

УДК 621.397.7

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ

В. Т. Дмитриев, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой РУС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-5521-6886, e-mail: vol77@rambler.ru

П. Н. Сконников, аспирант РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-4989-3757, e-mail: skonnikovpn@yandex.ru

*Показана актуальность задачи комплексирования изображений различных спектральных диапазонов при проведении поисково-спасательных работ. Рассмотрены и реализованы известные алгоритмы комплексирования таких изображений. На основе общедоступных баз мультиспектральных изображений для сравнения рассмотренных алгоритмов составлена комбинированная база, включающая 496 пар изображений. Получены результаты комплексирования изображений с помощью рассмотренных алгоритмов. **Целью работы** является сравнение известных алгоритмов комплексирования изображений различных спектральных диапазонов по объективным показателям качества. Сравнение результатов комплексирования производилось по комбинированному показателю качества. По результатам сравнения сделан вывод, что наилучшие значения комбинированного показателя качества комплексирования изображений различных спектральных диапазонов обеспечивают алгоритмы на основе локального весового суммирования, анализа главных компонент и пирамиды Лапласа.*

Ключевые слова: комплексирование мультиспектральных изображений, локальное весовое суммирование, инфракрасный диапазон, объективные показатели качества, метрика Пиеллы, база изображений, улучшенное видение, поисково-спасательные работы.

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-78-29-37

Введение

Проведение поисково-спасательных работ в ряде случаев бывает осложнено неблагоприятными погодными условиями. При этом обзор местности может быть затруднён в связи с такими мешающими факторами, как, например, дождь, снег, туман и дым, а в ночное время суток – недостаточная освещённость.

Для обеспечения всепогодного и круглосуточного обзора местности применяются многоспектральные системы улучшенного видения. Такие системы формируют изображение на основе информации, поступающей от сенсоров различных спектральных диапазонов. При этом обычно используются два или три канала из следующих диапазонов спектра: видимый свет (длины волн 380 – 780 нм), ближний инфракрасный (NIR, 0,75 – 1,4 мкм), коротковолновый инфракрасный (SWIR, 1,4 – 3 мкм), средневолновый инфракрасный (MWIR, 3 – 8 мкм), длинноволновый инфракрасный (LWIR, 8 – 15 мкм) [1]. Изображение диапазона видимого света привычно для человеческого восприятия, но в наибольшей мере подвержено влиянию указанных мешающих факторов. Сенсоры NIR и SWIR диапазонов применяются для ночного видения. Кроме того, в этих диапазонах ослаблено влияние дыма и осадков на дальность видимости. В MWIR диапазоне отчётливо видны объекты, нагретые до нескольких сотен градусов и более. Сенсоры LWIR диапазона – тепловизоры – принимают собственное тепловое излучение объектов в широком температурном диапазоне. Изображения, получаемые от тепловизоров, практически не зависят от внешнего освещения наблюдаемой сцены и могут существенно отличаться от изображений каналов других диапазонов.

Для объединения преимуществ различных диапазонов спектра на дисплей оператору выводится комбинированное изображение, получаемое в результате комплексирования изображений

различных каналов. В настоящее время известны различные алгоритмы комплексирования изображений [1 – 10]. Данные алгоритмы разработаны для решения различных задач, а вопрос применимости того или иного алгоритма для проведения поисково-спасательных работ не исследован. В связи с этим актуальна задача сравнения известных алгоритмов комплексирования изображений различных спектральных диапазонов с точки зрения использования в системе улучшенного видения при проведении поисково-спасательных работ.

Алгоритмы комплексирования изображений

Не все из известных алгоритмов комплексирования изображений позволяют использовать три и более исходных каналов. В связи с этим для сравнения большего количества алгоритмов производилось комплексирование двух исходных изображений. Для описанных далее экспериментальных исследований реализованы следующие алгоритмы комплексирования изображений различных спектральных диапазонов.

