

Оценка информативности комбинированных изображений в мультиспектральных системах технического зрения

Бондаренко М. А., Дрынкин В. Н.

Эл. почта: max.bond@bk.ru, drynkinv@gosniias.ru

Аннотация

Разработана структурно-семантическая количественная оценка информативности комбинированных изображений для мультиспектральных систем технического зрения, основанная на мере сохранения (искажения) различительной информации по спектрально-энергетическим и пространственным признакам, согласующаяся с визуальным восприятием. На основании введённой метрики информативности проведено сравнение известных способов комплексирования изображений для двухзональной телевизионно-тепловизионной системы улучшенного видения. Показано, что традиционные статистические подходы к оценке информативности менее согласованы с визуальным восприятием изображений.

Ключевые слова: анализ изображений, оценка информативности, информативность изображений, визуальное восприятие, комбинированные изображения, комплексирование изображений, человеко-машинные интерфейсы, система технического зрения, мультиспектральная видеосистема, система улучшенного видения.

Введение

Всё более широкое распространение получают мультиспектральные системы технического зрения, в частности мультиспектральные авиационные системы улучшенного видения (МСУВ), позволяющие отображать внешнее пространство для пилотов вне зависимости от погодных и суточных условий, повышая

эксплуатационные возможности воздушных судов. В таких системах информация от датчиков различной физической природы объединяется (комплексировается) в общее комбинированное изображение, которое должно содержать существенные информационные признаки от всех комбинируемых видеоканалов. В качестве источников данных в МСУВ могут использоваться телевизионные (ТВ) датчики видимого диапазона, инфракрасные (ИК) датчики различных диапазонов, радиолокаторы, лазерные локаторы и др., обладающие разной информативностью. Под информативностью в общем случае понимают совокупное количество информации, получаемое потребителем по пространственным, спектрально-энергетическим, временным и иным признакам при их восприятии и анализе [11].

На сегодняшний день известно достаточно большое число различных двух- и трёх-спектральных СУВ (например, [14]), в которых применяются различные подходы к комплексированию спектральных изображений. Сравнение же получаемых при этом комбинированных изображений довольно затруднительно из-за отсутствия единого количественного объективного критерия информативности изображений.

Обзор методов оценки информативности комбинированных изображений

В общем случае оценка эффективности комплексирования сводится к оценке меры сохранения количества информации комбинированного изображения в сравнении с информацией его составляющих изображений. Ныне, согласно источникам [3, 8], исследователи выделяют три основных подхода к оценке количества информации:

1. Структурный (алфавитный) – при дискретном строении массива информации измерение количества информации происходит путём подсчёта его информационных элементов.

2. Статистический (вероятностный) – оперирует понятием энтропии, как меры неопределённости ситуации. Энтропия учитывает вероятность появления ситуации, а, следовательно, и информативность сообщения.
3. Семантический (содержательный) – учитывает ценность, полезность информации. Используется при оценке эффективности логических опытов. В настоящее время применение ограничено, так как теория недостаточно разработана.

Из традиционных подходов к оценке информативности популярен способ вычисления энтропии сообщений по Шеннону [1, 3, 8]. Под энтропией произвольного сообщения понимается среднее количество информации, приходящееся на один символ сообщения. Энтропия характеризует сообщение с точки зрения его насыщенности информацией. Чем больше энтропия, тем больше информации воспринимается в единицу времени (при одинаковой скорости передачи символов сообщения). Информационная энтропия также характеризует меру неопределённости или непредсказуемости информации. Например, в произвольном предложении на русском языке разные буквы появляются с разной частотой, поэтому неопределённость появления для некоторых букв меньше, чем для других. Неопределённость уменьшается ещё сильнее, когда встречаются некоторые редкие сочетания букв. Пусть $p(i)$ – вероятность появления i -й буквы из N букв букваря (вероятность элементарного события), тогда информационная двоичная энтропия предложения из элементарных событий, в предположении о их независимости, с N возможными состояниями рассчитывается по формуле:

$$H = - \sum_{i=1}^N p(i) \log_2 p(i). \quad (1)$$

Применительно к оценке цифрового полутонового изображения I с 256-ю градациями яркости, энтропия вычисляется по формуле:

$$H(I) = - \sum_{i=0}^{255} P(i) \log_2 P(i), \quad (2)$$

где $P(i) = \frac{N(i)}{N}$ – вероятность появления пикселя яркости $i = \overline{0, 255}$,
 $N(i)$, $i = \overline{0, 255}$ – гистограмма изображения I , N – число его пикселей.

Для количественной оценки эффективности комплексирования H_c изображений на основе энтропии (2) в двухзональной СУВ будем оценивать суммарный прирост разности энтропии между комбинированным изображением I_c и его составляющими I_1 и I_2 :

$$H_c = 2H(I_c) - H(I_1) - H(I_2). \quad (3)$$

Если описанный подход позволяет достаточно объективно оценивать информативность идеального канала связи (без помех и шумов), то для реальных видеоизображений подобная формальная эквивалентность энтропии и информации может быть лишена смысла [12], так как не учитывает пространственные зависимости яркостей элементов изображения и особенности их зрительного восприятия.

