

УДК 681.78

Р.С. Кочмарчик¹, Л.Ф. Купченко², А.С. Рыбьяк²¹ Войсковая часть А2042² Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ, УТРАЧЕННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ НИЗКОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Описан метод частичного восстановления элементов изображений целей, утраченных в результате низкого пространственного разрешения оптоэлектронных систем, в случае, когда фон и объект представляют собой однородные, но различные по своему спектральному составу изображения. Проведено математическое моделирование метода восстановления элементов изображений. Показано улучшение сходства по геометрическим признакам обработанных и эталонных изображений.

Ключевые слова: многоспектральные оптико-электронные системы; цифровая обработка изображений; восстановление элементов изображений целей.

Введение

В настоящее время все большее распространение получают многоспектральные оптоэлектронные системы, основанные на принципах изображающей спектроскопии. Они находят широкое применение в дистанционном зондировании Земли, медицине, экологическом мониторинге и т.д. Принцип действия таких систем основан на получении интересных изображений одновременно в нескольких спектральных каналах, количество которых может варьироваться от единиц до нескольких сотен.

Известно, что использование нескольких спектральных каналов позволяет не только повысить вероятность обнаружения малоразмерных целей, но и увеличить вероятность их распознавания по спектральным признакам [1]. В ряде случаев в системах, использующих принципы изображающей спектроскопии, пространственная разрешающая способность понижается с целью повышения спектральной разрешающей способности.

Поэтому исследования направленные на восстановление элементов изображений, утраченных в результате низкой разрешающей способности многоспектральных оптоэлектронных систем (МОЭС) актуальны.

В работах [2, 3] рассмотрен метод частичного восстановления элементов изображений в многоспектральных оптоэлектронных системах, утраченных в результате их низкого пространственного разрешения. Данный метод основан на цифровой обработке изображений в последдетекторной области. Он основан на использовании закономерностей распределения спектральных составляющих элементов цели в пространстве, а именно – в их «притяжении» к области близкого спектрального состава с более высоким содержанием

спектральных компонент. В работе [4] показано, что частичное восстановление элементов изображений позволяет увеличить достоверность их распознавания по геометрическим признакам.

Однако в цитируемых работах анализируется и подвергается обработке упрощенная модель многоспектрального изображения, в которой цель представлена областью белого цвета, а фон – областью черного.

Целью настоящей статьи является разработка метода частичного восстановления элементов изображений, утраченных в результате низкого пространственного разрешения оптико-электронных систем (ОЭС) в случае, когда фон и объект представляют собой однородные и различные по своему спектральному составу изображения.

Постановка задачи

В работах [2, 3] обсуждаются методы обработки изображений в последдетекторной области, направленные на восстановление элементов изображений, утраченных в результате низкой разрешающей способности ОЭС. Показано, что методы цифровой обработки изображений лишь аппроксимируют возможное распределение спектрального состава цели и фона по площади пикселя изображения. Истинное распределение спектрального состава цели и фона по площади пикселя в ОЭС с низким пространственным разрешением восстановить невозможно [5].

В работах [2, 6] показано, что естественный спектральный состав целей и фонов в многоспектральных ОЭС обладает следующими характерными свойствами:

- пространственной близости спектральных составляющих;

- группировки вокруг центров однородных областей с близким спектральным составом.

Использование данных спектральных свойств естественных целей и фонов позволяет произвести такую цифровую обработку их изображений в многоспектральных ОЭС с низким пространственным разрешением, в результате которой они станут более близки по своим геометрическим признакам к тем же изображениям, но полученными многоспектральными ОЭС с более высоким пространственным разрешением [4].

Рассмотрим процесс формирования элемента изображения в последдетекторной области пространства многоспектральной оптико-электронной системы, обладающей низким пространственным разрешением (рис. 1, а). Оптическое излучение от источника (1) падает на область пространства (2), частично занятую целью, а частично – фоном. Спектральные характеристики отражения объектов класса «цель» и «фон» будем считать отличающимися и априорно известными. Отраженное от данной области пространства, излучение (3) через оптическую систему (4) попадает на дисперсионный элемент (5), который разделяет излучение на набор спектральных полос. Излучение в каждой из используемых системой спектральных полос проецируется на матричный фотодетектор, который преобразует его в электрический сигнал, а затем – в цифровую форму.

