



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-116-124>

Оригинальная статья

Original paper

УДК 004.942

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КАРТЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ, СОСТАВЛЯЮЩИХ ФОНОВУЮ ОБСТАНОВКУ ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

А. В. СЕРГЕЕНКО, А. Ю. ЛИПЛЯНИН, А. В. ХИЖНЯК

Военная академия Республики Беларусь (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 21.09.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Представлена разработанная математическая модель для построения карты расположения областей, составляющих фоновую обстановку для оптико-электронных систем. Особенностью предложенной модели является то, что при определении, к какому классу относится конкретный пиксель, учитываются одновременно значения классов соседних пикселей, а также пространственное положение пикселя. Приведены количественные оценки адекватности данной модели и существующих математических моделей изображений, способных осуществить построение карт расположения областей. Предлагаемая модель сравнивалась с Марковской моделью, блочной Марковской моделью, моделью Гиббса, блочной моделью Гиббса и дважды стохастической моделью с квантованием по уровню. Оценку адекватности проводили с использованием разработанной авторами искусственной нейронной сети, оценивающей сходство двух изображений по нормированному показателю сходства, находящемуся в интервале от 0.0 до 1.0, и ее k -кратной перекрестной проверки. Результаты сравнения показали, что разработанная модель по вычисленному показателю не менее чем в три раза лучше известных.

Ключевые слова: оптико-электронные средства, математическая модель изображений, оценка адекватности, обработка изображений.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Сергеевко, А. В. Математическая модель для построения карты расположения областей, составляющих фоновую обстановку для оптико-электронных систем / А. В. Сергеевко, А. Ю. Липлянин, А. В. Хижняк // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 1. С. 116–124. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-116-124>.

MATHEMATICAL MODEL FOR CONSTRUCTING A MAP OF THE LOCATION OF AREAS THAT MAKE UP THE BACKGROUND ENVIRONMENT FOR OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEMS

ANDREY V. SIARHEYENKA, ANTON Y. LIPLIANIN, ALEXANDER V. KHIZHNIYAK

Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 21.09.2023

Abstract. A developed mathematical model is presented for constructing a map of the location of areas that make up the background environment for optical-electronic systems. A feature of the proposed model is that when determining which class a particular pixel belongs to, the class values of neighboring pixels, as well as the spatial position of the pixel, are simultaneously taken into account. Quantitative assessments of the adequacy of this model and existing mathematical image models capable of constructing maps of the location of areas are given.

The proposed model was compared with the Markov model, block Markov model, Gibbs model, block Gibbs model and doubly stochastic model with level quantization. Adequacy assessment was carried out using an artificial neural network developed by the authors, which evaluates the similarity of two images using a normalized similarity index ranging from 0.0 to 1.0, and its k -fold cross-validation. The comparison results showed that the developed model, according to the calculated indicator, is at least three times better than the known ones.

Keywords: optical-electronic means, mathematical model of images, adequacy assessment, image processing.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Siarheyenka A. V., Liplianin A. Y., Khizhniak A. V. (2024) Mathematical Model for Constructing a Map of the Location of Areas that Make Up the Background Environment for Optical-Electronic Systems. *Doklady BGUIR*. 22 (1), 116–124. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-116-124> (in Russian).

Введение

Современные оптико-электронные системы (ОЭС) характеризуются глубокой интеграцией во многие виды человеческой деятельности. Задачи мониторинга и анализа сложной фоновой обстановки, поиска, распознавания, автоматического сопровождения объектов интереса на сложном динамическом фоне в условиях существенной как стохастической, так и нестохастической неопределенности требуют перманентной разработки новых алгоритмов обработки видеоинформации. Эффективность такой работы напрямую зависит от качества математических моделей изображений, используемых разработчиком. Наличие адекватных математических моделей позволяет разработчику, во-первых, формализовать фоновую целевую обстановку и объекты интереса, во-вторых, обосновать параметры и характеристики результатов работы алгоритмов обработки видеоинформации при различных условиях.