Часто количественную оценку информативности комбинированных изображений отождествляют с оценкой «качества комбинированных изображений» [17, 18], причём считается, что наиболее информативный результат даёт такой метод комплексирования, при котором совместная мера близости комбинированного изображения с его составляющими будет минимальна. В качестве меры близости выбирают совокупность локальных статистических показателей, таких как корреляция, средние значения и дисперсии яркости. Например, согласно работам [15, 17], взвешенная оконная оценка качества Q_b комбинированного изображения I_c вычисляется следующим образом:

$$Q_b = \frac{1}{(M - 2d)(N - 2d)} \sum_{x=d}^{M-d} \sum_{y=d}^{N-d} sW(I_1, I_c, x, y, d) + (1 - s)W(I_2, I_c, x, y, d), \quad (4)$$

$$s = \begin{cases} c = \frac{\sigma(I_1, I_c)}{\sigma(I_1, I_c) + \sigma(I_2, I_c)}, \\ 0, & c < 0, \\ 1, & c > 1, \end{cases} \quad (5)$$

$$W(I_k, I_c, x, y, d) = \frac{\sigma(I_k, I_c)}{\sigma(I_k)\sigma(I_c)} \frac{2\bar{I}_k\bar{I}_c}{\bar{I}_k^2 + \bar{I}_c^2} \frac{2\sigma(I_k)\sigma(I_c)}{\sigma^2(I_k) + \sigma^2(I_c)} = \quad (6)$$

$$= \frac{4\sigma(I_k, I_C)\bar{I}_k\bar{I}_C}{(\bar{I}_k^2 + \bar{I}_C^2)(\sigma^2(I_k) + \sigma^2(I_C))}, \quad (7)$$

$$\sigma(I_t, I_C) = \frac{1}{d^2} \sum_{i=x-d}^{x+d} \sum_{j=y-d}^{y+d} (I_t[i, j] - \bar{I}_t)(I_C[i, j] - \bar{I}_C), t \in \{1, 2\}, \quad (8)$$

$$\sigma^2(I_k) = \frac{1}{d^2} \sum_{i=x-d}^{x+d} \sum_{j=y-d}^{y+d} (I_k[i, j] - \bar{I}_k)^2, \quad (9)$$

$$\bar{I}_k = \frac{1}{d^2} \sum_{i=x-d}^{x+d} \sum_{j=y-d}^{y+d} I_k[i, j], k \in \{1, 2, C\}, \quad (10)$$

где I_1, I_2 – составляющие комбинированного изображения, M и N – их размеры, d – линейный размер скользящего квадратного окна, размеры которого несущественно влияют на результат. Степень же искажённости изображений (6-7) зависит от трёх различных факторов: потери корреляции $\frac{\sigma(I_k, I_C)}{\sigma(I_k)\sigma(I_C)}$, искажения яркости $\frac{2\bar{I}_k\bar{I}_C}{\bar{I}_k^2 + \bar{I}_C^2}$ и искажения контрастности $\frac{2\sigma(I_k)\sigma(I_C)}{\sigma^2(I_k) + \sigma^2(I_C)}$. При этом отмечается, что описанная мера оценки «согласуется с визуальной оценкой качества изображений». На самом же деле понятия «качество» и «информативность» изображения не тождественны: изображение может быть качественным без шумов и искажений (например, артефактов сжатия), но при этом быть бессодержательным. Для определённости метрику (4-10), впервые описанную в работе [17], будем называть метрикой Пиеллы.

Концепция количественной оценки информативности

С целью получения количественной оценки, в данной работе сделана попытка формализовать понятие информативности с точки зрения её полезности и воспринимаемости.

Изображения могут содержать информацию об объектах наблюдаемого пространства, наделённых определёнными спектрально-энергетическими признаками (СЭП) и пространственными признаками (ПП), которые могут изменяться во времени. Анализ таких признаков показывает, что основное

количество информации, содержащейся в изображении, в первую очередь несут ПП объектов. Роль СЭП состоит в выявлении основной пространственной информации об объектах в соответствии с их яркостным распределением. Таким образом, повышение информативности комбинированных изображений определяется возможностью привлечения дополнительных признаков, позволяющих осуществить различение новых объектов в данном многоспектральном изображении [11]. То есть, оценку информативности комбинированных изображений можно проводить на основе понятия «различительная информация» по СЭП ($R_{СЭП}$) и ПП ($R_{ПП}$) объектов. При этом необходимо дополнительно оценивать меру реалистичности её восприятия ($R_{РВ}$), выражающей степень сохранения распределений яркости исходной информации на комбинируемых изображениях. В случае слабого сохранения исходных распределений яркости совокупно различаемая информация будет слабо интерпретируема, из-за чего общее количество получаемой полезной информации будет существенно меньше.

