

УДК 629.783

DOI:10.36845.2073-8250-2020-256-1-27-32

## АДАПТИВНОЕ МИНИМАКСНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ В ЗАДАЧАХ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

**В.В. Василевский**

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

*Исследуется проблема повышения эффективности аэрокосмического мониторинга и автоматической обработки видеоинформации в условиях априорной неопределённости. Предложено построение адаптивной минимаксной оценки параметров модели изображения. Приведено описание вычислительного алгоритма адаптивного оценивания видеоинформации.*

**Ключевые слова:** аэрокосмический мониторинг, модель изображения, адаптивная минимаксная оценка, алгоритм адаптивного оценивания

**Сведения об авторах:** Василевский Валерий Владимирович, к.в.н., доцент, [echinops777@rambler.ru](mailto:echinops777@rambler.ru)

## ADAPTIVE MINIMAX ESTIMATION OF VIDEO-DATA IN AEROSPACE MONITORING APPLICATIONS

**V.V. Vasilevskiy**

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

*This article is dedicated to the problem of increasing the performance of aerospace monitoring and automatic video-data processing under prior uncertainty. The development of adaptive minimax estimate for the image model parameters is proposed, and the computational algorithm for adaptive estimation of video-data is described.*

**Keywords:** aerospace monitoring, image model, adaptive minimax estimate, adaptive estimation algorithm

**Data on author:** Vasilevsky Valeriy Vladimirovich, Ph.D., Associate Professor, [echinops777@rambler.ru](mailto:echinops777@rambler.ru)

### **Введение. Постановка задачи**

В последние годы всё большее распространение получают системы извлечения информации, включающие в себя пространственные апертуры датчиков сигналов. Такие системы используются для дистанционного исследования Земли и других планет, в геологии, исследовании природных ресурсов, навигации и других приложениях. Исходной информацией при этом являются динамические массивы данных, получаемые с помощью фоточувствительных приёмных устройств (ФПУ), устанавливаемых на борту средств аэрокосмического мониторинга, и которые представляются в виде многомерных изображений [1].

Остановимся на задаче автоматизации первичной обработки видеоинформации аэрокосмического мониторинга, поиска и распознавания объектов (аномалий) местности, которая в условиях априорной неопределённости параметров модели наблюдения относится к классу задач статистической фильтрации.

Традиционный подход к её решению основывается на применении алгоритмов оптимальной обработки полутонового (цветного) изображения для выделения однородных областей аномалий (объектов) [5].

Проблемой применения оптимальных алгоритмов обработки изображений, помимо их сложности, является отсутствие полной априорной информации о параметрах моделей и вероятностных характеристиках возмущений. Кроме того, оптимальные методы фильтрации и оценивания являются весьма чувствительными даже к незначительным отклонениям от принятых допущений и ограничений, в условиях которых они были получены.

Данные обстоятельства явились причиной исследования возможностей адаптивных методов обработки изображений, которые основаны на восстановлении неизвестных стохастических параметров модели наблюдения [8].

Таким образом, рассматривается задача автоматизации обработки многомерных полутоновых (цветных) многомерных изображений оптического диапазона при обнаружении объектов (аномалий) земной поверхности [2, 4].

Целью настоящей работы являются построение адаптивной минимаксной оценки параметров модели наблюдения и разработка адаптивного алгоритма обработки полутонового (цветного) изображения при получении бинарного потока данных с учётом отсутствия априорной информированности об условиях мониторинга.

### **Модель изображения**

Пусть производится анализ состояния текущего изображения как семейства  $U_j \{u_{\bar{j}}, \bar{j} \in J\}$  случайных величин яркости  $u_j$ , которые представим в виде изменяющегося в дискретном времени случайного поля (СП) на многомерной решётке в дискретном пространстве и времени  $J = \{\bar{j} = (j_1, j_2, \dots, j_n); j_l = \bar{l}, M_l, l = 1, 2, \dots, n\}$ .

Поскольку СП изменяется во времени, на фиксированном интервале времени  $T$  семейство величин будем называть строкой (столбцом) текущего изображения.

