пожара.

Полученная тем или иным способом оценка величины площади пожара является сигналом обратной связи, она поступает на верхний уровень системы, где с помощью фильтра Калмана корректируется управляющее воздействие, и весь цикл управления повторяется. Критерием остановки описанного процесса управления является прекращение роста площади, пройденной пожаром, то есть равенство нулю производной величины площади по времени.

1. Модель динамики природного пожара и управляющих воздействий

В данной работе принята следующая модель изменения площади природного пожара во времени [10]:

$$\dot{x}(t) = k(t) \cdot t^\alpha \quad (1)$$

где $t \in [0, T]$ – время, *сутки или часы*; при этом $t = 0$ – время возникновения пожара, T – горизонт планирования, $x(t)$ – площадь, пройденная пожаром к моменту t , *га*, $k(t)$ – коэффициент, имеющий размерность *га/сутки* ^{α} , α – числовой параметр, определяющий скорость возрастания площади. С этим параметром связано изменение скорости движения фронта пожара: при $\alpha = 2$ эта скорость постоянна, при $\alpha < 2$ скорость фронта со временем уменьшается, при $\alpha > 2$ скорость фронта возрастает. Указанные параметры зависят от множества факторов, в первую очередь, от класса пожарной опасности (КПО) в лесу, состава растительных горючих материалов и скорости ветра. [2], [7]. Период времени от t_0 до t_s соответствует свободному распространению пожара, когда площадь пожара увеличивается с нарастающей скоростью. С момента t_s вследствие противопожарных мер скорость прироста площади уменьшается и становится равной нулю в момент ликвидации

пожара t_f . Рассмотренная модель описывает идеальный теоретический случай, когда пожар распространяется в стационарных по времени и однородных по пространству условиях, а борьба с пожаром ведется эффективно. Модель является сравнительно грубой, ориентированной в основном на получение качественных оценок процесса распространения и локализации пожара. Однако такая модель используется на практике для принятия решений при борьбе с крупными пожарами, она принята и в работах [5] и [6]. Борьба с пожаром начинается в момент $t_s > 0$, при этом противопожарные меры приводят к уменьшению параметра $k(t)$ до того момента, когда площадь пожара перестанет увеличиваться, при этом производная $\dot{x}(t)$ в момент t_f станет равной нулю, что соответствует локализации пожара. Из (1) следует, что скорость увеличения площади при $t \geq t_s$ равна:

$$\dot{x}(t) = \alpha k(t) t^{\alpha-1} + \dot{k}(t) \cdot t^\alpha = \frac{\alpha}{t} x(t) + \dot{k}(t) t^\alpha, \quad t \geq t_s, \quad k(0) = k_0. \quad (2)$$

Из (2) видно, что управляющим воздействием в данной модели является производная $\dot{k}(t)$, т.е. скорость изменения коэффициента $k(t)$. В рассмотренных ниже задачах для удобства изменен отсчет времени t , он начинается с момента начала ликвидации пожара t_s , т.е. время фактически равно $t + t_s$.

Сформулируем теперь задачу ликвидации природного пожара в терминах теории управления. Модель управляемой системы в данном случае имеет вид:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t) \cdot u(t), \quad (3)$$

$$A(t) = \alpha(t + t_s)^{-1}, \quad B(t)u(t) = \dot{k}(t) \quad (4)$$

с начальными условиями: при $t = 0$ $x(0) = kt_s^\alpha$.

Обычно в борьбе с природным пожаром участвуют различные силы и средства, количество их видов обозначим n . Тогда управляющие воздействия по тушению пожара можно представить в виде вектора $u(t) = [u_1(t), \dots, u_n(t)]^T$,

где $u_i(t)$ – количество сил i -го вида, $i = 1, \dots, n$, участвующих в борьбе с пожаром и воздействующих на него различными средствами,

Интенсивность воздействия на пожар каждого из видов сил и средств задается вектором $B(t) = t^\alpha [b_1 \dots b_n]$, компоненты которого b_i определяют величину снижения прироста площади пожара на единицу соответствующих сил и средств в единицу времени.

В дальнейшем будем считать, что $x(t)$ – это площадь пожара, рассчитанная по модели. Кроме того, переменная $y(t)$ будет обозначать фактически наблюдаемую площадь пожара.

2. Задача управления борьбой с пожаром с использованием обратной связи по состоянию

Процесс управления ликвидацией пожара мы рассмотрим в детерминированной постановке, т.е., предполагая отсутствие случайных помех и полную наблюдаемость процесса, когда $y(t) \equiv x(t)$. Такая задача, как известно, называется задачей аналитического конструирования регулятора (АКОР) [8] – [10].

