

УДК 621.396.96

А. В. Мезенцев<sup>1</sup>, В. В. Юзефович<sup>1</sup>,  
А. Н. Буточнов<sup>1</sup>, А. М. Сотников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем регистрации информации НАН Украины  
ул. Н. Шпака, 2, 03113 Киев, Украина

<sup>2</sup>Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба  
ул. Сумская, 77/79, 61023 Харьков, Украина

## Способ комплексирования изображений различных диапазонов волн с целью создания универсальных эталонов для комбинированных корреляционно-экстремальных систем навигации

*Проанализированы известные способы комплексирования цифровых изображений различного диапазона волн для создания универсальных эталонных изображений, использующихся в комбинированных корреляционно-экстремальных системах навигации (наведения). Предложен способ комплексирования радиолокационного и полутоннового оптического изображений. Применение данного способа приводит к повышению яркости и контрастности общих фрагментов исходных изображений, не приводит к разрушению корреляционных связей, что позволяет использовать получаемые комплексированные изображения для формирования универсальных эталонных изображений.*

**Ключевые слова:** универсальное эталонное изображение, способ, комплексирование, анализ изображений, обработка изображений, информативные признаки.

### Введение

Для обеспечения точности навигации и наведения на цель современных беспилотных летательных аппаратов и управляемых средств поражения в любых погодных, помеховых условиях и времени суток наиболее перспективным является совместное использование датчиков различной физической природы для обнаружения и идентификации объектов наведения (поражения) [1, 2]. Это подтверждено большим количеством научных работ и экспериментов с комбинированными (имеющими несколько датчиков внешней информации, работающими в различном спектре электромагнитных волн) корреляционно-экстремальными системами на-

© А. В. Мезенцев, В. В. Юзефович, А. Н. Буточнов, А. М. Сотников

ведения (КЭСН). В комбинированных КЭСН задача наведения (навигации) решается посредством сравнения формируемых бортовыми датчиками различных диапазонов волн текущих изображений земной поверхности с заранее подготовленными эталонными изображениями (ЭИ) того же района. Подготовка таких ЭИ является отдельной задачей, одним из подходов к решению которой является формирование универсальных эталонных изображений (УЭИ), имеющих устойчивые информативные признаки в используемых диапазонах волн [1].

К информативным признакам изображения любой физической природы обычно относят области изображения с высокой интенсивностью яркости либо высококонтрастные области, или их границы. При этом контрастность границ определяется крутизной перепада яркости близкорасположенных пикселей изображения. Такие информативные признаки образуют на изображении геометрические элементы типа «линии» (формирующие контуры различных участков изображения) или «точки» (области). Перед выявлением информативных признаков изображений целесообразно их дифференцировать («обострить» контуры, интенсивность), а затем ограничить «снизу» по уровню (убрать слабоконтрастные детали).

### **Постановка задачи**

Для формирования УЭИ необходимо предварительно решить задачу получения комплексированного (объединенного) изображения на основе нескольких исходных изображений в различных диапазонах волн. В качестве примера рассмотрим вариант комплексирования оптического и радиолокационного изображений одного и того же участка местности. При этом задачу комплексирования изображений для последующего синтеза УЭИ удобно свести к задаче совмещения в одном изображении признаков, общих для оптического и радиолокационного образов — исходных изображений.

На следующем этапе, используя общие приемы анализа изображений путем совмещения отдельных общих признаков, можно переходить к синтезу универсального эталона.

Однако существует априорная неопределенность относительно «полезности» получаемого таким способом результата, вызванная двумя причинами:

1) неопределенностью на уровне физического сигнала, которая обусловлена сменой типа датчика, т.е. характером отражений и условиями распространения оптического и радиолокационных сигналов. Неопределенность данного типа выражается в непредсказуемом взаимном изменении элементов радиолокационного и оптического изображений. Для снятия такой априорной неопределенности необходимо предсказание вида радиолокационного (оптического) изображения по имеющемуся оптическому (радиолокационному) изображению, для чего необходимо знать физические свойства данной конкретной цели, среды распространения оптических и радиоволн и т.д. Получение такой информации связано с большими затратами и практически трудно реализуемо. Положение это усугубляется непредсказуемыми воздействиями на поверхность визирования, при которых положение характерных признаков меняется;

2) неопределенностью на уровне информативных признаков (устойчивых элементов), которая выражается в том, что часть признаков, выделенных каким-

либо способом на радиолокационном изображении, отсутствует на соответствующем ему оптическом изображении, а часть признаков, выделенных на оптическом изображении, отсутствует на радиолокационном изображении.

