УДК 629.783

АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ОБЪЕКТОВ МЕСТНОСТИ НА ОСНОВЕ ДЕТЕРМИНИРОВАННО-ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

В.В. Василевский¹, А.С. Жебель²

¹ФГОУ ВО МАИ (НИУ), 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4

²АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

Исследуется проблема повышения эффективности аэрокосмического мониторинга и автоматической обработки видеoinформации. Предложено использование детерминированно-вероятностной модели на основе оценивания вариаций двумерной функции и числовых характеристик распределения яркости элементов изображения. Приведено описание вычислительного алгоритма обработки видеoinформации и статистического распознавания объектов местности на основе модели изображений.

Ключевые слова: аэрокосмический мониторинг, изображение, детерминированно-вероятностная модель, кластер, вариация функции, моменты, инварианты, вычислительный алгоритм

Сведения об авторах: Василевский Валерий Владимирович, к.в.н., доцент, echinops777@rambler.ru; Жебель Александр Сергеевич, аспирант, zhebel@pulsarnpp.ru

AEROSPACE MONITORING OF SURFACE OBJECTS BASED ON DETERMINISTIC-PROBABILISTIC IMAGE MODEL

V.V. Vasilevsky¹, A.S. Zhebel²

¹Moscow Aviation Institute (National Research University), 125993, Moscow,
Volokolamskoye shosse, 4

²S&PE PULSAR JSC, 105187, Moscow, Okruzhnoy pr., 27

The issues of increasing the effectiveness of aerospace monitoring and automatic processing of video-data are investigated in this paper. The use of a deterministic-probabilistic model based on the estimation of variations of the two-dimensional function and the numerical characteristics of the brightness distribution of image elements is proposed. Description of computational algorithm for video-data processing and statistical recognition of surface objects on the basis of image model is given.

Keywords: aerospace monitoring, image, deterministic-probabilistic model, cluster, function variation, moments, invariant, computational algorithm

Authors: Vasilevsky Valeriy Vladimirovich, Ph.D., Associate Professor, echinops777@rambler.ru, Zhebel Aleksander Sergeevich, Postgraduate, zhebel@pulsarnpp.ru

Введение. Постановка задачи

Одной из проблем применения аэрокосмических средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является обеспечение требуемой достоверности и оперативности информации, доставляемой потребителям, при решении широкого спектра задач хозяйственной и социально-экономической деятельности. Один из путей её решения связан с автоматизацией обработки потоков видеоинформации в бортовом комплексе летательного аппарата, оснащаемого фоточувствительным приёмным устройством (ФПУ) соответствующего спектрального диапазона [1].

Остановимся на задаче распознавания площадных объектов местности (участков леса, сельхозугодий, дорожной инфраструктуры и других) в процессе реализации первичной обработки потока видеоинформации, эффективность выполнения которой во многом определяется характером и полнотой информации о типе местности, освещённости, а также используемым подходом к описанию свойств изображений.

Традиционный подход к решению задач распознавания объектов аэрокосмического мониторинга основывается на представлении изображения как совокупности некоторого множества связанных областей, каждая из которых обладает определёнными свойствами, отличающими её от соседних областей. Распознавание отдельных элементов (сегментов) кадра изображения, их структурирование и связывание в соответствующие множества (кластеры) составляет содержание задачи первичной обработки информации ДЗЗ. При этом

наблюдаемой является совокупность яркостей элементов изображения, а параметры, определяющие контуры и закон распределения яркостей однородных областей (кластеров), не являются наблюдаемыми.

В зависимости от типа используемых признаков в теории распознавания образов изображений можно выделить три основных подхода: структурный (лингвистический), детерминированный и вероятностный. При этом каждый из способов имеет свои особенности и области применения [1, 3, 4].

Целью настоящей работы является построение детерминированно-вероятностной модели изображения и её применение для реализации алгоритма первичной обработки видеоинформации в режиме реального времени и с учётом минимального уровня информированности об объектах мониторинга.

Для достижения поставленной цели требуется построить модель распознавания изображения, обеспечивающую выделение заданных классов объектов местности, и предложить метод распознавания образов на основе таких информативных признаков, которые инвариантны к преобразованиям масштаба, сдвига и поворота получаемых изображений, изменению условий освещённости подстилающей поверхности.

