

Аппаратно-программный комплекс АСК-ЧС для авиационного мониторинга зон чрезвычайных ситуаций

Б.И. Беляев, Ю.В. Беляев, В.В. Веллер, Л.В. Катковский, А.А. Казак,
Т.М. Курикина, В.А. Сосенко, А.В. Роговец, С.В. Хвалей

*НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белгосуниверситета
220108 Беларусь, Минск, ул. Курчатова, 7
E-mail: katkovskyl@bsu.by*

Описана методика авиационных съемок зон чрезвычайных ситуаций с использованием разработанной и созданной авиационной системы контроля обстановки в зоне чрезвычайных ситуаций и последствий от них. Рассчитаны основные параметры системы, необходимые для решения задач дистанционного мониторинга зон чрезвычайных ситуаций в видимом и ближнем ИК диапазоне длин волн. Предложена методика тематической обработки полученных данных и построения картосхем зон чрезвычайных ситуаций.

Введение

В рамках государственной научно-технической программы «Защита от чрезвычайных ситуаций» в НИИ прикладных физических проблем Белгосуниверситета совместно с Гомельским инженерным институтом МЧС разработана, создана и испытана авиационная система контроля (АСК-ЧС) обстановки в зоне чрезвычайных ситуаций (ЧС) и оценки их последствий [1-2]. Основное назначение АСК-ЧС – проведение авиационных съемок районов ЧС в видимом и тепловом ИК диапазонах длин волн, тематическая обработка полученных изображений для выявления особенностей объектов, а также построение картосхем обследованных территорий.

Система реализует технологию дистанционной оптической диагностики зон ЧС, определения масштабов и оценки последствий ЧС различных масштабов. Основными задачами, решаемыми с помощью данной системы, являются: обнаружение и классификация тепловых полей пожаров лесов, торфяников и других объектов в условиях сильной задымленности с координатной привязкой очагов горения и гарей, определение местоположений и масштабов утечек из нефте- и продуктопроводов, повреждений от ураганов и затоплений территорий, построение соответствующих картосхем и оценка последствий всех этих явлений.

Летные испытания опытного образца системы АСК-ЧС проводились в июне 2007 г. в Гомельской области Беларуси. На основе полученных данных отрабатывались методы построения тематических крупномасштабных картосхем территорий с координатной привязкой и определением площадей и границ различных классов подстилающих поверхностей; тепловых трасс жилых районов и промышленных объектов; применения бортовых навигационных систем для отслеживания и отображения местоположения летательного аппарата и автоматической записи маршрута.

Состав и характеристики авиационной системы АСК-ЧС

В состав АСК-ЧС входят: блок оптических датчиков; блок обработки информации; специальное программное обеспечение.

Блок оптических датчиков (рис. 1, таблица 1) состоит из следующих модулей: модуль спектральной съемки (МСС), включающий модуль зональной съемки (МЗС), предназначенный для съемки территории ЧС одновременно в трех заранее выбранных узких спектральных зонах или съемки с тремя различно ориентированными поляризационными светофильтрами и модуль обзорной съемки (МОС), предназначенный для получения стандартного цветного изображения с более широким полем зрения, чем МЗС; модуль инфракрасной съемки (МИК), предназначенный для съемки территории ЧС в диапазоне длин волн 7,5 – 13 мкм тепловизором ThermoVision

A40M; модуль трассовой съемки (МТС), предназначенный для получения цветного видеоизображения трассы полета с целью контроля наведения самолета на объект съемки; модуль координатной привязки, предназначенный для определения координат и скорости самолета во время съемок (приемник GPS18).



Рис. 1. Внешний вид основных модулей блока оптических датчиков:
 1 – модуль спектральной съемки; 2 – сменная кассета светофильтров модуля зональной съемки;
 3 – модуль инфракрасной съемки; 4 – модуль трассовой съемки

Указанные характеристики определяют параметры съемки блоков видео и спектральной аппаратуры АСК–ЧС, такие как: ширину полосы захвата каждого из оптических датчиков на поверхности Земли; требуемую частоту регистрации кадров камер МСС для заданных высоты и скорости полета, пространственное разрешение спектральных и теплового ИК изображений с высоты полета; «смаз» изображений на поверхности Земли благодаря движению авианосителя (скорость $V = 160$ км/ч (45 м/с)).