В соответствии с перечисленными основными факторами, определяющими информативность комбинированных изображений, наиболее уместным представляется оценивать общее количество различаемой информации $V_{Общ}$ в виде произведения:

$$V_{Общ} = \begin{cases} R_{ПП}R_{СЭП}R_{РВ}, & \text{если } R_{СЭП} > 0 \text{ и } R_{РВ} > 0, \\ -|R_{ПП}R_{СЭП}R_{РВ}|, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (11)$$

Геометрически формула (11) выражает объём совокупной различаемой информации на комбинированном изображении (рис. 1):

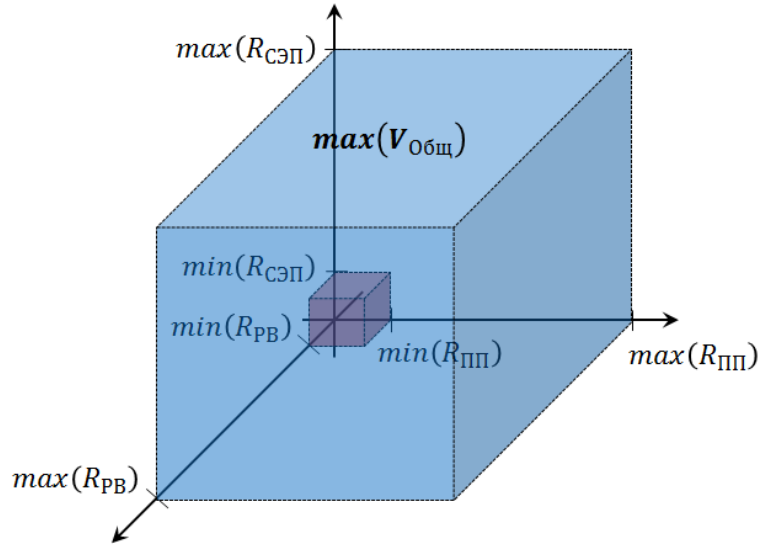


Рис. 1. Геометрический смысл совокупной различаемой информации на комбинированном изображении

Если абсолютная величина объёма определяет меру информативности, то знак объёма за счёт значений $R_{СЭП}$ и $R_{РВ}$ означает истинность или ложность её восприятия на комбинированном изображении по отношению к исходной информации его составляющих. Детальность $R_{ПП}$, как мера числа различимых деталей на изображениях, всегда неотрицательна.

Описанная концепция применяется ниже для сравнения разных способов комплексирования изображений в двуспектральных телевизионно-тепловизионных (ТВ-ТпВ) СУВ.

Критерии информативности для ТВ-ТпВ СУВ

Основное количество информации, содержащейся в ТВ изображении, в первую очередь несут ПП объектов. Поэтому целесообразно иметь ТВ канал высокого разрешения (ВР). С другой стороны ИК датчики (в частности ТпВ) дают больше СЭП (например, тепловой контраст), но, как правило, имеют более низкое разрешение (НР). В этой ситуации можно существенно повысить информативность изображения, совместно обрабатывая ТВ канал ВР с ТпВ каналом НР. Таким образом, критерий информативности с учётом зрительного восприятия изображений можно выбрать из следующих соображений:

комбинированное изображение должно иметь ПП и СЭП, присущие как ТВ, так и ТпВ изображениям, при их реалистичном восприятии. Иными словами, комбинированное изображение должно иметь высокую детальность ТВ изображений и тепловой контраст и при этом сохранять общее распределение яркостей по отношению к его составляющим.

Алгоритмическая реализация количественной оценки информативности

Детальность любого цифрового изображения характеризуется наличием различных границ объектов на некотором фоне, представляющих собой протяжённые перепады яркости. Для цифрового монохромного комбинированного изображения I_C с размерами $M \times N$ элементов относительное сохранение деталей формально можно описать в виде функции от отношения модулей градиентов комбинированного изображения к максимуму от модулей градиентов его составляющих I_1 и I_2 :

$$R_{\text{ПП}} = \frac{1}{(M-2)(N-2)} \sum_{x=1}^{M-2} \sum_{y=1}^{N-2} \delta(x, y), \quad (12)$$

где $\delta(x, y)$ – функция различимости деталей комбинированного изображения в точке (x, y) :

$$\begin{cases} 1, & \frac{\partial I_C(x, y)}{\max(\partial I_1(x, y), \partial I_2(x, y))} > T_0 \text{ и } \max(\partial I_1(x, y), \partial I_2(x, y)) > 0, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (13)$$

где $\partial I_j(x, y), j \in \{1, 2, C\}$ – модули градиентов соответствующих изображений в точке (x, y) , для их вычисления используется оператор Собеля [10]. T_0 – порог различимости границ объектов для комбинированных изображений.

