

*В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, В.Н. ОЛЕЙНИКОВ, канд. техн. наук,
М.М. КОЛЕНДОВСКАЯ, канд. техн. наук, Л.П. ТИМОШЕНКО, канд. техн. наук,
Н.В. РЫБНИКОВ, А.И. КАПУСТА*

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в последнее время широко используются при решении разнообразных задач с целью наблюдения территорий и состояний объектов, выявления лесных пожаров, метеорологических наблюдений за состоянием окружающей среды и т.д. [1 – 3].

В то же время распространение БПЛА значительно расширило возможности правонарушителей в области организованной преступности, транспортировки и распространения запрещенных грузов, несанкционированного мониторинга объектов и территорий [1, 2]. Несанкционированное использование БПЛА в районах аэропортов может привести к столкновению БПЛА с самолетами гражданской авиации при взлете и посадке.

Относительно невысокая стоимость БПЛА и трудности их наблюдения и контроля приводят к повышению безнаказанности и массовости противоправных действий с их использованием [1]. Актуальной является задача получения необходимой оперативной информации о появлении БПЛА в определенных зонах с помощью специальных средств [2]. Наиболее перспективным направлением решения данной задачи является использование многоспектральной оптико-электронной системы (ОЭС) получения и комплексирования изображений разных диапазонов волн (рис.1) [2, 4, 5].

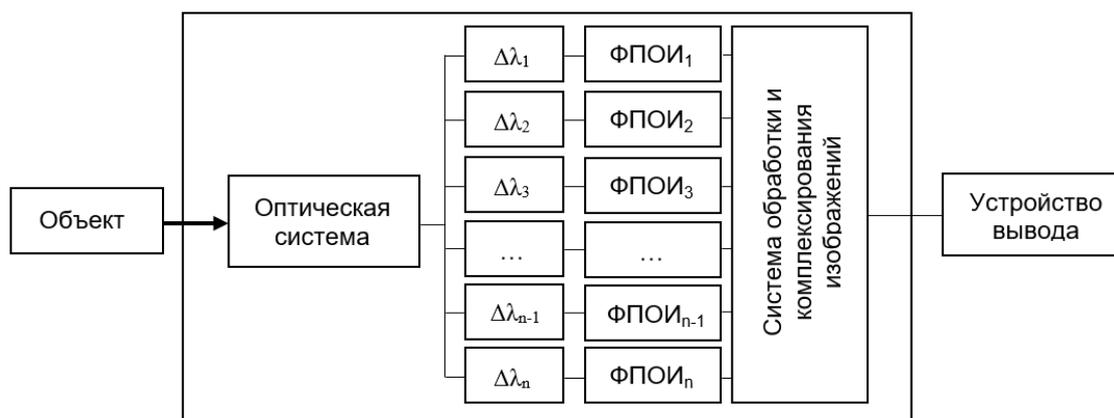


Рис. 1. Многоспектральная оптико-электронная система получения и комплексирования изображений

Обобщенная структурная схема многоспектральной ОЭС формирования и комплексирования изображений включает в себя оптическую систему, оптические элементы разделения сигналов анализируемого диапазона по частоте, каналные схемы ФПОИ – формирования и предварительной обработки изображений в каналах системы, систему СОКИ – обработки и комплексирования изображений и устройство вывода информации. Объект наблюдения осуществляет излучение в широком диапазоне частот, приемный модуль формирует изображения объекта в отдельных приемных каналах. Далее обрабатываются сигналы, поступающие в систему комплексирования, где по определенному алгоритму объединяются разно-

спектральные изображения. Устройство вывода передает комплексированное изображение для отображения или для дальнейшей обработки.

Анализ структуры изображений в ультрафиолетовом (УФ), видимом (ВИ) и инфракрасном (ИК) диапазонах спектра показывает, что изображения УФ и ВИ областей спектра имеют идентичную структуру [4, 5]. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать особенности обработки телевизионных и тепловизионных изображений, получаемых путем регистрации лучистого (светового) потока в ВИ и ИК областях спектра с формированием сигналов разноспектральных изображений.