### **Анализ последних достижений и публикаций**

В [4] предложен способ комплексирования информации от многоканальной системы с использованием вейвлет-спектров. При комплексировании изображений по этому способу выбираются элементы спектрального разложения одного из исходных изображений, что приводит к потере информации о локальных структурных особенностях другого изображения. В способе не производится яркостно-контрастная коррекция на уровне компонент разложения с целью повышения качества результирующего изображения.

В [5] предложен способ комплексирования многоспектральных полутонных изображений, включающий получение исходных изображений, разложение спектра каждого исходного изображения на низкочастотные и высокочастотные компоненты, отдельную обработку этих компонент, комплексирование изображений, основанное на принципе взвешенного суммирования для каждого пикселя, формирование результирующего изображения. Недостатком данного способа является то, что яркостная нормализация исходных изображений проводится методом приведения яркости исходных изображений к единому среднему значению и среднеквадратическому отклонению яркости, что в случае значительных различий яркостно-контрастных характеристик исходных изображений неизбежно приводит к усилению неинформативной шумовой микроструктуры одного изображения до уровня существенных структурных особенностей другого изображения.

В работе [6] разработан алгоритм комплексирования радиолокационного и оптического изображений. Первым этапом преобразования интенсивностей негативного радиолокационного изображения является переход к позитивному изображению. Это осуществляется с помощью замены уровня интенсивности каждого элемента изображения  $e_{ij}$  на уровень  $\bar{e}_{ij}$ , причем

$$\bar{e}_{ij} = 2^n - e_{ij} - 1,$$

где  $2^n$  — число уровней квантования.

Пусть и радиолокационное ( $R$ ), и оптическое ( $P$ ) изображения имеют размеры  $N \times N$ . Оба изображения сканируются строка за строкой:

$$R = (r_1, \dots, r_{N \times N}),$$
$$P = (p_1, \dots, p_{N \times N}).$$

Исследуется каждая пара элементов  $(r_k, p_k)$ . Вводится парная функция  $f(y_1, y_2)$ , где  $y_1, y_2$  — уровни интенсивности элементов  $r_k$  и  $p_k$  соответственно. Функция  $f(y_1, y_2)$  при  $y_1 = y_2$  количественно равна числу элементов изображений, интенсивности которых совпадают, а при  $y_1 \neq y_2$  — числу несовпадающих элементов.

Ковариационная матрица  $\sum_y$  имеет вид:

$$\sum_y = \left\langle \left[ (y - M_y)(y - M_y)^T \right] \right\rangle.$$

Здесь символ  $\langle \cdot \rangle$  означает среднее значение ожидаемого уровня, где  $y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}$ ,

$$M_y = \begin{pmatrix} M_{y_1} \\ M_{y_2} \end{pmatrix}.$$

Радиолокационное изображение преобразуется таким образом, чтобы число элементов каждого уровня интенсивности совпадало с соответствующим числом оптического изображения. Для этого вводится новая система координат.

Другой путь преобразования радиолокационного изображения также заключается в придании ему позитивного вида [6]. Дальнейшее преобразование состоит в отображении интенсивностей  $\bar{e}_{ij}$  в  $\bar{e}'_{ij}$  так, что:

$$N_0 \leq \bar{e}_{ij} \leq N_K, \quad M_0 \leq \bar{e}'_{ij} \leq M_L.$$

Преобразование осуществляется таким образом, чтобы распределение вероятностей на выходе  $P(\bar{e}'_{ij} = M_h)$ ,  $0 \leq h \leq L$  имело желаемую форму при заданном распределении  $P(\bar{e}_{ij} = N_k)$ ,  $0 \leq k \leq K$ ,  $P(M_h)$  и  $P(N_h)$  — вероятности  $k$ -го и  $h$ -го уровней квантования. Положим, что вероятности появления элементов с интенсивностями, равными менее  $M_h$  на входе, равны вероятностям появления на выходе элементов с интенсивностями, не превышающими  $M_h$ :

$$\sum_{q=0}^k P(\bar{e}_{ij} = N_q) = \sum_{x=0}^h P(\bar{e}'_{ij} = M_x).$$

Экспериментальные исследования показали, что оба метода преобразования интенсивностей дают приемлемые результаты, причем отмечалось некоторое превосходство первого из них.

