СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.932

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

Москвитин А.Э., к.т.н., доцент, в.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ, Рязань, Россия; orcid.org/0000-0003-0358-3953, e-mail: foton@rsreu.ru

Рассматриваются подходы к объединению разнородной видеоинформации от различных систем космического зондирования Земли. Целью такой задачи является получение нового изображения, в котором повышается четкость и дешифрируемость объектов наблюдаемой сцены. Представлен анализ отечественных и зарубежных публикаций по данной теме. Изложен ряд подходов к решению поставленной задачи.

Ключевые слова: комплексирование разнородных изображений, многозональные тепловые и радиолокационные изображения, повышение четкости и дешифрируемости изображений.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-71-108-116

Введение

Современные системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют выполнить космическое наблюдение заданных участков земной поверхности в видимом, тепловом, радиолокационном диапазонах спектра; в режимах многозональной и гиперспектральной съемки; при различных способах поляризации излучаемого и принимаемого радиолокационного сигнала. После наземной обработки данные ДЗЗ находят эффективное использование в различных отраслях народного хозяйства и в интересах обороны страны. Федеральными космическими программами и Гособоронзаказами определены приоритетные направления развития в России космической группировки систем ДЗЗ и создание эффективной наземной инфраструктуры приема, обработки и доставки потребителям получаемой информации.

Россия пока отстает в области ДЗЗ от мирового уровня. Это прежде всего касается систем высокодетального (с разрешением до 0,3 метров) наблюдения земной поверхности в видимом и радиолокационном диапазонах, гиперспектральной съемки, систем глобального наблюдения Земли на фоне окружающего космоса в видимом и тепловом диапазонах. В рамках ряда государственных документов по развитию космической деятельности поставлена цель восстановления паритета России в области ДЗЗ.

Одним из эффективных подходов к решению проблемы повышения четкости и дешифрируемости объектов наблюдаемой сцены является комплексирование информации от различных по принципу действия и назначению систем ДЗЗ [1].

Проблема повышения геометрической разрешающей способности космической съемки традиционно решается на технологическом уровне – путем создания приборов с зарядовой связью (ПЗС-линеек и ПЗС-матриц) с увеличенным числом фотоприемных элементов. Это радикальный, но достаточно трудный и продолжительный процесс. Россия в этом направлении отстает. Например, ПЗС-линейки отечественного производства для видимого диапазона насчитывает 2 тыс. фотоприемных элементов, а зарубежные – 20 тыс.; для теплового диапа-

зона в России созданы линейки из 192 приемников инфракрасного излучения, а за рубежом - линейки с 1500 приемниками.

В сложившихся условиях наряду с технологическим подходом в России создаются новые конструкции датчиков, в которых в каждом спектральном канале устанавливаются несколько отечественных ПЗС-линеек с субпиксельным смещением полей зрения. За счет объединения данных от них можно значительно повысить пространственное разрешение космической съемки.

При использовании обычных конструкций сканерных устройств, в которых ПЗС-линейки отдельных спектральных каналов устанавливаются в фокальной плоскости друг за другом без смещения полей зрения, есть возможность повысить четкость отображения объектов наблюдаемой сцены за счет комплексирования разнозональных изображений.

Актуальной задачей является повышение информативности спутниковых снимков за счет комплексирования разнородной видеоинформации, зафиксированной в видимом, тепловом и радиолокационном диапазонах спектра. Объединение таких данных потенциально позволяет сформировать изображение с качественно новыми свойствами, например, отображая на естественном для человеческого зрения фоне замаскированные объекты, хорошо заметные на радиолокационных снимках.

Интуитивно, комплексирование информации от различных систем ДЗЗ представляется как вполне разумный подход, нацеленный на повышение геометрических, радиометрических и спектральных характеристик объектов наблюдаемой сцены. В то же время, общей теоретической основы для решения этой проблемы нет.

По результатам анализа научных работ по проблеме комплексирования разнородных изображений можно сделать следующие выводы.