Перечисленные обстоятельства определили целесообразность двухуровневого описания модели изображения и её использования на основе сочетания детерминированного и вероятностного подходов. Входным сигналом устройства обработки (сигнального процессора) будет выступать

цветное или полутоновое изображение, получаемое на выходе ФПУ оптического спектрального диапазона, выходным сигналом – выделенный кластер кадра изображения и его статистические характеристики.

Детерминированно-вероятностная модель изображения

Для решения задачи выделения, фильтрации и распознавания кластеров каждого кадра изображения используем её описание как совокупности областей со случайным характером распределения яркости с границами, разделяющими соседние множества (кластеры). Её свойства определяются двухуровневой детерминированно-вероятностной моделью ансамбля изображения – детерминированной моделью контура (верхний уровень) и случайным полем (нижний уровень) [3].

Использование данной модели в задачах распознавания образов изображения предусматривает выполнение вычислительных процедур и двухэтапного принятия решения (выбора): на первом этапе определяются контуры границ областей (кластеров), на втором оценивается распределение яркостей их элементов.

Модель наблюдения объекта на изображении характеризуется распределением яркостей его элементов, в то время как модель контура может быть описана некоторым классом функций [2]. Поэтому задача распознавания изображения и выделения кластеров площадных объектов для выполнения вычислительных процедур автоматической обработки видеоинформации основывается на описании и использовании двухуровневой модели изображения:

модели контура и модели наблюдения яркости множества его элементов [3-5].

Модель контура

Для описания её используется детерминированный способ, при котором плоское полутоновое изображение $u(x, y)$ – действительная функция двух переменных $(x, y) \in S$, принадлежащая метрическому пространству M , элементы которого отражают существенные характеристики реальных изображений, и обладающая следующими свойствами [3, 4]:

во-первых, положительности и ограниченности функции

$$0 \leq u(x, y) \leq U_m, \quad (x, y) \in W, \quad (1)$$

где (x, y) – координаты точки плоскости изображения;

$S = \{(x, y) : 0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y\}$ – область изображения, называемая полем зрения (окном), которое будем предполагать прямоугольным; U_m – известное значение положительной константы для определённых условий аэрокосмического мониторинга;

во-вторых, ограниченности полной вариации $V(u)$ функции изображения.

С учётом подхода, предложенного А.С. Кронрадом, функция двух переменных $u(x, y)$, заданная на прямоугольнике D , полностью характеризуется двумя функционалами [6]:

$$V_k(u) = \int_{-\infty}^{\infty} V_{k-1}(u_l) dl, \quad (2)$$

где $V_{k-1}(u_l)$ – $(k-1)$ -я вариация множества $u_l = \{(x, y) : (x, y) \in D, u(x, y) = l\}$, а интеграл определяется по Лебегу.

Двумерная модель оценивающего функционала определяется, соответственно, линейной $V_1(u)$ и плоской $V_2(u)$ вариациями функции изображения $u(x, y)$:

$$V_1(u) = \int_a^b V_0(u_l) dl, \quad (3)$$

где $V_0(u_l)$ – нулевая вариация множества, u_l – число компонент множества u_l (уровня l функции $u(x, y)$);

$$V_2(u) = \int_a^b V_1(u_l) dl, \quad (4)$$

где $V_1(u_l)$ – вариация первого порядка множества, u_l – длина (по Хлусдорфу) множества u_l (уровня l функции $u(x, y)$).

При этом $V_0(u_l)$, $V_1(u_l)$ как функции l измеримы по Лебегу; функции с конечными вариациями $V_1(u_l)$, $V_2(u_l)$ обладают свойствами: у них есть полный дифференциал, к ним сходится их ряд Фурье, они раскладываются в разность двух монотонных функций.

Для практического применения функционала $\Omega(u)$ предлагается использовать следующие информативные признаки изображения объекта: нулевая вариация – число компонент множества (кластера); линейная вариация соответствует значению линейных периметров множества; плоская вариация – площадь поверхности множества [4, 5].

Таким образом, задача оценивания изображения и выделения контуров кластеров сводится к нахождению оценок функционала $\Omega_k(u)$ через полную вариацию функции $U = u(x, y) \in M(D)$:

$$\Omega_k(u) = V_1(u) + V_2(u), \quad (5)$$

где $V_2(u) = \int_a^b \int_c^d |\text{grad } u(x, y)| dx dy$.

