

Сравнительный анализ энтропийных метрик информативности оптических изображений космических объектов

Тимошенко А.В.^{1,2*}, Кошкаров А.С.^{3}**

¹*Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца,
ул. 8 марта, 10, стр. 1, 127083, Москва, Россия,*

²*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
площадь Шокина, 1, Москва, Зеленоград, 124498, Россия*

³*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
ул. Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Россия*

**e-mail: atimosenko@rti-mints.ru*

***e-mail: vka@mil.ru*

Аннотация

Рассмотрены особенности наблюдения космических объектов наземными оптическими средствами в интересах мониторинга околоземного космического пространства. Обоснована необходимость проведения предварительной отбраковки получаемых изображений перед проведением анализа человеком-оператором. Проведен сравнительный анализ энтропийных метрик информативности пригодных для полутоновых изображений космических объектов. На примере реальных изображений оценена возможность их использования с учетом особенностей зрительного восприятия изображений человеком-оператором.

Ключевые слова: анализ изображений, космический мусор, информативность изображений, зрительное восприятие.

Введение

Обеспечение безопасной эксплуатации пилотируемых орбитальных станций и функционирующих космических аппаратов (КА) невозможно без знания текущей обстановки и анализа эволюции широкого класса космических объектов (КО) искусственного происхождения, находящихся на околоземных орбитах и получивших название космического мусора (КМ) [1]. В дополнение к техногенному засорению околоземного космического пространства (ОКП) существует проблема столкновений с космическими телами естественного происхождения, которая получила название астероидно-кометной опасности [2].

Для мониторинга околоземного космического пространства и наблюдения космическими объектами широко используются наземные оптические средства. В рамках космической деятельности практический интерес представляет наблюдение за космическими экспериментами, проводимыми на МКС, и за КА, находящимися в аварийных режимах, когда радиосвязь с КА потеряна или ограничена. В этих случаях для получения изображений, наблюдаемых КА с разрешением до десятка сантиметров необходимо использовать наземные оптические средства наблюдения со среднеапертурными и крупноапертурными телескопами. Анализ таких изображений космических объектов в большинстве случаев проводится визуально человеком-оператором [3], даже при наличии современного аппарата обработки цифровых изображений. На качество визуального анализа (дешифрирования) большую роль оказывает качество исходных изображений. Ввиду большого объема обрабатываемых данных и большой загрузки операторов существует проблема

предварительной оценки качества изображений космических объектов, согласованная с зрительным восприятием. В настоящей статье проведен сравнительный анализ энтропийных метрик информативности оптических изображений космических объектов с позиций возможностей использования этих метрик для предварительной оценки качества изображений при их отборе для визуального дешифрирования.

Особенности использования наземных оптических средств для мониторинга околоземного пространства

В настоящее время в Российской Федерации создана и функционирует система автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях в околоземном пространстве (АСПОС ОКП) [4,5]. Основной целью создания АСПОС является информационное обеспечение безопасности полетов автоматических КА, а также пилотируемых космических полетов по программам Роскосмоса и международного сотрудничества в условиях техногенного засорения ОКП. Система АСПОС ОКП включает в себя сеть наземных оптических телескопов – экспериментальных оптических пунктов (ЭОП). Помимо ЭОП АСПОС в целях контроля технического состояния КА в аварийных ситуациях и ситуационной осведомленности о состоянии ОКП и находящихся в ОКП космических объектах (действующие КА, отделяемые фрагменты КА и ракет-носителей, а также «молчащие» КА) привлекаются средние крупные оптические телескопы различной ведомственной принадлежности [6-10].

Так, при наблюдении за Международной космической станцией (МКС) с помощью наземных оптических средств получают изображения стыковки и разделения модулей, положения подвижных внешних механических элементов, возможных загрязнений от струй двигательных установок. По полученным изображениям оператор визуально проводит оценку технического состояния узлов и агрегатов станции, а также имеет возможность оценить последствия столкновений с элементами космического мусора.