Рекуррентная процедура развёртки и обработки изображения имеет вид [3]:

$$u_j = U_{\bar{j}}(u_{\bar{l}}, \bar{l} \in G_{\bar{j}}; \bar{j}, \bar{l} \in J_t), \quad (1)$$

где  $G_{\bar{j}}$  – множество наблюдаемых элементов строки (столбца) на интервале времени  $T$ ;  $U_{\bar{j}}(u_{\bar{l}}), \bar{j}, \bar{l} \in J$  – функции распределения яркости  $\{u_{\bar{j}}\}$ .

Для каждого интервала дискретного времени  $T$  состояние СП распределения яркости определяется на основе оценивания значений  $\{u_j^t, j \in J, t \in T\}$  случайных величин и вычисления оценивающего функционала  $Z_t(u)$  [5].

Используем неопределённо-стохастическую модель наблюдения текущей строки (столбца) изображения, когда измерения проводятся блочно в моменты времени  $t$  и при этом для различных моментов  $t$  и  $t + \tau$  ошибки наблюдений могут быть коррелированы [6]:

$$Z_t = X_t^* \rho + V_t, \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad (2)$$

где  $Z_t \in R^r$  – вектор  $t$ -го наблюдения яркости строки (столбца) изображения;  $Z_t = \text{col}[Z_{t1}, \dots, Z_{tr}]$ ;  $X_t = \{X_{t1}, \dots, X_{tr}\} \in R^{p \times r}$  – неслучайная матрица регрессоров – некоторого множества элементов изображения объёмом  $r$ , используемых для оценивания вектора  $t$ -го наблюдения  $Z_t$ ;  $\rho = \text{col}[\rho_1, \rho_2] \in R^p$  – составной неопределённо-стохастический вектор параметров модели наблюдения;  $\rho_1 \in R^m$  – неслучайный неопределённый параметр;  $\rho_2 \in R^l$  – случайный частично определённый параметр;  $V_t \in R^r$  – векторный случайный процесс наблюдения шума с дискретным временем вида:

$$\begin{cases} V_t = \sum_{k=1}^q B_k \cdot V_{t-k} + \Omega_t, & t = 1, 2, \dots, T, \\ V_t = \Omega_t = 0, & t = 0, -1, \dots \end{cases} \quad (3)$$

Модель наблюдения (2) описывает  $r$ -мерный авторегрессионный процесс  $q$ -го порядка и может быть использована при решении задач оценивания параметра  $Z_t$  модели изображения.

Предположим, что в модели наблюдения (3) матрицы  $\{B_k\}_{k=1}^q$  являются диагональными:  $B_k = \text{diag}[b_{k1}, \dots, b_{kr}]$ , где  $b_i = \text{col}[b_{i1}, \dots, b_{ir}]$ ;  $\Omega_t = \text{col}[\omega_{t1}, \dots, \omega_{tr}]$ ,  $V_t = \text{col}[v_{t1}, \dots, v_{tr}]$ .

Если параметры  $Q, B = \{B_k\}, V_0$  известны, то минимаксная оценка параметров вероятностной модели наблюдения  $\hat{\rho}_T(B, Q)$  определяется соотношением

$$\hat{\rho}_T = (\Phi_T^*(B) \cdot (I_T \otimes Q^{-1}) \cdot \Phi_T(B) + V_0^+)^{-1} \Phi_T^*(B) \cdot (I_T \otimes Q^{-1}) \cdot z_T(B), \quad (4)$$

где  $\Phi_T(B) = \text{col}[U_1^*(B), \dots, U_T^*(B)]$ ,

$z_T(B) = \text{col}[z_1(B), \dots, z_T(B)]$ ;  $\otimes$  – тензорное произведение матриц.

Если параметры  $Q, B = \{B_k\}, V_0$  неизвестны, то найдётся адаптивная минимаксная оценка вида [7, 8]:

$$\tilde{\rho}_T = \pi_T^{ad}(z_T), \quad \pi_T^{ad} \in \Pi, \quad (5)$$

где  $z_T = \text{col}[Z_1, \dots, Z_T]$ ,  $\Pi$  – класс измеримых преобразований  $R^n \rightarrow R^r$ ,  $n = T \cdot r$ ;  $\pi_T^{ad}$  – оператор адаптивного минимаксного оценивания в модели наблюдения (2) - (3).

