

УДК 629.325 + 519.5

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.В. ХИЖНЯК, А.В. ШЕВЯКОВ

*Военная академия Республики Беларусь
Минск, 220057, Беларусь**Поступила в редакцию 17 июля 2008*

Предложено теоретическое и экспериментальное обоснование применения положений теории нечетких множеств при решении задач математического описания и обработки изображений, полученных техническими средствами разведки как в видимом, так и в инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн.

Ключевые слова: обработка изображений, нечеткие множества, нечеткие методы автоматической классификации, нечеткая морфология.

Введение

Современные средства обнаружения и сопровождения оптически и ИК-контрастных объектов находят применение в широкой номенклатуре систем вооружения, в том числе и в системах, использующих в качестве основного радиолокационный диапазон длин волн. Использование оптического диапазона длин волн обусловлено его высокой информативностью, что при комплексировании с другими диапазонами позволяет достичь значительного прироста вероятности обнаружения и точности сопровождения. Главный недостаток оптического диапазона длин волн — относительно невысокая дальность действия, на современном этапе компенсируется применением радиолокационных систем. Главное достоинство — высокие скрытность функционирования и точность сопровождения объектов. Оптические системы обладают неизмеримо большим разрешением, чем радиолокационные и позволяют с высокой достоверностью осуществлять распознавание объектов с целью выбора наиболее уязвимого элемента, оптимального способа поражения и др. Стремительное развитие полупроводниковой техники позволило оснастить высокоточные средства поражения матричными фотоприемниками, что привело к созданию крайне эффективных систем, способных самостоятельно производить обнаружение, распознавание и целераспределение [1].

Процесс создания таких систем неразрывно связан с проведением теоретических и экспериментальных исследований в таких направлениях, как разработка математических моделей процесса переноса оптического излучения в атмосфере [2], взаимодействия оптического излучения с веществом [3], разработка методов цифровой обработки изображений [4] и др.

Теоретические исследования в области цифровой обработки изображений начались около тридцати лет назад и были связаны в основном с задачами дистанционного зондирования земной поверхности. В настоящее время круг задач, решаемых с помощью цифровой обработки изображений, существенно расширился как благодаря разработке новых методов, так и значительному прогрессу в области аппаратных средств [5].

Интерес представляет сравнение традиционного подхода в обработке изображений, основанного на статистической теории двумерного случайного поля и подхода, основанного на положениях теории нечетких множеств. Первое направление характерно для отечественной школы обработки изображений [6, 7]. Второе направление активно развивается за рубежом (см. библиографию работ в [8]).

Модель объекта наблюдения

Для теоретических исследований использована идеализированная модель объекта наблюдения, представляющая собой бесконечную плоскость (фон) с интегральной яркостью B_Φ , содержащую круглую область диаметром $D_{об}$, в пределах которой яркость плоскости равна $B_{об}$ (объект наблюдения) рис. 1.

Модель объекта наблюдается оптическим прибором, расположенным на некотором расстоянии l . Прибор наблюдения имеет горизонтальное и вертикальное поля зрения, равные $2\omega_{пр}$, линейное поле зрения обозначено пунктиром на рисунке модели объекта наблюдения. В качестве приемника лучистой энергии в оптическом приборе применяется матричный фоточувствительный прибор с зарядовой связью (ФПЗС-матрица).

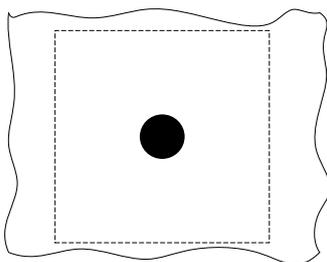


Рис. 1. Идеализированная модель объекта наблюдения

На вход оптической системы объектива прибора наблюдения поступает поток излучения, определяемый следующим соотношением [5]:

$$\varphi_\Sigma = \tau_A \pi \sin^2 \sigma \left(B_\Phi (2\omega_{пр} l - \pi (D_{об}/2)^2)^2 + B_{об} \pi (D_{об}/2)^2 \right),$$

где τ_A — коэффициент пропускания атмосферой излучения на участке между источником и входным зрачком объектива оптического прибора; σ — апертурный угол в пространстве предметов.