Пусть, принятое изображение преобразуется в выходной плоскости в изображение размерности 3×3 пикселя (рис. 1 а). При этом пиксели изображения будут содержать информацию об интенсивности формирующего их излучения в каждом из используемых спектральных каналов. Если элемент пространства полностью занят целью или фоном, то отвечающий ему пиксель выходного изображения будет отображать спектральный состав цели S_T или фона S_B соответственно (рис. 1 б, в). Наибольший интерес, с точки зрения восстановления элементов изображений, представляют частично занятые целью элементы пространства («субпиксельные цели» [2, 3]).

При формировании изображений субпиксельных целей, спектральный состав каждого отвечающего им пикселя выходного изображения будет представлять собой смесь спектрального состава цели и фона S_{TB} (Рис. 1 г). При этом информация о геометрических признаках цели в пределах одного пикселя изображения будет полностью потеряна, а амплитуда спектров классов «цель» и «фон» будет пропорциональна площади покрытия ими элемента изображения, спроецированного на данный пиксель.

В настоящее время для описания спектрального состава смешанных пикселей (занятых одновременно целью и фоном) многоспектральных изображений используются различные математические моде-

ли, наиболее употребляемой из которых считается модель линейного смешивания (Linear mixing model, LML) [1, 7, 8]. Использование модели линейного смешивания позволяет синтезировать алгоритмы обнаружения по спектральным признакам как субпиксельных [1, 7], так и малоразмерных объектов [8]. В данной работе будем использовать упрощенную модель линейного смешивания субпиксельных целей, которая не учитывает воздействие шумов.

Математическая модель восстановления спектрального состава смешанного пикселя в многоспектральных ОЭС

Как показано в работах [1 – 4, 9], необходимым условием выполнения цифровой обработки изображений по методу восстановления их элементов, является знание количественного содержания спектрального состава объектов классов «цель» и «фон» в каждом пикселе изображения. Для монохроматических изображений, рассматриваемых в работах, данная задача трудностей не представляет. Анализ литературных источников [6, 7, 9, 10] показал, что для многоспектральных изображений определение спектральных компонент составляющих пикселя сопряжено с определенными трудностями. Рассмотрим метод определения спектрального состава смешанного пикселя, основанный на векторном представлении многоспектральных изображений в многомерном метрическом Евклидовом пространстве.

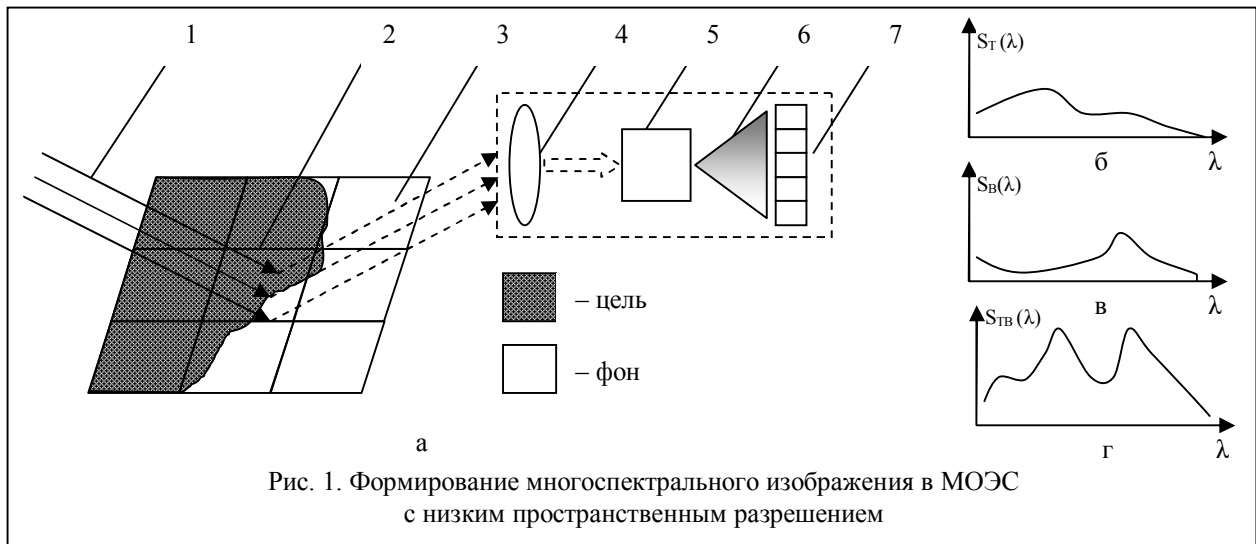
Пусть имеется многоканальное изображение размерности $L=2$ и количеством спектральных каналов M . Каждый пиксель данного изображения $P_{x,y}$ может быть представлен вектором в многомерном Евклидовом пространстве размерности M :

$$\vec{P}(x, y) = [\lambda_1(x, y), \lambda_2(x, y), \dots, \lambda_m(x, y)], \quad (2)$$