Ширина полосы обзора L на поверхности Земли с высоты H и пространственное разрешение ΔL при ширине регистрирующей матрицы l и размере пикселя Δa определяются фокусным расстоянием объектива f :

$$L = l(H/f), \quad \Delta L = \Delta a(H/f) \quad (1)$$

Промежуток времени между регистрациями спектральной аппаратуры МСС, T определяется из заданного условия перекрытия соседних кадров на $1/3$ длины M проекции кадра на Земле вдоль направления полета и равняется

$$T = (2/3 \cdot M)/V \quad (2)$$

Смаз Δl изображения характеризуется расстоянием, на которое перемещается съемочная система за время экспозиции (засветки кадра), он определяется скоростью авианосителя V и временем экспозиции t_{exp} :

$$\Delta l = V \cdot t_{\text{exp}} \quad (3)$$

Таблица 1. Основные характеристики блока оптических датчиков АСК-ЧС

Модуль спектральной съемки МЗС	
Модуль зональной съемки	
рабочий спектральный диапазон, нм	350 – 800
число спектральных зон одновременной съемки	3
число сменных кассет	4
спектральная ширина зоны съемки, нм	20 ÷ 50
фокусное расстояние объектива, мм	35
число элементов изображения, пикселей	3456 × 2304
сенсор изображения, мм	22,2 × 14,8 КНПО-матрица
Динамический диапазон яркости, бит	12
диапазон выдержек, с	1/4000 – 1
скорость съемки, кадр/с	0,4
Модуль обзорной съемки	
число элементов изображения, пикселей	3264 × 2448
скорость съемки, кадр/с	0,3
Модуль трассовой съемки МТС	
размер CCD матрицы, мм	4,8 × 3,6
число пикселей	752 × 582
поле зрения, град	70 × 56
Модуль инфракрасной съемки МИК	
диапазоны измерения температуры, град С	– 40 ÷ + 120; 0 ÷ + 500
чувствительность при 30 град С, не хуже град С	0,08
погрешность, %	± 2
спектральный диапазон, мкм	7,5 ÷ 13
тип детектора	неохлаждаемый термоболометр
фокусное расстояние германиевого объектива, мм	36
поле зрения (со стандартным объективом)	24°(Г) × 18°(В)/0,3 м
пространственное разрешение (со стандартным объективом), мрад	1,3
размер матрицы, пикселей	320 × 240
размер матрицы, мм	15,3 × 11,5
частота кадров, Гц	50/60
динамический диапазон, бит	14

Исходя из опыта обработки изображений, можно утверждать, что достаточно жестким условием сохранения четкости изображений будет выполнение следующего неравенства:

$$\Delta l \leq 2 \cdot \Delta L \quad (4)$$

Расчитанные геометрические и временные параметры блоков видео и спектрозональной аппаратуры АСК-ЧС приводятся в таблице 2.

Оптические оси всех камер направлены в нади́р. Ширина захвата поверхности Земли камерами МЗС и МИК устанавливалась одинаковой путем подбора фокусов вариообъективов МЗС (т. к. ширина захвата МИК для используемого германиевого объектива зависит только от высоты полета). При этом достигается равная ширина полосы захвата, в то время как поле зрения камер МЗС вдоль трассы полета примерно в два раза шире, чем у МИК.

Таблица 2. Геометрические и временные параметры съемки видео и спектрозональных каналов АСК-ЧС (высота носителя $H = 1000$ м, скорость $V = 160$ км/ч (45 м/с), $t_{exp} = 1/60$ с)

	МИК	МЗС	МОС	МТС
Поле обзора $M \times L$, м	425×320	425×640	940×1250	1060×1412
Время между соседними кадрами T , с	4,74	9,45	18,5	непрерывно
Пространственное разрешение ΔL , м	1,33	0,37	0,76	3,0 × 1,7
Смаз Δl (при 1/60 с), м	0,75	0,22	0,12	0,92

Определение характеристик съемочных камер МЗС (Canon EOS 350D) и возможности их использования в спектрозональной аппаратуре высокого пространственного разрешения проводилось на метрологическом комплексе «Камелия-М» [3]. Было установлено, что при малых уровнях сигнала камера работает с максимальным усилением, а по мере нарастания уровня сигнала происходит уменьшения коэффициента усиления, что позволяет значительно увеличить динамический диапазон регистрации данных, но требует проведения подробных градуировок при различных уровнях спектральной яркости излучения.

