

УДК 621.3 : 614.84

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

И. А. Левко

*Белорусский государственный университет,
220030, Республика Беларусь, г. Минск, просп. Независимости, 4
E-mail: levkoi@bsu.by*

Рассматриваются закономерности, связывающие точность определения очага возгорания и площадь контроля систем дистанционного обнаружения лесных пожаров. Указанные характеристики оказывают существенное влияние на эффективность данных систем. Повышение эффективности может быть достигнуто за счет совместного использования средств визуального контроля и автоматического отображения лесных кварталов контролируемой местности. Обсуждаются процедуры поиска номера лесного квартала и определения его границ.

Ключевые слова: лесные пожары, верховой пожар, низовой пожар, система обнаружения лесных пожаров, предельная площадь контроля, определение местоположения, лесные кварталы, визуализация.

Введение. Пожары наносят серьезный ущерб лесным массивам. Раннее обнаружение такого катастрофического явления и оперативное проведение мероприятий по ликвидации пожаров позволяют предотвратить уничтожение лесов и находящихся в их зоне населенных пунктов. Выявление пожара предполагает обнаружение очага возгорания и определение его местоположения.

Для противопожарной охраны используются дистанционные системы противопожарной сигнализации (ДСПС), выполняющие операцию обнаружения факта пожара в автоматическом режиме [1], и дистанционные вспомогательные системы обнаружения (ДВСО), обеспечивающие информационную поддержку в автоматизированном режиме человеку-оператору при выявлении лесных пожаров [2].

В состав таких систем входит приемная аппаратура, регистрирующая излучение, которое можно разделить на два типа: собственное излучение нагретых твердых и газообразных продуктов сгорания клетчатки, составляющей основу древесины, в ИК-диапазоне 2–8 мкм и рассеянное частицами дыма солнечное излучение в видимом диапазоне спектра 0,3–0,8 мкм. В связи с этим надежность обнаружения пожара зависит от солнечной активности и времени суток.

ИК-аппаратура обеспечивает регистрацию, как правило, открытого огня, или верхового пожара, и имеет большую вероятность пропуска пожара при низовом характере протекания данного процесса. Это объясняется тем, что при низовых пожарах в хвойных или смешанных лесах на начальном этапе их возникновения существенного увеличения температуры у кромки леса не происходит за счет того, что твердые и газообразные компоненты продуктов сгорания по мере подъема в более высокие слои атмосферы теряют значительную часть энергии, выделившейся при горении, на теплообмен с окружающей средой.

ДСПС в автоматическом режиме работы требуют обработки значительного объема физической информации о состоянии окружающей среды и использования уникальной регистрирующей аппаратуры [1]. Радиус действия этих систем в ИК- и видимом диапазонах излучения не превышает 1,5 и 6 км соответственно.

ДВСО создаются на базе типовой аппаратуры и обеспечивают более широкий радиус действия в пространстве, но требуют при эксплуатации специально обученного персонала [2].

Целью данной работы является решение проблемы своевременного проведения противопожарных работ с помощью системы обнаружения лесных пожаров, обеспечивающей оптимальную площадь контроля и простоту эксплуатации системы.

Предельная площадь контроля и определение местоположения очага возгорания. Предельная площадь контроля S_c является важной характеристикой эффективности систем обнаружения лесных пожаров (СОЛП), к которым относятся ДСПС и ДВСО. Она складывается из площадей обнаружения отдельных пунктов наблюдения (ПН) S_i и зависит от рельефа контролируемой территории, метеорологических условий, времени суток, точности локализации очага возгорания и допустимых значений вероятностей ложной тревоги и пропуска пожара [1, 2].

