

Дистанционное обнаружение очагов пожара с помощью ультрафиолетового сенсора

В. В. Егоров¹, А. П. Калинин², А. И. Родионов³,
И. Д. Родионов³, И. П. Родионова³

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: victor_egorov@mail.ru

² *Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН*
Москва, 119526, Россия
E-mail: kalinin@ipmnet.ru

³ *Научно-технический центр «Реагент», Москва, 119991, Россия*
E-mail: irodionov@reagent-rdc.ru

Исследованы возможности использования бортового ультрафиолетового сенсора в диапазоне длин волн 250–280 нм для оперативного обнаружения, определения координат очагов пожаров и наведения на них носителя огнегасящей жидкости (например, воды). Описаны принципы функционирования сенсора, реализация которых позволяет оперативно определять азимут и угол визирования очага пожара в бортовой системе координат. Показано, что эти данные в совокупности со штатными данными бортового доплеровского измерителя скорости и сноса и высотомера дают возможность вычислять текущую дальность до очага пожара, наводить на него авиационный носитель и информировать экипаж о рациональном моменте сброса огнегасящей жидкости. Отмечается возможность работы системы обнаружения в условиях полёта как над плоским рельефом местности, так и над неровным. Таким образом, обеспечивается полная автономность работы всей бортовой системы обнаружения. Рассмотрены вопросы определения предельной дальности обнаружения пожара с помощью бортового сенсора в условиях наличия задымления на трассе зондирования и влияния экранирующего свойства растительности для случая лесных пожаров. Приведены расчёты реальных дальностей обнаружения, которые находятся в пределах от 2,4 до 4,7 км.

Ключевые слова: летательный аппарат, УФ-С-сенсор, пожар, обнаружение, координаты, дальность обнаружения, пороговая чувствительность

Одобрена к печати: 16.06.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-51-57

Введение

Своевременное обнаружение очагов пожаров — одна из актуальнейших задач Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий и ФБУ «Авиалесоохрана». Её эффективному решению во многом способствует применение воздушных средств дистанционного авиамониторинга, снабжённых бортовой аппаратурой различного спектрального диапазона (Брюханов, Коршунов, 2017). В частности, хорошо известны методы и средства использования тепловизионной и радиотепловой аппаратуры, визуального обнаружения и т. п. Однако они не приспособлены автономно определять координаты очага пожара, а привлечение для этих целей системы спутниковой навигации, например GPS/ГЛОНАСС (Global Positioning System, система глобального позиционирования/Глобальная навигационная спутниковая система), не может обеспечивать достаточной надёжности их работы, что связано с возможностью появления нештатных ситуаций при обострении международной обстановки.

В этой связи одним из перспективных методов дистанционного обнаружения очагов пожара может стать использование на борту авиационного носителя ультрафиолетовых (УФ-С) сенсоров (Белов и др., 2010), которые регистрируют ультрафиолетовое излучение в диапазоне 250–280 нм. Эти приборы уже нашли применение для обнаружения коронных и частичных

разрядов, возникающих в местах неисправностей линий электропередач (Белов и др., 2012), организации посадки самолётов (Белов и др., 2014).

Такие сенсоры позволяют не только оперативно обнаруживать очаги возгораний при полёте летательного аппарата (ЛА), но и определять их координаты с высокой геометрической точностью, что особенно важно в условиях дефицита времени в работе указанных выше служб.

Следует отметить, что влияние излучения Солнца в указанном диапазоне подавляется озоновым слоем планеты. Это делает диапазон УФ-С «солнечно-слепым» и весьма привлекательным для создания систем, позволяющих решать различные технические задачи в условиях, когда солнечное излучение может маскировать полезный сигнал.

Актуальной проблемой, стоящей перед бортовыми устройствами обнаружения очагов пожара, оказывается задача своевременного получения информации о локализации небольших источников возгорания (площадью порядка 1 га), что существенно повышает эффективность работы служб пожаротушения. Очевидно, что своевременность приёма информации о пожаре связана с дальностью обнаружения в условиях различной степени задымлённости и экранирования трассы зондирования.