В процессе исследований были определены спектральные кривые чувствительности для каждого из трех каналов *R*, *G*, *B* камеры для невысокого уровня сигнала. Результаты приведены на рисунке 2. Однако при высоких уровнях освещенности приемной матрицы происходит расширение спектрального диапазона чувствительности в коротковолновой, и особенно в длинноволновой части спектра при насыщении отклика в области максимальной чувствительности. Благодаря этому возможны измерения и в ближней ИК области при максимальных параметрах чувствительности камеры и достаточном уровне освещенности регистрируемых объектов, что важно при съемке растительности.

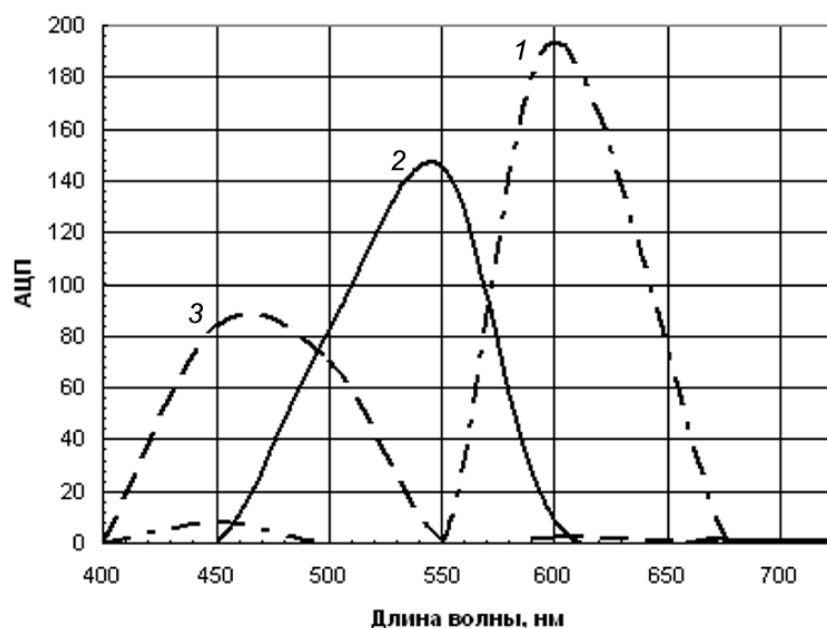


Рис. 2. Спектральные чувствительности трех камер модуля спектральной съемки: 1 – камера 1 (соответствует каналу *R*), 2 – камера 2 (соответствует каналу *G*), 3 – камера 3 (соответствует каналу *B*)

На основании анализа и обобщения спектральных и поляризационных характеристик исследуемых объектов [3] и с учетом спектральной чувствительности камер блок МСС снабжен четырьмя сменными кассетами, каждая из которых предназначена для решения определенного круга задач (таблица 3). Каждая кассета содержит три различных фильтра, расположенных перед объективами камер МЗС, и одно отверстие, соответствующее обзорной камере, свободно.

В состав блока обработки информации входят: бортовой компьютер; бортовой накопитель видеоданных; монитор пилота; модуль питания и коммутации. Блок обработки информации выполняет: тестирование (контроль состояния) всех оптических модулей АСК-ЧС; управление режимами работы модулей оптического блока; прием служебной информации о режимах работы системы; прием, запись и хранение спектрозональных изображений, ИК изображений, обзорной видеoinформации, данных координатной привязки зоны съемки, а также экспресс-обработку данных и отображение синтезированных тематических изображений на мониторе бортового компьютера.