Модель наблюдения яркости

Для её описания используется вероятностный способ, при котором дискретное представление изображения (1) описывается следующим массивом чисел [5]:

$$u = \{u(x, y) : (x, y) \in Q\}, \quad (6)$$

где $Q = \{(x, y) : x = \overline{1, M}, y = \overline{1, N}\}$ – множество пар целых чисел в пределах окна наблюдения; $x = nh, y = mh$, h – шаг дискретизации изображения, определяемый разрешающей способностью ФПУ, $n = \overline{0, N}, N = [X/h], m = \overline{0, M}, M = [Y/h]$.

Тогда модель распределения яркости объекта (нижний уровень общей модели изображения) является реализацией заданного на решётке гаусс-одномарковского случайного поля

$$U_b = \{U(x, y) : (x, y) \in Q\} \quad (7)$$

с собственным потенциалом (x, y) -го элемента, равным $\alpha(u(x, y) - t^2/2)$, и потенциалами парного взаимодействия $W_x(x, y), W_y(x, y)$; $b(x, y) = 0, 1$ – целые числа.

При этом массив двоичных чисел $b_k = (b_x, b_y)$ является реализацией управляющего поля, задаваемого моделью контура кластера изображения (верхнего уровня общей модели изображения).

В качестве информативных признаков наблюдения яркости объекта используем следующие характеристики случайной функции $u(x, y)$: начальные и центральные моменты, инварианты (кумулянты).

Начальные m_{kl} и центральные μ_{kl} моменты распределения яркости объекта порядка k, l на растре размером $(x, y) \in Q$ определяются следующими соотношениями:

$$m_{kl} = \iint_L [x^k y^l \cdot \dot{u}(x, y)] dx dy, \quad \dot{u}(x, y) = u(x, y) - \bar{u}_\phi; \quad (8)$$

$$\mu_{kl} = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^l (-1)^{i+j} c_\rho^i c_\delta^j \frac{m_{i0}^i \cdot m_{0j}^j}{m_{00}^{i+j}} m_{k-l-i, j}, \quad (9)$$

где $\dot{u}(x, y)$ – значение функции яркости распознаваемого объекта:

$$u(x, y) = \iint_Q u_{об}(\xi, \eta) g(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta;$$

$\bar{u}_\phi$ – среднее значение яркости фона в пределах раstra: $\bar{u}_\phi = u_0 \iint_Q g(\xi, \eta) d\xi d\eta$,

где $g(\xi, \eta)$ – функция рассеяния точки (импульсная характеристика) используемого ФПУ; u_0 – нормирующий уровень фона.

Инварианты (кумулянты), свободные от факторов сдвигов и вращений изображения относительно системы координат, определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} \Phi_0 &= m_{00}; \Phi_1 = \mu_{20} + \mu_{02}; \\ \Phi_2 &= (\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2; \\ \Phi_3 &= (\mu_{30} - 3\mu_{12})^2 + (3\mu_{21} - \mu_{03})^2; \\ \Phi_4 &= (\mu_{30} + \mu_{12})^2 + (\mu_{21} + \mu_{03})^2; \\ \Phi_5 &= (\mu_{30} - 3\mu_{12})(\mu_{30} + \mu_{12})[(\mu_{30} + \mu_{12})^2] \\ &\quad - 3(\mu_{21} + \mu_{03})^2 + (3\mu_{21} - \mu_{03})(\mu_{21} + \mu_{03}) \\ &\quad [3(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{21} + \mu_{03})^2]; \\ \Phi_6 &= (\mu_{20} - \mu_{02})[(\mu_{30} + \mu_{12})^2 \\ &\quad - (\mu_{21} + \mu_{03})^2] + 4\mu_{11}(\mu_{30} + \mu_{12})(\mu_{21} - \mu_{03}). \end{aligned} \quad (10)$$