Важным аспектом применения подобного рода бортовых устройств локализации очага пожара служит вопрос о работе сенсора в условиях плоской и пересечённой местности, так как наличие неровностей рельефа при небольшой высоте полёта ЛА влияет на алгоритм определения дальности до цели и, следовательно, на точность определения времени сброса огнегасящей жидкости.

В настоящей работе рассматриваются вопросы дистанционного обнаружения, определения координат и дальности до очага пожара и осуществления наведения на него летательного аппарата по данным бортового монофотонного УФ-С-сенсора, работающего в диапазоне длин волн 250–280 нм, что при наличии модели оседания огнегасящей жидкости позволит определять момент её своевременного сброса.

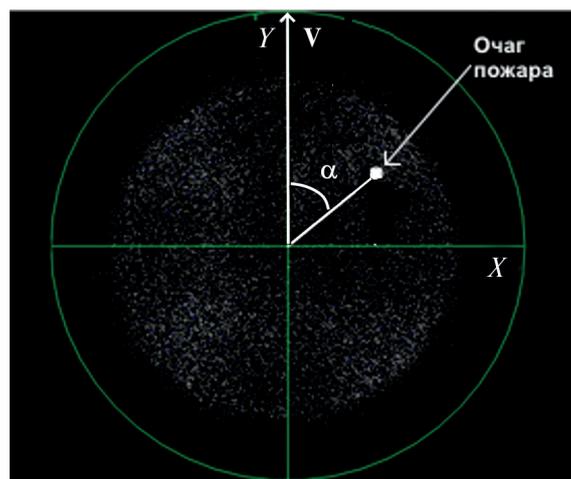
Принципы функционирования бортового УФ-С-сенсора и обнаружения очага пожара

Бортовой УФ-С-сенсор, устанавливаемый на борту летательного аппарата и предназначенный для обнаружения и определения координат очагов пожаров, способен работать автономно — без использования спутниковых систем навигации. Обеспечение функционирования «солнечно-слепого» режима сенсора даёт возможность работы в любое время суток. Высокая чувствительность УФ-С-сенсора позволяет обнаруживать даже небольшие по площади пожары в условиях различной степени задымлённости, поскольку дым, создаваемый пожаром, лишь незначительно рассеивает УФ-излучение. Стволы деревьев, ветви и листья, согласно теории Ми, также не оказывают сильного влияния на рассеяние и экранирование ультрафиолета, формируя при этом весьма узкую индикатрису излучения. В то же время следует учитывать существенное поглощение УФ-С-волн углеродными частицами дыма и элементами растительности.

Основными блоками УФ-С-сенсора являются: входной объектив, снабжённый узкополосным фильтром со средней длиной волны 265 нм и шириной 30 нм; время-координатно-чувствительный детектор (ВКЧД); блок электроники и вычислительный блок. Подробное описание конструкции устройства и его функциональных возможностей можно найти в работе (Белов и др., 2010). Помимо УФ-С-сенсора на борту носителя должен быть предусмотрен спецвычислитель, позволяющий по данным угловых координат очага пожара, определяемых сенсором, а также данным штатного высотомера и доплеровского измерителя скорости и угла сноса (ДИСС) рассчитывать текущие значения дальности до цели и момент своевременного сброса огнегасящей жидкости.

Функционирует УФ-С-сенсор следующим образом. Излучение, исходящее от очага пожара и других источников, попадает в объектив УФ-С-сенсора, где с помощью системы линз и фильтров из всего принимаемого потока оптического излучения выделяют только фотоны в диапазоне длин волн 250–280 нм.

Рис. 1. Отображение очага возгорания на экране монитора (вертикальной стрелкой показано направление строительной оси ЛА). V — вектор путевой скорости, ориентирован вдоль строительной оси Y (боковой снос отсутствует)



Согласно работе (Белов и др., 2010), коэффициент подавления фотонов с длинами волн, отличными от указанного выше диапазона, может достигать 10^{-14} . Прошедший через объектив фотон излучения попадает на фотокатод ВКЧД. С выхода фотокатода выбитый электрон попадает на сборку из двух микроканальных пластин. После микроканальных пластин образовавшаяся лавина электронов поступает на коллекторную систему. По распределению зарядов на коллекторах вычислительный блок определяет угловые координаты очага пожара α (азимут) и β (угол визирования). Точность определения угловых координат центра пожара составляет сотые доли радиана. Например, для сенсора «Скорпион» она равна 0,02 рад (Белов и др., 2010). Это означает, что точность локализации относительно небольшого пожара с дальности 6 км будет равна 120 м, и поэтому проблем с точностью целенавешивания не возникает.