Одним из актуальных направлений в настоящее время является использование ОЭС с низкореляционными беспилотных летательных аппаратов. Такие условия съемки имеют следующие особенности: во-первых, на наблюдаемых изображениях одновременно присутствует как наземная составляющая обстановки, так и воздушная; во-вторых, наземная и воздушная составляющие в общем случае не являются однородными и состоят из областей, характеризующихся разными структурными и спектральными характеристиками. Обзор современных математических моделей изображений показал, что существующие модели позволяют описывать подстилающую поверхность (характерно для съемки в надиры с высоколетящего носителя) или однородный фон [1, 2]. Оба типа математических моделей не соответствуют указанным условиям съемки. В связи с этим возникает необходимость разработки математической модели изображения, соответствующей условиям эксплуатации систем. Формирование изображения целесообразно разделить на два этапа: первый – создание карты расположения областей, составляющих фоновую обстановку; второй – заполнение каждой области требуемыми структурами и спектральными характеристиками.

В статье представлена разработанная авторами математическая модель, с помощью которой можно описать расположение областей, составляющих фоновую обстановку для ОЭС. Эта модель предназначена для использования в рамках первого этапа построения изображения.

Математическая модель для построения карты расположения областей, составляющих фоновую обстановку для оптико-электронных систем

Искомая карта расположения областей представляет собой изображение сложной сцены, состоящей из областей (классов) различных конфигураций. Поэтому построение карты проводится в несколько этапов, итерационно уточняя параметры и характеристики каждой области. Изначально карта инициализируется пустыми значениями. На каждом итерационном шаге точки карты обходятся последовательно по столбцам сверху вниз, и осуществляется модификация значения карты в каждой из них.

На первом, подготовительном, этапе необходимо задать параметры изображения и проинициализировать начальными значениями: весовые коэффициенты пикселей, зависимость коэффициентов появления классов от координаты Y , карта переходов между классами, количество итераций, размер изображения и размер группы пикселей для расчета. Объединение пикселей в группы обусловлено тем, что попиксельная модернизация карты приводит к тому, что все карты состоят из областей схожих размеров. Чтобы обеспечить существенное различие размеров

областей между случайными картами, проводится определение класса не для каждого отдельно взятого пикселя, а сразу для группы пикселей. Начальные размеры группы задаются таким образом, чтобы быть эквивалентными желаемому размеру наименьшей итоговой области. Для обеспечения различия форм областей в последующих итерациях размер группы уменьшается в два раза до тех пор, пока группа не вырождается в пиксель.

На втором, основном, этапе производится итерационное построение карты расположения областей. Анализ изображений, соответствующих заданным условиям съемки, показал, что типичное изображение сцены представляет собой совокупность областей разных классов произвольных формы и размеров. При этом было установлено, что наибольший вклад в определение, к какому классу относится отдельно взятый пиксель, оказывают значения координаты Y пикселя (значение коэффициента корреляции между координатой Y и значением класса составило 0.84) и значения классов, к которым относятся соседние пиксели (значение коэффициента корреляции между классами соседних пикселей и отдельно взятым составило 0.99). Тогда значения весовых коэффициентов появления пикселя (группы пикселей) одного из классов можно записать в виде

$$W_c(\Omega, y, z) = W_c(\Omega)_{cor} W_c(y, z)_{cor} TM, \quad (1)$$

где $W_c(\Omega, y, z)$ – весовой коэффициент появления класса c ; $c \in [1, n]$ – номер класса, к которому относится пиксель (группа пикселей); n – общее число классов; Ω – соседние пиксели (группы пикселей); y – значение координаты Y ; z – номер итерации; $W_c(\Omega)_{cor}$ – скорректированный коэффициент появления класса c от значения соседних пикселей (групп пикселей); $W_c(y)_{cor}$ – скорректированный коэффициент появления класса c от значения координаты Y ; TM – карта переходов классов.