В свою очередь, площадь обнаружения S_i может быть выражена через радиус обнаружения каждого ПН (вышки) в предположении, что проходящая через объект (открытый огонь или дымовой шлейф) оптическая ось наблюдения пересекает линию горизонта в зоне, контрастной с температурой или цветом объекта наблюдения, по формуле

$$S_i = \iint_A \Phi(r, \alpha) dr d\alpha, \quad (1)$$

где A — область допустимого контраста, Φ — функция контраста объекта наблюдения на местности, r — радиус наблюдения, α — азимут. Функция контраста является сложной характеристикой системы, связанной с различными параметрами, к которым можно отнести рельеф местности, время суток, метеорологические условия, высоту вышки ПН, качество приемно-регистрирующей аппаратуры, качество ретрансляции и воспроизведения видеозображения.

В предельном случае (1) сводится к выражению

$$S_i = \pi R_\beta^2, \quad (2)$$

где R_β — предельное расстояние, при котором вероятность пропуска возгорания меньше допустимой величины при использовании плоской монотонной модели ландшафта, или эффективный радиус обнаружения. Это условие применимо, когда местность представляет собой плоскость, перпендикулярную основанию вышки либо имеющую монотонный наклон как в сторону больших, так и меньших высот. Нарушение монотонности (резкие подъемы или спады высот) приводит к потере контраста и, следовательно, уменьшает площадь обнаружения. При этом выражение (2) дает слишком грубые результаты и для расчетов следует применять выражение (1).

Площадь контроля СОЛП S_c зависит от числа пунктов наблюдения N , S_i отдельных ПН и метода определения местоположения очага возгорания, от которого, в свою очередь, зависит коэффициент $\beta \leq 1$, и может быть представлена уравнением

$$S_c = \beta \sum_{i=1}^N S_i. \quad (3)$$

Эффективность обнаружения, а также площадь контроля зависят не только от контраста, но и от точности определения местоположения очага возгорания. В полярных координатах местоположение однозначно описывается с помощью азимута и расстояния до очага возгорания R_+ . Азимутальные измерения проводятся в СОЛП с высокой точностью [1, 2].

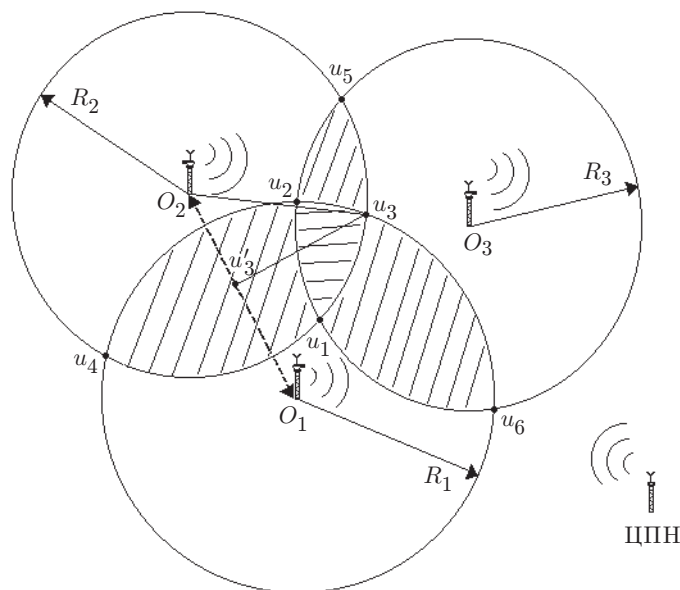


Рис. 1

Однако использование на каждом ПН дальнометрической аппаратуры для измерения R_d приводит к значительным материальным издержкам, хотя при этом удастся получить коэффициент $\beta \approx 1$. Традиционное же измерение дальности с помощью глазомера может давать весьма приблизительные результаты.