где x – номер строки изображения; y – номер столбца изображения; $\lambda_1(x, y), \lambda_2(x, y), \dots, \lambda_m(x, y)$ – спектральные компоненты элемента изображения с координатами (x, y) .

В связи с невозможностью графического представления Евклидова пространства размерности, большей $\aleph = 3$, для наглядности дальнейших рассуждений рассмотрим ОЭС с двумя спектральными каналами, каждый пиксель изображения которой может быть представлен вектором в двумерном пространстве.

В дальнейшем, полученные результаты будут обобщены для МОЭС с произвольным количеством спектральных каналов. Для задания метрического Евклидова пространства, необходимо определить его базис и метрику. В качестве базиса выберем ортогональные оси координат λ_1 и λ_2 , выходящие из начала координат 0 и отображающие интенсивность излучения в каждом из используемых в МОЭС спектральных каналов (рис. 2).



Для задания метрики Евклидова пространства, определим единичные орты \vec{i}, \vec{j} на осях координат. Выходным сигналом рассматриваемой нами МОЭС является интенсивность излучения в каждом из используемых спектральных каналов, представленная в цифровом виде. Следовательно, в качестве единичной длины ортов \vec{i}, \vec{j} становится возможным выбрать вес младшего разряда аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) системы. При этом максимальная представимая в системе интенсивность излучения будет равна:

$$I_{\max} = 2^n - 1, \quad (3)$$

где n – разрядность АЦП.

После задания метрического Евклидова пространства становится возможным отобразить в нем ожидаемые векторы цели (\vec{S}_{T_0}) и фона (\vec{S}_{B_0}), координаты которых представляют собой математические ожидания двумерных случайных величин интенсивности излучения в каждом из спектральных каналов (рис. 2).

Данные векторы отображают спектральный состав полного пикселя выходного изображения, занятого целью или фоном соответственно. Для неполных пикселей векторы \vec{S}_T и \vec{S}_B будут совпадать по направлению с векторами \vec{S}_{T_0} и \vec{S}_{B_0} , но их модули будут пропорциональны занимаемой площади пикселя фоном и целью соответственно:

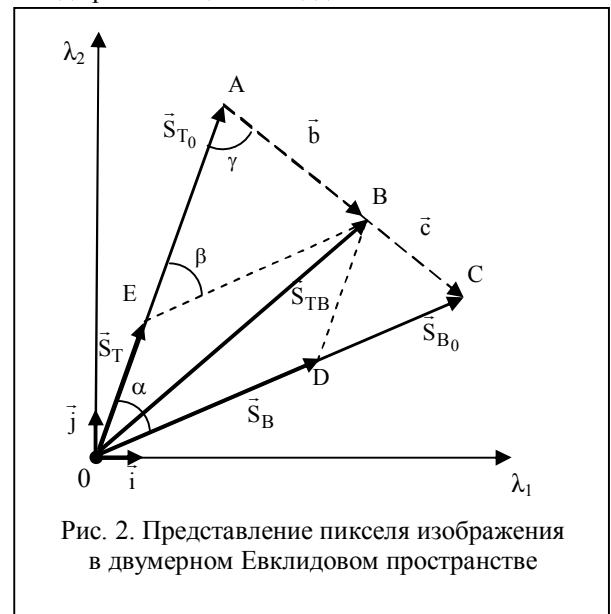
$$|\vec{S}_B| = \frac{P_B}{P_{TB}} |\vec{S}_{B_0}|; \quad (4)$$

$$|\vec{S}_T| = \frac{P_T}{P_{TB}} |\vec{S}_{T_0}|, \quad (5)$$

где P_{TB} – общая площадь пикселя; P_B – площадь пикселя, занимаемая фоном; P_T – площадь пикселя, занимаемая целью.