Используем полученные весовые коэффициенты для определения вероятности, что пиксель (группа пикселей) при модификации примет значение класса c :

$$P(c) = \frac{W_c(\Omega, y, z)}{\sum_{c=1}^n W_c(\Omega, y, z)}, \quad (2)$$

где $P(c)$ – вероятность, что пиксель (группа пикселей) при модификации примет значение класса c .

Как видно из (1), для того, чтобы отнести пиксель к определенному классу, необходимо рассчитать три составляющие: скорректированный коэффициент появления класса c от значения соседних пикселей (групп пикселей), скорректированный коэффициент появления класса c от значения координаты Y и возможность перехода из одного класса в другой. Рассмотрим подробнее процесс формирования весовых коэффициентов класса от соседних пикселей (группы пикселей). При анализе реальных изображений было установлено, что наибольший вклад в определение класса отдельного пикселя вносят восемь ближайших соседних пикселей, находящихся в области 3×3 пикселя (значение коэффициента корреляции 0.9988). Далее с увеличением размера области вклад постепенно уменьшается.

$W_{i-1,j-1}$	$W_{i,j-1}$	$W_{i+1,j-1}$
$W_{i-1,j}$	$W_{i,j}$	$W_{i+1,j}$
$W_{i-1,j+1}$	$W_{i,j+1}$	$W_{i+1,j+1}$

Рис. 1. Внешний вид маски коэффициентов соседних пикселей (группы пикселей)
Fig. 1. Appearance of the mask of coefficients of neighboring pixels (group of pixels)

Для определения влияния конкретного пикселя (группы пикселей) на то, какое значение примет новый пиксель (группа пикселей), используется маска, представленная на рис. 1.

На рис. 1 i и j – текущие координаты модифицируемого пикселя (верхнего левого пикселя модифицируемой группы пикселей); $w \in [0.0, 1.0]$ – весовой коэффициент пикселя (группы пикселей). В соответствии с рис. 1 каждому из соседей присваивается некоторый весовой коэффициент w , находящийся в диапазоне от 0.0 до 1.0. Значение центрального элемента маски коэффициентов в расчет не принимается. Инициализация значений маски зависит от внешнего вида искомой карты расположения областей. При задании больших коэффициентов на горизонтальных позициях и малых на вертикальных итоговые области будут сильно растянуты по горизонтали (рис. 2, a, b). Если задать большие коэффициенты на вертикальные позиции и малые на горизонтальные, итоговые области будут сильно растянуты по вертикали (рис. 2, c, d).