Усреднение

Согласно данному простейшему алгоритму пиксели результирующего изображения I_C представляют собой среднее арифметическое изображений исходных каналов I_1 и I_2 [2]:

$$I_C(x, y) = \frac{I_1(x, y) + I_2(x, y)}{2},$$

где x, y – координаты пикселя.

Метод максимума

При комплексировании методом максимума производится выбор наиболее яркого пикселя из исходных каналов:

$$I_C(x, y) = \max\{I_1(x, y), I_2(x, y)\}.$$

Анализ низкочастотных и высокочастотных составляющих

Изображения, поступающие от сенсоров, разделяются на высокие и низкие частоты путём свёртки исходных изображений с пространственным фильтром нижних частот и вычитания результата фильтрации из исходных изображений. Объединение каналов различных диапазонов производится отдельно для высоких и низких частот, причём в обоих случаях возможно применение различных алгоритмов комплексирования изображений. При дальнейших исследованиях использована реализация алгоритма, описанная в работе [2].

Оценка информативности

Изображение, получаемое в результате применения алгоритма комплексирования на основе оценки информативности, определяется весовым суммированием исходных изображений с коэффициентами σ_1 и σ_2 :

$$I_C(x, y) = \frac{\sigma_1 I_1(x, y) + \sigma_2 I_2(x, y)}{\sigma_1 + \sigma_2}.$$

Коэффициенты σ_1 и σ_2 одинаковы для всех пикселей, но их перерасчёт производится в каждом кадре. Данный расчёт основан на вычислении среднеквадратического отклонения (СКО) яркостей пикселей в окнах, скользящих по изображению. В каждом канале вес σ принимается равным максимальному СКО по различным положениям скользящего окна [2].

Добавление отличий

На первом этапе алгоритма комплексирования изображений на основе добавления отличий рассчитывается карта отличий D [2]:

$$D(x, y) = |I_1(x, y) - I_2(x, y)|.$$

Дальнейшие операции можно представить в виде весового суммирования пикселей:

$$I_C(x, y) = f(D(x, y))I_1(x, y) + (1 - f(D(x, y)))I_2(x, y),$$

где $f(D(x, y))$ – кусочно-линейная функция текущего элемента карты отличий $D(x, y)$.

В зависимости от значения $D(x, y)$ результирующий пиксель $I_C(x, y)$ принимает значения или $I_1(x, y)$, или $I_2(x, y)$, или результат их весового суммирования.

Выделение локальных контрастов

В координатной плоскости двух исходных каналов I_1, I_2 откладываются точки значений яркости каждого пикселя $\{I_1(x, y), I_2(x, y)\}$ и усреднённой яркости в окрестностях соответствующих пикселей $\{\bar{I}_1(x, y), \bar{I}_2(x, y)\}$. Далее на определённом расстоянии в заданном направлении φ от точки усреднённых яркостей откладывается точка отсчёта, причём угол φ , единый для всех пикселей, подлежит определению в каждом кадре или периодически через несколько кадров. Яркость пикселя комплексированного изображения $I_C(x, y)$ рассчитывается по кусочно-линейной функции от расстояния между точкой отсчёта и исходной точкой $\{I_1(x, y), I_2(x, y)\}$ [2, 3].

Наилучший угол φ определяется путём перебора различных значений φ и сравнения результирующих изображений I_C по некоторому объективному показателю качества [3].

Пирамида Лапласа и вейвлет-преобразование

Подходы, основанные на пирамиде Лапласа и вейвлет-преобразовании, можно представить как правила разложения исходных изображений на уровни и на составляющие. Для отдельных составляющих двух каналов возможно применение различных алгоритмов комплексирования. В частности, в работе [2] для комплексирования с использованием пирамиды Лапласа применялись метод максимума и усреднение, а для комплексирования с использованием вейвлет-преобразования – усреднение и постоянный выбор заранее определённого канала. Для описанного далее эксперимента использованы реализации алгоритмов на основе пирамиды Лапласа и вейвлет-преобразования, доступные в открытой библиотеке image fusion toolbox [4].