Во-первых. В отечественных и зарубежных публикациях слабо отражены вопросы повышения пространственного разрешения систем ДЗЗ на основе комплексирования субпиксельно смещенных изображений, формируемых отдельными ПЗС-линейками. За рубежом эта задача менее актуальна, поскольку она решается путем технологического увеличения количества фотоприемных элементов в ПЗС-линейках. В нашей стране, в условиях технологического отставания в создании многоразмерных оптоэлектронных ПЗС-линеек и матриц, а также действия санкций на поставку зарубежной микроэлектроники, подобные технологии являются перспективными для развития [1].

Во-вторых. В зарубежных и отечественных системах обработки изображений используются различные подходы комплексирования многозональных и гиперспектральных видеоданных. Эти подходы требуют точной настройки алгоритмов, они эффективно работают только в своей узкой области - это, например, обработка телевизионных изображений, снимки от бытовых и профессиональных фотоаппаратов и т.п., и не учитывают специфику космических систем наблюдения Земли.

В-третьих. В научных публикациях в части комплексирования разнородной видеоинформации (видимого, теплового и радиолокационного диапазона) применяются методы простого и диффузного морфологического комплексирования, строятся пирамиды изображений. Такие подходы требуют проведения предварительной сегментации изображений, что делает их сложными в реализации и узконаправленными.

На основе проведенного анализа можно выделить четыре мало изученных направлений для исследований.

1-е направление – это комплексирование изображений от нескольких субпиксельно смещенных ПЗС-линеек, позволяющее многократно повысить пространственное разрешение материалов космической съемки [2, 3].

2-е направление – это комплексирование геометрически совмещенных снимков, полученных в различных диапазонах видимого участка спектра. Для формирования нового снимка с повышенной четкостью отображения объектов наблюдаемой сцены [2, 3, 4]. *3-е направление* – это комплексирование изображений, сформированных в видимом, тепловом и радиолокационном диапазонах спектра. Объединение таких совершенно разнородных данных нацелено на получение снимка, в котором отображаются с высокой четкостью элементы, хорошо наблюдаемые в видимом, тепловом и радиолокационном диапазонах [5, 6, 7, 8].

Комплексирование изображений от субпиксельно смещенных ПЗС-линеек

Технология комплексирования субпиксельно смещенных изображений основана на строгом аналитическом описании этого процесса [2, 3]. Для простоты понимания ограничимся вначале наиболее простым случаем комплексирования данных от двух ПЗС-линеек, смещенных относительно друг друга на 0,5 шага дискретизации и имеющих по M элементов (рисунок 1).



Рисунок 1 - Пояснения к комплексированию данных от двух ПЗС-линеек Figure 1 - Explanations for two CCD scanning array data array

На приведенном рисунке: $X_1, X_2, X_3, ..., X_{2M}$ – отсчеты яркости двух строк изображения, полученных от двух смещенных ПЗС-линеек: $X_1, X_3, X_5, X_7, ..., X_{2M-1}$ – отсчеты от первой линейки; $X_2, X_4, X_6, X_8, ..., X_{2M}$ – отсчеты от 2-й линейки; $y_1, y_2, y_3, ..., y_{2M}$ – отсчеты яркости строки изображения, полученной от одной виртуальной ПЗС-линейки с двойным числом элементов. Отсчеты X_m и $y_m, m = \overline{1, 2M}$, связаны между собой как

$$y_1 = X_1$$
, $y_m = 2\sum_{i=0}^{m-3} (-1)^i X_{m-1-i} + (-1)^m X_1$, $m = \overline{2, 2M}$.