Значительное распространение в различных областях получили двухканальные оптико-электронные системы наблюдения в составе телевизионного ТВ канала видимого диапазона длин волн (380 – 760 нм) и одного из тепловизионных ТПВ каналов коротковолнового SWIR (ShortWaveInfrared, длина волны 0,9 – 1,7 мкм), средневолнового MWIR (MediumWaveInfrared, 3 – 5 мкм) или длинноволнового LWIR (LongWaveInfrared, 8 – 14 мкм) инфракрасных поддиапазонов, с объединением информации (комплексированием) обоих каналов.

Комплексирование повышает информативность результирующего изображения при работе по объектам наблюдения по сравнению с изображениями, полученными в отдельных каналах системы, и обеспечивает существенные качественные и количественные преимущества при решении задач обнаружения, различения, распознавания, слежения и целеуказания [4 – 6].

С другой стороны, практика показывает, что использование в процессе комплексирования трех и более изображений является избыточным. Это связано с тем, что наиболее распространенной является ситуация, когда помеха «поражает» один из спектральных каналов и одно изображение. Вероятность поражения помехой двух различных спектральных диапазонов невелика, а использование 3-го канала требует значительных аппаратных и вычислительных затрат. На практике целесообразно использовать два наиболее информативных канала – ТВ и ТПВ.

Телевизионный канал формирует в пространстве предметов контрасты объектов относительно фона за счет переотражения солнечной энергии в видимом диапазоне, что приводит к вариациям сигнала в зависимости от состояния внешнего освещения. Тепловизионный канал имеет неизменный сигнал, потому что воспринимает собственное излучение объектов относительно фона, которое меняется очень медленно. С другой стороны, дневные и ночные условия наблюдения в ТПВ канале также могут отличаться существенно. Кроме собственного излучения ТПВ канал также может воспринимать излучение, модулированное коэффициентом отражения, который изменяется в зависимости от условий освещения объекта.

Эффективность многоспектральных ОЭС в значительной мере определяется методами комплексирования, используемыми в системе. Недостаточно исследованным является вопрос эффективности существующих методов комплексирования, даже для одной и той же ОЭС при различных условиях функционирования. Большинство методов комплексирования совсем или частично не учитывают текущую задачу наблюдения, внешние условия функционирования или характеристики конечного потребителя информации.

Дистанционные наблюдения за БПЛА выполняются в условиях высокой или низкой освещенности, а также в полной темноте. Поскольку различные условия работы системы создают различные сигналы на входе в систему, то возможность использовать один и тот же метод комплексирования в разных условиях не является очевидной.

Цель статьи – анализ возможностей методов комплексирования разноспектральных изображений применительно к задаче обнаружения и наблюдения беспилотных летательных аппаратов.

Этапы обработки изображений при использовании комплексирования

На практике, с учетом особенностей спектрально-зональной обработки и формирования изображений, возникает необходимость реализации сложной многоэтапной процедуры получения, оценки качества получаемых изображений, принятия решений о возможности их использования и непосредственного последующего их комплексного использования [6, 7].

Алгоритм функционирования системы дистанционного мониторинга БПЛА с использованием комплексирования парциальных изображений включает в себя следующую последовательность этапов обработки информации и принятия решений:

1. Пространственная привязка изображений в различных каналах системы.
2. Процедура предварительной оценки входных изображений, полученных в различных спектральных диапазонах, с целью принятия решения о возможности или невозможности их использования.
3. Предварительная обработка полученных парциальных спектрально-зональных изображений.
4. Процедура оценки информативности входных изображений для принятия решения о качестве имеющихся изображений.
5. Комплексирование спектрально-зональных изображений с целью получить общее решение на основе решений, принятых в отдельных каналах обработки, либо с целью получить улучшенное изображение.
6. Предварительная обработка комплексированного изображения.
7. Процедура распознавания комплексированного изображения.
8. Принятие окончательного решения об использовании одного из трех имеющихся изображений (двух входящих и одного комплексированного изображений).
9. Постобработка результирующего изображения в зависимости от поставленной задачи.

Процесс комплексирования может включать в себя различные операции, выполняемые в определенной последовательности, и осуществляется на различных этапах обработки изображений (рис. 2).

На рис. 2, *а* комплексирование изображений осуществляется на уровне зональных первичных решений. Вначале принимаются предварительные решения об обнаружении объекта по каналным изображениям, далее принимается окончательное решение с учетом принятых решений в каналах.