При наличии нескольких пунктов наблюдения для решения задачи определения местоположения очага применяют метод засечки, или кросспеленгации [1]. Этот метод требует измерения направления из различных точек наблюдения, как правило двух или трех, и дает хорошие результаты для подвижных пеленгаторов [3]. Если в СОЛП используются стационарные (неподвижные) ПН, то площадь контроля существенно снижается, так как условие пеленга выполняется только для ограниченной области. На рис. 1 показана СОЛП, состоящая из центрального пункта наблюдения (ЦПН) и трех пунктов наблюдения O_1, O_2, O_3 , имеющих радиусы обнаружения R_1, R_2, R_3 соответственно. Область контроля, для которой применим метод засечки, заштрихована. Проведем количественную оценку коэффициента β для пунктов наблюдения O_1 и O_2 (область $u_1u_4u_2u_3$ на рис. 1), расстояние между которыми (отрезок O_1O_2) равно D , при условии абсолютного контраста и плоского рельефа местности. В предположении, что $R_1 = R_2 = R_\beta$, коэффициент β будет задаваться выражением

$$\beta = (2/\pi)(\arccos \gamma - \gamma\sqrt{1 - \gamma^2}), \quad (4)$$

где $\gamma = D/2R_\beta = \cos \angle u_3^1 O_2 u_3$. Если, например, $R_\beta = D$, то с учетом выражения (4) $\beta = 0,4$. Отсюда с помощью выражений (2), (3) получим $S_c = 0,4\pi R_\beta^2$, тогда как два ПН потенциально обеспечивают $S_c = 2\pi R_\beta^2$. Таким образом, площадь обнаружения при использовании метода засечки в стационарной СОЛП с двумя ПН уменьшается в 5 раз. Повышение точности определения расстояния при использовании пеленга на трех носителях угломерной системы O_1, O_2, O_3 приводит к еще более существенному уменьшению площади контроля (область $u_1u_2u_3$ на рис. 1).

Следует отметить, что и дальнометрия, и засечка объекта, пространственные характеристики которого зависят от угла наблюдения (например, дымовой шлейф при низовом пожаре), представляют определенные трудности.

Визуализация квартальной разметки. Стационарные СОЛП, использующие неподвижные ПН, обеспечивают возможность геодезической привязки ПН объекта и его положения на плане местности. Практически это достигается установлением связи между пространственным положением оптической оси регистрирующей аппаратуры каждого ПН и топографической основой местности. При этом отпадает необходимость определения расстояния до объекта, так как появляется возможность точно установить, какие объекты попадают в поле зрения ПН в каждом конкретном случае.

Положение главной оптической оси регистрирующей аппаратуры может быть определено с помощью двух координат: α — азимут, ε — угол возвышения. Для описания общего поля наблюдения требуется дополнительная характеристика τ — коэффициент увеличения оптического сенсора, который складывается из увеличения оптики входного объектива и коэффициента изменения размера элемента изображения преобразователя оптического излучения в электрический сигнал или дискретного увеличения. Для обнаружения начального этапа возникновения лесного пожара с помощью данных координат должна быть обеспечена возможность математического описания участков местности площадью 250×250 м на расстояниях $\leq R_\beta$. Отсюда определяется дискретность задания α и ε . Градусная мера угловой протяженности отрезка Δs , перпендикулярного линии наблюдения, может быть представлена в виде

$$\Delta\alpha \cong \frac{180 \Delta s}{\pi R_\beta}. \quad (5)$$

Если принять $R_\beta = 10$ км, $\Delta s = 250$ м и $\tau = 1$, то угловая протяженность $\Delta\alpha$ отрезка Δs , перпендикулярного линии наблюдения, на плоскости составляет около $1,4^\circ$. Данная дискретность обеспечивается типовыми поворотными устройствами.

Градусная мера угловой протяженности отрезка ΔR , расположенного вдоль линии наблюдения, может быть рассчитана с помощью выражения

$$\Delta\varepsilon \cong \frac{180h \Delta R}{\pi R_\beta^2}, \quad (6)$$

где h — высота вышки ПН. Для $R_\beta = 10$ км, $h = 30$ м, $\Delta R = 250$ м на основании выражения (6) получим $\Delta\varepsilon = 0,0043^\circ$. Для реализации такой дискретности требуется датчик углового положения, имеющий линейность 0,006 % в угловом диапазоне 70° , что вполне достижимо на практике.