При этом адаптивная оценка  $\tilde{\rho}_T$  имеет асимптотическую точность оценки  $\hat{\rho}_T(B, Q)$  и не использует априорную информацию о параметрах модели шума  $\{V_t\}$ .

Оценки параметров вероятностных моделей, обладающих данными свойствами, известны как адаптивные (асимптотически оптимальные в принятом смысле), а соответствующие алгоритмы – как адаптивные алгоритмы оценивания [2, 8].

### Вычислительный алгоритм адаптивного оценивания

Основу метода обработки составляет использование двумерных данных наблюдаемого изображения при его последовательной развёртке по строке (столбцу) [2-5].

В принятых допущениях и обозначениях алгоритм построения адаптивной оценки параметров наблюдаемого сечения изображения (строки, столбца) содержит следующие процедуры:

1. Вычисляется априорная минимаксная оценка распределения яркости по строке (столбцу):

$$\rho_T^a = \left( \sum_{t=1}^T X_t \cdot X_t^* \right)^+ \cdot \sum_{t=1}^T X_t \cdot Z_t = \Phi_T^+ \cdot z_T, \quad (6)$$

где  $(\circ)^+$  – псевдообратная по Муру-Пенроузу матрица.

2. Находятся для каждого момента времени  $t = 1, \dots, T$  оценки случайного вектора наблюдения  $V_t$ :

$$\hat{V}_t = \text{col}[\hat{v}_{1t}, \dots, \hat{v}_{rt}] = Z_t - X_t^* \cdot \rho_t^a. \quad (7)$$

3. Вычисляются оценки вспомогательных параметров  $\{b_i\}_{i=1}^r$ :

$$\hat{b}_i = \left( \sum_{t=1}^T \hat{Y}_{it} \cdot \hat{Y}_{it}^* \right)^+ \cdot \sum_{t=1}^T \hat{Y}_{it} \cdot \hat{y}_{it}, \quad i = 1 \div r, \quad (8)$$

где  $\hat{Y}_{it} = \text{col}[\hat{y}_{i,t-1}, \dots, \hat{y}_{i,t-q}]$ .

4. Находится оценка  $\hat{Q}_T$  матрицы  $Q = \text{cov}\{\Omega_t, \Omega_t\}$ :

$$\hat{Q}_T = T^{-1} \cdot \sum_{t=1}^T \left( \hat{V}_t - \sum_{k=1}^q \hat{B}_k \hat{V}_{t-k} \right) \left( \hat{V}_t - \sum_{k=1}^q \hat{B}_k \hat{V}_{t-k} \right)^*, \quad (9)$$

где  $\hat{B}_k = \text{diag}[\hat{b}_{k1}, \dots, \hat{b}_{kr}] \quad k = 1 \div q$ .

5. Строится адаптивная оценка  $\tilde{\rho}_T$  вектора параметров модели наблюдения  $\rho$  по строке (столбцу) изображения:

$$\tilde{\rho}_T = W_T^+ (\hat{B}, \hat{Q}_T) \cdot H_T (\hat{B}, \hat{Q}_T), \quad (10)$$

где  $\bar{W}_T (\hat{B}, \hat{Q}_T) = \sum_{t=1}^T U_t (\hat{B}) \cdot \hat{Q}_T^+ \cdot U_t^* (\hat{B})$ ,

$$H_T (\hat{B}, \hat{Q}_T) = \sum_{t=1}^T U_t (\hat{B}) \cdot \hat{Q}_T^+ \cdot Z_t (\hat{B}),$$

$$W_T (\hat{B}, \hat{Q}_T) = \bar{W}_T (\hat{B}, \hat{Q}_T) + V_0^+, \quad \hat{B} = [\hat{B}_1, \dots, \hat{B}_q].$$

Оценка (10) является адаптивной минимаксной оценкой, а алгоритм (6) - (10) является алгоритмом адаптивного минимаксного оценивания.