На рис. 1 приведён пример обнаружения источника фотонов УФ-С-излучения, генерируемого очагом пожара, отображаемого в виде яркого пятна на фоне помех, создаваемых шумом фотокатода, фоновым излучением окружающей очаг поверхности, генерационно-рекомбинационным и тепловым шумом. Суммарный уровень шума определяет величину пороговой чувствительности УФ-С-сенсора, называемой также минимальной обнаруживаемой мощностью принимаемого сигнала $P_{\text{пор}}$.

При появлении на экране монитора изображения источника УФ-С-излучения — очага пожара в виде яркого пятна (см. рис. 1) — оператором (штурманом) производится считывание координат его центра, по которым, как уже было сказано выше, определяются угловые координаты цели (азимут и угол визирования очага пожара). На рис. 1 показано определение азимута (угол α) при отсутствии бокового ветра. Вектор путевой скорости ЛА измеряется штатной системой бортового ДИСС. При наличии бокового ветра компонента вектора сноса может быть легко учтена по данным ДИСС.

При получении информации об угле α выдаётся команда на совершение разворота ЛА, в результате которого вектор путевой скорости V ориентируется на пятно очага пожара. Зная угол визирования очага пожара β и располагая информацией о текущей высоте полёта H , получаемой со штатного бортового высотомера, а также путевой скорости V , с помощью спецвычислителя рассчитывают горизонтальное расстояние до очага пожара L и наклонную дальность до него R .

При известных значениях L , R , H , V с помощью известной модели оседания облака воды после её сброса с ЛА (см., например, работу (Москвилин, 2009)) спецвычислителем может быть рассчитан момент сброса воды.

В случае неровного рельефа местности алгоритм определения указанных выше дальностей несколько усложняется, однако при наличии данных штатных измерителей о скорости и высоте полёта ЛА решение этой задачи становится тривиальным.

Дальность обнаружения пожара

Вопрос дальности обнаружения пожара представляется весьма актуальным в связи с необходимостью принятия экипажем решения о сбросе огнегасящей жидкости в условиях дефицита времени. Очевидно, что чем раньше будет обнаружен пожар, тем больше времени может быть

отведено на принятие решения, что, в свою очередь, влияет на точность определения оптимального момента сброса жидкости. На величину предельной дальности очага пожара оказывают влияние такие факторы, как температура пламени, площадь очага, площадь зрачка объектива, шумовой характер УФ-С-сигнала, задымлённость трассы зондирования и экранирование излучения от пожара элементами лесной растительности, а также фоновое излучение.

Рассмотрим вопрос экранирования излучения лесным покровом. Степень экранирования и в конечном итоге ослабления УФ-С-излучения определяется двумя факторами: рассеянием и поглощением. Стволы деревьев, ветки и листья по своим размерам существенно больше длины УФ-С-волны, и сами являются источниками вторичного излучения. Поэтому, согласно теории Ми, индикатриса рассеяния лесного покрова будет сильно вытянутой, т.е. рассеянием УФ-С-излучения можно практически пренебречь.

Таким образом, основной вклад в ослабление УФ-С-волн будет вносить эффект их поглощения углеродом, входящим в состав элементов растительности. В то же время лесной покров содержит не только углеродные компоненты: в нём имеются и весьма значительное воздушное пространство. Кроме того, пространственный интервал, на котором происходит экранирование (поглощение) излучения, не столь велик. Например, при высоте полёта ЛА 500 м, дальности до источника излучения 6 км и средней высоте деревьев 10 м интервал экранирования составляет всего 150 м. При этом ослабление излучения за счёт поглощения УФ-С-волн элементами растительности и дымом вполне может быть учтено величиной коэффициента затухания k_3 , равной $1,5 \text{ км}^{-1}$, что и было сделано нами в примере расчёта дальности. В качестве альтернативы можно предложить использование описываемого монофотонного УФ-С-сенсора для обнаружения пожаров на открытых площадках для случая степных пожаров, лесных пожаров на полянах и опушках леса, где они чаще всего возникают вследствие человеческого фактора.