Поскольку мы рассматриваем только два класса многоспектральных объектов: «цель» и «фон», то

сумма занимаемых ими площадей пикселя будет всегда равна общей площади пикселя:



$$P_T + P_B = P_{TB}. \quad (6)$$

Из формул (4) – (6) и рис. 2 следует, что спектральный состав смешанного пикселя будет представлен вектором \vec{S}_{TB} , являющимся суммой векторов \vec{S}_T и \vec{S}_B :

$$\vec{S}_{TB} = \vec{S}_T + \vec{S}_B. \quad (7)$$

При изменении соотношения площадей пикселя, занимаемой целью и фоном, вершина вектора \vec{S}_{TB} будет пробегать множество своих возможных значений, принадлежащих отрезку, соединяющему вершины векторов \vec{S}_T и \vec{S}_B . Поскольку векторы \vec{S}_T и \vec{S}_B выходят из начала координат ортонормированного базиса и являются несовпадающими по условиям задачи, то они не могут быть коллинеарными и являются линейно независимыми. Следовательно, вектор \vec{S}_{TB} может быть разложен по векторам \vec{S}_T и \vec{S}_B , причем данное разложение – единственное.

Для удобства математических выкладок, введем буквенные обозначения вершин рассматриваемых векторов (рис. 2).

Рассмотрим $\triangle ABE$. Из правила графического построения вектора суммы двух векторов следует, что $EB \parallel OD$ и $EB = OD$. Следовательно, $\angle \beta = \angle \alpha$ и они могут быть определены через априорно известные векторы \vec{S}_{T_0} и \vec{S}_{B_0} из их скалярного произведения:

$$\angle \beta = \angle \alpha = \arccos \left(\frac{\vec{S}_{T_0} \cdot \vec{S}_{B_0}}{|\vec{S}_{T_0}| |\vec{S}_{B_0}|} \right). \quad (8)$$

Сторона AB $\triangle ABE$ может быть определена через априорно известный вектор \vec{S}_{T_0} и апостериорно известный (измеренный) вектор \vec{S}_{TB} :

$$\vec{b} = \vec{S}_{TB} - \vec{S}_{T_0}; \quad (9)$$

$$AB = |\vec{b}| = |\vec{S}_{TB} - \vec{S}_{T_0}|. \quad (10)$$

Из теоремы синусов становится возможным определить длину стороны EB :

$$\frac{AB}{\sin(\alpha)} = \frac{EB}{\sin(\gamma)}; \quad (11)$$

$$EB = \frac{AB \sin(\gamma)}{\sin(\alpha)}. \quad (12)$$

Неизвестный $\angle \gamma$ остается неизменным при любой комбинации векторов \vec{S}_T и \vec{S}_B , и может быть найден из соотношения:

$$\angle \gamma = \arccos \left(\frac{\vec{S}_{T_0} \cdot \vec{c}}{|\vec{S}_{T_0}| |\vec{c}|} \right) = \arccos \left(\frac{\vec{S}_{T_0} \cdot (\vec{S}_{B_0} - \vec{S}_{T_0})}{|\vec{S}_{T_0}| |\vec{S}_{B_0} - \vec{S}_{T_0}|} \right). \quad (13)$$

Учитывая, что $\angle \alpha$ и $\angle \gamma$ являются константами, зависящими только от априорно заданных векторов \vec{S}_{T_0} и \vec{S}_{B_0} , а $EB = OD$, то из формулы (12) возможно определить длину отрезка OD :

$$OD = EB = C_1 AB = C_1 |\vec{S}_{TB} - \vec{S}_{T_0}|, \quad (14)$$

где $C_1 = \sin(\gamma) / \sin(\alpha)$. (15)

Найденная длина отрезка OD позволяет из формул (4), (5) получить количественное значение относительной площади смешанного пикселя, покрытой целью и фоном:

$$P_b = \frac{P_B}{P_{TB}} = \frac{|\vec{S}_B|}{|\vec{S}_{B_0}|} = \frac{C_1 |\vec{S}_{TB} - \vec{S}_{T_0}|}{|\vec{S}_{B_0}|}; \quad (16)$$

$$P_t = \frac{P_T}{P_{TB}} = 1 - \frac{P_B}{P_{TB}} = 1 - \frac{C_1 |\vec{S}_{TB} - \vec{S}_{T_0}|}{|\vec{S}_{B_0}|}. \quad (17)$$

Таким образом, формулы (8), (13) – (17) позволяют определить относительные площади смешанного пикселя, занятые излучениями объектов классов «цель» и «фон». Их численные значения позволяют разработать метод восстановления элементов изображений в МОЭС изображающей спектроскопии.