Так как $0 \leq \frac{\partial I_C(x, y)}{\max(\partial I_1(x, y), \partial I_2(x, y))} \leq 1$, то $0 \leq T_0 \leq 1$. Понятие различимости должно быть согласовано с визуальным восприятием, поэтому величину порога различимости T_0 следует находить эмпирически на основании усреднённых субъективных оценок. В приведённом исследовании порог T_0 выбирался на

отрезке $[0, 1]$ с шагом 0,05. В случае малого значения $T_0 \leq 0,1$ на комбинированном изображении за различимые детали принимаются практически все элементы (включая шумы и помехи), для которых перепад яркости может быть, как не различим человеческим глазом, так и различим с трудом, в то время как при $T_0 \geq 0,5$ учитываются только наиболее чёткие детали и пропускаются легко различимые. Эмпирически авторами было выбрано значение порога $T_0 = 0,25$. В соответствии с (12-13) величина $R_{\text{ПП}}$ изменяется в пределах от 0 (нет различимых деталей) до 1 (полное сохранение деталей от двух комплексированных каналов). Если при комплексировании одно из изображений цветное, то выбирается суммарное значение $R_{\text{ПП}}$ по всем цветовым каналам.

Для оценки теплового контраста сцены $R_{\text{СЭП}}$ на ТпВ изображении сцены находили самую «тёплую» и самую «холодную» области, проходя по нему центральным скользящим окном размером $(2k + 1) \times (2k + 1)$ элементов. Найденные области в комбинированных изображениях учитывали при расчёте контраста по следующей формуле:

$$R_{\text{СЭП}} = \begin{cases} \frac{K_c}{K_{\text{ТпВ}}}, & \left| \frac{K_c}{K_{\text{ТпВ}}} \right| < 1, \\ 1, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (14)$$

$$K_c = \frac{H_c - L_c}{H_c + L_c}, \quad K_{\text{ТпВ}} = \frac{H_{\text{ТпВ}} - L_{\text{ТпВ}}}{H_{\text{ТпВ}} + L_{\text{ТпВ}}}, \quad (15)$$

где K_c и $K_{\text{ТпВ}}$ – относительные тепловые контрасты для комбинированного и ТпВ изображения соответственно, H_c и $H_{\text{ТпВ}}$ – усреднённые значения яркости в самой «тёплой» области сцены для комбинированного и ТпВ изображения, L_c и $L_{\text{ТпВ}}$ – усреднённые значения яркости в самой «холодной» области сцены для комбинированного и ТпВ изображения. Размер областей 21×21 пикселей ($k = 10$) выбирался так, чтобы контрасты были достаточно локальными, и в тоже время шумы, помехи и ложные контура не вносили существенного вклада в общую оценку теплового контраста. При комплексировании цветных изображений выбирается минимальное значение $R_{\text{СЭП}}$ по всем цветовым каналам. При этом

необходимо учитывать, что контраст на комбинированном изображении в виде отношения $\frac{K_C}{K_{ТпВ}}$ может быть < 0 (например, если усреднить ТВ изображение с инвертированным ТпВ). В этом случае ТпВ канал добавляет ложную различительную информацию по СЭП и такой вариант комплексирования следует считать неудачным. Отношение относительных контрастов $\frac{K_C}{K_{ТпВ}}$ может быть по модулю > 1 , что соответствует усилению исходного относительного контраста $K_{ТпВ}$ на комбинированном изображении и, следовательно, не добавляет информационных признаков. Поэтому оценка $R_{СЭП}$ выбрана так, чтобы $|R_{СЭП}| \leq 1$.

Реалистичность восприятия $R_{РВ}$, в смысле меры сохранения распределений яркости исходной информации на комбинируемых изображениях, определяется как произведение коэффициентов корреляции $\rho(I_1, I_C)$ и $\rho(I_2, I_C)$ яркости пикселей комбинированного изображения I_C с его составляющими I_1 и I_2 :

$$R_{РВ} = \rho(I_1, I_C)\rho(I_2, I_C) \in [-1, 1], \quad (16)$$

$$\rho(I_j, I_C) = \frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (I_j[x, y] - \overline{I_j[x, y]})(I_C[x, y] - \overline{I_C[x, y]})}{\sqrt{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (I_j[x, y] - \overline{I_j[x, y]})^2 \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (I_C[x, y] - \overline{I_C[x, y]})^2}},$$

$$j \in \{1, 2\}, \quad (17)$$

$$\overline{I_t[x, y]} = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I_t[x, y], t \in \{1, 2, C\}, \quad (18)$$

где M и N - размеры изображений в пикселях. В случае комплексирования цветных изображений выбирается минимальное значение $R_{РВ}$ по всем цветовым каналам.