Анализ главных компонент

Комплексирование изображений на основе анализа главных компонент основано на уменьшении размерности входных данных за счёт отбрасывания наименее значимых компонент. Набор изображений различных спектральных диапазонов отображается из трёхмерного пространства (ширина, высота, различные каналы) в двухмерное (ширина, высота). В настоящей работе использована открытая реализация данного алгоритма [4].

Трёхмерный фильтр нижних частот

В работе [5] описан принцип действия алгоритма комплексирования изображений на основе трёхмерного фильтра нижних частот и пример его реализации в частотной области для случая комплексирования двух изображений – телевизионного и тепловизионного. При дальнейших экспериментах использована реализация данного фильтра методом свёрток в пространственной области.

Степенное преобразование

Алгоритм на основе степенного преобразования [6] предполагает получение результирующего изображения по следующей формуле:

$$I_C(x, y) = I_1(x, y) \exp(1 - I_2(x, y) / 256).$$

Затем изображение $I_C(x, y)$ приводится к требуемому яркостному диапазону.

Приоритет телевизионного канала

Комплексирование изображений с приоритетом телевизионного канала производится по следующей формуле [7]:

$$I_c(x, y) = I_1(x, y) + |I_2(x, y) - \bar{I}_2| - \bar{\Delta},$$

где I_1 – телевизионное изображение, I_2 – тепловизионное изображение, $\bar{I}_2$ – средняя яркость изображения I_2 , $\bar{\Delta}$ – среднее значение абсолютных отклонений яркости изображения I_2 .

Морфология Пытьева и Диффузная морфология

В данной работе алгоритмы на основе морфологии Пытьева и диффузной морфологии реализованы не в точном соответствии с работами [8, 9], но основаны на общих идеях данных алгоритмов. В обоих случаях комплексирование производится по формуле:

$$I_c(x, y) = I_1(x, y) + |P_{12}(x, y) - I_2(x, y)|,$$

где $P_{12}(x, y)$ – результат линейной фильтрации изображения I_2 по форме изображения I_1 :

$$P_{12}(x, y) = \sum_{i, j \in \Lambda_{x, y}} I_2(x, y) K_D(x, y, i, j).$$

Здесь $\Lambda_{x, y}$ – множество пикселей, соседних для пикселя с координатами x и y , а $K_D(x, y, i, j)$ – результат нормировки теплового ядра $K_H(x, y, i, j)$.

Для использования частного случая морфологии Пытьева в настоящей работе тепловое ядро K_H определяется следующим образом:

$$K_H(x, y, i, j) = \begin{cases} 1, & \text{при } I_1(x, y) = I_1(i, j); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Выбор способа определения теплового ядра вида

$$K_H(x, y, i, j) = \exp\left(-\left(I_1(x, y) - I_1(i, j)\right)^2\right)$$

приводит к частному случаю диффузной морфологии.

Локальное весовое суммирование

Функциональная схема алгоритма комплексирования изображений, основанного на локальном весовом суммировании, показана на рисунке 1:

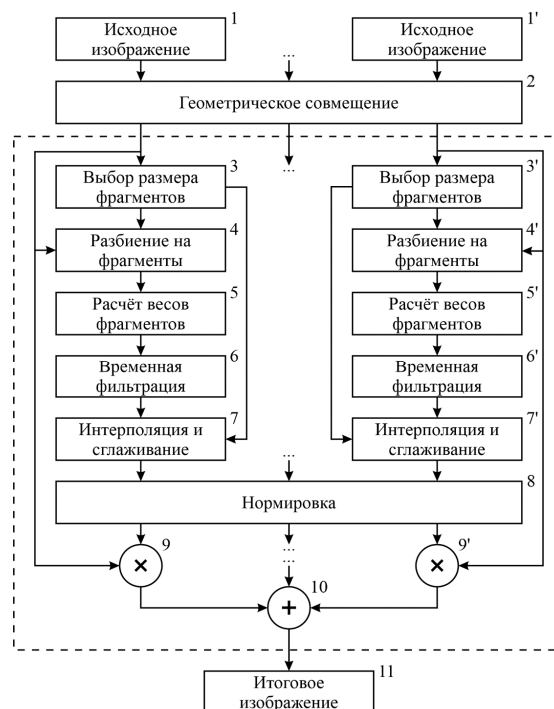


Рисунок 1 – Функциональная схема алгоритма комплексирования изображений, основанного на локальном весовом суммировании