Комплексирование, выполняемое на уровне элементарных сигналов многоканальной оптико-электронной системы, показано на рис. 2, *б*. Вначале осуществляется процедура комплексирования парциальных изображений и формирования результирующего интегрального изображения, по которому затем принимается решение об обнаружении объекта. Оознавательные признаки определяются по векторному полю яркости многоспектрального изображения.

На рис. 2, *в* отражено комплексирование на уровне признаков. Определяются опознавательные признаки объекта по каналным изображениям, затем признаки объединяются в единый вектор признаков, на основании которого принимается итоговое решение.

На рис. 2, *г* показано комплексирование на уровне элементарных сигналов многоканальной оптико-электронной системы. Вначале осуществляется получение единого комплексированного изображения, по которому затем принимается решение об обнаружении объекта.

Схема, представленная на рис. 2, *а*, является наиболее простой для реализации. Однако она может существенно проигрывать в эффективности, так как решения в каналах принимаются независимо и без учета информативности парциальных изображений.

Значительно большую эффективность может обеспечить схема, представленная на рис. 2, *б*, так как учет особенностей различных диапазонов спектра происходит по самим измерениям. Для реализации данной схемы необходима разработка многоканальных признаков изображений, а также наличие точной взаимной привязки отдельных изображений.

Схема, представленная на рис. 2, в, представляется эффективной в связи с тем, что взаимная связь разных спектральных яркостей изображения производится в меньшей степени. Реализация данного метода является сложной, т.к. в процедуре принятия решения используется расширенный вектор признаков, что сказывается в дальнейшем на вычислительных ресурсах.

Схема, представленная на рис. 2, г, учитывает взаимную корреляцию спектральных измерений, существенно снижает требования к вычислителю и позволяет упростить процедуру оценки эффективности комплексной обработки.