Неопределенность по поводу выбора значения начального элемента легко снимается. Пусть в качестве значения начального элемента принято $\hat{y}_1 = y_1 + \xi_1$, где ξ_1 – ошибка в выборе этого элемента. Ошибка передается по абсолютной величине в каждый член последовательности y_m , $m = \overline{1, 2M}$, с чередованием знака. Поэтому ее можно практически полностью устранить, сформировав скорректированную последовательность

$$y'_m = \hat{y}_m + (-1)^m (\bar{b}_H - \bar{b}_H), \quad m = \overline{1, 2M}$$

= $\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y_{2i-1}.$

где $\overline{b}_{\mathrm{H}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M} y_{2i}$, $\overline{b}_{\mathrm{H}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M} y_{2i}$.

Обобщая рассмотренную модель комплексирования на случай *К* линеек, имеющих взаимные смещения 1/*К*, получим:

$$y_m = X_1, \quad m = \overline{1, K}; \quad y_m = K \sum_{i=0}^{Z_m - 1} (X_{m+1-K(1+i)} - X_{m-K(1+i)}) + X_1, \quad m = \overline{K + 1, 2M},$$

где $Z_m = \operatorname{ent}((m-1)/K)$; $y'_m = \hat{y}_m + \overline{b} - h_m$, $m = \overline{1, 2M}$, \overline{b} – среднее значение яркости всей строки, h_m - среднее значение яркости, рассчитанное по множеству отсчетов \hat{y}_i , для которых $i/K - Z_i = m/K - Z_m$, т.е. для $i = m + K(Z_i - Z_m)$.

Выполним учет процесса квантования. В полученных выше формулах полагается, что X_m , $m = \overline{1, 2M}$, не имеют ошибок измерения. На практике для обработки доступны лишь

оцифрованные (квантованные) значения X_m , которые по отношению к истинным значениям содержат ошибку квантования ξ_m . Рассмотрим алгоритм коррекции ошибок $\hat{\xi}_k$ на примере двух ПЗС-линеек (K = 2). На первом этапе, основываясь на периодическом характере этих ошибок, строятся два полинома: один полином ($P_{\rm H}$) по нечетным элементам; второй ($P_{\rm q}$) – по четным. Для каждого *m*-го элемента полиномы строятся по точкам, принадлежащим некоторой апертуре, симметричной относительно *m*-го элемента, и вычисляются значения этих полиномов для этого элемента:

$$y'_m = \hat{y}_m + (-1)^m 0.5 (P_{\rm H} - P_{\rm q}), \quad m = \overline{1, 2M}.$$

На втором этапе определяется параметр $\alpha = X_m - 0.5(y'_m + y'_{m+1})$, при котором обеспечивается $y_m + y_{m+1} = X_m$. После этого формируется корректирующая последовательность:

$$y''_m = y'_m + \alpha$$
, $y''_{m+1} = y'_{m+1} + \alpha$, $m = 1, 3, 5, \dots$

В итоге с учетом компенсации ошибок квантования при комплексировании, например, данных от 2-х линеек можно достичь повышения пространственного разрешения примерно в 1,6 раза.

Комплексирование геометрически совмещенных снимков, полученных в различных диапазонах видимого спектра [1, 2, 3, 4]

Перед комплексированием изображение каждого спектрального канала I_k (k, $k = \overline{1,K}$, номер спектрального канала) декомпозируется на низкочастотную и высокочастотную составляющие: $I_k = I_k^{HY} + I_k^{BY}$. Низкочастотная составляющая I_k^{HY} получается путем размытия изображения I_k : $I_k^{HY} = F * I_k$, где F – сглаживающий фильтр. В качестве F может быть выбран усредняющий фильтр, либо фильтр размытия по Гауссу. Размеры фильтра определяют порог, отделяющий высокие частоты от низких.

Высокочастотная составляющая $I_k^{B^{Q}}$ вычисляется как разность исходного и размытого изображений: $I_k^{B^{Q}} = I_k - I_k^{H^{Q}}$.