Figure 1 – Functional diagram of image fusion algorithm based on local weighted summation

Согласно данному алгоритму результирующее изображение представляет собой результат весового суммирования исходных изображений, причём весовые коэффициенты не одинаковы для всех пикселей изображения, а определяются по нормированным и сглаженным картам весов Ω_1 и Ω_2 :

$$I_C(x, y) = \Omega_1(x, y)I_1(x, y) + \Omega_2(x, y)I_2(x, y).$$

Карты Ω_1 и Ω_2 рассчитываются на основе анализа информативности отдельных фрагментов исходных изображений всех каналов. Подробнее принцип действия данного алгоритма описан в работах [10,11].

Экспериментальные исследования

Качественное сравнение алгоритмов комплексирования изображений различных спектральных диапазонов сводится к оценке качества результатов комплексирования изображений с помощью данных алгоритмов. Поскольку желаемый результат комплексирования неизвестен априори, ограничимся рассмотрением безэталонных показателей качества. При этом для того, чтобы судить об эффективности применения того или иного алгоритма, необходимо учитывать не только результат комплексирования I_C , но и исходные изображения I_1 и I_2 , то есть показатели качества комплексирования должны представлять собой зависимости от трёх изображений $Q(I_1, I_2, I_C)$.

Такие показатели качества могут быть объективными и субъективными.

Субъективные показатели качества представляют собой результат обработки (в простейшем случае – усреднения) экспертных оценок. Субъективные оценки в наибольшей мере отражают соответствие того или иного алгоритма словесной формулировке цели комплексирования, характерной для решаемой задачи. Основным недостатком субъективной оценки качества комплексирования является сложность рассмотрения экспертами больших объёмов изображений в короткие сроки.

Объективные показатели качества комплексирования изображений имеют математическую формализацию и могут быть реализованы программным способом. В связи с этим значения таких показателей качества могут быть автоматически рассчитаны на ЭВМ.

В настоящее время известны различные безэталонные объективные показатели качества комплексирования изображений. Обзор и сравнение таких алгоритмов произведены, например, в работах [12, 13]. Для дальнейших исследований использован комбинированный объективный показатель качества Q_C , предложенный в работе [14]. Данный показатель согласован с субъективной оценкой качества таким образом, чтобы в наибольшей мере характеризовать цель комплексирования: отображение на результирующем изображении всех объектов, присутствующих хотя бы на одном из исходных изображений. Такое согласование достигается за счёт взвешенного суммирования составляющих различных известных объективных показателей качества комплексирования изображений, в частности метрики Пиеллы [14].

Для сравнения рассмотренных ранее алгоритмов по показателю Q_C создана база изображений различных спектральных диапазонов. Данная база основана на общедоступных базах TNO [15], OSU [16] и VAIS [17]. По результатам отбора изображений, входящих в данные базы, в комбинированную базу включены 496 пар изображений различных спектральных диапазонов.

Для каждой i -й пары изображений I_{1i} и I_{2i} произведено комплексирование с помощью каждого из рассмотренных выше алгоритмов, в результате чего получены результирующие изображения I_{Ci} . Далее были рассчитаны значения комбинированного объективного показателя качества комплексирования $Q_{Ci}(I_{1i}, I_{2i}, I_{Ci})$.

Для каждого алгоритма комплексирования рассчитаны минимальные и усреднённые значения комбинированного объективного показателя качества $Q_{C \min}$ и $\bar{Q}_C$ соответственно:

$$Q_{C \min} = \min_i \{Q_{Ci}\},$$

$$\bar{Q}_C = \frac{1}{496} \sum_{i=1}^{496} Q_{Ci}.$$

Рассмотрение не только усреднённых, но и минимальных значений показателя качества необходимо для того, чтобы определить восприимчивость того или иного алгоритма комплексирования изображений к особым ситуациям и характерным сценам, для которых не удаётся обеспечить видимость всех объектов.