Таблица 3. Характеристики и назначение сменных кассет МЗС

№	Назначение	Фильтр 1	Фильтр 2	Фильтр 3
1	Оценка последствий пожаров, ураганов. Исследование растительного покрова.	$\lambda=646$ нм, $\Delta\lambda=56$ нм	$\lambda=501$ нм, $\Delta\lambda=54$ нм	$\lambda=564$ нм, $\Delta\lambda=46$ нм
2	Оценка последствий наводнений. Исследование водных поверхностей.	$\lambda=501$ нм, $\Delta\lambda=54$ нм	$\lambda=435$ нм, $\Delta\lambda=45$ нм	КС 11, $\lambda>600$ нм
3	Оценки последствий вырубок, пожаров. Исследование растительности при низкой освещенности.	ОС 13, $\lambda>560$ нм	ЖС 17, $\lambda>485$ нм	ЗС 11, $\lambda>520$ нм,
4	Определение и оценка последствий утечек из нефте- и продуктопроводов (при низком солнце или сплошной облачности)	Поляроид 0°	Поляроид 45°	Поляроид 90°

Специальное программное обеспечение состоит из взаимодействующих между собой программных модулей: тестирования, управления, предварительной обработки зарегистрированных изображений, тематической обработки данных, представления синтезированных изображений.

Методика съемок

В результате первой серии летных испытаний было зарегистрированы изображения вдоль 12 прямолинейных трасс полета самолета различной протяженности и с разных высот. Пробная трасса снята при наборе высоты самолетом, пять прилегающих друг к другу трасс со значительными боковыми перекрытиями сняты с высоты 1000 м. Две трассы той же территории, что и на указанных пяти трассах, сняты с высоты 700 м. Две короткие трассы над поселком Широкое, снятые с высот 1000 и 600 м, и одна трасса – с высоты 300 м. Однако в последней трассе при низкой высоте съемки и заданном времени между двумя последовательными кадрами порядка 5 с (которое определяется временем, необходимым для осуществления полного цикла регистрации одного кадра изображения во всех каналах и записи их на диск) отсутствуют перекрытия соседних кадров друг с другом, в результате чего для нее оказалось невозможным построение трассовой мозаики. Еще одна трасса снята с высоты 600 м над речкой Липой, она содержит 20 кадров и состоит из 6 не перекрывающихся между собой фрагментов (по 3 – 4 кадра в каждом).

Заметим, что высота съемки порядка одного километра при скорости самолета 160 км/ч оптимальна для решаемых задач картирования зон ЧС, поскольку соответствует разумному компромиссу между шириной захвата кадра (320 м), пространственным разрешением (37 см) камер МСС и интервалом времени между последовательными кадрами (5 с), обеспечивая 30 %-ое перекрытие кадров и промежутки времени, достаточный для записи всей видео и служебной информации на жесткий диск. При необходимости увеличения пространственного разрешения высота съемки может быть уменьшена с соответствующим уменьшением временной скважности съемки.

Предварительная обработка

Предварительная обработка зарегистрированных данных предназначена для выполнения следующих задач: вывода полученных изображений на экран; изменения динамического диапазона яркости изображений; изменения размеров и поворота изображений; совмещения изображений различных каналов, построения и вывода синтезированных изображений; построения мозаики спектральнональных изображений по данным GPS, оперативной (упрощенной) тематической обработки полученных изображений.

Изменение динамического диапазона яркости изображений обусловлено тем, что стандартные устройства отображения видеоинформации (синтез через R, G, B каналы) работают со значе-

ниями яркости 8 битов на цвет, что также позволяет уменьшить объем памяти, необходимой для хранения изображений на этапе предварительной обработки.

Изменение размеров изображений необходимо для ускорения оперативной обработки, вывода изображений для просмотра и производится методом билинейного ресемплирования [4]. Данный метод выбран на основании его высокой скорости выполнения, возможности приводить изображения к произвольным размерам при достаточно малых искажениях исходных данных.