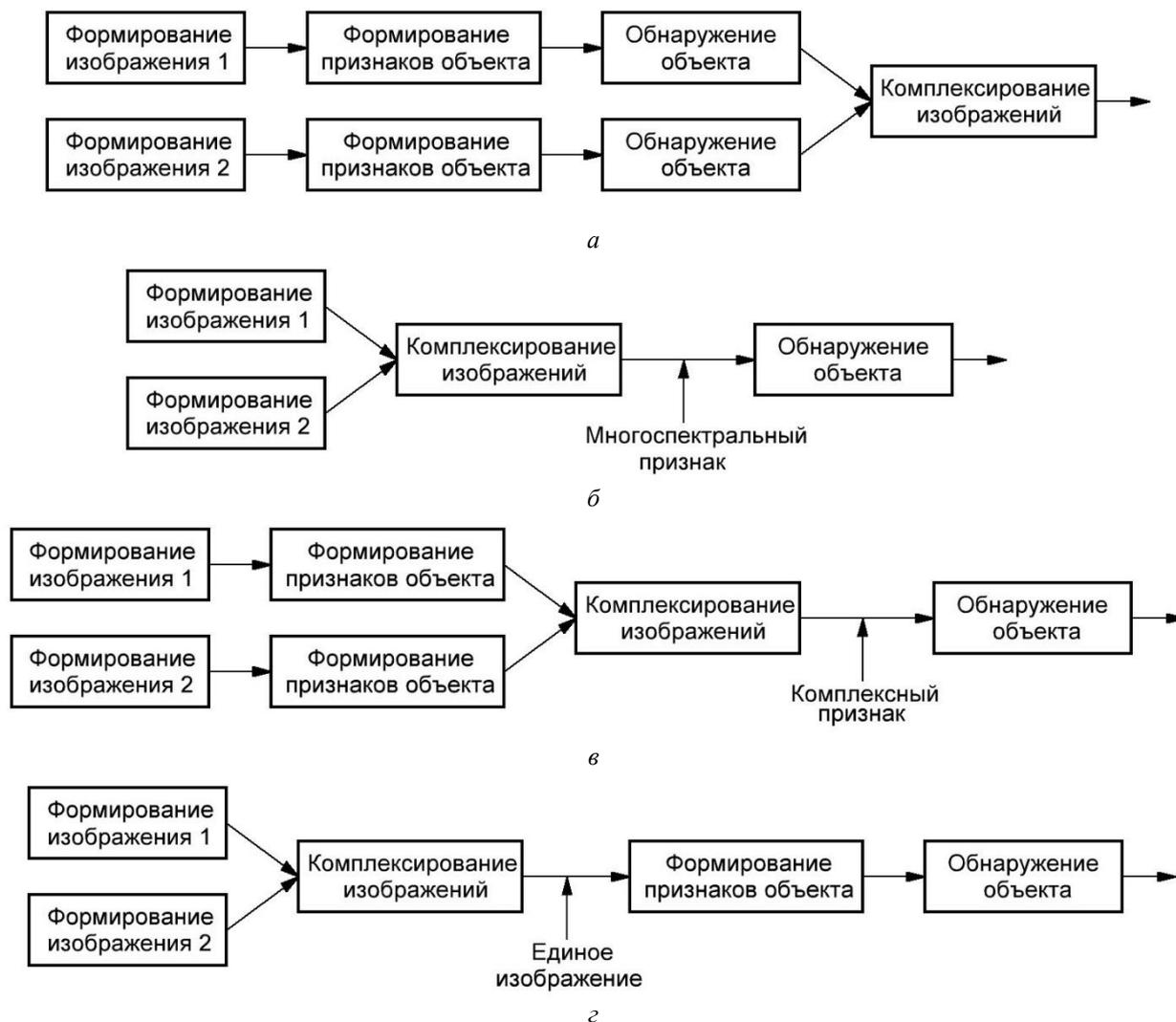


Рис. 2. Методы комплексирования изображений

Оценка информативности изображений

В процессе выполнения операции комплексирования возникает необходимость формирования оценки качества и информативности входных парциальных изображений, различных его фрагментов, а также полученного результирующего изображения [5, 6].

Наиболее авторитетным методом оценки качества и информативности изображений является метод экспертных оценок [7, 8]. Основные его недостатки – значительные материальные затраты, высокая трудоемкость и невозможность использования метода и получаемых с его помощью оценок при обработке изображений в реальном масштабе времени. Поэтому продолжается разработка методов объективной количественной оценки информативности изображений.

В процессе привязки парциальных изображений и их фрагментов целесообразно использовать объективный критерий, основанный на максимуме функции взаимной информации, который является инвариантным к пространственному распределению яркости и позволяет более точно выполнять привязку. Функция взаимной информации $VI(A, C)$ двух изображений A и C определяется выражением [7]

$$VI(A, C) = E(A) + E(C) - E(A, C), \quad (1)$$

где $E(A)$, $E(C)$ – энтропия канального изображения A и комплексированного изображения C ; $E(A, C)$ – совместная энтропия изображений A и C .

Энтропия изображения характеризует его информативность:

$$E(C) = - \sum_{i=0}^I P(i) \log_2 P(i),$$

где $P(i) = \frac{q(i)}{Q}$ – вероятность наличия в изображении пикселя с яркостью i ($i = \overline{0, I}$); $q(i)$ – количество пикселей с яркостью i ; Q – количество пикселей в изображении; $i = \overline{0, 255}$ для 8-битного изображения.

В идеальных условиях для изображений, не содержащих искажений и шумов, энтропия обеспечивает объективную оценку информативности. Однако в реальных условиях для реально получаемых изображений при формировании оценки энтропии не берутся во внимание пространственное изменение яркости изображений и особенности зрительного восприятия. Вследствие этого соответствие (эквивалентность) между энтропией и информативностью изображений нарушается.

При оценке свойств изображений с формальных позиций теории информации имеют место трудности, подобные тем, как и при работе с одномерными сигналами: формализованные математические подходы не учитывают субъективной ценности сообщений. При формализации оценок изображений основной проблемой в настоящее время является установление взаимосвязи между объективными характеристиками изображений (метриками) и субъективными критериями зрительного восприятия.

Критерии зрительного восприятия, определяющие качество изображений, – это в основном энергетические характеристики и параметры сигналов: контраст объект/фон, динамический диапазон и количество воспроизводимых уровней яркости, а объективные показатели – количество информативных уровней I и контраст D .

Путем объединения указанных частных показателей для формирования оценки информативности изображений предложен многокритериальный векторный показатель [6] $\vec{P} = [I, J, D, \sigma, E]$, включающий параметры: I – количество градаций яркости; J – среднее значение яркости изображения; D – контраст; σ – среднеквадратическое отклонение яркости изображения от среднего значения; E – информационная энтропия изображения.