Кроме того, дополнительно данный эксперимент был проведён не только для изображений I_C , полученных непосредственно по результатам комплексирования, но и для соответствующих изображений с увеличенным контрастом для приведения к полному диапазону яркостей от 0 до 255.

Результаты расчёта указанных показателей качества приведены в таблице:

Таблица 1 – Показатели качества комплексирования изображений при помощи различных алгоритмов

Table 1 – Image fusion quality metric values for different algorithms

Алгоритм комплексирования	Без коррекции контрастности		С коррекцией контрастности	
	$\bar{Q}_C$	$Q_{C \min}$	$\bar{Q}_C$	$Q_{C \min}$
Усреднение	0,812	0,585	0,826	0,531
Анализ НЧ и ВЧ составляющих	0,796	0,571	0,814	0,517
Оценка информативности	0,834	0,549	0,832	0,506
Добавление отличий	0,720	0,555	0,712	0,509
Выделение локальных контрастов	0,752	0,277	0,738	0,275
Пирамида Лапласа	0,838	0,653	0,816	0,545
Вейвлет-преобразование	0,806	0,595	0,798	0,503
Анализ главных компонент	0,840	0,394	0,834	0,400
Трёхмерный фильтр нижних частот	0,780	0,543	0,801	0,492
Метод максимума	0,659	0,243	0,673	0,317
Степенное преобразование	0,506	0,067	0,704	0,370
Приоритет телевизионного канала	0,820	0,504	0,808	0,502
Морфология Пытьева	0,778	0,304	0,800	0,324
Диффузная морфология	0,800	0,411	0,787	0,410
Локальное весовое суммирование	0,845	0,585	0,836	0,529

Анализ данной таблицы показывает, что в обоих проведённых экспериментах по комбинированному показателю качества наилучшее усреднённое качество комплексирования обеспечивает алгоритм, основанный на локальном весовом суммировании исходных изображений. Далее в порядке убывания значений данного показателя следуют алгоритмы на основе анализа главных компонент, на основе пирамиды Лапласа, на основе оценки информативности, алгоритм с приоритетом телевизионного канала и усреднение.

Заключение

Выбор алгоритма комплексирования изображений различных спектральных диапазонов оказывает существенное влияние на обнаружение объектов при проведении поисково-спасательных работ.

Результаты, полученные в настоящей работе, показали, что некоторые алгоритмы комплексирования изображений, хотя и обладают высоким усреднённым значением показателя

качества комплексирования изображений, но теряют эффективность на некоторых особых сценах. Например, алгоритм на основе оценки информативности характеризуется высоким усреднённым показателем качества 0,834, но в ситуациях, когда изображение одного из каналов содержит шум, веса σ_1 и σ_2 перераспределяются в пользу зашумлённого изображения, в результате чего для таких сцен показатель качества уменьшается до 0,549. Другим примером может служить алгоритм, основанный на выделении локальных контрастов. При обработке данным алгоритмом сцен, содержащих преимущественно мелкие объекты, качество комплексирования снижается от 0,752 до 0,277, так как для данного алгоритма характерно ложное оконтуривание объектов определённого размера.

В общем случае отличительные особенности сцен, на которых наблюдается уменьшение качества комплексирования, различны для рассмотренных алгоритмов и требуют отдельного исследования. Однако для решения поставленной задачи достаточно определить степень влияния данного негативного эффекта на качество комплексирования без определения природы его возникновения. Если использованная база изображений является достаточно объёмной и представительной, то для каждого алгоритма найдутся изображения, для которых проявится эффект снижения качества комплексирования. Среди алгоритмов, у которых такой эффект проявляется наименьшим образом, можно перечислить алгоритмы, основанные на пирамиде Лапласа (комбинированный показатель качества $Q_{C\min} = 0,653$), на вейвлет-преобразовании ($Q_{C\min} = 0,595$), локальном весовом суммировании ($Q_{C\min} = 0,585$) и усреднении ($Q_{C\min} = 0,585$). При этом в среднем по набору использованных изображений наилучшие результаты ($\bar{Q}_C = 0,845$) показал алгоритм на основе локального весового суммирования.