Среди перспективных способов комплексирования изображений также широкую известность получили структурные алгоритмы совмещения изображений. Обычно принято рассматривать соответствующий структурный алгоритм совмещения изображений в виде совокупности следующих двух составных алгоритмов:

- 1) выделение устойчивых элементов и получение структурного описания их совокупности для данного ракурса наблюдения поверхности визирования;
- 2) выделение из радиолокационного и оптического структурных изображений описаний общих частей для универсального эталона опять же для данного ракурса наблюдения поверхности визирования.

Структурные алгоритмы слабо чувствительны к инвертированию контраста и предъявляют минимальные требования к памяти процессора. В то же время выделение структурных признаков чувствительно к шуму, аналитическое описание характеристик этих алгоритмов затруднено. Структурные алгоритмы имеет смысл применять только в том случае, если на изображении может быть выделено достаточно большое количество элементов (признаков), либо они характерно сгруп-

пированы, так как в противном случае возрастает вероятность ложной идентификации. Поэтому, если для запоминания универсального эталонного образа (и не одного, а нескольких) действительно необходимы небольшие затраты памяти, то для временного запоминания текущего изображения, при отсутствии возможности исключить такой этап, затраты памяти будут значительно больше. К несомненным достоинствам структурных алгоритмов совмещения изображений относится тот факт, что оценку взаимного сдвига изображений можно получить при самых общих предположениях относительно отличий масштабов изображений, их взаимного разворота, а также взаимных искажений перспективы. В то же время другие алгоритмы становятся практически неработоспособными в реальном масштабе времени уже при небольших взаимных геометрических искажениях изображений. Это свойство структурных алгоритмов особенно важно при быстрой смене взаимного положения цели и носителя датчика наблюдения.

**Целью** статьи является получение аналитически простого способа комплексирования оптических и радиолокационных изображений для последующего создания УЭИ.

## Основной материал

Предполагается, что датчики различной физической природы являются безинерционными, их собственные шумы взаимно независимы и представляют собой нормально распределенные случайные величины с нулевым средним значением и заданной дисперсией, а взаимодействие шума с полезным сигналом имеет аддитивный характер.

При составлении эталонов для комбинированных КЭСН необходимо иметь в виду, что, в соответствии с принципами построения комбинированных КЭСН, априорная информация может быть получена по результатам аэрофотосъемки, т.е. в оптическом диапазоне. Это означает, что получаемые эталонные изображения и текущие изображения должны быть приведены к единой системе координат.

Предлагаемый способ комплексирования цифровых полутонных радиолокационных и оптических изображений состоит в следующем.

Рассмотрим два цифровых изображения одного и того же участка земной поверхности (рис. 1), полученных в оптическом (рис. 1,а) и миллиметровом радиолокационном (рис. 1,б) диапазонах волн, соответственно.

Соответствующее оптическому изображению в градациях серого показано на рис. 2.

Определяется основной канал с наибольшим количеством информативных деталей на изображении, например, оптический.

Для второго канала (в данном случае радиолокационного) вычисляется его средняя яркость  $\bar{E}_{PL}$  по формуле

$$\bar{E}_{PL} = \sum_{x,y=1}^{n,m} E_{x,y}^{PL} / n \cdot m,$$

где  $x, y$  — координаты точек с яркостью изображения;  $n, m$  — размеры изображения.



Рис. 1. Изображения участка земной поверхности



Рис. 2. Изображение участка земной поверхности в оптическом диапазоне в градациях серого

Далее вычисляется среднее значение абсолютных разностей  $\bar{E}_{\Delta}$  между всеми значениями яркости пикселей и средней яркостью радиолокационного изображения по формуле:

$$\bar{E}_{\Delta} = \sum_{x,y=1}^{n,m} |E_{x,y}^{PL} - \bar{E}_{PL}| / n \cdot m.$$

Радиолокационное изображение (рис. 1, б), нормированное его средней яркостью ( $E_{x,y}^{PL} - \bar{E}_{PL}$ ), показано на рис. 3.



Рис. 3. Изображение в радиолокационном диапазоне, нормированное его средней яркостью

Яркость пикселей комплексированного изображения определяется согласно выражению

$$E_{x,y} = E_{x,y}^{Opt} + \left| E_{x,y}^{PL} - \bar{E}_{PL} \right| - \bar{E}_{\Delta},$$

где  $E_{x,y}$  — комплексированное изображение;  $x, y$  — координаты точек с яркостью  $E$  радиолокационного и оптического изображений.