Что касается фонового излучения, то оно по своей величине значительно слабее сигнала от очага пожара, поскольку температура фона, окружающего пожар, существенно ниже температуры пламени пожара и составляет около 300 К. Другие же источники УФ-С-излучения либо отсутствуют в лесу (например, электросварка), либо их координаты точно известны (как, например, неисправные изоляторы линий электропередачи) и они могут быть исключены из рассмотрения.

Влияние задымлённости трассы зондирования на величину дальности обнаружения учитывается значениями коэффициента затухания УФ-С-волн.

Зависимость мощности принимаемого сигнала $P_{\text{пр}}$, поступающего во входную апертуру приёмника УФ-С-диапазона, от дальности R определяется следующей формулой (Формозов, 2002):

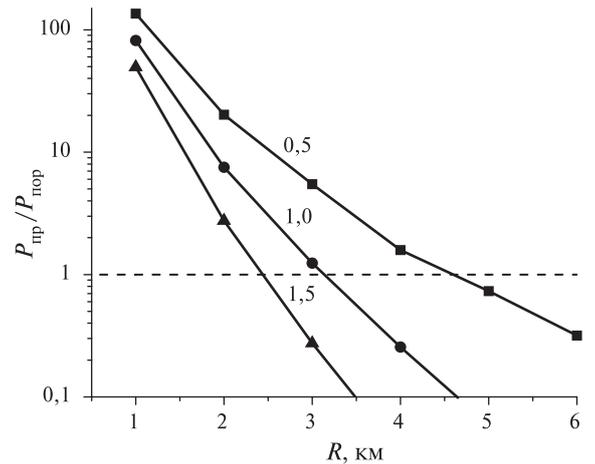
$$P_{\text{пр}} = \frac{W \Delta \lambda S_{\text{п}} S_{\text{вх}} k_{\text{ф}} \exp(-k_3 R)}{4\pi R^2}, \quad (1)$$

где W — спектральная плотность яркости источника излучения (очага пожара); $\Delta \lambda$ — ширина фильтра объектива монофотонного сенсора; $S_{\text{п}}$ — площадь очага пожара, равная площади элемента разрешения на земной поверхности; $S_{\text{вх}}$ — площадь входного зрачка объектива; $k_{\text{ф}}$ — коэффициент передачи фильтра; k_3 — коэффициент затухания (экстинкции) трассы зондирования. Формула (1) получена в предположении, что излучение очага пожара соответствует излучению абсолютно чёрного тела.

Минимальная обнаруживаемая мощность принимаемого сигнала $P_{\text{пор}}$ определялась экспериментально. В частности, на входном зрачке объектива для УФ-С-сенсора «Скорпион» (Белов и др., 2012) она равна $1,6 \cdot 10^{-14}$ Вт.

Решение уравнения (1) относительно предельной дальности обнаружения аналитически затруднено, поскольку оно является трансцендентным. В связи с этим целесообразно обратиться к графическому методу, вычислив значения $P_{\text{пр}}$ и $P_{\text{пор}}$, что позволит оценить предельную дальность обнаружения очага пожара при заданной величине отношения $P_{\text{пр}}/P_{\text{пор}}$. На рис. 2 (см. с. 55) в логарифмическом масштабе по оси ординат приведены расчётные графики величин $P_{\text{пр}}/P_{\text{пор}}$ для трёх значений k_3 .