В этом случае динамика площади пожара, находящегося под воздействием противопожарных сил, может быть записана в стандартной форме (3), (4).

Качество управления оценивается квадратичным критерием

$$J = \psi \cdot x^2(T) + \int_0^T [Q \cdot x^2(t) + u(t)^T \cdot R \cdot u(t)] dt \rightarrow \min \quad (5)$$

Поясним смысл параметров, входящих в критерий (5). Положительное число ψ определяет значимость конечного результата процесса управления – величины площади пожара $x(T)$ в момент T . Положительное число Q определяет «цену» ущерба от пожара в течение всей операции. Положительное число R определяет суммарную «цену» затрат на борьбу с пожаром в течение всей операции.

Как известно [9], оптимальное управление $\bar{u}(t)$ системой (3) при квадратичном критерии качества (5) определяется формулой

$$\bar{u}(t) = K(t) \cdot x(t), \quad (6)$$

где коэффициент усиления $K(t)$ – вектор, вычисляемый по формуле

$$K(t) = -R^{-1} B^T(t) \cdot P(t), \quad (7)$$

$P(t)$ – решение в обратном времени $t \in [T, 0]$ скалярного уравнения Риккати

$$\dot{P}(t) = -2A(t)P(t) + B(t)R^{-1}B^T(t) \cdot P^2(t) - Q \quad (8)$$

при условии $P(T) = \psi$.

Определив оптимальное управление (6), можно затем по формуле (3) найти оптимальную траекторию, а по формуле (5) вычислить значение критерия.

Решение рассмотренной задачи позволяет получить оптимальный план управления борьбой с пожаром, оценку оптимального состава сил и средств борьбы с пожаром и оптимальную траекторию изменения площади пожара по времени. Возможна также постановка этой задачи при наличии помех и неполной информации о состоянии объекта управления [8] – [10].

При этом необходимо учитывать следующие особенности задачи, связанные с управлением борьбой с пожаром.

- Площадь, пройденная огнем, не может уменьшаться. Поэтому, если при вычислениях величина $\dot{x}(t)$ становится нулевой или отрицательной, то цель управления достигнута, пожар локализован или потушен, и дальнейшие расчеты следует прекратить. Момент времени, при котором наступает это событие, и есть момент окончания операции t_f .
- Если априори заданный при расчете момент T величина $\dot{x}(t)$ больше нуля, то это означает, что при заданных параметрах задача не разрешима, т.е. пожар к установленному сроку не удастся локализовать или потушить. В этом случае необходимо изменить исходные данные.

3. Определение объема работ по локализации пожара и необходимых сил

На данном этапе управления требуется по рассчитанной оптимальной величине необходимого управляющего воздействия $\bar{u}(k)$ и оценке величины площади пожара $\bar{x}(k)$ определить необходимые силы и средства для ликвидации пожара на каждом временном шаге k . Для этого необходимо оценить длину горящей кромки пожара $E(k)$, которая определяет трудоемкость работы по борьбе с пожаром, и рассмотренная в п. 1 модель должна дополниться сведениями об ожидаемой конфигурации пожара.

Для этой цели используется описание фронта пожара в виде волны на плоскости, конфигурация которой задается скалярной функцией $G(z, t) = 0$, где $z = [z_1 \ z_2]$ – координаты на карте местности, t – время [5]. Движения фронта в соответствии с принципом Гюйгенса определяется уравнением Гамильтона-Якоби

$$\frac{\partial G}{\partial t} + v_n |grad G| = 0 \quad (9)$$

где v_n – вектор нормальной скорости перемещения фронта ∂G в точке z . В свою очередь, v_n представляется как $v_n(\varphi, w) = v_0(w) \cdot \xi(\varphi, w)$, где $v_0(w)$ – максимальная скорость распространения фронта пожара (в направлении ветра или уклона местности); w – скорость ветра, м/сек, $\xi(\varphi, w)$, $|\xi(\varphi, w)| \leq 1$ индикатриса нормальной скорости фронта – функция, определяющая конфигурацию пожара, φ – угол между направлением нормали к линии фронта пожара и направлением ветра ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$).

Принятие решений по составу и количеству противопожарных сил и средств производится на каждом временном шаге руководителями тушения пожара на основе нормативных документов, [1], [2], исходя из требований к интенсивности тушения $\bar{u}(k)$, погодных и природных условий (класса пожарной опасности КПО, скорости ветра и др.) и фактического наличия ресурсов с учетом приведенных выше расчетов. Более подробно данный вопрос мы не рассматриваем.