Основную сложность при комплексировании составляет идентификация и обработка так называемых инверсных областей, для которых направления яркостных перепадов и уровни яркости объектов по отношению к окружающему фону противоположны в различных спектральных каналах. Для идентификации инверсных областей на паре изображений I_1 и I_2 разработан алгоритм, выполняющий попарный анализ низкочастотных составляющих этих изображений $I_{1,x,y}^{Hq}$, $I_{2,x,y}^{Hq}$ (*x* и *y* – координаты пикселей) с помощью корреляционной процедуры

$$V_{12}(x,y) = \sum_{t=-T}^{T} \left(I_{1,x,y+t}^{HY} - I_{1,x,y+t-1}^{HY} \right) \cdot \left(I_{2,x,y+t}^{HY} - I_{2,x,y+t-1}^{HY} \right), \quad x = \overline{1,X}, \quad y = \overline{1,Y},$$

где (2T+1) – размер апертуры. Признак инверсии определяется отрицательным знаком $V_{12}(x, y)$ для всех пар спектральных каналов и используется при комплексировании путем изменения знака высокочастотной компоненты одного из изображений.

После проведения предварительной обработки, низкочастотные составляющие разноспектральных видеоданных почти не отличаются друг от друга. Основные отличительные свойства несут высокочастотные компоненты.

Низкочастотные составляющие комплексируются путем взвешенного суммирования, например, для случая трехзонального изображения:

$$R_{x,y}^{HY} = r_1 I_{1,x,y}^{HY} + r_2 I_{2,x,y}^{HY} + r_3 I_{3,x,y}^{HY} ,$$

где $R_{x,y}^{HY}$ – низкочастотная компонента результирующего изображения. Коэффициенты r_1, r_2, r_3 характеризуют степень спектрозональных различий одноименных пикселов и формально определяются как

$$r_{1} = \frac{\left|I_{1,x,y}^{HY} - I_{2,x,y}^{HY}\right| + \left|I_{1,x,y}^{HY} - I_{3,x,y}^{HY}\right|}{\left|I_{1,x,y}^{HY} - I_{2,x,y}^{HY}\right| + \left|I_{1,x,y}^{HY} - I_{3,x,y}^{HY}\right|}, \quad r_{2} = \frac{\left|I_{1,x,y}^{HY} - I_{2,x,y}^{HY}\right| + \left|I_{2,x,y}^{HY} - I_{3,x,y}^{HY}\right|}{\left|I_{1,x,y}^{HY} - I_{2,x,y}^{HY}\right| + \left|I_{1,x,y}^{HY} - I_{3,x,y}^{HY}\right|}, \quad r_{3} = \frac{\left|I_{1,x,y}^{HY} - I_{3,x,y}^{HY}\right| + \left|I_{2,x,y}^{HY} - I_{3,x,y}^{HY}\right|}{\left|I_{1,x,y}^{HY} - I_{3,x,y}^{HY}\right| + \left|I_{2,x,y}^{HY} - I_{3,x,y}^{HY}\right|}.$$

Чем больше яркость пиксела одного изображения отличается от двух других, тем с большим весом этот пиксел участвует в формировании элемента результирующего изображения. Совмещение высокочастотных компонент осуществляется путем определения перепада с максимальной амплитудой:

$$Sign\left[R_{x,y}^{BY}\right] = Sign\left[r_{1}I_{1,x,y}^{HY} + r_{2}I_{2,x,y}^{HY} + r_{3}I_{3,x,y}^{HY}\right], \left|R_{x,y}^{BY}\right| = max\left[\left|I_{1,x,y}^{HY}\right|, \left|I_{2,x,y}^{HY}\right|, \left|I_{3,x,y}^{HY}\right|\right].$$

Результат комплексирования представляется в виде суперпозиции низкочастотной и высокочастотной составляющих: $R = R^{HY} + R^{BY}$. На рисунке 2 приведен пример комплексирования трех спектрозональных изображений.