Целесообразно произвести переход к вычислению новых инвариант, так как при некоторых допущениях независимыми являются только первые пять инвариантов $\Phi_0, \dots, \Phi_4$:

$$\begin{aligned} M_{00} &= \Phi_0; M_{20} = \frac{\Phi_1 + \sqrt{\Phi_2}}{2}; \\ M_{02} &= \frac{\Phi_1 - \sqrt{\Phi_2}}{2}; M_{30} = \frac{\sqrt{\Phi_3} + 3\sqrt{\Phi_4}}{4}; M_{12} = \frac{\sqrt{\Phi_4} - \sqrt{\Phi_3}}{4}. \end{aligned} \quad (11)$$

Модель наблюдения яркости объекта на растре изображения представляет собой зависимость вектора $Z(u)$ инвариантов случайной функции $u(x, y)$:

$$Z(u) = (M_{00}, M_{20}, M_{02}, M_{30}, M_{12})^T \quad (12)$$

и характеризуется ковариационной матрицей R_j ошибок распознавания для каждого j -го эталона.

Информативные параметры эталонных образов объектов рассчитываются по тем

же формулам, в которых используются оценки изображения соответствующего j -го эталона $u_j(x, y)$.

В предположении нормальности распределения искажений изображения из-за действия внешних и внутренних шумов и помех оптимальное решение о принадлежности распознаваемого объекта изображению к соответствующему классу достигается эффективным байесовым оцениванием, например, нахождением для каждой из проверяемых гипотез D_j оценок $\hat{Z} : P(\hat{Z}|u) = \max_Z P(Z|u)$.

Таким образом, алгоритм автоматического распознавания объектов на текущем кадре изображения представляет собой статистический фильтр [3, 5]. Для определения принадлежности изображения к одному из образов необходимо вычислить вероятности гипотез о том, что соответствующий кластер изображения сформирован в результате искажения того или иного эталонного образа, и выбрать максимальную вероятность.

Вычислительный алгоритм распознавания изображений

В условиях априорной неопределённости условий ведения ДЗЗ и мониторинга объектов земной поверхности задача автоматической обработки потока видеoinформации и отдельных кадров изображений относится к классу задач статистической фильтрации.

Укрупнённый вычислительный алгоритм автоматической обработки каждого текущего кадра изображения и распо-

знавания площадных объектов на основе использования рассмотренной детерминированно-вероятностной модели предусматривает выполнение следующей последовательности процедур [3-5]:

1. Задать исходное состояние системы приёма и обработки видеoinформации: параметры фотограмметрической модели наблюдения; характеристики ФПУ; базы данных фоновой и объектовой обстановки; характеристики освещённости.

2. Определить поток видеoinформации и выполнить процедуры её предварительной обработки.

3. Выделить и подготовить для обработки текущий кадр изображения – поиск областей локальной неоднородности на основе методов корреляционного или/и спектрального анализа, кластеризацию изображения.

4. Определить контур соответствующего кластера изображения на основе метода вариационного исчисления экстремума оценивающего функционала $\Omega_k(u)$ и вычисления числовых характеристик его нулевой, линейной и плоской вариаций.

5. Выполнить статистическую фильтрацию соответствующего кластера изображения путём оценивания вектора $Z(u)$ инвариантов распределения яркости $u(x, y)$ и массива вероятностей $P(\hat{Z}|u)$ проверяемых гипотез о принадлежности объекта к соответствующему классу.

6. Выполнить сохранение и вывод результатов обработки текущего кадра изображения.

Иллюстрация применимости метода детерминированно-вероятностной обработ-

ки видеоинформации в задачах распознавания площадных объектов местности показана на рис. 1. Оценки вероятности распознавания $P_{об}$ в зависимости от детальности L_i изображения получены для следующих классов объектов подстилающей поверхности:

1 – редкие леса; 2 – полигональные поверхности, такыры; 3 – элементы рельефа;

4 – естественные поверхности с нерегулярной структурой типа 1; 5 – естественные поверхности с нерегулярной структурой типа 2. Под L_i принимаем характерный средний размер деталей подстилающей поверхности, приведённый к линейному размеру объекта.

Интерфейс программного модуля автоматического распознавания изображений

обеспечивает возможности выполнения следующих настроек: исходных данных системы обработки; потока видеоинформации; выбора файла кадра изображения для обработки; выделения контура и характерных точек кластера; статистической фильтрации кластера; сохранения результатов обработки в выходном файле.