4. Оценка конфигурации пожара и процесса его локализации на местности

Все рассмотренные выше расчеты строились на основе упрощенных моделей (1) и (9). Более точная и полная картина процессов распространения и локализации пожара в режиме реального времени может быть получена путем съемки пожара авиационными или космическими средствами. В настоящее время эффективным средством получения оперативной информации о пожаре являются беспилотные воздушные суда (БВС) [13]. При отсутствии или недостаточности оперативной информации конфигурация пожара может быть оценена путем математического моделирования процесса распространения в ускоренном режиме на карте местности. В настоящей работе использована новая модель процессов распространения и локализации пожара, основанная на агентном подходе к модели вида (9) [12]. Полученные в результате моделирования данные о фактической площади $y(k)$, пройденной пожаром к моменту k , являются сигналом обратной связи и поступают в систему для расчета оценки площади пожара $\bar{x}(k+1)$ и сигнала управления $\bar{u}(k+1)$ на следующем шаге процесса управления. Кроме того, в результате моделирования уточняется длина горящей кромки $E(k)$, что позволяет уточнить состав сил и средств, необходимых для тушения пожара.

5. Пример

Приведем пример расчета оптимального процесса управления борьбой с пожаром при следующих исходных данных, которые соответствуют параметрам одного из природных пожаров, зарегистрированных в Красноярском крае:

$$T = 8; k = 1, \dots, 8; \Delta t = 1 \text{ час}; \psi = 7; \alpha = 2; A = \alpha / (3 + k); x_0 = 50; n = 3; B(k) = k^\alpha [1 \ 2 \ 3]; Q = 1; R = 1.$$

Расчет проводился в дискретном времени соответствии с процедурой, представленной на рисунке 1 и формулами (6) – (8), его результаты представлены в виде графиков на рисунке 2. В борьбе с пожаром участвуют 3 команды с разной производительностью, что определено вектором $B(k)$. Для оценки значений фактической площади и длины горящей кромки во времени производилось моделирование процессов распространения и локализации пожара с помощью упомянутой выше программы, основанной на агентном подходе. Конфигурация пожара и горящей кромки для трех моментов времени показана на рисунке 3.

Рисунок 2 иллюстрирует поведение системы при наличии помех с учетом сигналов обратной связи $y(k)$, которые получены путем моделирования процесса локализации. Для сравнения приведены значения площади пожара $x(k)$, полученные в детерминированной задаче.

Из приведенных данных видно, что система реагирует отклонениями на фактическое значение площади, однако в основном следует намеченному детерминированной моделью графику.

Результаты расчётов показывают, что пожар локализован на 6-м шаге. Этот же результат дает агентное моделирование конфигурации пожара, выполненное с помощью программы [12] (рисунок 3).

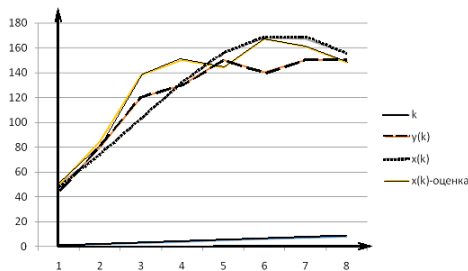


рис.2 - Графики изменения площади пожара при расчете по формулам (12) – (13) и (14) – (24). Обозначения:

$x(k)$ – оптимальная траектория изменения площади пожара, рассчитанная методом АКОР при детерминированной постановке; $y(k)$ – площадь пожара, полученная по результатам моделирования;

$\bar{x}(k)$ – оптимальная оценка величины площади пожара с помощью фильтра Калмана при наличии помех.

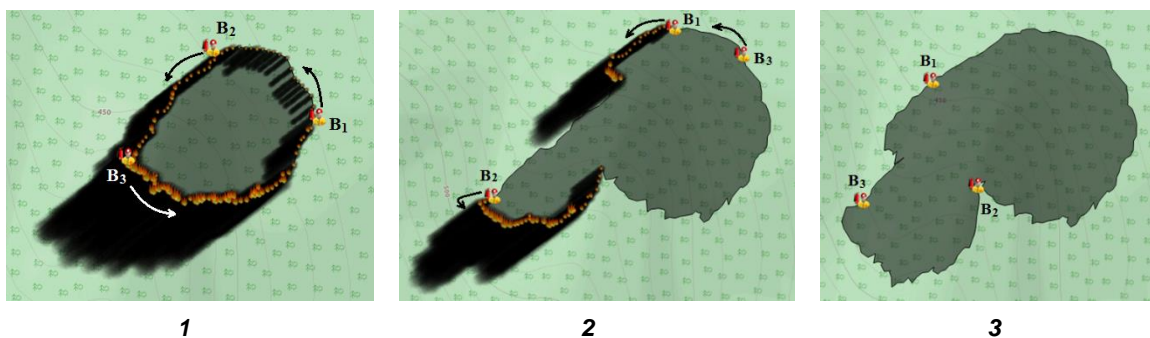


рис. 3 – Результаты моделирования процесса распространения природного пожара с помощью агентной модели