Библиографический список

1. Зотин А. Г., Пахирка А. И., Дамов М. В., Савчина Е. И. Улучшение визуального качества изображений, полученных в сложных условиях освещенности на основе инфракрасных данных // Программные продукты и системы. 2016. Т. 29. № 3. С. 109-120.
2. Инсаров В. В., Тихонова С. В., Михайлов И. И. Проблемы построения систем технического зрения, использующих комплексирование информационных каналов различных спектральных диапазонов // Информационные технологии. 2014. Прил. к № 3. С. 1-32.
3. Инсаров В. В., Обросов К. В., Ким В. Я., Лисицын В. М. Формирование комплексированных телевизионно-тепловизионных изображений в системах переднего обзора летательных аппаратов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. №. 4. С. 3-10.
4. Functionality of the image fusion toolbox [Электронный ресурс] // Metapix. Дата обновления: 30.09.1999. URL: <http://metapix.de/func.htm> (дата обращения 16.09.2019).
5. Дрынкин В. Н., Фальков Э. Я., Царева Т. И. Формирование комбинированного изображения в двухзональной бортовой авиационно-космической системе // Механика, управление и информатика. 2012. №. 9. С. 33-39.
6. Васильев А. С., Трушкина А. В. Методы комплексирования изображений в многоспектральных оптико-электронных системах // Сб. трудов 26-й междунар. конф. «GraphiCon– 2016». 2016. С. 314-318.
7. Костяшкин Л. Н., Бабаев С. И., Логинов А. А., Павлов О. В. Технологии систем улучшенного/синтезированного зрения для управления летательными аппаратами // Техническое зрение в системах управления мобильными объектами – 2010: Труды научно-технической конференции-семинара. М.: КДУ, 2011. Вып. 4. С. 45-56.
8. Рубис А. Ю., Выголов О. В., Визильтер Ю. В. Морфологическое комплексирование изображений различных спектральных диапазонов // Механика, управление и информатика. 2012. №. 8. С. 143-148.
9. Визильтер Ю. В., Выголов О. В., Желтов С. Ю., Рубис А. Ю. Комплексирование многоспектральных изображений для систем улучшенного видения на основе методов диффузной морфологии // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2016. № 4. С. 103–114.

10. Кириллов С. Н., Покровский П. С., Бауков А. А., Сконников П. Н. Алгоритмы формирования телевизионного изображения улучшенного качества для дистанционного управления робототехническими комплексами // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 5(II). С. 205-214.
11. Кириллов С. Н., Сконников П. Н. Процедура определения размеров окон для алгоритма локального весового суммирования мультиспектральных изображений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2020. № 73. С. 3-9.
12. Кириллов С. Н., Покровский П. С., Сконников П. Н., Бауков А. А. Сравнение оценок качества комплексирования разнотипных изображений и алгоритмы улучшения качества низко-контрастных изображений для систем видеонаблюдения // 21-я Междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2019»: сборник докладов. Кн. 2. М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2019. С. 403-408.
13. Кириллов С. Н., Покровский П. С., Сконников П. Н., Бауков А. А. Сравнение алгоритмов улучшения низкоконтрастных изображений и оценок качества комплексирования разнотипных изображений для цифровых систем видеонаблюдения // Цифровая обработка сигналов. 2019. № 1. С. 52-58.
14. Кириллов С. Н., Сконников П. Н. Оптимизация комбинированного объективного показателя качества комплексирования изображений различных спектральных диапазонов // Сб. докл. 22-й Международной конференций «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2020». 2020. С. 592-596.
15. Toet A., Ijspeert J. K., Waxman A. M., Aguilar M. Fusion of visible and thermal imagery improves situational awareness // Displays. 1997. Vol. 18. No. 2. pp. 85-95.
16. Davis J., Sharma V. Background-Subtraction using Contour-based Fusion of Thermal and Visible Imagery // Computer Vision and Image Understanding. 2007. Vol. 106. No. 2-3. pp. 162-182.
17. Zhang M. M., Choi J., Daniilidis K., Wolf M. T., Kanan C. VAIS: A Dataset for Recognizing Maritime Imagery in the Visible and Infrared Spectrums // Proc. of the 11th IEEE Workshop on Perception Beyond the Visible Spectrum (PBVS-2015). 2015. pp. 10-16.