Рис. 2. Расчётные зависимости $P_{\text{пр}}/P_{\text{пор}}$ от дальности при значениях k_3 в качестве параметра. Пунктиром показан уровень отношения $P_{\text{пр}}/P_{\text{пор}}$, соответствующий равенству мощности полезного сигнала значению его минимально обнаруживаемой мощности



Расчёты выполнены при следующих значениях входящих в выражение (1) параметров сенсора «Скорпион» и внешних условий: $S_{\text{вх}} = 0,785 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $k_{\text{ф}} = 0,2$; $\Delta\lambda = 30 \text{ нм}$; мгновенное угловое поле зрения сенсора — $0,02 \text{ рад}$; $\lambda_{\text{ф}} = 265 \text{ нм}$ (средняя длина волны фильтра входного объектива); $T_{\text{пож}} = 1700 \text{ К}$ (температура очага пожара); $S_{\text{п}} = 1,4 \text{ га}$; $k_3 = 0,5; 1,0; 1,5$ (Holst, Lomheim, 2007).

Расчёт значений произведения $W\Delta\lambda$ в выражении (1) производился с помощью программы «Спектральный калькулятор» (https://www.spectralcalc.com/blackbody_calculator/blackbody.php).

Графики на рис. 2 имеют спадающий характер. При увеличении значений k_3 , т.е. при всё большем затухании УФ-С-волн на трассе зондирования, спадание графиков становится более резким, и, соответственно, дальность предельного обнаружения сравнительно небольшого по площади пожара (порядка 1,5 га) при $P_{\text{пр}}/P_{\text{пор}} = 1$ уменьшается с 4,7 км ($k_3 = 0,5$) до 2,4 км ($k_3 = 1,5$). Для обеспечения большей надёжности обнаружения очага пожара может потребоваться увеличение отношения $P_{\text{пр}}/P_{\text{пор}}$, но тогда уменьшится дальность обнаружения. Например, даже для среднего уровня затухания УФ-С-волн, т.е. при $k_3 = 1,0$ и при $P_{\text{пр}}/P_{\text{пор}} = 5$, предельная дальность обнаружения существенно сократится и составит чуть более 2,3 км, а для случая сильного затухания ($k_3 = 1,5$) будет равна порядка 1,9 км.

Заключение

Таким образом, рассматриваемая авиационная система, реализуемая на базе самолёта, вертолёта или беспилотного летательного аппарата, позволяет в условиях задымлённости, плоского и неровного рельефа местности, отсутствия координатных данных спутниковой навигации обнаруживать очаг пожара, определять его координаты, наводить ЛА на цель и вычислять момент срабатывания системы слива огнегасящей жидкости. Потенциальная дальность обнаружения небольшого пожара площадью около 1,5 га составляет от 2,4 до 4,7 км в зависимости от степени задымлённости трассы зондирования.

Эта авиационная система достаточно легко реализуется на практике, поскольку требует использования доступной аппаратуры (УФ-С-сенсор), выпускаемой серийно.

В части разработки конструкции системы работа выполнена в рамках государственного заказа № АААА-А20-120011690135-5, в части разработки функционирования системы — в рамках государственного заказа № АААА-А18-118022790133-1.

Литература

1. Белов А. А., Калинин А. П., Крысюк И. В., Порохов М. А., Родионов А. И., Родионов И. Д., Русанов В. В. Монофотонный сенсор ультрафиолетового диапазона «Скорпион» // Датчики и системы. 2010. № 1. С. 47–50.
2. Белов А. А., Егоров В. В., Калинин А. П., Коровин Н. А., Родионов А. И., Родионов И. Д., Степанов С. Н. Монофотонный сенсор ультрафиолетового диапазона «Корона» // Датчики и системы. 2012. № 12. С. 58–60.

3. Белов А. А., Виноградов А. Н., Егоров В. В., Завалишин О. И., Калинин А. П., Коровин Н. А., Родионов А. И., Родионов И. Д. Возможности использования координатно-чувствительных монофотонных УФ-С-датчиков для навигации воздушных судов в зоне аэродрома // Датчики и системы. 2014. № 1. С. 37–42.
4. Брюханов А. В., Коршунов Н. А. Авиационное тушение природных пожаров: история, современное состояние, проблемы и перспективы // Сибирский лесной журн. 2017. № 5. С. 37–54.
5. Москвиллин Е. А. Применение авиации для тушения лесных пожаров // Пожарная безопасность. 2009. № 1. С. 89–92.
6. Формозов Б. Н. Аэрокосмические фотоприемные устройства в видимом и инфракрасном диапазоне: учеб. пособие / Санкт-Петербургский гос. ун-т аэрокосмич. приборостроения. СПб., 2002. 120 с.
7. Holst G. C., Lomheim T. S. CMOS/CCD sensors and camera systems. Washington, D.C.: SPIE Press Bellingham, 2007. 355 p.