В силу сложности работы с векторными показателями качества на практике, при работе с изображениями, как и в других областях, принято переходить к скалярному, обобщенному критерию

$$R = \sum_{i=1}^U v_i R_i, \quad (2)$$

где v_i – весовой коэффициент; R_i – частный, скалярный показатель качества; U – количество частных показателей качества. Весовые коэффициенты v_i являются ненулевыми и выбираются таким образом, что $\sum v_i = 1$.

Весовые коэффициенты в (2) предлагается определять в соответствии с критерием Фишберна [9, 10]. При таком подходе весовые коэффициенты являются функцией значения i , т.е. функцией номера параметра (при увеличении i вес параметра уменьшается). Предлагается распределять параметры в соответствии с их влиянием на зрительную информативность изображения в таком порядке [1]: J, σ, D, I, E .

В [6] показано, что предложенная в [10] методика формирования метрики обеспечивает завышенную оценку при низкой информативности изображений и в нее внесены некоторые изменения.

Предлагается заменить энтропию на градиент изображения [6], отображающий контуры объектов и учитывающий перепад яркости по полю изображения

$$g(x, y) = \text{grad}C = \left(\frac{\partial C}{\partial x} i + \frac{\partial C}{\partial y} j \right),$$

где $\frac{\partial C}{\partial x}, \frac{\partial C}{\partial y}$ – перепады яркости по координате x на интервале Δx , а также по координате y на интервале Δy .

Нормированный градиент g_n определяется отношением количества пикселей с ненулевым градиентом к общему количеству пикселей в изображении.

Предложено также при оценивании количества градаций яркости I принимать во внимание не все градации с ненулевым количеством пикселей, а только те, количество пикселей которых превышает некоторое заданное число l . При определении количества значимых градаций порог следует выбирать на уровне (0,01 – 0,05) от значения наиболее значимой градации I_{\max} , содержащей наибольшее число пикселей.

Тогда выражение для результирующего показателя эффективности имеет вид [6]

$$F = v_1 J_n + v_2 \sigma_n + v_3 D_n + v_4 I_n + v_5 E_n. \quad (3)$$

Предложенная методика позволяет формировать объективную количественную оценку информативности изображений, причем ее можно использовать как для входных парциальных изображений, так и для результирующего изображения, полученного в результате комплексирования.

Критерием качества информационной составляющей изображения может выступать также перекрестная энтропия от контуров изображений [10, 11]

$$CE = \frac{2E(\delta C(x, y))}{E(A(x, y)) + E(B(x, y))}, \quad (4)$$

где CE – перекрестная энтропия, E – информационная энтропия, $\delta C(x, y), \delta A(x, y), \delta B(x, y)$ – контуры комплексированного и канальных изображений соответственно.

Методы формирования и обработки результирующих изображений

Основной задачей совмещения изображений при комплексировании является получение синергетического эффекта от объединения и получение некоторого нового, более информативного сообщения. При этом требуется обеспечить высокую скорость обработки информации в реальном масштабе времени.

В настоящее время известно большое количество методов комплексирования [8, 10]: метод максимума, метод маски, метод усреднения, метод весовой функции, метод степенного преобразования, метод чересстрочного комплексирования, метод Фурье спектров, комплексирование на основе функций вейвлет-преобразования (ВП). Большое количество алгоритмов комплексирования свидетельствует о том, что не существует наилучшего алгоритма для всех условий, и при проектировании системы обнаружения БПЛА следует использовать (выбирать) алгоритмы, в наибольшей степени отвечающие предъявляемым требованиям.

Метод максимума является одним из наиболее простых методов комплексирования и реализуется на основе логической операции сравнения: значения яркости одного изображения заменяются значениями яркости второго изображения в том случае, если значение яркости второго изображения больше [12]. На выходе формируется новое изображение, в котором будут присутствовать информационные признаки первого изображения и ярко выраженные признаки второго изображения.

При совмещении изображений методом маски результирующее комплексированное изображение будет представлять собой объединение множеств $A(x, y)$ и $B(x, y)$ – над изображением $B(x, y)$ выполняется операция пороговой фильтрации. Значение яркости комплексированного изображения в каждой точке пространства будет определяться либо соответствующим значением из изображения $B(x, y)$ (маски), либо, в случае, если значение соответствующей точки маски равно нулю, результирующим значением принимается значение пикселя из изображения $A(x, y)$. Значение яркости каждого пикселя

$$C(x, y) = \begin{cases} A(x, y), B(x, y) \leq T \\ B(x, y), B(x, y) > T \end{cases} \quad (5)$$

где T – уровень порогового фильтра.