Математическая модель восстановления элементов изображений в многоспектральных ОЭС

В работе [2] разработан метод восстановления элементов монохроматических изображений, а в работе [3] – алгоритм, обеспечивающий его реализацию. В данной работе обсуждается усовершенствованный алгоритм, обеспечивающий применение метода восстановления элементов для однородных изображений в МОЭС. Алгоритм восстановления элементов для однородных изображений в МОЭС можно представить в следующем виде:

1) предварительная обработка изображения, которая включает следующие этапы:

- 1.1. получение многоспектрального изображения и выделение на нем областей, содержащих цель;
- 1.2. определение масштаба восстановления изображения:

$$M_R = R_n / R_r, \quad (18)$$

где M_R – необходимый масштаб восстановления; R_n – необходимый размер изображения; R_r – действительный размер изображения;

1.3. определение относительной площади покрытия каждого пикселя интересующей области компонентами классов «цель» и «фон» с использованием формул (8), (13) – (17);

1.4. определение Евклидовых расстояний от каждого пикселя до каждого субпикселя кластера размером 3×3 пикселя [3]:

$$D_{(i,j)(k,m)} = \sqrt{(i-k)^2 + (j-m)^2}, \quad (19)$$

где $D_{(i,j)(k,m)}$ – Евклидово расстояние; i, j – координаты окружающего пикселя; k, m – координаты субпикселя;

1.5. упорядочение Евклидовых расстояний пиксель – субпиксель для каждого пикселя кластера в порядке возрастания;

2) сортировка пикселей в обрабатываемой области в порядке убывания площади, покрываемой в них целью;

3) определение в обрабатываемой области пикселей с максимальным покрытием его площади целью. Данный пиксель будет являться центром обрабатываемой области;

4) Выделение кластера, центральным пикселем которого является центр цели;

5) Разделение центрального пикселя кластера на субпиксели в соответствии с масштабом восстановления изображения;

6) Определение количества субпикселей, занятых в центральном пикселе целью:

$$N_t = M_s^2 \cdot P_t, \quad (20)$$

где N_t – количество субпикселей цели в пикселе; M_s – масштаб восстановления изображения; P_t – относительная площадь покрытия пикселя целью;

7) определение относительной площади покрытия целью всех пикселей кластера, за исключением центрального пикселя:

$$Pt_R = \left(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 Pt_{i,j} \right) - Pt_{2,2}, \quad (21)$$

где Pt_R – относительная площадь покрытия целью всех пикселей, окружающих центральный пиксель; $Pt_{i,j}$ – относительная площадь покрытия целью пикселя с координатами « i, j »;

8) Определение количества субпикселей, «притягиваемых» каждым пикселем кластера:

$$Nt_{i,j} = \frac{Pt_{i,j}}{Pt_R} Nt, \quad (22)$$

где Nt – количество субпикселей цели в пикселе.

Результат расчета необходимо округлить до ближайшего большего целого:

$$[Nt_{i,j}] = \min\{n \in Z | n \geq Nt_{i,j}\}; \quad (23)$$

9) обработка центрального пикселя данного кластера, которая состоит в следующем:

9.1. определение пикселя кластера с максимальным покрытием его площади спектром цели;

9.2. заполнение обрабатываемого пикселя определенным для данного пикселя количеством субпикселей цели, рассчитанных по формулам (22)– (23). Заполнение производится в порядке увеличения Евклидова расстояния, полученного по формуле (18);

9.3. заполнение следующего свободного, если субпиксель занят целью;

9.4. повторение подпунктов 9.1 – 9.3 для всех пикселей кластера, за исключением центрального;

10) повторение пунктов 3 – 9 для всей области, содержащей цель.

Оценка результатов восстановления элементов многоспектральных изображений

Для проверки работоспособности предложенного метода восстановления элементов многоспектральных изображений было взято исходное однородное трехцветное (RGB) изображение цели на однородном фоне с разрешением 110×110 пикселей (рис. 3, а). Спектральный состав цели и фона в условных единицах спектральной яркости соответствовал:

- цель: R=150, G=200, B=250;
- фон: R=000, G=150, B=100.

Далее размер изображения был уменьшен в 11 раз. Для этого отдельно в каждом из трех спектральных каналов изображение разбивалось на кластеры размером 11×11 пикселей, которые заменялись единственным пикселем с усредненным значением спектральной яркости пикселей кластера [2, 3]. В результате обработки получено изображение цели размером 10×10 пикселей (рис. 3 б). (Изображение увеличено в графическом

редакторе в 10 раз, а исходное изображение представлено в левом верхнем углу).