Remote detection of fire sources using an ultraviolet sensor

V. V. Egorov¹, A. P. Kalinin², A. I. Rodionov³, I. D. Rodionov³, I. P. Rodionova³

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: victor_egorov@mail.ru

² Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow 119526, Russia
E-mail: kalinin@ipmnet.ru

³ “Reagent” Research and Scientific Center
Moscow 119991, Russia
E-mail: irodionov@reagent-rdc.ru

The possibilities of using an on-board ultraviolet (UV-C) sensor in the wavelength range of 250–280 nm for operational detection, determination of the coordinates of fires and guidance of a carrier of fire-extinguishing liquid (for example, water) are investigated. The principles of the sensor operation are described, the implementation of which allows to quickly determine the azimuth and angle of sight of the fire in the on-board coordinate system. It is shown that these data, together with the standard data of the onboard Doppler velocity and drift meter (DISS) and altimeter, make it possible to calculate the current range to the fire site, point the aircraft carrier at it and inform the crew about the rational moment to discharge the extinguishing liquid. The capability of the detection system in flight conditions of both flat and uneven terrain is noted. Thus, the complete autonomy of the entire on-board detection system is ensured. The problems of determining the limiting range of fire detection using the on-board sensor in the presence of smoke on the sensing path and the influence of the screening effect of vegetation for the case of forest fires are considered. Calculations of real detection ranges are given that vary from 2.4 to 4.7 km.

Keywords: aircraft, UV-C sensor, fire, detection, coordinates, range detection, threshold sensitivity

Accepted: 16.06.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-51-57

References

1. Belov A. A., Kalinin A. P., Krysyuk I. V., Porokhov M. A., Rodionov A. I., Rodionov I. D., Rusanov V. V., Monofotonnyi sensor ul'trafiioletovogo diapazona “Skorpion” (Monophoton sensor of the ultraviolet range “Scorpion”), *Datchiki i sistemy*, 2010, No. 1, pp. 47–50.
2. Belov A. A., Egorov V. V., Kalinin A. P., Kоровин N. A., Rodionov I. D., Stepanov S. N., Primenenie monofotonnogo sensora “Korona” dlya distantsionnogo monitoringa sostoyaniya vysokovol'tnogo oborudovaniya (The use of the Korona monophoton sensor for remote monitoring of the state of high-voltage equipment), *Glavnyi energetik*, 2012, No. 6, pp. 12–17.

3. Belov A. A., Vinogradov A. N., Egorov V. V., Zavalishin O. I., Kalinin A. P., Korovin N. A., Rodionov A. I., Rodionov I. D., *Vozможности ispol'zovaniya koordinatno-chuvstvitel'nykh monofotonnykh UF-S datchikov dlya navigatsii vozдушnykh sudov v zone aerodroma (Possibilities of using coordinate-sensitive monophotonic UV-C sensors for aircraft navigation in the aerodrome zone)*, *Datchiki i sistemy*, 2014, No. 1, pp. 37–42.
4. Bryukhanov A. V., Korshunov N. A., *Aviatsionnoe tushenie prirodnykh pozharov: istoriya, sovremennoe sostoyanie, problemy i perspektivy (Aviation fire extinguishing: history, current status, problems and prospects)*, *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No. 5, pp. 37–54.
5. Moskvilin E. A., *Primenenie aviatsii dlya tusheniya lesnykh pozharov (The use of aviation to extinguish forest fires)*, *Pozharnaya bezopasnost*, 2009, No. 1, pp. 89–92.
6. Formozov B. N., *Aerokosmicheskie fotopriemnye ustroystva v vidimom i infrakrasnom diapazonakh (Aerospace photodetectors in the visible and infrared ranges)*, Saint Petersburg, 2002, 120 p.
7. Holst G. C., Lomheim T. S., *CMOS/CCD sensors and camera systems*, Washington, D. C.: SPIE Press Bellingham, 2007, 355 p.