Выходящий из объектива и падающий на фоточувствительную площадку ФПЗС-матрицы поток излучения равен

$$\varphi_\Sigma' = \varphi_\Sigma \tau_{опт},$$

где $\tau_{опт}$ — коэффициент пропускания объективом оптического излучения.

Освещенность фоточувствительной площадки ФПЗС-матрицы E' равна отношению светового потока φ_Σ' , прошедшего через объектив к площади изображения, формируемого на фоточувствительной площадке:

$$E' = \tau_A \tau_{опт} \pi \sin^2 \sigma \left(\frac{B_\Phi (2\omega_{пр} l - \pi (D_{об}/2)^2)^2}{NM - f\alpha} + \frac{B_{об} \pi (D_{об}/2)^2}{f\alpha} \right),$$

где N, M — размеры фоточувствительной площадки ФПЗС-матрицы; f — фокусное расстояние объектива оптического прибора; α — угловые размеры объекта наблюдения: $\alpha = D_{об}/l$.

Среднее число фотоэлектронов, накопленных одним элементом ФПЗС-матрицы за время накопления T_H равно

$$\bar{n}_{\Sigma}(x, y) = \frac{T_H A_{\Sigma}}{hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E'(\lambda, x, y) \eta(\lambda) \lambda d\lambda,$$

где $E'(\lambda, x, y)$ — спектральная освещенность фоточувствительной площадки ФПЗС-матрицы; $\eta(\lambda)$ — квантовая эффективность ФПЗС – матрицы; λ — длина волны излучения; A_{Σ} — площадь элемента ФПЗС-матрицы; h — постоянная Планка; c — скорость света.

При формировании цифрового изображения геометрическим растром (рис. 2.) осуществляется дискретизация непрерывной освещенности по пространственным координатам, что позволяет разделить дискреты фоточувствительной площадки на три области (множества): область, включающую элементы, элементарное поле зрения которых падает исключительно на плоскость с яркостью B_{Φ} ; область, включающую элементы, элементарное поле зрения которых падает исключительно на объект наблюдения с яркостью $B_{об}$ и область, включающую элементы, элементарное поле зрения которых падает как на плоскость с яркостью B_{Φ} , так и на объект наблюдения с яркостью $B_{об}$ (рис. 2).



Рис. 2. Дискретизированное по пространственным координатам изображение (а) и пространственное распределение числа накопленных фотоэлектронов в дискретах ФПЗС-матрицы (б)

В соответствии с изложенным выше число накопленных фотоэлектронов в одном дискрете в зависимости от рассматриваемой области определяется следующим образом:

– для первой области:

$$\bar{n}_{\Sigma}^{(1)}(x, y) = \frac{T_H \tau_A \tau_{опт} \pi \sin^2 \sigma}{hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\Phi}(\lambda, x, y) (2\omega_{\Sigma} l)^2 \eta(\lambda) \lambda d\lambda, \quad (1)$$

где $2\omega_{\Sigma}$ — поле зрения дискрета ФПЗС-матрицы в вертикальном и горизонтальном направлениях;

– для второй области:

$$\bar{n}_{\Sigma}^{(2)}(x, y) = \frac{T_H \tau_A \tau_{опт} \pi \sin^2 \sigma}{hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{об}(\lambda, x, y) (2\omega_{\Sigma} l)^2 \eta(\lambda) \lambda d\lambda, \quad (2)$$

– для третьей области:

$$\bar{n}_{\Sigma}^{(3)}(x, y) = \frac{T_H A_{\Sigma} \tau_A \tau_{опт} \pi \sin^2 \sigma}{hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(\frac{B_{\Phi}(\lambda, x, y) (2\omega_{\Sigma} l)^2}{A_{\Sigma} - S_{\Sigma,об}(x, y)} + \frac{B_{об}(\lambda, x, y) (2\omega_{\Sigma} l)^2}{S_{\Sigma,об}(x, y)} \right) \eta(\lambda) \lambda d\lambda, \quad (3)$$

где $S_{\Sigma,об}(x, y)$ — площадь дискрета с координатами (x, y) , перекрываемая объектом наблюдения.