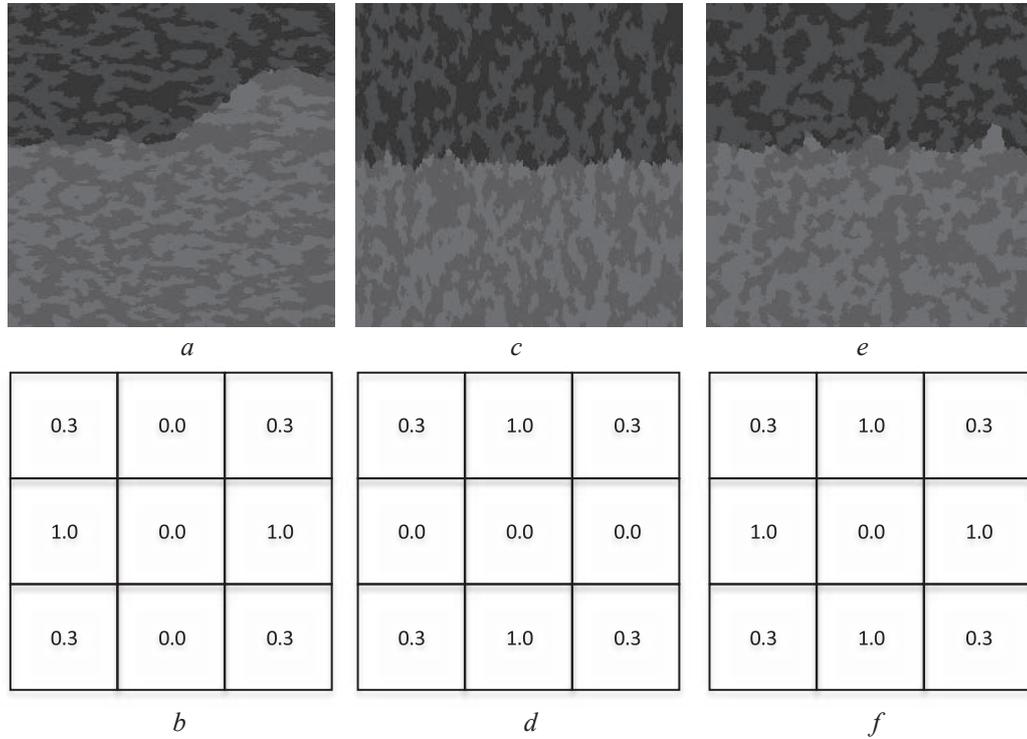


Рис. 2. Внешний вид искомой карты и соответствующей ей маски: a, c, e – карты областей для различных масок коэффициентов соседних пикселей; b, d, f – соответствующие маски коэффициентов соседних пикселей

Fig. 2. Appearance of the target map and the corresponding mask: a, c, e – maps of regions for different masks of coefficients of neighboring pixels; b, d, f – corresponding masks of coefficients of neighboring pixels

Поскольку на первой итерации значения карты инициализированы пустыми значениями, формула расчета коэффициента появления класса c имеет следующий вид:

$$W_A(\Omega) = \sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^1 \left(w_{i,j} \cdot 1_{i,j}^{C_A} + \frac{w_{i,j}}{n} \cdot 1_{i,j}^{C_{-1}} \right), \quad (3)$$

где $W_A(\Omega)$ – нескорректированный коэффициент появления класса c от значения соседних пикселей (группы пикселей); $1_{i,j}^{C_A}$ – принимает значение 1, если класс пикселя (области) равен c , иначе 0; $1_{i,j}^{C_{-1}}$ – принимает значение 1, если пиксель (область) не инициализирован, иначе 0.

Корректировка полученного весового коэффициента применяется при первой итерации и необходима для снижения вклада соседних пикселей (группы пикселей) в результирующий весовой коэффициент. Скорректированный весовой коэффициент появления класса c от значения соседних пикселей (областей) определяется по формуле

$$W_A(\Omega)_{cor} = W_A(y) \frac{g-e}{g} + W_A(\Omega) \frac{e}{g}, \quad (4)$$

где $W_A(y)$ – нескорректированный коэффициент появления класса c от значения координаты Y ; g – общее число пикселей (групп пикселей), участвующих в формировании пикселя (группы пикселей); e – число инициализированных соседних пикселей (групп пикселей).

Следующей составляющей расчета является скорректированный коэффициент появления класса c от значения координаты Y . Для описания зависимости значения c от координаты Y подходят функция сигмоиды, которая обеспечивает неоднородность границы классов по координате X , и кусочно-заданная функция, обеспечивающая однородность границы классов по координате X . Корректировка этих коэффициентов необходима для уменьшения роли координаты Y при наличии уже инициализированных соседних пикселей (областей) и сохранении значимости коэффициентов при шаге уменьшения размеров группы. Корректировка осуществляется по формуле

$$W_c(y, z)_{cor} = \begin{cases} W_c(\Omega) \frac{g - e}{g} + W_c(y) \frac{e}{g}, & \text{если } z > 0; \\ W_c(y), & \text{если } z = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Третьей составляющей выражения (1) является коэффициент карты переходов, который принимает два значения: 0 или 1. Коэффициент определяет, может ли пиксель (группа пикселей) принять значение класса c_y , при условии, что предыдущий пиксель (область пикселей) по координате Y относится к классу c_{y-1} . Вид карты переходов представлен на рис. 3, где $t_{c_{y-1}c_y}$ – коэффициент, определяющий возможность перехода одного класса в другой.