Иллюстрация результатов вычислительного эксперимента по исследованию применимости метода адаптивной минимаксной обработки видеoinформации при получении из исходного полутонового изображения бинарного показана на рис. 1.

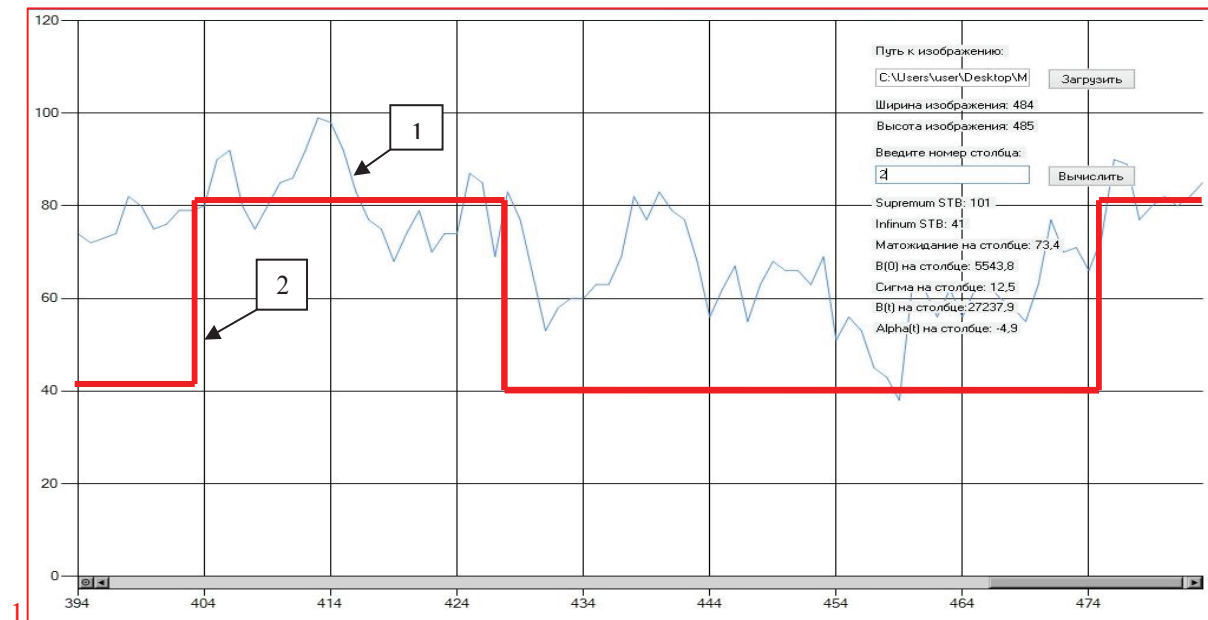


Рис. 1

Оценивание параметров изменений яркости строки полутонового изображения (1) и получение бинарного потока данных (2)

На рис. 1 непрерывной функцией синего цвета (функция 1) показано яркостное сечение строки реального изображения местности, для которого в случае традиционной схемы распознавания практически невозможно назначить границы принятия решений, чтобы корректно разделить пикселы на классы объектовые и фоновые. Дискретной функцией красного цвета (функция 2) показано бинарное представление яркости строки изображения, полученное с использованием адаптивного минимаксного оценивания.

Как следует из полученных результатов, при обработке полутонового (цветного) изображения и получения бинарного представления с использованием алгоритма адаптивного оценивания априорно неопределённых параметров модели наблюдения (динамического диапазона изменения яркости, размера множества данных, порогового уровня и др.) пикселы наблюдаемого изображения могут быть правильно разделены на классы 1 (фоновые) и 2 (объектовые) соответственно.

При этом поля выходного файла вычислительного модуля включают следующую информацию: 1) файл текущего изображения; 2) массив данных распределения яркости по строке (столбцу); 3) оценки статистических характеристик изображения по строке (столбцу); 4) бинарное представление строки (столбца) изображения; 5) массив оценок параметров модели изображения.

Таким образом, адаптивный алгоритм обработки видеоинформации на основе преобразования полутонового изображения в бинарное позволяет повысить достоверность обнаружения аномалий (объектов) местности.