Анализ выражений (1) и (2) позволяет сделать вывод о прямой пропорциональной связи числа накопленных фотоэлектронов и яркости поверхности, на которую падает поле зрения дискрета, что позволяет однозначно судить о том, к какой из перечисленных областей относится дискрет с координатами (x, y) .

В выражении (3) подынтегральная часть состоит из двух слагаемых, первое из которых определяет вклад потока, поступающего от фона в общий поток, поступающий во входной

зрачок объектива оптического прибора; второе слагаемое определяет вклад потока, поступающего от объекта наблюдения. Соответственно, количество накопленных фотоэлектронов в дискретах, относящихся к третьей области, определяется потоком излучения как от фона, так и от объекта наблюдения. Таким образом, возникает неопределенность соответствия дискретов третьей области (рис. 2,б).

При обработке изображений, опираясь на статистическую теорию двумерного случайного поля, которая основывается на булевой логике, решение о том, на какую область (фона или объекта наблюдения) приходится поле зрения конкретного дискрета, принимается на основании амплитудного значения принятого сигнала (числа накопленных фотоэлектронов) с помощью пороговой обработки. В общем случае для принятия решения необходима априорная информация об амплитуде сигнала, соответствующего объекту наблюдения. Задача принятия решения значительно усложняется в условиях, когда $B_{\phi} \cong B_{об}$ и/или объект наблюдения имеет градиентные перепады яркости (рис. 4).

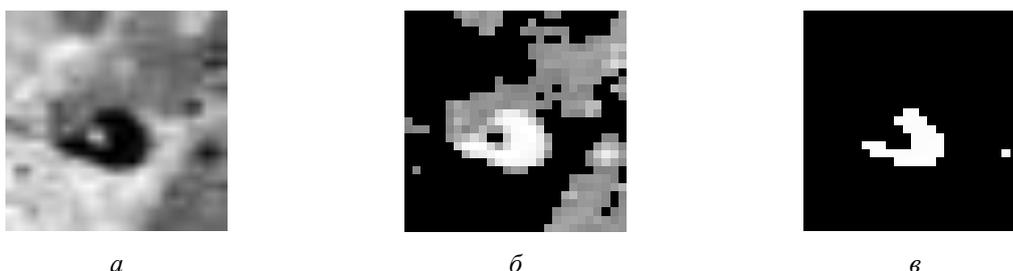


Рис. 3. Выделение дискрет, принадлежащих изображению озера: *а* — Исходный снимок озера; *б* — результат применения пороговой обработки; *в* — результат применения алгоритма D-AFC-TC

Представление изображения как объединения нечетких множеств

В то же время теория нечетких множеств (ТНМ) позволяет не отождествлять третью область ни с первой, ни со второй, а рассматривать отдельно. Само понятие нечеткого множества связано с понятием обычного множества и позволяет изучать нестрогие определенные понятия и свойства, используя математические структуры. С позиций ТНМ естественно рассматривать области как множества дискрет, являющихся подмножествами более общего множества — всех дискрет цифрового изображения. В общем случае ТНМ позволяет представить множество дискрет цифрового изображения как объединение нескольких нечетких подмножеств (в общем случае являющихся абстрактными):

$$\underline{A} = \underline{E}_1 \cup \underline{E}_2 \cup \dots \cup \underline{E}_N,$$

где \underline{A} — все множество дискрет цифрового изображения, формируемого ФПЗС-матрицей; \underline{E}_N — N -ое подмножество, входящее в \underline{A} ; N — количество подмножеств, составляющих \underline{A} .

В качестве примеров нечетких подмножеств, составляющих \underline{A} , можно выделить следующие:

– в задачах улучшения изображений: подмножество "идеального" изображения — изображения, свободного от шумовой составляющей, и подмножество "идеальных" шумов — аккумулирующего шумовую составляющую цифрового изображения;

– в задачах селекции (обнаружения) объектов на изображении: подмножество, составляющее "фон" и подмножество, включающее элементы, составляющие искомый "объект".