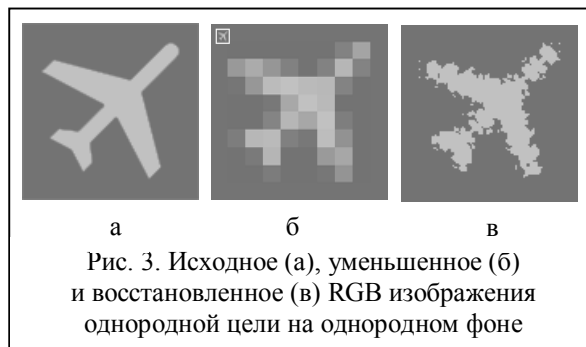


Рис. 3. Исходное (а), уменьшенное (б) и восстановленное (в) RGB изображения однородной цели на однородном фоне

В результате восстановления элементов уменьшенного изображения с масштабом восстановления $M_s = 11$, получено изображение цели размером 110×110 пикселей с очертаниями, близкими к исходному изображению (рис. 3 в).

Для количественной оценки результатов обсуждаемого метода обработки многоспектральных изображений сравним сходство исходного изображения (рис. 3 а) и уменьшенного изображения (рис. 3 б), а затем – исходного изображения (рис. 3 а) и восстановленного изображения (рис. 3 в). В связи с тем, что рассматриваемые в работе классы объектов «цель» и «фон» являются однородными, задача сравнения распределения спектральной яркости по площади кадра изображений может быть сведена к сравнению распределения яркости излучения по площади кадра черно-белых изображений методом корреляционного сопоставления [4, 11].

С целью изучения влияния масштаба восстановления на результаты обработки изображений, проведено математическое моделирование их обработки для уменьшенных в 3,5,7,9,11 раз изображений с последующей их обработкой с масштабами восстановления $M_R = 3,5,7,9,11$ соответственно. Результаты расчетов коэффициентов корреляции «исходное изображение – уменьшенное изображение» и «исходное изображение – восстановленное изображение» для всех (M_s) приведены на рис. 4.

Из графика зависимости $r(M_s)$ следует, что с уменьшением размеров анализируемого изображения коэффициент корреляции «исходное изображение – уменьшенное изображение» достаточно быстро уменьшается. Коэффициент корреляции «исходное изображение – восстановленное изображение» слабо зависит от масштаба «сверхразрешения» и флюктуирует в диапазоне $(0,73 \leq r \leq 0,94)$. Таким образом, полученные результаты позволяют сделать выводы:

- в результате цифровой обработки изображения однородной многоспектральной цели на многоспектральном однородном фоне изображения цели по своим геометрическим признакам становятся более близкими к исходным изображениям;

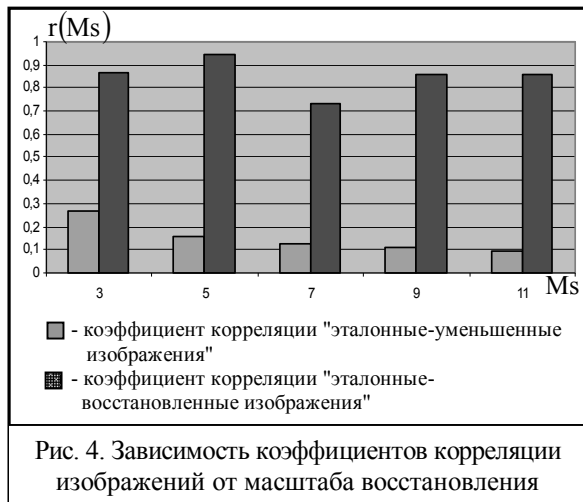


Рис. 4. Зависимость коэффициентов корреляции изображений от масштаба восстановления

- коэффициент корреляции «эталонное – восстановленное изображение» слабо зависит от размеров уменьшенного изображения при условии, что масштаб восстановления равен масштабу уменьшения исходного изображения;

- полученные результаты полностью соответствуют результатам, полученным для черно-белых изображений [3] и подтверждают состоятельность предложенного метода обработки многоспектральных изображений.