Рисунок 2 – Результат комплексирования (справа) трех спектрозональных изображений (слева) Figure 2 – Fusion result (right) of three spectrozonal images (left)

Комплексирование радиолокационного и оптического изображений на основе выделения важных объектов

Выделение объектов, представленных на радиолокационном изображении, базируется на предположении, что наиболее важные объекты, плохо различимые на оптическом изображении, имеют большую яркость относительно фона и малую площадь.

К таким объектам относятся столбы, заборы, дорожные ограждения, военная техника, самолеты, корабли и т.д. Геометрическая форма этих объектов в сочетании с подстилающей поверхностью обеспечивает значительное количество прямых углов, выступающих как так называемые «блестящие точки». В сочетании с металлическим материалом объектов, отличающимся высоким коэффициентом диэлектрической проницаемости, это обеспечивает большую яркость их откликов на радиолокационном изображении. При этом малая площадь объектов зачастую и становится одной из причин, по которым они плохо различимы на оптическом снимке такого же пространственного разрешения, что и радиолокационный.

Предлагается следующий вычислительно эффективный алгоритм выделения важных объектов [5, 6, 7, 8]. Обозначим радиолокационное изображение как $B_{x,y}$, а $B_{x,y}^{HY}$ низкочастотную составляющую. Выделим $B_{x,y}^{HY}$ с помощью фильтра скользящего среднего, которое при эффективной вычислительной организации асимптотически сводится к двум сложениям и двум вычитаниям на пиксель. Размер стороны окна фильтра скользящего среднего выбирается в несколько раз большим, чем корень квадратный из максимальной площади выделяемых важных объектов. Это позволяет в сигнале $B_{x,y}^{HY}$ отразить влияние фона, окружающего важные объекты. Высокочастотную составляющую радиолокационного сигнала $B_{x,y}^{BY}$ найдем как разность $B_{x,y}$ и $B_{x,y}^{HY}$. В результате основной составляющей сигнала $B_{x,y}^{BY}$ будет превышение яркости откликов от объектов небольшой площади над яркостью окружающего фона. Пиксель (x, y) радиолокационного изображения предлагается считать относящимся к важному объекту, если для него выполняется условие $B_{x,y}^{BY} \ge k B_{x,y}^{HY}$, где k – параметр алгоритма, подбираемый эмпирическим путем или в результате обучения по набору тестовых изображений.

После выявления важных объектов на радиолокационном снимке привлекается геометрически точно совмещенный с $B_{x,y}$ оптический снимок $I_{b,x,y}$, где b – индекс спектрального канала. В результате формируется комплексированное изображение:

$$F_{b,x,y} = \begin{cases} I_{b,x,y}, & B_{x,y}^{BQ} < k \ B_{x,y}^{HQ}, \\ I_{b,x,y} + \frac{B_{x,y}^{BQ} \ I_{b,x,y}^{HQ}}{(1+k)B_{x,y}^{HQ}}, & B_{x,y}^{BQ} \ge k \ B_{x,y}^{HQ}. \end{cases}$$

Фактически с радиолокационного изображения к сигналу оптического прибавляются только нормированные превышения яркостей важных объектов над окружающим фоном. Нормировка выполняется на основе сопоставления ни зкодетальной составляющей оптического сигнала $I_{b,x,y}^{HY}$ с минимальной возможной яркостью важного объекта $(1+k)B_{x,y}^{HY}$.

Результат комплексирования $F_{b,x,y}$ по существу представляет собой оптическую подложку, поверх которой нанесены яркие белые точки, пятна и линии, соответствующие важным объектам, выделенным на радиолокационном изображении: столбам, заборам, военной технике и т.п.

На рисунке 3 приведен пример работы первого предложенного алгоритма комплексирования, переносящего важные объекты с радиолокационного изображения на оптическую подложку. Видно, что столбы и дорожные ограждения перенеслись на оптическое изображение, дополнив его новой информацией.