Согласно (12-18), значения относительного объёма различимой информации находятся в пределах от -1 до 1. То есть величина $V_{Общ}$ может принимать отрицательные значения, что можно трактовать как мнимый объём или как ложную (искажённую) информацию. Методы комплексирования, приводящие к значениям $V_{Общ} \leq 0$, следует также считать неудачными и в дальнейшем исключать из рассмотрения. Равенство $V_{Общ} = 1$ соответствует

теоретическому пределу – полному сохранению различительной информации на комбинированном изображении от его составляющих. Равенство $V_{\text{общ}} = 0$ соответствует полной потере хотя бы одного из базисных информационных признаков при комплексировании.

Сравнение методов комплексирования и способов оценки эффективности комплексирования

Ниже приводится сравнительный анализ количественной оценки информативности комбинированных изображений, полученных разными способами комплексирования, в двуспектральной ТВ-ТпВ СУВ. Для сравнения были выбраны известные способы комплексирования по открытым публикациям:

- 1) простое усреднение,
- 2) трёхмерный фильтр нижних частот (3D ФНЧ) [2],
- 3) на основе вейвлет-преобразования [4],
- 4) метод добавления отличий [4],
- 5) на основе пирамиды Лапласианов (8 уровней) [4],
- 6) на основе оценки «информативности» [4],
- 7) с анализом нижних частот (НЧ) и верхних (ВЧ) изображений [4],
- 8) с приоритетом ТВ канала [5],
- 9) метод локального синтеза [7],
- 10) на основе диффузной морфологической фильтрации [9],
- 11) на основе гистограммной морфологической сегментации [10],
- 12) метод главных компонент (МГК) [13].
- 13) на основе преобразования цветовых пространств $RGB \leftrightarrow YCrCb$ [16],

При сравнении использовались 17 пар ТВ и ТпВ цветных и монохромных изображений с различными сюжетами. Для получения достоверного результата все изображения были приведены к одному яркостному диапазону со значениями яркости от 0 до 255 на канал. На рис. 2 представлена диаграмма сравнения информативности комбинированных изображений по усреднённым значениям величин оценок по методам комплексирования на данной выборке. Зелёным

цветом отображены оценки, полученные по предлагаемой метрике (11-18), назовём её «относительный объём восприятия»; оранжевым – полученные с помощью известной метрики Пиеллы [7, 9], вычисляемой по формулам (4-10); синим обозначены результаты измерения разности энтропии по формулам (2-3).