Основная сложность при использовании метода маски заключается в сложности выбора порогового уровня [10]. Метод не требует значительных вычислительных затрат, но не использует те информационные преимущества, которые дает наличие нескольких отличающихся изображений, а при неправильном выборе порога, может произойти потеря информации в результирующем изображении.

Метод усреднения требует минимальных вычислительных затрат, но также в недостаточной степени использует различия и определенные информационные преимущества входных изображений. Комплексированное изображение формируется путем нахождения среднего арифметического от исходных изображений

$$C(x, y) = \frac{A(x, y) + B(x, y)}{2}.$$

Комплексированное изображение характеризуется сглаженными деталями объектов, контраст его существенно уменьшается относительно входных изображений, но в то же время отмечается уменьшение шумовой составляющей [10, 13].

Метод чересстрочного комплексирования основан на чередовании строк одного и другого изображений. При этом результат комплексирования определяется выражением

$$C(x, q) = C(x, 2y) = A(x, y), C(x, 2y) = B(x, y),$$

где $q = 0, 2N - 1; y = 0, N - 1$.

Пространственное разрешение комплексированного изображения по вертикали для пары входных изображений размером $M \times N$ составит $M \times 2N$.

С сохранением пространственного разрешения метод может быть реализован при образовании комплексированного изображения [10, 13] чередованием нечетных и четных строк соответственно изображений $A(x, y), B(x, y)$. Тогда операционное выражение комплексирования приобретает вид

$$C(x, y) = \begin{cases} A(x, y), y \in 1, 3, \dots, N \\ B(x, y), y \in 2, 4, \dots, N - 1 \end{cases}.$$

В этом случае комплексированное изображение имеет ярко выраженную периодическую структуру по вертикальной координате с пространственным периодом в размер одного пикселя, а в области пространственных частот – ярко выраженную составляющую на самых

верхних частотах пространственного спектра, которая может быть подавлена соответствующим высокочастотным фильтром [10].

В методе степенного преобразования выходное изображение формируется путем возведения исходного изображения $A(x, y)$ в показатель степени [10], представляющий собой нормированное значение негатива второго изображения $B(x, y)$,

$$C(x, y) = A(x, y)^{1-B(x, y)/2^n}, \quad (6)$$

где n – разрядность изображения $B(x, y)$.

Значения показателя степени в (6) находятся в диапазоне $[0, 1]$. В результате преобразования небольшой диапазон значений яркости входного изображения $A(x, y)$ будет преобразован в широкий диапазон выходных значений, вследствие чего увеличивается контраст выходного изображения $C(x, y)$.

Рассмотренный метод представляет собой модификацию метода [7], в котором показатель степени представляет собой отношение двух входных изображений с предварительно выполненной пространственной фильтрацией. Модифицированный алгоритм требует меньших вычислительных затрат и может быть реализован в реальном времени.

В методе весовой функции комплексированное изображение находится как линейная комбинация значений парциальных изображений [7]

$$C(x, y) = \beta A(x, y) + (1 - \beta) B(x, y), \quad (7)$$

где β – весовой коэффициент, характеризующий значимость каждого из каналов; диапазон его значений $[0, 1]$.

Коэффициент β может быть найден, исходя из имеющейся априорной информации об эффективности используемых в системе каналов [7]. В адаптивном варианте системы коэффициент β может быть определен по информации, поступающей на вход в изображениях, в частности на основе их средних значений яркости [10]:

$$\beta = \frac{2 \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} B(x, y)}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} A(x, y) + \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} B(x, y)}. \quad (8)$$

Метод не требует значительных вычислительных затрат, является адаптивным и может быть реализован в реальном времени. Но неверное определение значения коэффициента β может привести к потере информации.

При использовании в комплексировании спектральных методов обработка изображений выполняется в области спектрального представления. Над изображениями осуществляется преобразование Фурье (вейвлет-преобразование), далее производятся определенные операции над спектрами, а затем выполняется сложение полученных спектров с определенными весами. В результате обратного спектрального преобразования получается результирующее комплексированное изображение [7].