Рисунок 3 – Радиолокационное (слева), оптическое (посередине) изображение и результат комплексирования (справа) Figure 3 – Radiolocating (left) optical (centre) image and fusion result (right)

Оценка качества комплексирования

Для оценки степени повышения качества комплексирования использовались три критерия [1]. Первый критерий (спектральный) основан на том факте, что с ростом разрешающей способности изображения возрастает амплитуда высокочастотных составляющих спектра Фурье:

$$R = \sum_{x=0}^{X/2} x \cdot \sqrt{Rm_{x,x}^2 + Im_{x,x}^2},$$

где $Rm_{x,x}$ и $Im_{x,x}$ – соответственно действительная и мнимая части элемента спектра Фурье с номером x, X – число элементов в строке изображения.

Второй критерий (разностный) основан на том, что при повышении разрешающей способности изображения при неизменном контрасте возрастают амплитуды перепадов яркости между соседними элементами:

$$S = \sqrt{\frac{1}{XY} \sum_{x=1}^{X} \sum_{y=2}^{Y} (I_{x,y} - I_{x,y-1})^2}$$

В качестве третьего критерия использована энтропия третьего порядка, которая характеризует среднее количество информации в изображении:

$$H = \sum_{j_0=0}^{J} \sum_{j_1=0}^{J-1} \sum_{j_2=0}^{J-2} P_0 \log(P_0/P_1),$$

где $P_0 = P[I_q, I_{q-1}, I_{q-2}] = \Pr\{I_q = j_0, I_{q-1} = j_1, I_{q-2} = j_2\}$ – совместное распределение вероятностей; $P_1 = P[I_{q-1}, I_{q-2}]$; $I_q, q = \overline{1, XY}$, – вектор элементов изображения в виде одной строки (q – номер элемента); j_0, j_1, j_2 – значения яркости трех соседних элементов вектора I_q .

В результате экспериментальных исследований установлено, что все три критерия дают близкие оценки степени повышения качества изображений за счет комплексирования разноспектральной видеоинформации, что во многом подтверждает корректность их использования по назначению.

Заключение

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Алгоритм комплексирования видеоданных от нескольких субпиксельно смещенных ПЗС-линеек, основанный на алгебраическом подходе объединения данных, позволяющий повысить пространственное разрешение материалов космической съемки для 2-х линеек в 1,6 раза, для 3-х линеек в 1,9 раза, для 4-х линеек в 2,5 раза.

2. Технология комплексирования разнозональных изображений видимого диапазона, основанная на усилении их отличительных особенностей, обеспечила повышение четкости отображения объектов наблюдаемой сцены на 23 % (по критерию энтропия).

3. Алгоритм комплексирования оптических снимков с данными радиолокационного и теплового наблюдения Земли, основанный на независимой обработке высоко- и низкочастотных компонент изображений, позволил повысить информативность исходных снимков примерно на 30 % (по критериям энтропии и дисперсии разности соседних элементов).

Библиографический список

1. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / под ред. В.В. Еремеева. М: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 460 с.

2. Еремеев В. В., Кузнецов А. Е., Москвитин А. Э. Технологии повышения качества изображений земной поверхности на основе комплексирования спектрозональной видеоинформации // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2004. № 14. С. 22-28.

3. Еремеев В. В., Злобин В. К., Москвитин А. Э. Методы и технологии комплексирования спектрозональной видеоинформации от систем дистанционного зондирования Земли // Цифровая обработка сигналов. 2007. № 1. С. 30-36.

4. Еремеев В. В., Макаренков А. А., Москвитин А. Э., Юдаков А. А. Повышение четкости отображения объектов на изображениях земной поверхности на основе данных гиперспектральной съемки // Цифровая обработка сигналов. 2012. № 3. С. 35-39.

5. Егошкин Н. А., Еремеев В. В., Макаренков А. А., Москвитин А. Э., Ушенкин В. А. Проблемные вопросы обработки данных от космических систем гиперспектральной и радиолокационной съемки Земли // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 60. С. 54-64.