Для современных оптических сенсоров величина τ изменяется в пределах 1–100. Поэтому значение 0,5 является достаточным для задания дискретности изменения коэффициента увеличения τ .

Как правило, для создания планов квартальной разметки лесных хозяйств используется масштаб изображения леса 1 : 10000 [4]. Для описания территории, контролируемой с помощью одного ПН, в декартовой системе координат при $R_\beta = 10$ км требуется задать координаты минимум 30 000 элементарных участков (при дискретности 100×100 м), т. е. около 60 000 точек в трехмерном пространстве. Это возможно при использовании, например, персонального компьютера.

Однако применение технологии географических информационных систем (ГИС) позволяет избежать необходимости хранения в машинной памяти цифровой копии обычных топографических карт, которые представляют совокупность высот точек на местности над уровнем моря как функцию широты и долготы в зависимости от масштаба карты и метода проецирования сферической поверхности на плоскость [5]. С учетом этого на основе

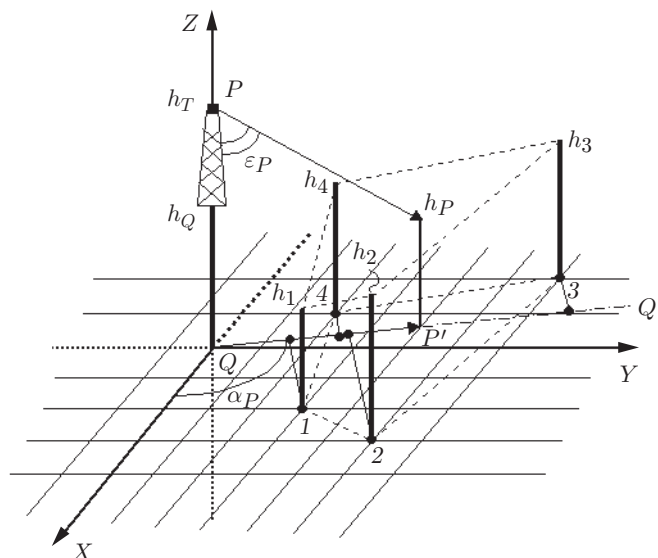


Рис. 2

плоской модели местности расстояния между точками могут быть выражены через углы возвышения, а положение точек — через азимуты, что снижает количество хранимых координат и обеспечивает возможность эффективной выборки географических данных по различным критериям поиска при выявлении очага возгорания.

Для пояснения данного факта рассмотрим упрощенную модель местности, приведенную на рис. 2. Здесь начало координат Q совмещено с положением вышки ПН, высота основания которой над уровнем моря задается величиной h_Q , а высота самой вышки — h_T . На рисунке показаны только один квартал, границы которого представлены высотами над уровнем моря h_1, h_2, h_3, h_4 , и точка пересечения главной оптической оси P (в данном случае линии визирования) детектора пожара с земной поверхностью, высота которой равна h_P . Остальные точки местности не отображены. Для установления принадлежности точки h_P к определенному лесному кварталу требуется решить задачу принадлежности ее к области, задаваемой границами этого квартала.

Для этого в линейной системе координат границы всех кварталов могут быть представлены в виде прямых линий в пространстве при аппроксимации такой области многоугольником. Критерием принадлежности точки h_P к определенному кварталу может служить учет пересечений проекции линии визирования на плоскость XU и проекций границ кварталов на эту же плоскость. Очевидно, что у искомого квартала число таких пересечений будет на одно меньше от максимально возможного числа пересечений.

Однако данный подход требует проведения большого числа операций умножения и деления, что существенно увеличивает время определения номера квартала. Процедуру поиска квартала можно ускорить, если перейти к угловым координатам для задания точек земной поверхности. При этом каждая i -я точка будет описываться азимутальным углом α_i , углом возвышения ε_i и высотой h_i . Согласно рис. 2 ряд чисел, образованный разностями азимутального угла текущего положения линии визирования и определяющих границы квартала азимутальных углов $(\alpha_p - \alpha_i)$, для изображенного квартала будет знакопеременным, а для всех остальных кварталов — знакопостоянным.