## Заключение

В работе предложено решение задачи автоматической обработки и распознавания видеоинформации на основе использования алгоритма адаптивного минимаксного оценивания изображений.

Использование алгоритма адаптивного минимаксного оценивания многомерных изображений показывает следующие возможности автоматизации аэрокосмического мониторинга объектов земной поверхности:

- устранения избыточности информации при преобразовании полутонового (цветного) изображения в бинарный поток данных;
- сокращения времени поиска объектов мониторинга на основе последовательной обработки изображения по строкам (столбцам);
- повышения надёжности распознавания изображений в условиях априорной неопределённости мониторинга при использовании адаптивного метода фильтрации и оценивания изображения.

## Литература

1. Шовенгердт, Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
2. Василевский, В.В. Высокопроизводительный алгоритм предварительной цифровой обработки видеоинформации при аэрокосмическом мониторинге динамических объектов / В.В. Василевский, А.Н. Михоленок, А.С. Жебель // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2018. – Вып. 1 (248). – С. 72-77.
3. Василевский, В.В. Синтез алгоритма и устройство оперативной автоматизированной обработки данных аэрокосмического мониторинга / В.В. Василевский // Специальная техника. – 2015. – 2. – С. 27-43.

4. Василевский, В.В. Многоспектральная обработка видеoinформации в задачах аэрокосмического мониторинга малозаметных объектов местности / В.В. Василевский, А.Н. Жебель // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2018. – Вып. 4 (251). – С. 4-7.
5. Василевский, В.В. Аэрокосмический мониторинг объектов местности на основе детерминированно-вероятностной модели изображения / В.В. Василевский, А.С. Жебель // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2019. – Вып. 3 (254). – С. 4-11.
6. Панков, А.Р. Методы и алгоритмы оптимального оценивания состояний неопределенно-стохастических систем / А.Р. Панков, А.В. Борисов, Н.М. Сотский. – М.: Изд-во МАИ, 1991. – 44 с.
7. Пугачев, В.С. Теория стохастических систем / В.С. Пугачев, И.Н. Сеницын. – М.: Логос, 2000. – 642 с.
8. Фомин, В.Н. Рекуррентное оценивание и адаптивная фильтрация / В.Н. Фомин. – М.: Наука, 1984. – 288 с.
3. Vasilevsky V.V. Sintez algoritma i ustroystvo operativnoy avtomatizirovannoy obrabotki dannykh aerokosmicheskogo monitoring [Algorithm synthesis and the device for operative automated processing of aerospace monitoring data]. Spetsial'naya Tekhnika, 2015, no. 2. pp. 27-43.
4. Vasilevsky V.V., Zhebel A.S. Mnogospektral'naya obrabotka videoinformatsii v zadachakh aerokosmicheskogo monitoring malozametnykh obyektov 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.
5. Vasilevskiy V.V., Zhebel A.S. Aerokosmicheskii monitoring obyektov mestnosti na osnove determinirovanno-veroyatnostnoy modeli izobrazheniya [Aerospace monitoring of surface objects based on deterministic-probabilistic image model]. Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices, 2019, no. 3 (254), pp. 4-11.

### 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. Vasilevsky V.V., Mikholenok A.N., Zhebel A.S., Vysokoproizvoditel'nyy algoritm predvaritel'noy tsifrovoy obrabotki videoinformatsii pri aerokosmicheskom monitoring dinamicheskikh obyektov [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.
6. Pankov A.R., Borisov A.V., Sotskiy N.M. Metody i algoritmy optimal'nogo otsenivaniya sostoyaniy neopredelenno-stokhasticheskikh sistem [Methods and algorithms for optimal estimation of states of indefinitely stochastic systems]. Moscow, Moskovskiy aviatsionniy institute, 1991, 44 p.
7. Pugachev V.S., Sinitsyn I.N. Teoriya stokhasticheskikh sistem [Theory of stochastic systems]. Moscow, Logos, 2000, 642 p.
8. Fomin V.N. Rekurrentnoye otsenivaniye i adaptivnaya fil'tratsiya [Recurrent estimation and adaptive filtering]. Moscow, Nauka, 1984, 288 p.