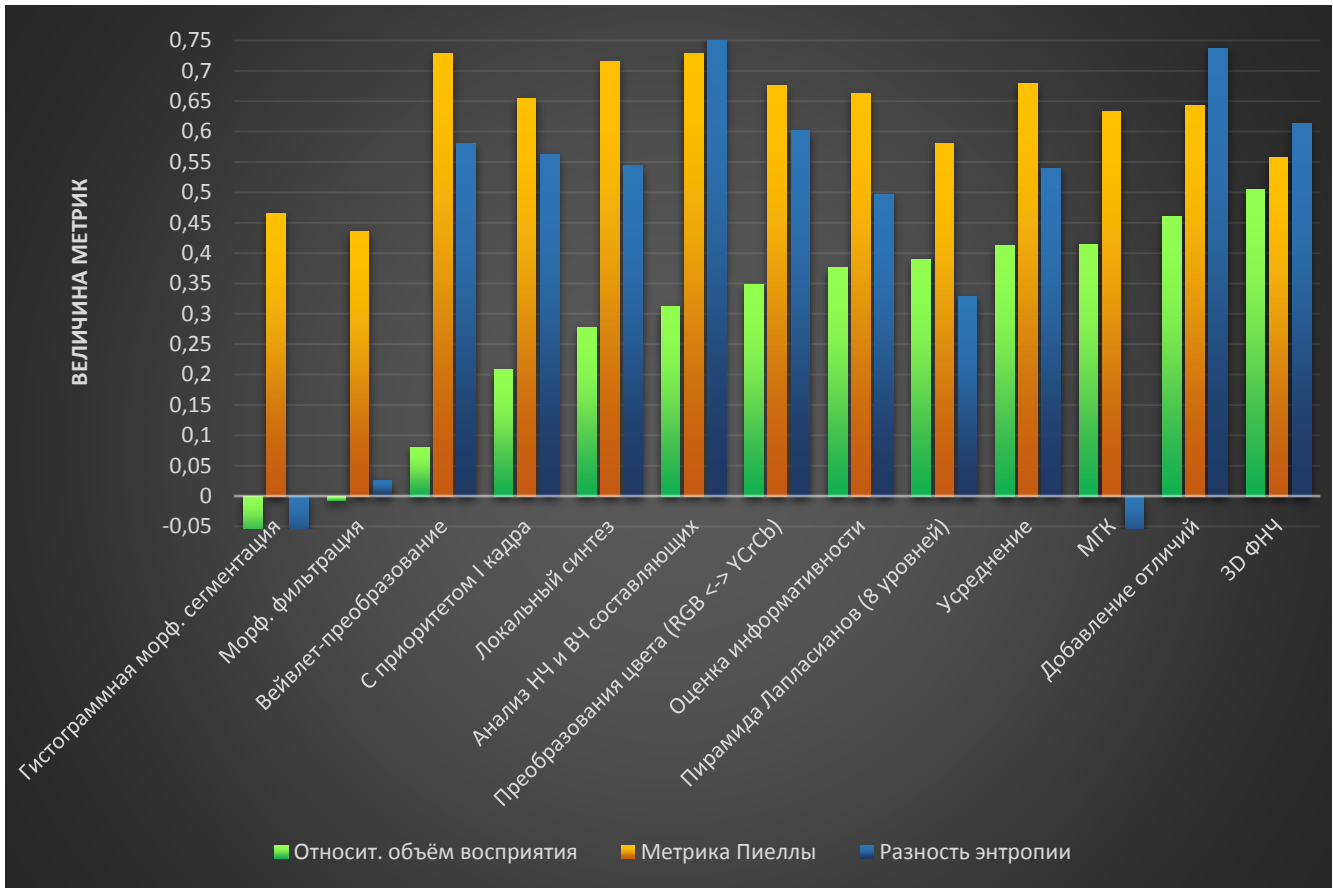


Рис. 2. Сравнение эффективности методов комплексирования изображений

Проведём сопоставительный анализ полученных оценок для разных методов комплексирования с их визуальным восприятием. На рис. 3 представлены результаты комплексирования исходных ТВ (рис. 3а) и ТпВ (рис. 3б) изображений в двух зональной ТВ-ТпВ СУВ. На рис. 3в показано комбинированное изображение, полученное с помощью метода «на основе анализа НЧ и ВЧ изображений», наилучшее с точки зрения, как метрики «разность энтропии», так и метрики Пиеллы (рис. 2). Визуально же мы видим, что на нём полностью утрачены холодные ТпВ контрасты, что не соответствует выбранному критерию информативности. Этот факт можно объяснить тем, что метрика Пиеллы, разработанная для абстрактной оценки «качества»

комбинированных изображений, не учитывает реальные информационные признаки, связанные с их визуальным восприятием. Оценка по энтропии также не учитывает особенности визуального восприятия, так как не оценивает пространственные зависимости элементов изображения. С другой стороны, на рис. 3г показано комбинированное изображение, полученное с помощью 3D ФНЧ, которое является наилучшим с точки зрения предложенной оценки (рис. 2). При этом визуально оно полностью удовлетворяет выбранному критерию информативности, т. е. имеет высокую детальность и на нём практически полностью сохраняется ТпВ контраст.



а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Примеры визуального сопоставления методов комплексирования:
а) – исходное ТВ изображение с высокой детальностью, б) – исходное ТпВ изображение с ТпВ контрастом, в) – комбинированное изображение на основе анализа НЧ и ВЧ изображений, г) – комбинированное изображение трёхмерным ФНЧ

Предлагаемый авторами метод количественной оценки относительного объёма различаемой информации позволяет не только численно оценить общую результативность того или иного алгоритма комплексирования, но и проанализировать характер его работы по каждому из измерений объёма (см. рис. 1). На рис. 4 по выборке из 17-ти различных сюжетов представлено сравнение вышеупомянутых способов комплексирования в плоскости ($R_{СЭП} - R_{РВ}$), т.е. «ТпВ контраст – реалистичность восприятия». Диаметр шариков характеризует детальность ($R_{ПД}$) изображения.