Эта же закономерность справедлива для ряда чисел, образованного разностями угла возвышения текущего положения линии визирования и углов возвышения, задающих гра-

ницы квартала. Тогда критерием попадания линии визирования в определенный квартал будет являться одновременное выполнение следующих неравенств:

$$\sum_{i=1}^n \operatorname{sgn}(\alpha_p - \alpha_i) < n, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n \operatorname{sgn}(\varepsilon_p - \varepsilon_i) < n, \quad (8)$$

где n — число точек, определяющих границы квартала. При этом не требуется учитывать величину h_i . На типовых планах квартальной разметки лесничеств величина кварталов может колебаться от 50 до 1600 га [4]. Если принять за основу минимальную площадь квартала 50 га и аппроксимацию каждого квартала четырехугольником, то при $R_\beta = 10$ км требуется задать координаты 630 таких областей, т. е. всего лишь около 1260 пар угловых координат α , ε . К тому же обработка данных по критериям (7), (8) может быть реализована на 8-разрядном однокристальном микроконтроллере, имеющем банк Flash-памяти со страничной организацией объемом 256 Кбайт и RAM-памяти (Random-Access Memory) объемом 32 Кбайт. Для визуализации положения общего вида контролируемой местности относительно квартальной разметки на данное изображение может быть наложен указатель главной оптической оси и номер квартала, например, в виде перекрестия. Тогда при обнаружении очага пожара для определения его местоположения достаточно навести вышеуказанное перекрестие на этот объект.

Кроме того, в некоторых случаях оперативность доставки средств пожаротушения может быть повышена, если известно расположение границ квартала на изображении местности. Решение этой задачи требует визуализации квартальной разметки в реальном масштабе времени. Основной сложностью здесь является тот факт, что при изменении увеличения детектора пожара изменяется положение границ лесного квартала на изображении. Поэтому определение положения границ квартала необходимо производить относительно точки, инвариантной к изменению увеличения. Такой точкой может быть выбрано положение оптической оси детектора пожара, так как из теории оптических приборов известно, что изображение точечного источника, находящегося на оптической оси оптической системы, будет также находиться на этой оси независимо от увеличения данной системы. Для упрощения расчетов можно полагать, что в первом приближении для равнинных территорий все точки земной поверхности, относящиеся к определенному кварталу, лежат на одной плоскости, причем эта плоскость параллельна плоскости XU .

Согласно рис. 2 такой точкой является точка P' , представляющая проекцию точки пересечения линии визирования P с земной поверхностью h_P на плоскость XU . Тогда величина нормалей, проведенных от оснований высот h_1, h_2, h_3, h_4 к проекции линии визирования QQ' на плоскость XU , и положение этих нормалей на линии относительно точки P' могут быть выбраны в качестве базовых отрезков для визуализации границ квартала. Изображение, построенное с учетом вышесказанного в предположении, что номер квартала условно выбран равным 35, представлено на рис. 3. Линия qq' на рисунке соответствует проекции линии визирования QQ' на плоскость XU (см. рис. 2), точка P' — точке P (см. рис. 2). Как известно, двумерные изображения представляются набором элементов изображения (пикселей) и имеют горизонтальную и вертикальную границы, обозначенные на рис. 3 соответственно x_{\max} и y_{\max} . Координаты i -й граничной точки квартала № 35 могут