Известные методы комплексирования с использованием ВП характеризуются рядом существенных преимуществ перед методами, основанными на БПФ. Это связано с тем, что вейвлет-базисные функции являются пространственно-локализованными [11, 13], ВП позволяет осуществлять спектральный анализ определенных локальных фрагментов изображения. Спектральные вейвлет-коэффициенты несут информацию об интенсивности разных частот и соответствуют определенным пространственным участкам на изображении.

При использовании ВП осуществляется декомпозиция изображений на определенные уровни – от 1 до $\log_2(\min(M, N))$ и для каждого уровня осуществляется разложение на низкочастотную (НЧ) и высокочастотную (ВЧ) составляющие вейвлет-спектра. НЧ составляющая результирующего спектра получается путем усреднения всех НЧ составляющих вейвлет-спектров входных изображений, а ВЧ составляющая – выбором максимального по модулю значения из соответствующих составляющих вейвлет-спектров входных парциальных изображений. Комплексированное изображение получается в результате применения обратного вейвлет-преобразования к результирующему вейвлет-спектру [7].

Для повышения контраста результирующего изображения в случае, когда одно из входных изображений является малоинформативным, предложено [6] формировать НЧ часть спектра выходного изображения на основе статистического анализа НЧ частей парциальных изображений с помощью линейной регрессии.

В том случае, когда система обработки и анализа канальных изображений (СОАКИ) предназначена для исследования заранее известных сцен, включающих образы с определенной структурой [14], целесообразно, на основании анализа известных методов комплексирования с учетом их достоинств и недостатков, построить систему комплексирования с их использованием.

Если в каналы системы СОАКИ поступают плохо формализуемые парциальные изображения, то следует использовать обучаемую двухуровневую схему комплексирования: первый уровень представляется в виде нескольких ветвей, реализующих различные методы, каждая из которых позволяет получать наилучшие значения некоторых параметров качества [15].

Второй уровень комплексирования предназначен для агрегирования улучшенных сцен, получаемых от ветвей первого уровня. Исследования показывают, что на втором уровне комплексирования следует применять обучаемые алгоритмы, построенные на основе нейросетевых технологий и теории нечетких множеств [15 – 17]. На первом уровне следует использовать рассмотренные выше алгоритмы комплексирования, выбираемые для решения определенной задачи обработки информации.

Выводы

Многоспектральные системы для обнаружения беспилотных летательных аппаратов целесообразно выполнять двуканальными, с формированием парциальных изображений в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Комплексирование полученных изображений целесообразно выполнять на уровне канальных решений, либо путем принятия решений по результирующему изображению, сформированному путем объединения получаемых канальных изображений.

Большое значение на практике имеют методы совмещения полей зрения разноспектральных сенсоров, обеспечивающих формирование кадра комплексированного изображения по кадрам телевизионной и тепловизионной камер.

На этапе формирования обобщенного изображения целесообразно использовать информационные критерии, в достаточной степени отражающие субъективную ценность изображений – модифицированный многокритериальный векторный показатель, сведенный к скалярному критерию, и критерий, отражающий перекрестную информацию от контуров изображений.

При получении результирующего изображения на основе канальных изображений предпочтительно использовать метод степенного преобразования, метод весовой функции, допускающий объединение каналов с использованием априорной информации о ценности (весе) каждого из информационных каналов, а также на основе адаптивного извлечения информации о ценности каналов из поступающей входной информации.

Среди методов комплексирования путем разложения изображений в спектр наиболее предпочтителен метод с использованием вейвлет-преобразования, так как он позволяет получать информацию об объектах в пространственно-частотном представлении.

Если в каналы системы СОАКИ поступают плохо формализуемые парциальные изображения, то следует использовать обучаемую двухуровневую схему комплексирования. Первый уровень представляется в виде нескольких ветвей, реализующих различные методы, на втором уровне комплексирования следует применять обучаемые алгоритмы, построенные на основе нейросетевых технологий и теории нечетких множеств.