Рассмотренный ранее идеальный случай объекта наблюдения в реальных условиях функционирования боевой техники не может иметь места. Основываясь на результатах анализа, проведенного в [9] и [10], представляется возможным выделить следующие типовые ситуации (варианты фоново-целевой обстановки) (рис. 4):

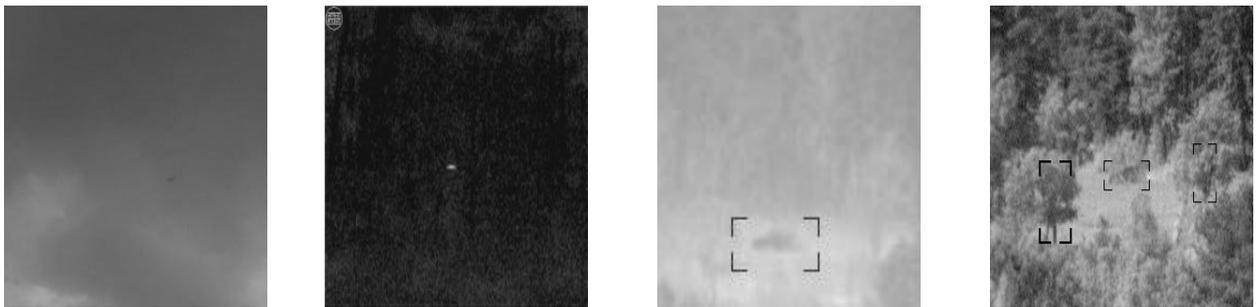
– наблюдение малоразмерной одиночной цели с отрицательным контрастом на фоне протяженных помех — ситуация, характерная при обнаружении и сопровождении летательных

аппаратов на фоне неба с облаками с помощью телевизионной оптико-электронной системы (ТВ ОЭС) (рис. 4,а);

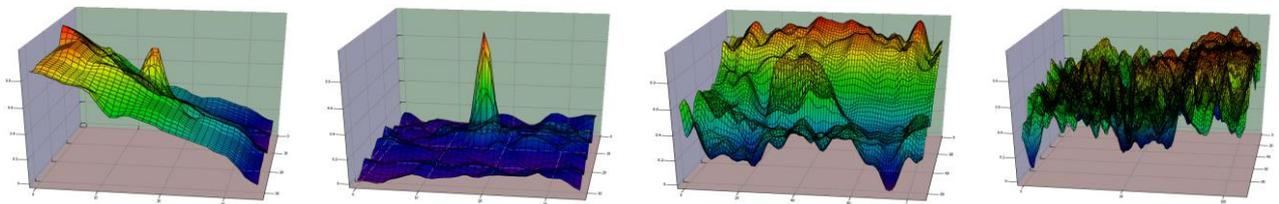
– наблюдение малоразмерной одиночной цели с положительным контрастом — ситуация, характерная при обнаружении и сопровождении летательных аппаратов на фоне неба или земной поверхности с помощью инфракрасной оптико-электронной системы (рис. 4,б);

– наблюдение площадной одиночной или групповой цели как с положительным, так и с отрицательным контрастом (как для всей группы, так и для отдельных элементов) на фоне как малоразмерных, так и протяженных помех — ситуация, характерная при обнаружении и сопровождении стационарных и подвижных объектов на фоне земной поверхности с помощью ТВ ОЭС (рис. 4,в);

– наблюдение за элементами фона — ситуация, возникающая при сопровождении замаскированной цели (контраст которой близок к нулю) на фоне земной поверхности с помощью ТВ ОЭС (рис. 4,г).



Трехмерное представление фрагмента изображения объекта



Гауссова аппроксимация
возможна
а

Гауссова аппроксимация
возможна
б

Гауссова аппроксимация
невозможна
в

Гауссова аппроксимация
невозможна
г

Рис. 4. Типовые варианты фоново-целевой обстановки

Изображения объектов на рис. 4,а и б с точностью, достаточной для инженерных расчетов могут быть аппроксимированы гауссовой поверхностью [11]. Аппроксимация протяженных, групповых, низкоконтрастных объектов (рис. 4,в и г) гауссовой поверхностью сопровождается значительными погрешностями и невозможностью проведения аналитических вычислений, что приводит к необходимости разработки и применения методов свободных от статистического описания изображения, и позволяющих учесть природную нестохастическую неопределенность (см. пояснения к выражению (3)).