Синтез изображений, полученных в трех различных каналах, осуществляется путем записи в R , G , B каналы синтезированного изображения соответствующих значений выбранных каналов. Оператор имеет возможность вывести различные варианты синтезированных изображений, а так же черно-белые изображения каждого канала в отдельности.

Полученные синтезированные изображения подвергаются 2%-му линейному контрастированию, а также производится коррекция пространственных смещений изображений каналов друг относительно друга, имеющих место из-за погрешностей временной синхронизации поступающих на камеры команд, погрешностей установки камер и нестабильности носителя.

Построение мозаики спектральнональных изображений производится на основании данных GPS и алгоритма пересчета географических координат в декартовы на эллипсоиде WGS84.

Оперативная тематическая обработка (на борту) полученных синтезированных изображений осуществляется методом параллелепипеда [4] на основе построенных оператором обучающих выборок по искомым классам.

Корегистрация изображений и построение картосхем

Одна из основных проблем при обработке спектральнональных изображений – это корегистрация (совмещение соответственных пикселей) изображений различных каналов друг с другом и затем с картой. Точное попиксельное совмещение снимков спектральнональных каналов, поступающих с трех разных камер МЗС, производится на основе алгоритма, предложенного в [5]. Указанный алгоритм предполагает наличие только пространственных сдвигов dx и dy между изображениями, которые необходимо совместить. Однако в полученных с АСК-ЧС изображениях присутствуют поворот изображений относительно друг друга, искажения типа «изменение масштаба», а также нелинейные искажения. Чтобы учесть и компенсировать данные искажения, предложен следующий алгоритм совмещения двух изображений, одно из которых считается эталонным (E), а другое – искаженным (D):

1. С помощью оператора Робертса производится бинаризация изображений E и D . При этом пороги бинаризации t_E и t_D определяются как [5]:

$$t_E = (MaxE - MinE)/3, \quad (5)$$

$$t_D = (MaxD - MinD)/3, \quad (6)$$

где $[MaxE, MinE]$, $[MaxD, MinD]$ – диапазоны эффективных значений яркостей изображений E и D , соответственно, оцененные по их гистограммам.

2. Разбиваются изображения на 3-5 равных прямоугольных частей (сегментов) перпендикулярно линии полета.

3. Сдвигая сегменты бинаризованного изображения D_b относительно соответствующих сегментов бинаризованного изображения E_b в пределах $(\pm B_x, \pm B_y)$ оценивается функция $(D_b, E_b -$ бинарные значения пикселей соответствующих изображений) [5]:

$$K(x_D, y_D) = \sum_x \sum_y E_b(x, y) \cdot D_b(x - x_E + x_D, y - y_E + y_D) \quad (7)$$

При $x_D = (x_E - B_x), \dots, (x_E + B_x)$, $y_D = (y_E - B_y), \dots, (y_E + B_y)$. Это позволяет оценить пространственные сдвиги сегмента изображения D относительно соответствующего сегмента изображения E : $dx = x_D - x_E$ и $dy = y_D - y_E$.

4. После выполнения сдвигов производится «сшивка» совмещенных сегментов изображений.

Приведенный алгоритм позволил достичь очень хорошего совмещения изображений различных каналов.

Для построения мозаики отдельной трассы в первом приближении можно использовать географические координаты (широту, долготу и высоту над уровнем моря), которые поступают ежесекундно с GPS приемника. Полученные координаты точек трассы интерполируются по времени с целью более точного расчета координат, соответствующих центру каждого кадра. Однако полученный таким образом шаблон мозаики трассы требует корректировки как ввиду невозможности точной пространственно-временной синхронизации съемки в различных каналах и моментов измерения координат с помощью GPS (благодаря особенностям поступления и обработки команд с блока электроники), так и из-за наличия случайных колебаний при полете авианосителя (крен, тангаж, рыскание). Корректировка производится оператором интерактивно с использованием операций сдвига, вращения и масштабирования отдельных кадров. Кроме того, «сшивка» кадров осуществляется автоматизировано на основе алгоритмов поиска опорных точек в перекрывающихся частях соседних кадров с последующим выравниванием освещенностей в области перекрытия кадров. Использование автоматизированных алгоритмов «сшивки» дает хорошие результаты в отдельных случаях, но не всегда удовлетворительные при построении площадных мозаик (в особенности для длинных трасс) из-за накопления погрешностей «сшивки» вдоль трассы, а также при съемке объектов с плохо выраженной пространственной структурой (например, леса).