UDC 621.397.7

COMPARATIVE ANALYSIS OF ALGORITHMS FOR MULTISPECTRAL IMAGE FUSION

V. T. Dmitriev, Ph.D. (Tech.), head of department, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0001-5521-6886, e-mail: vol77@rambler.ru
P. N. Skonnikov, post-graduate student, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0002-4989-3757, e-mail: skonnikovpn@yandex.ru

*The article shows the relevance of the problem for multispectral image fusion during search and rescue operations. Well-known algorithms for such image fusion are considered and implemented. Based on the publicly available datasets of multispectral images a combined database including 496 pairs of images has been compiled to compare the algorithms considered. The results of image fusion using the considered algorithms are obtained. **The aim is to compare the known algorithms for multispectral image in terms of objective quality indices. Comparison of fusion results was carried out by two criteria: Piella metric and combined quality index. Based on the results of the comparison, it was concluded that the best values of combined quality index for multispectral image fusion are provided by the algorithms based on local weighted summation, principal components analysis and Laplace pyramid.***

Key words: multispectral image fusion, local weighted summation, infrared range, objective quality index, Piella metric, image dataset, enhanced vision, rescue operations.

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-78-29-37

References

1. Zotin A. G., Pahirka A. I., Damov M. V., Savchina E. I. Uluchshenie vizual'nogo kachestva izobrazhenij, poluchennyh v slozhnyh usloviyah osveshhennosti na osnove infrakrasnyh dannyh. *Programmnye produkty i sistemy*. 2016, vol. 29, no. 3, pp. 109-120. (In Russian).

2. **Insarov V. V., Tihonova S. V., Mihajlov I. I.** Problemy postroenija sistem tehničeskogo zrenija, ispol'zujushhih kompleksirovanie informacionnyh kanalov razlichnyh spektral'nyh diapazonov. *Informacionnye tehnologii*. 2014, att. no. 3, pp. 1-32. (In Russian).

3. **Insarov V. V., Obrosof K. V., Kim V. Ja., Lisicyn V. M.** Formirovanie kompleksirovannyh televizionno-teplovizionnyh izobrazhenij v sistemah perednego obzora letatel'nyh apparatov. *Vestnik komp'juternyh i informacionnyh tehnologij*. 2013, no. 4, pp. 3-10. (In Russian).

4. Functionality of the image fusion toolbox [Electronic resource]. *Metapix*. Updated: 30.09.1999. URL: <http://metapix.de/func.htm> (date of the application 16.09.2019).

5. **Drynkin V. N., Fal'kov Je. Ja., Careva T. I.** Formirovanie kombinirovannogo izobrazhenija v dvuhzonal'noj bortovoj aviacionno-kosmicheskoj sisteme. *Mehanika, upravlenie i informatika*. 2012, no. 9, pp. 33-39. (In Russian).

6. **Vasil'ev A. S., Trushkina A. V.** Metody kompleksirovanija izobrazhenij v mnogospektral'nyh optiko-elektronnyh sistemah. *Sb. trudov 26-j mezhdunar. konf. «GraphiCon– 2016»*. 2016, pp. 314-318. (In Russian).