Общая схема цифровой обработки изображений методами ТНМ приведена на рис. 5.

Под фаззификацией изображения (англ. *fuzzy* — нечеткий) понимается применение процедуры (ряда процедур) задания степени принадлежности элемента разрешения заданным нечетким множествам, выполняемая на основании приведенных выше правил.

Результат фаззификации представлялся в виде:

$$\underline{J} = x_{11}/\mu_{11}; x_{12}/\mu_{12}; \dots; x_{NM}/\mu_{NM} \quad , \quad (4)$$

где \underline{J} — изображение в форме нечеткого множества; x_{NM} — дискрет исходного изображения с координатами N и M ; μ_{NM} — степень принадлежности дискрета x_{NM} нечеткому множеству \underline{J} .

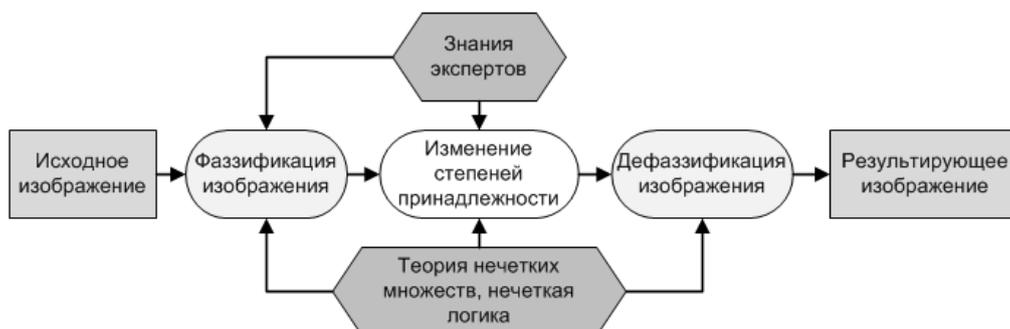


Рис. 5. Общая схема обработки изображения методами теории нечетких множеств

В тривиальном случае фазификации в качестве информации о степени принадлежности конкретного дискрета одному из множеств выступает первичная информация о дискрете — его яркость. Тогда, если A формируют два нечетких подмножества E_1 и E_2 , то их интерпретация будет следующей: подмножество E_1 — подмножество дискрет, яркость которых максимально возможная; подмножество E_2 — подмножество дискрет, яркость которых минимально возможная. В таком случае дискрет принадлежит и E_1 , и E_2 со степенью принадлежности, определяемой его яркостью (рис. 6).



Рис. 6. Результат фазификации изображения на рис. 4, *а* — степени принадлежности элементов разрешения подмножеству темных точек; *б* — степени принадлежности элементов разрешения подмножеству светлых точек изображения

Для осуществления фазификации возможно использовать методы нечеткой автоматической классификации, наиболее полное описание которых представлено в [8]. Результаты, представленные на рис. 6, получены с помощью алгоритма FCM для двух классов.

Далее на основании методов теории нечетких множеств осуществляется изменение степеней принадлежности результатов фазификации. На данном этапе интерес представляет применение следующих методов: нечеткой автоматической классификации, нечеткой морфологии, нечеткой фильтрации, нечеткой логики, нечетких искусственных нейронных сетей и т.д.

Экспериментальная часть

Особый практический интерес представляет решение задачи сегментации изображений методами нечеткой морфологии и нечеткой автоматической классификации. Задача сегментации изображения в общем случае является частной задачей теории классификации и может быть решена на основании различных подходов [8]: вероятностного, вариативного, структурного и т.д., однако все классические подходы, как указано, основаны на булевой логике и характеризуются рядом общих недостатков: высокая чувствительность к локальным и глобальным изменениям яркости изображения, искажение формы объектов.