Одной из задач при обнаружении и оценке зон ЧС и их последствий является определение площадей отдельных классов объектов (определенных зон на изображениях). При оценке погрешности определения площадей по снимкам МСС в качестве тестового объекта, площадь которого известна, использовался автомобиль Газель, имеющий размеры 5500 × 2075 мм (площадь 11,41 м²). Для высоты полета 1000 м величина площади, рассчитанная по данным МЗС АСК-ЧС, составила 11,5 м². Таким образом, погрешность определения площади данного объекта составляет 0,77 % (менее одного процента). Следует заметить, что для больших по величине объектов погрешность определения их площади будет меньше.

Тематическая классификация с помощью разработанного специального программного обеспечения (ПО) осуществляется методами попиксельной классификации с обучением. При этом используются различные варианты (в зависимости от характера данных и стоящих задач) определения межклассовых расстояний (метрик) и задания решающих правил (функций), например: параллелепипеда, минимального расстояния, максимального правдоподобия, спектрального угла и др [4].

Создание картосхемы предполагает наложение полученных площадных мозаик изображений снятых территорий на топографическую основу с добавлением координатных сеток, необходимой текстовой и графической информации, включая результаты тематической классификации снимаемых объектов и зон ЧС. В простейшем случае картосхема может представлять собой полученную площадную мозаику изображений с наложенной координатной и иной информацией. В качестве топографической основы могут использоваться имеющиеся векторные карты, растровые электронные карты высокого разрешения, а также «геопривязанные» композитные изображения Земли из космоса. На рисунке 3 приведен пример обработки результатов съемочных испытаний в виде картосхемы, построенной наложением мозаики изображений на космический снимок.

Как показали тестовые испытания в осенний период, совместное использование спектрально-нальных изображений видимого диапазона и изображений теплового ИК диапазона позволяет обнаружить трубу нефтепровода, залегающего на глубине от одного до трех метров.

Разработанная и созданная система и специальное ПО развивают технологии дистанционного зондирования путем совместного использования спектрально-нальных и тепловых изображений зон ЧС, позволяя обнаруживать и определять размеры территорий, пострадавших в результате природных и антропогенных ЧС. Параметры и состав аппаратуры обеспечивают получение спектрально-нальных изображений высокого пространственного разрешения, достаточных для эффективно-



Рис. 3. Пример представления результатов съемочных испытаний в виде картосхемы, построенной наложением мозаики изображений на космический снимок

го обнаружения и распознавания искомых классов объектов, в частности, для решения следующих задач:

- обнаружение и построение картосхем тепловых полей пожаров;
- определение масштабов утечек из нефте- и продуктопроводов, оценка их последствий;
- построение картосхем повреждений от ураганов;
- построение картосхем затопленных территорий и оценка последствий наводнений.

Литература

1. Беляев Б.И., Сосенко В.К., Потеха В.Л. Авиационный мониторинг зон чрезвычайных ситуаций // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: Сборник тезисов докладов IV Международной научно-практической конференции. В 3 т. Т. 1 / ред. кол. Э.Р. Бариев и др. – Мн., 2007. С. 108-110.

2. Ранчинский К.В., Роговец А.В., Хвалец С.В. Тематическая обработка данных авиационной системы контроля зон чрезвычайных ситуаций «АСК-ЧС» // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: Сборник тезисов докладов IV Международной научно-практической конференции. В 3 т. Т. 3 / ред. кол. Э.Р. Бариев и др. – Мн., 2007. С. 148-151.

3. Беляев Б.И., Катковский Л.В. Оптическое дистанционное зондирование. Минск: Белорусский государственный университет, 2006. 455 с.

4. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: Учебное пособие. М.: Логос, 2001. 275 с.

5. Аксенов О.Ю. Совмещение изображений // Цифровая обработка сигналов, 2005. №3. С. 51-55.