Агенты типа **A** моделируют кромку пожара, а агенты **B₁**, **B₂**, **B₃** действие трех пожарных команд. Скорость локализации каждой командой определяется вектором $B(k)$. Стрелками показано направление движения команд. Показаны также дымовые шлейфы, порождаемые агентами типа **A**.

Временной шаг расчета равен 1 часу. Конфигурация пожара показана на слайдах. Слайд 1: $k=0$. Начальная конфигурация пожара, команды приступили к тушению; $y(0) = 45$ га Слайд 2: $k=4$. Команда **B₃** завершив тушение своего участка кромки, приступила к тушению участка **B₁**; $y(4)=130$ га. Слайд 3: $k=6$. Локализация завершена; $y(6) = 150$ га.

Заключение

Изложенные материалы позволяют, на наш взгляд, сделать следующие выводы.

1. Предложенная в работе иерархическая модель управления процессом борьбы с природными пожарами, сочетающая планирование на основе простейшей модели пожара вида $S(t) = k(t) \cdot t^\alpha$ с последующим уточнением величины площади пожара, а также размера требуемых сил и средств, позволяет осуществлять оптимальное планирование процесса управления с обратной связью и затем реализовать этот план с учетом фактического поведения пожара и хода его ликвидации.
2. Теория оптимального управления с квадратичным критерием вида (5) и оценкой состояния системы на основе фильтра Калмана позволяет качественно верно описывать динамику изменения площади пожара и процесса его ликвидации в условиях помех и неполноты информации об объекте, что позволяет использовать ее для проектирования систем поддержки принятия решений при борьбе с природными пожарами.

Литература

1. Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров. – Гослесхоз СССР, М.: 1985. – 96с.
2. Андреев Ю.А. Брюханов А.В. Профилактика, мониторинг и борьба с природными пожарами (на примере Алтае-Саянского экорегиона): справочное пособие / Ю.А. Андреев, – Красноярск, 2011. – 272с.
3. Доррер Г.А. Динамика лесных пожаров. /Г.А. Доррер. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 404с.
4. Dorrer G. A. Wildfire Dynamics Modeling Based on Hamilton Mechanics Methods / Fourth Fire Behavior and Fuels Conference. July 1-4, St. Petersburg, 2013, Russia. Conference Feature Speakers, P.13
5. Parks G.M. Development and application of a model for suppression of forest fires / /Manage Science/ - 1964, - Vol 10, N 4. – P 760 – 766.
6. Parlar M. Vicson R.G. Optimal Forest Fire Control an Extension of Park's Model / Forest Science. – 1982/ - Vol. 28, N2. – P. 760 – 766.
7. Коморовский, В. С. Доррер Г. А. Методика расчета параметров лесных пожаров как динамических процессов на поверхности Земли с использованием данных космического мониторинга /Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2010. – Вып. 3 (29). – С. 47-51
8. Калман Р. Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем / М.: Мир, 1971. – 400 с.
9. Афанасьев В.Н. В.Б. Колмановский, В.Р. Носов Математическая теория конструирования систем управления / М.: Высшая школа, 1998. – 574 с.
10. Перепелкин Е.А. Основы теории управления: Учебное пособие / Алтайский гос. техн. ун-т. им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2001. – 115с.
11. Mell, W. A. Jenkins, J. Gould, Ph. Cheney A physics-based approach to modeling grassland fires / International Journal of Wildland Fire. – 2007. – Vol. 16. - P. 1- 22.
12. Яровой С.В. Применение агентных моделей для имитации процесса локализации природных пожаров /Электронный научный журнал «Программные продукты, системы и алгоритмы» Вып. № 2, 2016г.
13. Доррер Г.А. и др. Аппаратно-программный комплекс для контроля пожарной обстановки в природной среде на базе беспилотного воздушного судна / Системы проектирования технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM–2017). Труды XVII международной научно-практической конференции 12-14 ДЕКАБРЯ 2017г. ИПУ, Москва. – С. 186-188.