Основной целью обработки изображений является повышение их качества, зачастую выражающееся в повышении информативности. В настоящее время не выработан единый показатель оценки информативности обработанного изображения и в зависимости от конкретных решаемых задач даются свои определения. Однако, как показали исследования, для сравнения алгоритмов обработки изображений целесообразно использовать следующие показатели.

1. Коэффициент вариаций интенсивности физического поля (яркости дискрет) K_B , предложенный Б.С. Береговым в работе [12] и определяемый следующим соотношением:

$$K_B = \sigma_0 / M,$$

где σ_0 — среднее квадратическое отклонение интенсивности физического поля; M — математическое ожидание интенсивности физического поля.

2. Энтропию изображения, определяемую на основании следующего соотношения:

$$H_{\underline{A}} = \frac{1}{\ln NM \sum_{i,j=1}^{NM} \mu_{\underline{A}} x_{ij}} \left[\sum_{i,j=1}^{NM} \mu_{\underline{A}} x_{ij} \left(\ln \sum_{i,j=1}^{NM} \mu_{\underline{A}} x_{ij} \right) - \sum_{i,j=1}^{NM} \mu_{\underline{A}} x_{ij} \ln \mu_{\underline{A}} x_{ij} \right]. \quad (5)$$

Для оценки информативности исходных изображений и результатов сегментации использованы изображения, представленные на рис. 3 и 4.

Следует отметить значительную вычислительную сложность использованных алгоритмов при высоких требованиях к точности вычислений, однако в рассматриваемом классе задач точность вычисления степеней принадлежности без снижения качества сегментации возможно ограничить двумя знаками после запятой, что позволило добиться приемлемого качества (степень сходства с результатами, полученными при точности вычислений пять знаков после запятой, достигает величины 75–80%) сегментации за 17–20 итераций. Результаты исследований показали, что использование для обработки изображений морфологических операций позволяет значительно снизить требования к вычислительным ресурсам.

Распространяя основные морфологические операции на нечеткие множества получены следующие выражения:

- дилатация: $(\underline{A} \oplus \underline{B}) = \max \mu_{\underline{A}} \cup \mu_{\underline{B}_i} / i \in \underline{A}, \underline{B}$,
- эрозия: $(\underline{A} \ominus \underline{B}) = \min \mu_{\underline{A}_i} \cap \mu_{\underline{B}} / i \in \underline{A}, \underline{B}$,
- размыкание: $(\underline{A} \oslash \underline{B}) = \max \left[\min \left[\mu_{\underline{A}_i} \cap \mu_{\underline{B}_j} / i \in \underline{A}, \underline{B} \right] \cup \mu_{\underline{B}_j} / i \in \underline{A}, \underline{B} \right]$,
- замыкание: $(\underline{A} \bullet \underline{B}) = \min \left[\max \left[\mu_{\underline{A}_i} \cup \mu_{\underline{B}_j} / i \in \underline{A}, \underline{B} \right] \cap \mu_{\underline{B}_j} / i \in \underline{A}, \underline{B} \right]$,
- морфологическое сглаживание нечеткого множества: $S = \underline{A} \oslash \underline{B} \bullet \underline{B}$,
- морфологический градиент: $g = \max \left[\mu_{\underline{A}_i} \cup \mu_{\underline{B}_j} / i \in \underline{A}, \underline{B} \right] \cap \min \left[\mu_{\underline{A}_i} \cap \mu_{\underline{B}_j} / i \in \underline{A}, \underline{B} \right]$,
- преобразование «столбик»: $h = \underline{A} \cap \overline{\underline{A} \oslash \underline{B}}$.

Результаты применения операций нечеткой морфологии к рис. 4, а–в приведены на рис. 7.