Поля выходного файла включают следующую информацию: 1) файл изображения; 2) масштаб изображения; 3) контур выделенного кластера; 4) оценки вариаций оценивающего функционала изображения – координаты центра; длину, площадь поверхности, параметры контурной функции; 5) массив оценок числовых характеристик распределения яркости элементов – моментов и инвариантов.

а)

б)

Рис. 1

Распознавание площадных объектов местности на основе детерминированно-вероятностной обработки видеоинформации ДЗЗ: изображение с выделенным контуром объекта (а); оценки вероятности распознавания $P_{об}$ различных типов объектов подстилающей поверхности (б)

в зависимости от детальности L_i i -го изображения

Заключение

В работе предложено решение задачи автоматической обработки и распознавания видеоинформации аэрокосмического мониторинга площадных объектов земной поверхности на основе использования детерминированно-вероятностной модели изображений.

Анализ результатов использования детерминированно-вероятностной модели и алгоритмов автоматической покадровой обработки изображений показывает следующие возможности аэрокосмического мониторинга площадных объектов местности:

- существенное сокращение времени поиска и локализации объектов в потоке видеоинформации;
- обеспечение распознавания и получения оценок состояния объектов мониторинга в режиме реального времени;
- обеспечение вероятности автоматического «обнаружения» объектов до уровня 0,5...0,75 при фиксированном значении вероятности «ложной тревоги» 0,1...0,25;
- повышение достоверности информации аэрокосмического мониторинга объектов местности на основе многоспектральной обработки изображений;
- снижение требований к радиоканалам управления и передачи информации по пропускной способности и защищённости.

Литература

1. Шовенгердт, Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
2. Натансон, И.П. Теория функций вещественной переменной / И.П. Натансон – М.: Наука, 1974. – 480 с.
3. Василевский, В.В. Высокопроизводительный алгоритм предварительной цифровой обработки видеоинформации при аэрокосмическом мониторинге динамических объектов / В.В. Василев-

ский, А.Н. Михоленок, А.С. Жебель // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2018. – Вып. 1 (248). – С. 72-77.

4. Василевский, В.В. Синтез алгоритма и устройство оперативной автоматизированной обработки данных аэрокосмического мониторинга / В.В. Василевский // Специальная техника. – 2015. – № 2. – С. 27-43.
5. Василевский, В.В. Многоспектральная обработка видеоинформации в задачах аэрокосмического мониторинга малозаметных объектов местности / В.В. Василевский, А.С. Жебель // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2018. – Вып. 4 (251). – С. 4-7.
6. Кронрад, А.С. О функциях двух переменных / А.С. Кронрад // Успехи мат. наук. – 1950. – Т. 5. – № 1. – С. 24-134.

References

1. Shovengerdt R.A., Distantionnoye zondirovaniye. Modeli i metody obrabotki izobrazheniy [Remote Sensing. Models and methods of image processing]. Moscow, *Tekhnosfera*, 2010, 560 p.
2. Natanson I.P. Teoriya funktsiy veshchestvennoy peremennoy [Theory of functions of real variable]. Moscow, *Nauka*, 1974, p. 480.
3. Vasilevsky V.V., Mikholenok A.N., Zhebel A.S., Vysokoproizvoditel'nyy algoritm predvaritel'noy tsifrovoy obrabotki videoinformatsii pri aerokosmicheskom monitoringe dinamicheskikh obyektoy [High-performance algorithm for preliminary digital processing of video information for aerospace monitoring of dynamic objects]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*. 2018, no. 1(248), pp. 72-77.
4. Vasilevsky V.V. Sintez algoritma i ustroystvo operativnoy avtomatizirovannoy obrabotki dannykh aerokosmicheskogo monitoringa [Algorithm synthesis and the device for operative automated processing of aerospace monitoring data]. *Spetsial'naya Tekhnika*, 2015, no. 2. pp. 27-43.
5. Vasilevsky V.V., Zhebel A.S. Mnogospektral'naya obrabotka videoinformatsii v zadachakh aerokosmicheskogo monitoringa malozametnykh obyektoy mestnosti [Multispectral processing of video-data for aerospace monitoring of low-observable objects]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*. 2018, no. 4(251), pp. 4-7.
6. Kronrad A.S. O funktsiyakh dvukh peremennykh [On the functions of two variables]. *Uspekhi matematicheskikh nauk*, 1950, vol. 5, no. 1, pp. 24-134.