$c_{y-1} \backslash c_y$	c_0	...	c_n
c_0	1	...	$t_{c_n c_0}$
\vdots	\vdots	1	\vdots
c_n	$t_{c_0 c_n}$...	1

Рис. 3. Внешний вид карты переходов между классами
Fig. 3. Appearance of transition map between classes

Последовательность выполнения операций при создании карты расположения областей, составляющих фоновую обстановку для ОЭС в соответствии с предложенной математической моделью, представлена на рис. 4. Пример карты расположения областей, составляющих фоновую обстановку для ОЭС, полученной при помощи разработанной математической модели, показан на рис. 5.

Анализ результатов исследований

Сравним предложенную математическую модель для построения карты областей с математическими моделями, позволяющими выполнять аналогичные задачи. Для этого воспользуемся методикой оценки адекватности математической модели изображения [3]. В ее основе лежит искусственная нейронная сеть (ИНС), решающая задачу оценки сходства двух изображений по нормированному показателю сходства, и ее k -кратная перекрестная проверка [4, 5]. Для сравнения карт расположения областей, составляющих фоновую обстановку для ОЭС, требуется выполнить следующие этапы.

1. Провести обучение ИНС, для чего используется весь набор изображений, за исключением изображений реальных сцен и оцениваемой модели.

2. Выделить переменную *estimate*, которая необходима для хранения текущей суммы оценок сходства пары изображений.

3. Выполнить разбиение набора данных на 10 равных частей таким образом, чтобы в каждой части было равное число реальных изображений и изображений оцениваемой математической модели.