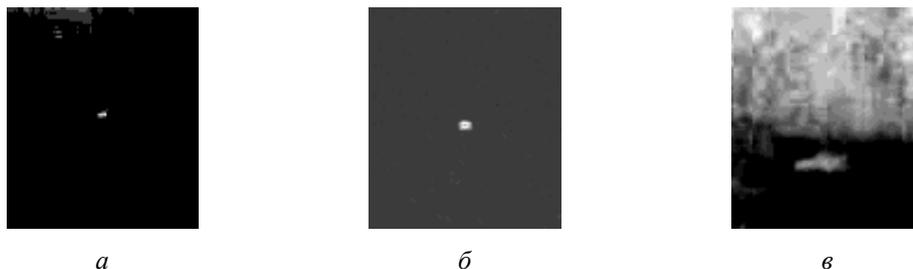


Рис. 7. Результаты применения нечеткой морфологии

Показатель	Изображение									
	Рис. 3		Рис. 4, <i>а</i>		Рис. 4, <i>б</i>		Рис. 4, <i>в</i>		Рис. 4, <i>г</i>	
	Исходн.	Сегмент.	Исходн.	Сегмент.	Исходн.	Сегмент.	Исходн.	Сегмент.	Исходн.	Сегмент.
Коэффициент вариаций	0,33	2,5	0,19	2,75	0,35	5,75	0,098	1,18	0,33	1,26
Энтропия	26,8	8,404	34,3	7,53	21,5	3,673	121,2	67,3	20,2	6,43

Заключение

Анализ результатов сегментации изображений (рис. 4, рис. 6, 7, таблица) показал, что при невозможности аппроксимации изображения цели гауссовой поверхностью методы теории нечетких множеств, основанные на многозначной логике позволяют добиться лучших результатов, чем традиционные, основанные на булевой логике и статистической обработке. Показательным является применение процедуры сегментации с помощью методов нечеткой автоматической классификации и нечеткой морфологии, позволяющей повысить информативность исходных изображений на величину до 150% (в некоторых случаях на порядок) и выделить дискреты со схожими характеристиками, что дает возможность селектировать элементы изображения со стационарной во временной и пространственной областях яркостью. В совокупности сегментация приводит к повышению качества реализации целевой функции [13, 14].

SUBSTANTIATION OF APPLICATION OF THE THEORY OF FUZZY SETS IN TASKS OF PROCESSING DIGITAL OPTICAL IMAGES

A.V. SHIJNIK, A.V. SHEVIAKOV

Abstract

The theoretical and experimental substantiation of application of positions of the theory of fuzzy sets is offered at the decision of tasks of the mathematical description and processing of the images received by means of investigation both in visible, and in infra-red a range of lengths of waves.

Литература

1. Анализ технических характеристик оптико-электронных систем головок самонаведения высокоточных средств поражения: Отчет о составной части НИР (заключ.) / УО "Военная академия Республики Беларусь"; Рук. темы А.А. Степанов. Минск, 2006. 103 с.
2. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели) / Под. ред. Ю.С. Седунова. М., 1981.
3. Якушенко Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М., 2004.
4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М., Пер с англ. П.А. Чочиа, 2006.
5. Беляев Б.И. Катковский Л.В. Оптическое дистанционное зондирование. Минск, 2006.
6. Абламейко С.В. Лагуновский Д.М. Обработка изображений: технология, методы, применение. Минск, 2000.
7. Анисимов Б.В., Курганов В.Д., Злобин В.К. Распознавание и цифровая обработка изображений. Москва, 1983.
8. Вятченин Д.А. Нечеткие методы автоматической классификации. Минск, 2004.
9. Головин С.А. и др. Высокоточное оружие и борьба с ним. М., 1996.
10. Лазарев Л.П. Оптико-электронные приборы наведения. Москва, 1989.
11. Марков Л.Н. Основы автоматического управления систем радиоэлектронных средств: телевизионно-оптические измерители координат и параметров объектов. Минск, 1988.
12. Берегов Б.С. Методы оценки качества изображений в системах дистанционного зондирования земной поверхности / Минск, 1988. 31 с. (Препринт / Акад. наук БССР, Ин-т техн. кибернетики, № 19).
13. Шевяков А.В., Моисеев В.В., Хижняк А.В. // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. 2006. №3(12). С. 29–34.
14. Шевяков А.В. // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. 2007. № 2 (15). С. 74–83.