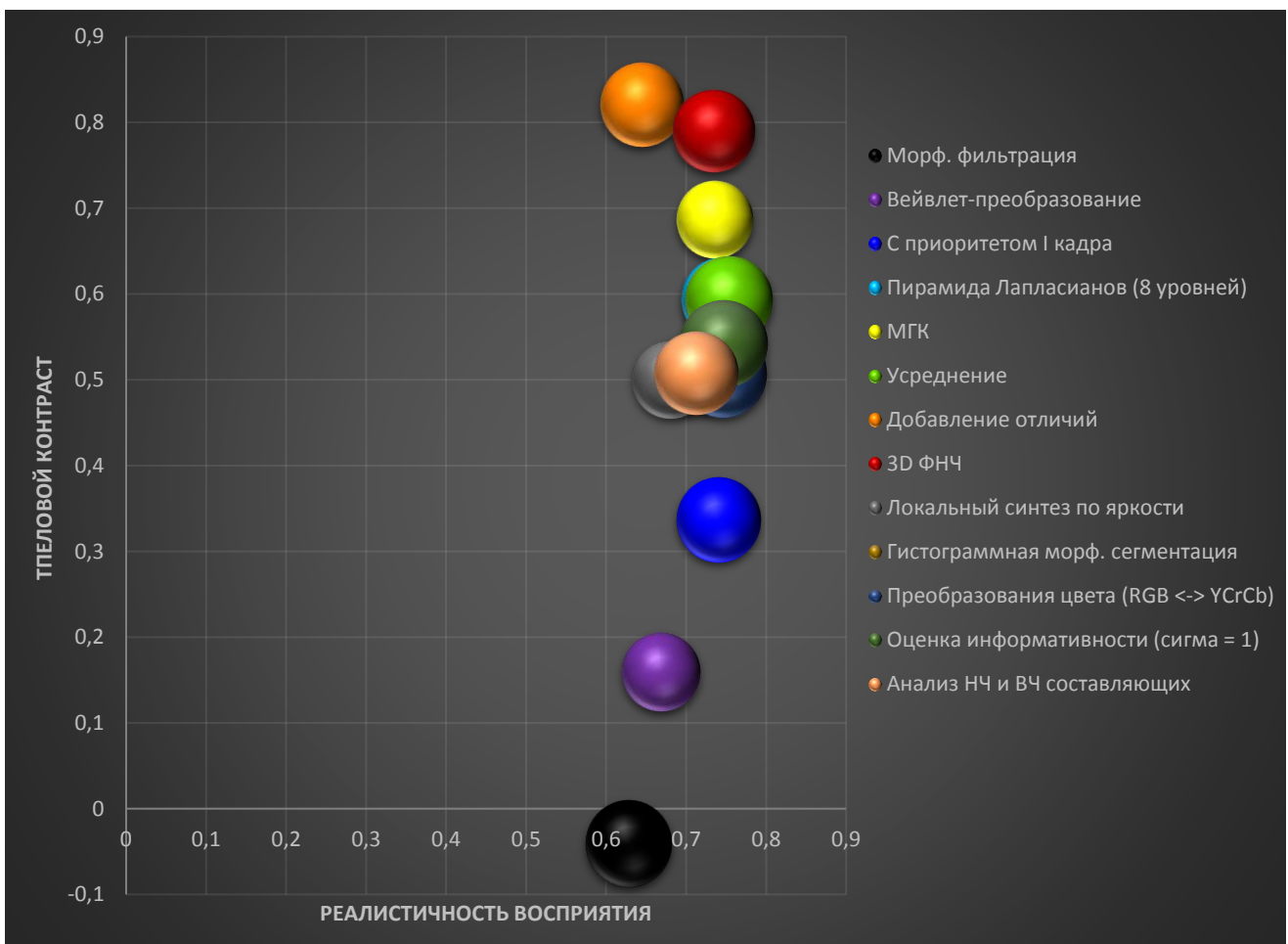


Рис. 4. Признаковая характеристика методов, диаметр шариков отвечает за детальность, по методам она слабо различается

Из рис. 4 видно, что все сравниваемые методы дают в среднем практически схожую детальность комбинированных изображений, при этом наихудший результат по детальности показал МГК.

К наименее реалистичным методам, которые сильно искажают исходные

распределения яркостей, относятся методы на основе диффузной морфологии, добавления отличий, вейвлет-преобразования, а также локальный синтез по яркости.

Сильно искажают тепловые контрасты (вплоть до отрицательных величин) комплексирование на основе диффузной морфологии, с использованием вейвлет-преобразования и с приоритетом I кадра (ТВ канала), поэтому их практическое использование в СУВ не желательно. Почти одинаково себя показали простое усреднение и комплексирование на основе пирамиды Лапласианов, при том, что последний метод более вычислительно трудоёмок. Имея схожий уровень воспроизведения деталей и хорошую реалистичность восприятия при сохранении тепловых контрастов, наилучшие результаты по сравнению с рассмотренными методами показал трёхмерный ФНЧ, который несущественно отстаёт по данному критерию от метода добавления отличий.

Заключение

Разработана объективная метрика количественной оценки информативности комбинированных изображений, основанная на мере сохранения (искажения) их различительной информации, согласующаяся с визуальным восприятием. Согласно предлагаемой трёхмерной метрике (по трём измерениям: ПП, СЭП и реалистичности восприятия), трёхмерный ФНЧ позволяет формировать более информативные комбинированные изображения. Этот факт можно объяснить тем, что он разработан на основе общей теории дискретизации и восстановления сообщений по их отсчётам с помощью многомерной интерполяции, в то время как остальные методы носят эвристический характер. В рамках отмеченной классификации оценки информативности данных, метрика «относительный объём восприятия» относится к структурно-семантическим подходам, так как оценка производится путём подсчёта элементов визуального сообщения при учёте её ценности и полезности для конечного потребителя.

В заключение отметим, что комплексирование изображений в

мультиспектральных системах может быть и вредным, когда только один из объединяемых каналов содержит полезную информацию. В этой публикации подобные случаи не рассматриваются. Поэтому, руководствуясь полученными наработками, в дальнейшем планируется разработать безэталонную метрику оценки информативности изображений для автоматического выбора наиболее информативных каналов в МСУВ.