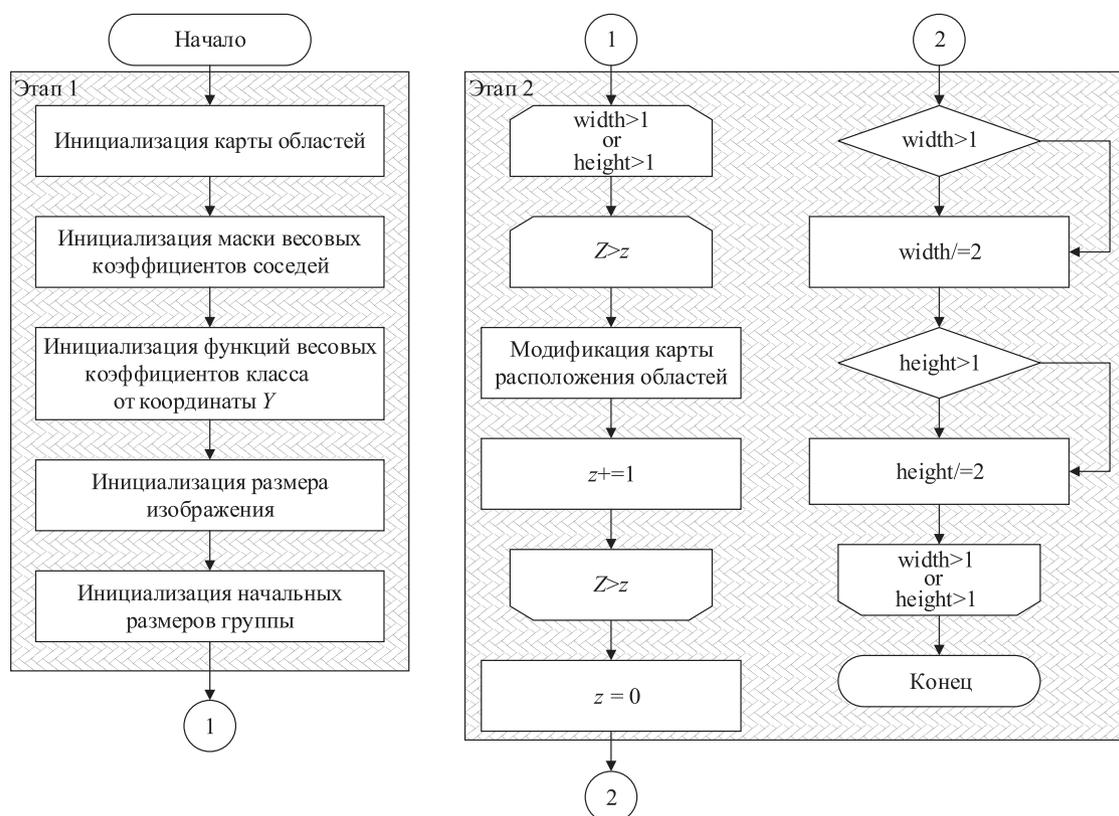


Рис. 4. Алгоритм создания карты расположения областей, составляющих фоновую обстановку для оптико-электронных систем, в соответствии с предложенной математической моделью
Fig. 4. Algorithm for creating a map of the location of the areas that make up the background environment for the optoelectronic system in accordance with the proposed mathematical model



Рис. 5. Внешний вид карты расположения областей согласно разработанной математической модели
Fig. 5. Appearance of maps of the location of areas, according to the developed mathematical model

4. Выделить 1-ю часть набора как тестовую, а 2–10-е – как тренировочные.
5. Провести обучение ИНС на тренировочной части набора данных. При этом изображения разбиваются на пары так, чтобы пары с четными номерами являлись изображениями одного класса, а с нечетными – изображениями разных классов.
6. Провести проверку обученной ИНС, при этом результат оценки каждой пары суммируется к переменной *estimate*. Изображения разбиваются на пары таким образом, чтобы каждая пара являлась изображением разных классов.
7. Выполнить пункты 3–5 для оставшихся частей набора данных.
8. Разделить итоговую сумму оценки сходства *estimate* на общее число пар изображений.

9. Обнулить веса в ИНС.
10. Выполнить пункты 1–9 для оставшихся моделей изображения.
Блок-схема оценки карт областей представлена на рис. 6.