Список литературы:

1. Кошкин Р.П. Беспилотные авиационные системы. Москва : Стратегические приоритеты, 2016. 676 с.
2. Oleynikov V. N., Zubkov O. V., Kartashov V. M., Korytsev I. V., Babkin S. I., Sheiko S. A. Investigation of detection and recognition efficiency of small unmanned aerial vehicles on their acoustic radiation // Telecommunications and Radio Engineering (English translation of *Elektrosvyaz and Radiotekhnika*). 2019. Vol. 78, Is. 9. P. 759–770.
3. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Sheyko S.A., Babkin S.I., Koryttsev I.V., Zubkov O.V., Anokhin M.A. Information characteristics of sound radiation of small unmanned aerial vehicles // Telecommunications and Radio Engineering (English translation of *Elektrosvyaz and Radiotekhnika*). 2018. V.77 (10). P. 915–924.
4. Zheeng Y. Image Fusion and Its Applications. Publisher: In Tech. 2011. 252 p.
5. Strelkova T., Kartashov V., Lytyuga A., Strelkov A. Theoretical Methods of Images Processing in Optoelectronic Systems. Chapter 6. // Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision / Oleg Sergiyenko and Julio C. Rodriguez-Quinonez. (341p.) USA. Herhey, 2017. P.180–205.
6. Гривачевський А.П., Прудюс І.Н. Підвищення інформативності мультиспектральних зображень шляхом мультимодального комплексування // *Visnyk NTUUKPI Series Radiotekhnika. Radiobuduvannia*, 2018. Is. 73. P. 40–49.
7. Фролов В.Н. Методы информационного совмещения изображений в многоканальных оптико-электронных системах / В.Н. Фролов, В.А. Тупиков, В.А. Павлова, В.А. Александров // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2016. №11-3. С.95–104.
8. Бондаренко М.А. Оценка информативности комбинированных изображений в мультиспектральных системах технического зрения / М.А. Бондаренко, В.И. Дрыкин // *Программные системы и вычислительные методы*. 2016. №1. С. 64–79.
9. Карташов В.М., Беляев А.В. Обнаружение объектов заданной формы и определение их координат на изображении в мультимедийном стрелковом тренажере // *Системаи обробки інформації*. (Харьков). 2015. Вип.10 (135). С.16–20.
10. Романов Ю.Н. Оценка качества цифровых изображений/ А.П. Богданов, Ю.Н. Романов // *Механика, управление и информатика*. 2012. №9. С.218–226.
11. Карташов В.М., Беляев А.В. Обнаружение объектов заданной формы на изображении в мультимедийном стрелковом тренажере и определение их координат // *Радиотехника*. 2015. Вып. 182. С. 58–64.
12. Беляев А.В., Карташов В.М., Ф. А. Лутуангу Ф.А. Стробирование отметок движущихся объектов в системе обработки изображений со стационарной камерой // *ScienceRise*. 2017. №3. С. 66–71.
13. Sytnik O., Kartashov V. Methods and Algorithms for Technical Vision in Radar Introscopy. Chapter 13 // *Optoelectronics in Machine Vision-Based Theories and Applications*. 2018. P. 373–391.
14. Ivanov M., Sergiyenko O., Tyrsa V., Mercorelli P., Kartashov V., Hernandez W., Sheiko S., Kolendovska M. Individual scans fusion in virtual knowledge base for navigation of mobile robotic group with 3D TVS // *Proceedings of 44th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*. 2018. Washington DC, USA. P. 3187–3192.
15. Бондаренко А. Аппаратно-программная реализация мультиспектральной системы улучшенного видеона / А. Бондаренко, М. Бондаренко // *Современная электроника*. 2017. №1. С. 32–37.
16. Ivanov M., Sergiyenko O., Mercorelli P., Hernandez W., Rodriguez Quinonez J.C., Kartashov V., Kolendovska M., Iryna T. Effective informational entropy reduction in multi-robot systems based on real-time TVS // *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. 2019-June, 8781209. P. 1162–1167.
17. Oleksandr Sotnikov, Vladimir Kartashov, Oleksandr Tymochko, Oleg Sergiyenko, Vera Tyrsa, Paolo Mercorelli, Wendy Flores-Fuentes. Methods for Ensuring the Accuracy of Radiometric and Optoelectronic Navigation Systems of Flying Robots in a Developed Infrastructure. Chapter 16 // *Machine Vision and Navigation*. P.537–578. Editors: Sergiyenko, Oleg, Flores-Fuentes, Wendy, Mercorelli, Paolo.