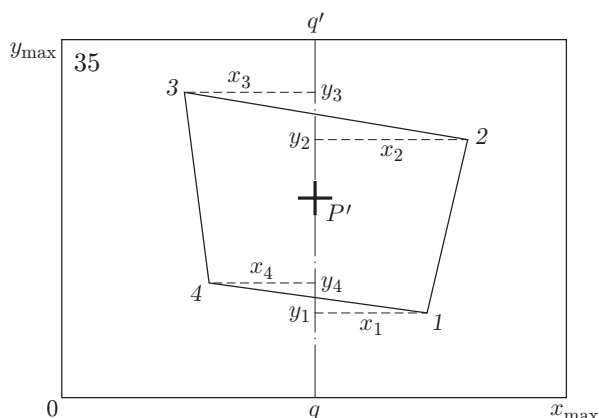


Рис. 3

быть заданы величинами x_i, y_i . Выражения для расчета этих величин согласно теории оптических приборов будут иметь следующий вид:

$$x_i \cong x_p + \frac{\pi R_F \tau (\alpha_i - \alpha_p)}{180}, \quad (9)$$

$$y_i \cong y_p + \frac{\pi R_F \tau (\varepsilon_i - \varepsilon_p)}{180}, \quad (10)$$

где x_p, y_p — координаты точки P' на изображении; R_F — расстояние от оптического центра детектора пожаров до изображения, проецируемого на светочувствительный элемент, например ПЗС-матрицу; α_p, ε_p — угловые координаты линии визирования, выраженные в градусах; α_i, ε_i — угловые координаты граничных точек лесного квартала, выраженные в градусах. Согласно формулам (9), (10) при изменении коэффициента увеличения τ некоторые граничные точки текущего квартала могут выходить за пределы изображения либо быть искаженными из-за недостаточного разрешения изображения. В этих случаях может применяться технология генерализации аналогично ГИС [5]. Кроме того, возможность изменения τ позволяет производить подстройку видимых контуров квартальной разметки в соответствии с положением квартала относительно ПН в автоматическом режиме для того, чтобы на изображении квартал был виден полностью. При этом оптимальное значение τ для каждого квартала может быть занесено в память системы на этапе подготовки ее к работе.

Следует отметить, что задачу визуализации можно также решить и при отсутствии цифровой карты контролируемой местности, если использовать метод калибровки по контрольным поджигам в контролируемом лесном массиве. Для этого достаточно навести линию визирования, задаваемую, например, перекрестием на дымовой шлейф над кромкой леса от контрольного источника огня, выставить оптимальное увеличение изображения местности, задать номер квартала и сохранить азимутальные углы α_i , углы возвышения ε_i и коэффициент увеличения τ в энергонезависимой памяти системы.

Заключение. Наложение квартальной сетки на изображение контролируемой местности обеспечивает оперативность выявления очага возгорания, увеличивает площадь обнаружения лесных пожаров СОЛП до теоретически возможной, снижает аппаратные издержки на развертывание такой системы и не требует от обслуживающего персонала специальной подготовки для работы с ней.

Помимо этого, отпадает необходимость в централизованной иерархической организации СОЛП, которая предполагает наличие центрального пункта наблюдения, координирующего деятельность всей системы, оборудования передачи/приема цифровых изображений местности и телеметрических команд для всех развернутых пунктов наблюдения, а также мощной управляющей ЭВМ на ЦПН, содержащей кроме управляющего программно-математического обеспечения цифровую карту местности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Shamal V.** An automated remote infrared and television system for forest fire and ecological monitoring // Intern. Forest Fire News. 2000. N 23. P. 92.
2. **Artsibashev E., Kolessov V.** TV systems for early detection of forest fires in Leningrad region, Russian Federation // Ibid. P. 108.
3. **Попов Ю. Б., Кураков В. А., Хабарова К. Ю.** Алгоритм определения местоположения подвижного источника излучения в двухпозиционной угломерной динамической системе // Автометрия. 2005. 41, № 4. С. 70–77.
4. **Лесоустройство.** М.: Лесн. пром-сть, 1974.
5. **Шайтура С. В.** Геоинформационные системы и методы их создания. Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 1998.

Поступила в редакцию 3 октября 2008 г.