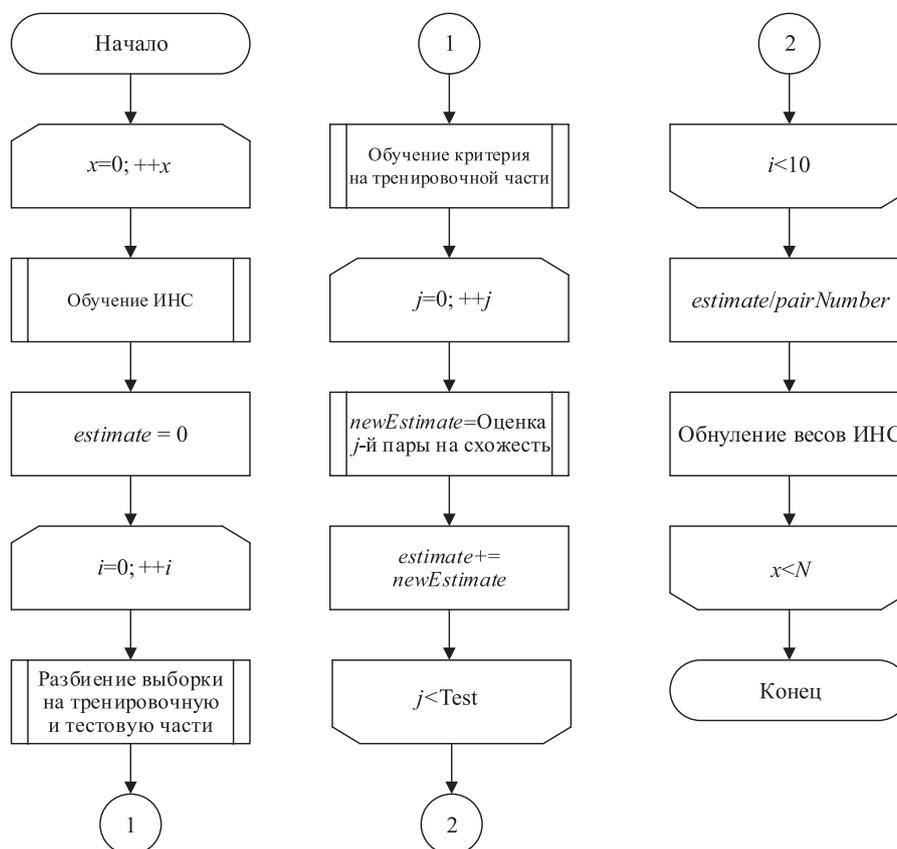


Рис. 6. Блок-схема методики оценки адекватности карт областей, полученных при помощи различных математических моделей, по отношению к реальным изображениям
Fig. 6. Flowchart of the methodology for assessing the adequacy of maps of regions obtained using various mathematical models in relation to real images

Сравнение разработанной математической модели осуществлялось со следующими математическими моделями: с Марковскими случайными полями, случайными полями Гиббса, их блочными модификациями и дважды стохастической моделью с квантованием по уровню¹ [2].

В табл. 1 представлены результаты оценки адекватности существующих математических моделей изображений и предложенной модели построения карты расположения областей, составляющих фоновую обстановку.

Таблица 1. Результаты оценки адекватности существующих математических моделей изображений и предложенной методики разбиения изображения

Table 1. Results of assessment of adequacy of existing mathematical models and proposed math models

Наименование оцениваемой модели / Name of the model being evaluated	Нормированная оценка сходства / Normalized similarity score
Марковская модель	0,0279
Блочная Марковская модель	0,0032
Модель Гиббса	0,0450
Блочная модель Гиббса	0,2134
Дважды стохастическая модель с квантованием по уровню	0,0078
Разработанная модель	0,7452

¹Андриянов, Н. А. Дважды стохастические авторегрессионные модели изображений / Н. А. Андриянов. Ульяновск, 2017.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что существующие в настоящее время математические модели не могут обеспечить адекватное построение карт расположения областей, составляющих фоновую обстановку для ОЭС, соответствующую заданным условиям съемки. Предложенная модель, напротив, обеспечивает адекватное построение таких карт. Нормированные оценки сходства математических моделей показали, что разработанная модель позволяет повысить не менее чем в три раза адекватность карт расположения областей, составляющих фоновую обстановку.

Заключение

1. Разработана итерационная математическая модель для построения карты расположения областей, составляющих фоновую обстановку для оптико-электронных систем. Особенностью этой модели является то, что в ее рамках при определении значения пикселя (группы пикселей) учитываются значения координаты Y и значения классов соседних прилегающих пикселей (групп пикселей).

2. Оценка адекватности, основанная на нормированном показателе сходства разработанной математической и существующих моделей, показала, что предлагаемая модель позволяет повысить нормированную оценку сходства карт расположения областей, составляющих фоновую обстановку, до трех раз.

3. Дальнейшие исследования планируется направить на реализацию второго этапа построения изображения – заполнение каждой области требуемыми структурами с требуемыми спектральными характеристиками.