Литература

1. Броневи́ч А. Г., Гонча́ров А. В. Аксиоматический подход к измерению информативности знаковых представлений изображений // Известия РАН. Теория и системы управления, 2011, № 1. – С. 54-69.
2. Дрынкин В. Н., Фальков Э. Я., Царёва Т. И. Формирование комбинированного изображения в двухзональной бортовой авиационно-космической системе, сборник трудов конференции ТЗСУ-2012. – С. 33-40, [Электронный ресурс] / URL: http://www.iki.rssi.ru/books/2012_2tz.pdf (дата обращения 13.02.2016 г).
3. Измерение информации. Энтропия [Электронный ресурс] // 2016, URL: <http://spargalki.ru/priborostroenie/35-obrabotka-signalov.html?start=9> (дата обращения 13.02.2016 г).
4. Инсаров В. В. Проблемы построения систем технического зрения, использующих комплексирование информационных каналов различных спектральных диапазонов / Инсаров В. В., Тихонова С. В., Михайлов И. И. – М.: Новые технологии, 2014. – 32 с. (Приложение к журналу "Информационные технологии"; № 3/2014).
5. 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-технич. конф.-семинара. Выпуск 4 / Под ред. Р. Р. Назирова. М.: КДУ, 2011. – С. 45–56.
6. Методы нахождения границ изображения, [Электронный ресурс] // 2011, URL: habrahabr.ru/post/128753/ (дата обращения 07.02.2015 г).
7. *Михеев С. М.* Комплексирование изображений разных диапазонов спектра в

- многоканальных системах наблюдения, автореферат диссертации на соискание учёной степени канд. тех. наук. – М.: 2011, [Электронный ресурс] / URL: <http://www.mai.ru/content/files/index.php?ID=27504> (дата обращения 14.02.2016 г).
8. Подходы к измерению информации [Электронный ресурс] // 2016, URL: <http://informatika.sch880.ru/p18aa1.html> (дата обращения 13.02.2016 г).
 9. Рубис А. Ю., Выголов О. В., Визильтер Ю. В. Морфологическое комплексирование изображений различных спектральных диапазонов, сборник трудов конференции ТЗСУ-2011. – С. 143-148, [Электронный ресурс] / URL: <http://www.iki.rssi.ru/books/2012tz.pdf> (дата обращения 14.02.2016 г).
 10. Рубис А. Ю., Визильтер Ю. В., Горбачевич В.С., Выголов О.В. Алгоритм комплексирования изображений на основе диффузной морфологии, сборник тезисов конференции ТЗСУ-2015. – С. 112-113, [Электронный ресурс] / URL: http://tvcs2015.technicalvision.ru/docs/Сборник_тезисов_ТЗСУ_2015.pdf (дата обращения 14.02.2016 г).
 11. Сагдуллаев Т. Ю., Сагдуллаев Ю. С. Информативность телевизионных изображений в системах видеонаблюдения объектов. – Вопросы радиоэлектроники. Сер. «Техника телевидения», 2009, вып. 2, – С. 41–51.
 12. Садовничий В. А. Космическое земледование: информационно-математические основы / Козодеров В. В., Косолапов В. С., Садовничий В. А. и др.; Ред. Садовничий В. А. – М.: МГУ, 1998. 576 с.
 13. Смагин М. С. Разработка методики синтеза структуры вычислительных устройств слияния изображений, автореферат диссертации на соискание учёной степени канд. тех. наук, – М.: 2008. – С. 11, [Электронный ресурс] / URL: <http://www.ineum.ru/files/51063c/d66487/1a9b7c/000000/aref9.pdf> (дата обращения 14.02.2016 г).
 14. E2VS Displays Potential as Breakthrough Product //Aviation week network, October 2015, [Электронный ресурс] / URL: <http://aviationweek.com/nbaa-2015/e2vs-displays-potential-breakthrough-product> (дата обращения 14.02.2016 г).
 15. Cvejic N., Łoza A., Bull D. and Canagarajah N. A Novel Metric for Performance Evaluation of Image Fusion Algorithms, 2007, [Электронный ресурс] / URL: waset.org/publications/8392/a-novel-metric-for-performance-evaluation-of-image-fusion-

[algorithms](#) (дата обращения 13.02.2016 г).

16. *Guangxin Li*, Image Fusion Based on Color Transfer Technique, 2011, [Электронный ресурс] / URL: <http://www.intechopen.com/books/image-fusion-and-its-applications/image-fusion-based-on-color-transfer-technique> (обращение 14.02.2016 г).
17. Piella G. and Heijmans H. A new quality metric for image fusion, Proceeding of the IEEE International Conference in Image Processing, ICIP-2003, vol. 3, pp. 173-176, 2003.
18. Wang Z. and Bovik A. C. A universal image quality index, IEEE Signal Processing Letters, vol. 9, no. 3, pp. 81-84, 2002.