6. **Москвитин А. Э., Ушенкин В. А.** Комплексирование радиолокационных изображений от восходящего и нисходящего витков орбиты на основе нечеткой логики // Цифровая обработка сигналов. 2018. № 3. С. 10-15.

7. **Москвитин А. Э., Ушенкин В. А.** Комплексирование радиолокационных и оптических изображений от космических систем дистанционного зондирования Земли // Радиотехника. 2019. № 5 (6). С. 120-127.

8. Егошкин Н. А., Еремеев В. В., Москвитин А. Э., Ушенкин В. А. Обработка информации от современных космических систем радиолокационного наблюдения Земли. М: ФИЗМАТЛИТ, 2019. 320 с.

UDC 004.932

INTEGRATION OF VIDEO INFORMATION FROM A VARIETY OF SPACE- BASED EARTH OBSERVATIONS

A. E. Moskvitin, Ph.D. (Tech.), associate professor, senior researcher of SRI «Photon», RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-0358-3953, e-mail: foton@rsreu.ru

Approaches to combine heterogeneous video information from various Earth space sensing systems are considered. **The aim** of this task is to obtain a new image that improves clarity and decipherability of the objects in the scene being observed. The analysis of domestic and foreign publications on this topic is presented. A number of approaches to solve this problem are described.

Keywords: integration of heterogeneous images, multi-zone thermal and radar images, increasing clarity and decipherability of images.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-71-108-116

References

1. Sovremennye tehnologii obrabotki dannyh distancionnogo zondirovanija Zemli (Modern technologies of Earth remote sensing data processing) / pod red. V.V. Eremeeva. Moscow, FIZMALIT, 2015. 460 p. (in Russian).

2. Eremeev V. V., Kuznecov A. E., Moskvitin A. E. Tehnologii povyshenija kachestva izobrazhenij zemnoj poverhnosti na osnove kompleksirovanija spektrozonal'noj videoinformacii. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotehnicheskogo universiteta*. 2004, no. 14, pp. 22-28. (in Russian).

3. Eremeev V. V., Zlobin V. K., Moskvitin A. E. Metody i tehnologii kompleksirovanija spektrozonal'noj videoinformacii ot sistem distancionnogo zondirovanija Zemli. *Cifrovaja obrabotka signalov*. 2007, no. 1, pp. 30-36. (in Russian).

4. Eremeev V. V., Makarenkov A. A., Moskvitin A. E., Yudakov A. A. Povyshenie chetkosti otobrazhenija obektov na izobrazhenijah zemnoj poverhnosti na osnove dannyh giperspektral'noj semki. *Cifrovaja obrabotka signalov*. 2012, no. 3, pp. 35-39. (in Russian). 5. Egoshkin N. A., Eremeev V. V., Makarenkov A. A., Moskvitin A. E., Ushenkin V. A. Problemnye voprosy obrabotki dannyh ot kosmicheskih sistem giperspektral'noj i radiolokacionnoj semki Zemli. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotehnicheskogo universiteta*. 2017, no. 60, pp. 54-64ю (in Russian).

6. **Moskvitin A. E., Ushenkin V. A.** Kompleksirovanie radiolokacionnyh izobrazhenij ot voshodyaschego i nishodyaschego vitkov orbity na osnove nechetkoj logiki. *Cifrovaja obrabotka signalov.* 2018, no. 3, pp. 10-15. (in Russian).

7. Moskvitin A. E., Ushenkin V. A. Kompleksirovanie radiolokacionnyh i opticheskih izobrazhenij ot kosmicheskih sistem distancionnogo zondirovanija Zemli. *Radiotehnika*. 2019, no. 5(6), pp. 120-127 (in Russian).

8. Egoshkin N. A., Eremeev V. V., Moskvitin A. E., Ushenkin V. A. *Obrabotka informacii ot sovremennyh kosmicheskih sistem radiolokacionnogo nabljudenija Zemli* (Processing of information from modern system of Earth radiolocating sensing). Moscow: FIZMATLIT. 2019, 320 p. (in Russian).