Список литературы

1. Сергеенко, А. В. Универсальный инструментарий для исследования работы алгоритмов обнаружения в оптическом диапазоне / А. В. Сергеенко, А. Ю. Липлянин, А. В. Хижняк // Вестник Полоцкого государственного университета. 2020. № 12. С. 36–43.
2. Имитационное моделирование в задачах оптического дистанционного зондирования / Г. М. Креков [и др.]. Новосибирск: Наука, 1988.
3. Сергеенко, А. В. Методика расчета параметров адекватности математической модели изображения / А. В. Сергеенко, А. Ю. Липлянин, А. В. Хижняк // Проблемы физики, математики и техники. 2023. Т. 56, № 3. С. 94–99.
4. TORCH.NN [Electronic Resource] // PyTorch. Mode of access: <https://pytorch.org/docs/stable/nn.html>. Date of access: 01.08.2023.
5. Cross-Validation: Evaluating Estimator Performance [Electronic Resource] // Scikit-Learn. Mode of access: https://scikit-learn.org/stable/modules/cross_validation.html. Date of access: 01.08.2023.

References

1. Siarheyenka A. V., Liplianin A. Y., Khizniak A. V. (2020) Universal Tools for Analysis of Algorithms for Detecting Targets in the Optical Range. *Bulletin of Polotsk State University*. (12), 36–43 (in Russian).
2. Krekov G. M., Orlov V. M., Belov V. V., Belov M. L., Belokhvoshtikov A. V., Mishin I. V., et al. (1988) *Simulation Modeling in Optical Remote Sensing Problems*. Novosibirsk, Nauka Publ. (in Russian).
3. Siarheyenka A. V., Liplianin A. Y., Khizniak A. V. (2023) Method for Calculating the Adequacy Parameters of Image Mathematical Model. *Problems of Physics, Mathematics and Engineering*. 56 (3), 94–99 (in Russian).
4. TORCH.NN. *PyTorch*. Available: <https://pytorch.org/docs/stable/nn.html> (Accessed 1 August 2023).
5. Cross-Validation: Evaluating Estimator Performance. *Scikit-Learn*. Available: https://scikit-learn.org/stable/modules/cross_validation.html (Accessed 1 August 2023).

Вклад авторов

Сергеенко А. В. выполнил построение математической модели и ее анализ.

Липлянин А. Ю. осуществил сбор данных для проведения исследования.

Хижняк А. В. осуществил постановку задачи для проведения исследования и формулировку выводов.

Authors' contribution

Siarheyenka A. V. carried out the construction of a mathematical model and its analysis.

Liplianin A. Y. carried out data collection for the study.

Khizniak A. V. formulated the problem for the study and the conclusions.

Сведения об авторах

Сергеенко А. В., мл. науч. сотр. 2-й группы науч.-исслед. лаб. факультета связи и автоматизированных систем управления, Военная академия Республики Беларусь

Липлянин А. Ю., канд. техн. наук, нач. цикла каф. автоматизированных систем управления войсками, Военная академия Республики Беларусь

Хижняк А. В., канд. техн. наук, доц., вед. науч. сотр. 2-й группы науч.-исслед. лаб. факультета связи и автоматизированных систем управления, Военная академия Республики Беларусь

Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,
г. Минск, просп. Независимости, 220
Военная академия Республики Беларусь
Тел.: +375 29 652-62-06
E-mail: andrew-sergeenko@mail.ru
Сергеенко Андрей Владимирович

Information about the authors

Siarheyenka A. V., Junior Researcher of the 2nd Group of the Research Laboratory at the Department of Communications and Automated Control Systems, Military Academy of the Republic of Belarus

Liplianin A. Y., Cand. of Sci., Head of the Cycle at the Department of Automated Control Systems, Military Academy of the Republic of Belarus

Khizniak A. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Senior Researcher of the 2nd Group of the Research Laboratory at the Department of Communications and Automated Control Systems, Military Academy of the Republic of Belarus

Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti Ave., 220
Military Academy of the Republic of Belarus
Tel.: +375 29 652-62-06
E-mail: andrew-sergeenko@mail.ru
Siarheyenka Andrey Vladimirovich