На рис. 4,а показано полученное с использованием последнего выражения комплексированное изображение на основе исходных оптического и радиолокационных изображений. Для сравнения, на рис. 4,б приведено исходное оптическое изображение в градациях серого.



а)



б)

Рис. 4. Комплексированное изображение: а) полученное на основе исходных оптического и радиолокационных изображений; б) исходное оптическое изображение в градациях серого

На рис. 5 приведена блок-схема обобщенного алгоритма реализации предложенного способа комплексирования изображений.



Рис. 5. Блок-схема обобщенного алгоритма комплексирования изображений

На рис. 6 показаны результаты построения двумерных дискретных взаимокорреляционных функций (ВКФ) для полученного комплексированного изображения и исходных изображений в оптическом и радиолокационном диапазонах. Полученные характеристики, такие как унимодальность, узкий экстремум, низкий уровень «фона» данных корреляционных функций позволяют утверждать, в соответствии с [3], о возможности использования данного комплексированного изображения для последующего формирования универсального эталона.

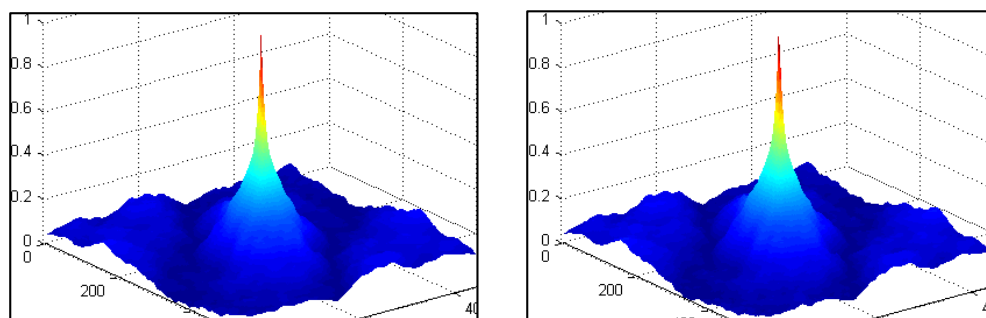


Рис. 6. ВКФ комплексированного изображения: а) с исходным оптическим; б) с радиолокационным



## **Выводы**

Предлагаемый способ комплексирования цифровых полутоновых радиолокационных и оптических изображений позволяет объединить в одном изображении основные информативные признаки изображений обоих диапазонов. При этом дополнительным эффектом является повышение «качества» полутоновых изображений одного и того же фрагмента земной поверхности, полученных от двух каналов различного спектрального диапазона (радиолокационного и оптического), за счет повышения локального контраста результирующего изображения в двух диапазонах волн. Анализ характеристик корреляционных функций полученного комплексированного изображения с исходными изображениями позволяет утверждать о возможности формирования на его основе универсального эталонного изображения участка(ов) местности для комбинированных КЭСН летательных аппаратов.

1. Сотников А.М., Таршин В.А. Обоснование принципов построения и разработка модели корреляционно-экстремальной системы наведения комбинированного типа. *Системи управління навігації та зв'язку*. 2012. № 4(24). С. 7–11.

2. Мезенцев А.В., Буточнов А.Н., Юзефович В.В. Анализ способов повышения быстродействия алгоритмов совмещения изображений в комбинированных корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов. *Ресстрація, зберігання і оброб. даних*. 2017. Т. 19. № 1. С. 64–71.

3. Юзефович В.В., Мезенцев А.В., Буточнов А.Н. Оценка качества эталонных изображений, создаваемых для корреляционно-экстремальных систем навигации. *Ресстрація, зберігання і оброб. даних*. 2014. Т. 16. № 4. С. 44–53.

4. Тетерин В.В. Метод комплексирования информации от многоканальной системы с использованием вейвлет-спектров. *Оптичний журнал*. 2006. Т. 73. № 10. С. 47.

5. Москвитин А.Э. Технология и алгоритм повышения качества изображений земной поверхности на основе комплексирования спектральной видеоинформации (Алгоритм, основанный на раздельной обработке низко- и высокочастотных компонент разнотональных видеоданных): автореф. дис. ... канд. техн. наук. Рязань, 2003. 16 с.

6. Баклицкий В.К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения. Тверь: ГО «Книжный клуб», 2009. 360 с.

Поступила в редакцию 29.05.2018