7. **Kostjashkin L. N., Babaev S. I., Loginov A. A., Pavlov O. V.** Tehnologii sistem uluchshennogo/sintezirovannogo zrenija dlja upravlenija letatel'nymi apparatami. *Tehničeskoe zrenie v sistemah upravlenija mobil'nymi ob'ektami – 2010: Trudy nauchno-tehničeskoi konferencii-seminara*. Moscow: KDU, 2011, vol. 4, pp. 45-56. (In Russian).

8. **Rubis A. Ju., Vygolov O. V., Vizil'ter Ju. V.** Morfologičeskoe kompleksirovanie izobrazhenij razlichnyh spektral'nyh diapazonov. *Mehanika, upravlenie i informatika*. 2012, no. 8, pp. 143-148. (In Russian).

9. **Vizil'ter Ju. V., Vygolov O. V., Zheltov S. Ju., Rubis A. Ju.** Kompleksirovanie mnogospektral'nyh izobrazhenij dlja sistem uluchshennogo videnija na osnove metodov diffuznoj morfologii. *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Teorija i sistemy upravlenija*. 2016, no. 4, pp. 103-114. (In Russian).

10. **Kirillov S. N., Pokrovskij P. S., Baukov A. A., Skonnikov P. N.** Algoritmy formirovanija televizionnogo izobrazhenija uluchshennogo kachestva dlja distancionnogo upravlenija robototehničeskimi kompleksami. *Radiotekhnika*. 2019, vol.83, no. 5(II), pp. 205-214. (In Russian).

11. **Kirillov S. N., Skonnikov P. N.** Procedura opredelenija razmerov okon dlja algoritma lo-kal'nogo vesovogo summirovaniya mul'tispektral'nyh izobrazhenij. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radio-tehničeskogo universiteta*. 2020, no. 73, pp. 3-9. (In Russian).

12. **Kirillov S. N., Pokrovskij P. S., Skonnikov P. N., Baukov A. A.** Sravnenie ocenok kachestva kompleksirovanija raznospektral'nyh izobrazhenij i algoritmy uluchshenija kachestva nizkokontrastnyh izobrazhenij dlja sistem videonabljudenija. *21-j Mezhdunar. konf. «Cifrovaja ob-rabotka signalov i ejo primenenie – DSPA-2019»: sbornik dokladov. Kn. 2*. Moscow: RNTORES. 2019, pp. 403-48. (In Russian).

13. **Kirillov S. N., Pokrovskij P. S., Skonnikov P. N., Baukov A. A.** Sravnenie algoritmov uluchshenija nizkokontrastnyh izobrazhenij i ocenok kachestva kompleksirovanija raznospektral'nyh izobrazhenij dlja cifrovych sistem videonabljudenija. *Cifrovaja obrabotka signalov*. 2019, no. 1, pp. 52-58. (In Russian).

14. **Kirillov S. N., Skonnikov P. N.** Optimizacija kombinirovannogo obektivnogo pokazatelja kachestva kompleksirovanija izobrazhenij razlichnyh spektral'nyh diapazonov. *Sb. dokl. 22-j Mezhdunarodnoj konferencija «Cifrovaja obrabotka signalov i ejo primenenie – DSPA-2020»*. Moscow: RNTORES. 2020, pp. 592-596. (In Russian).

15. **Toet A., Ijspeert J. K., Waxman A. M., Aguilar M.** Fusion of visible and thermal imagery improves situational awareness. *Displays*. 1997, vol. 18, no. 2, pp. 85-95.

16. **Davis J., Sharma V.** Background-Subtraction using Contour-based Fusion of Thermal and Visible Imagery. *Computer Vision and Image Understanding*. 2007, vol. 106, no. 2-3, pp. 162-182.

17. **Zhang M. M., Choi J., Daniilidis K., Wolf M. T., Kanan C.** VAIS: A Dataset for Recognizing Maritime Imagery in the Visible and Infrared Spectrums. *Proc. of the 11th IEEE Workshop on Perception Beyond the Visible Spectrum (PBVS-2015)*. 2015, pp. 10-16.