Выводы

В работе проведено математическое моделирование метода восстановления изображений однородных целей на однородном фоне в многоспектральной оптико-электронной системе. Из результатов моделирования следует, что в результате восстановления элементов изображений они становятся более близкими по своим геометрическим признакам к эталонным изображениям при условии, что масштаб восстановления равен масштабу уменьшения исходного изображения. Показано, что результаты применения метода восстановления элементов однородных многоспектральных целей на однородном многоспектральном фоне соответствуют результатам, полученным для черно-белых изображений [3].

ВІДНОВЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЗОБРАЖЕНЬ, ВТРАЧЕНИХ В РЕЗУЛЬТАТІ НИЗЬКОЇ ПРОСТОРОВОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

Р.С. Кочмарчук, Л.Ф. Купченко, А.С. Риб'як

Викладено метод часткового відновлення елементів зображень цілей, втрачених в результаті низької просторової роздільної здатності оптикоелектронних систем при умові, коли фон та об'єкт являють собою однорідні, але різні за своїм спектральним складом зображення. Проведено математичне моделювання методу відновлення елементів зображення. Показано поліпшення подібності за геометричними ознаками оброблених та еталонних зображень.

Ключові слова: багатоспектральні оптико-електронні системи, цифрова обробка зображень, відновлення елементів зображень цілей.

RECOVERY OF IMAGE ELEMENTS LOST BY LOW SPATIAL RESOLUTION OF MULTISPECTRAL ELECTRO – OPTICAL SYSTEMS

R.S. Kochmarchuk, L.F. Kupchenko, A.S. Rybiak

The article describes the method of partial recovery of target image elements, lost as the result of low spatial resolution of electro-optical system, on condition, that background and target are homogeneous, but various by their spectral composition. It represents the mathematical modeling of the method how to restore the elements of images. It shows the improvement of similarity based on dimensional features of the processed and master images.

Keywords: multispectral electro – optical systems, digital image processing, recovery of target image elements.

Список литературы

1. Manolakis D. Hyperspectral image processing for automatic target detection applications / D. Manolakis, D. Marden, G.A. Shaw // *Lincoln Laboratory Journal*. – 2003. – V. 14, n. 1. – P. 79 – 113.
2. Tiwari K.C. Subpixel target detection and enhancement in hyperspectral images / K.C. Tiwari, M. Aroraand, D.Singh // *Defence Science Journal*. – 2013. – V. 63, n. 1. – P 63 – 68.
3. Кочмарчук Р.С. Пространственное сверхразрешение целей в оптико-электронных системах воздушной разведки / Р.С. Кочмарчук // *Наука і техніка Повітряних Сил ЗС України*. – 2013. – № 3(12). – С. 52 – 57.
4. Кочмарчук Р.С. Повышение достоверности распознавания целей в многоспектральных оптико-электронных системах воздушной разведки методом восстановления элементов изображений / Р.С. Кочмарчук // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2013. – № 4(36). – С. 70 – 73.
5. Supervised super-resolution to improve the resolution of hyperspectral images classification maps / A. Villa, J. Chanussot, J. Benediktsson, C. Jutten // *Image and Signal Processing for Remote Sensing*. – 2010. – V. 7830, art. id. 78300J – 8 p.
6. Kasetkasem T. Super resolution land cover mapping using a Markov Random field based approach / T. Kasetkasem, M.K. Arora, P.K. Varshney // *Remote Sensing Environment*. – 2005. – V. 96, n. 3-4. – P. 302 – 314.
7. Рыб'як А.С. Обнаружение субпиксельных объектов по спектральным признакам в оптико-электронных системах с использованием принципов динамической фильтрации / А.С. Рыб'як // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – X.: ХУПС, 2013. – № 1(10). – С. 75 – 78.
8. Рыб'як А.С. К вопросу обнаружения малоразмерных объектов по спектральным признакам оптико-электронными системами с динамической фильтрацией / А.С. Рыб'як // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – X.: ХУПС, 2013. – № 3(12). – С. 102 – 105.
9. Melgani F. Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines / F. Melgani, L. Bruzzone // *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. – 2004. – V. 42, n. 8. – P. 1778 – 1790.
10. Rocchini D. Remotely sensed spectral heterogeneity as a proxy of species diversity: recent advances and open challenges / D. Rocchini, N. Balkenhol, G. Carter // *Ecological Informatics*. – 2010. – V. 5, Issue 5. – P. 318 – 329.
11. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М., 2005 – 1072 с.

Поступила в редколлегию 18.04.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.В. Рубан, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.