При получении наземными телескопами изображений [6] КА на низких орбитах ОКП в видимом диапазоне спектра используется естественная подсветка КА Солнцем и Землей. Анализ технического состояния КА, штатных и аварийных ситуаций проводится на основе сравнения эталонных изображений и отражательно-излучательных характеристик поверхностей объектов с полученными ЭОП АСПОС изображениями. Вследствие большого объема накапливаемых данных и невозможности их оперативного визуального дешифрирования необходима предварительная оценка качества полученных изображений. В соответствии с этим необходимо определить критерии информативности и качества изображений КА и других космических объектов, получаемых наземными средствами ЭОП АСПОС, а также привлекаемыми средствами.

Изображения КА, получаемыми наземными оптическими средствами, можно определить как отдельный класс изображений. Они характеризуются достаточно хорошим разделением на собственно объект и фон, при этом яркость фона зависит от времени съемки (дневная, ночная) а яркость объекта от условий освещённости

солнцем в ходе сеанса наблюдения. Получаемые изображения КА имеют сходство с таким классом изображений, как радиолокационные изображения, получаемые радиолокаторами с синтезируемой апертурой. Для изображений этого класса и в настоящее время используется визуальное дешифрирование, что обусловлено тем, что зрительный анализатор в сочетании с мыслительным аппаратом реализует близкую к оптимальной пространственную фильтрацию с адаптивным распознаванием на статистически однородном фоне [11].

Существующие в настоящее время подходы к оценке качества оптических изображений можно разделить на три группы [12]: субъективные, объективные (с эталоном) и безэталонные критерии качества. Поскольку изображения КА обрабатываются преимущественно в процессе визуального дешифрирования, при анализе качества оптических изображений космических объектов необходимо учитывать свойства визуального восприятия оператором полутоновых изображений. С учетом отмеченных особенностей изображений космических объектов и условий зрительного восприятия оценку качества изображений целесообразно проводить в рамках теоретико-информационного подхода [13], относящегося к безэталонным оценкам качества изображений.

В соответствии с теоретико-информационным подходом при неизвестных ракурсах наблюдаемых космических объектов на низких орбитах ОКП необходимо обеспечить получение максимального количества семантической информации [13]. В рассматриваемом случае количество семантической информации на полутоновых изображениях космических объектов, характеризуемых равномерным

распределением фона, определяется количеством перепадов яркости (количеством границ между пикселями) в области зарегистрированного изображения объекта. Для определения указанных характеристик целесообразно использовать свойства гистограммы изображения и рассчитываемых на ее основе энтропийных метрик информативности изображений.

Выбор и оценка энтропийных метрик информативности полутоновых изображений

Для обработки человеком-оператором все изображения, полученные наземными оптическими средствами с адаптивной оптической системой подвергаются постобработке [14-17]. В изоплатическом приближении интенсивность полученного адаптивной оптической системой изображения (i) может быть представлена как свертка исходного распределения в пространстве объектов (o) с функцией рассеяния точки (PSF) с добавлением шумового члена (n):

$$i(\vec{r}) = o(\vec{r}) * PSF + n(\vec{r}). \quad (1)$$

Наибольшую эффективность в уточнении фазового распределения полутоновых изображений космических объектов получили нелинейные итерационные методы слепой деконволюции, основанные на максимизации энтропийных мер [11]. В классе таких задач энтропию представляют как:

$$H = \iint f[i(\vec{r})] d\vec{r} \quad (2)$$

где f – функционал для расчета энтропийной метрики. В зависимости от используемой метрики требуется максимизация или минимизация функционала. Таким образом актуальной задачей является поиск наиболее рациональных

функционалов расчета энтропийных метрик, для использования при обработке полутоновых изображений, получаемых наземными оптическими средствами.

Для вычисления количественных оценок качества полутоновых изображений космических объектов будем использовать метрики информативности на основе гистограммы, как одного из показателей качества изображения хорошо согласующегося с техникой визуального дешифрирования. Гистограмма наблюдаемого изображения определяется в виде

$$p(k) = N_k / N, \quad (3)$$

где $p(k)$ – распределение градаций яркости (уровней полутонового изображения) или гистограмма наблюдаемого изображения; $k=0,1,2\dots m$; N_k – число появлений на изображении пикселей k -уровня градации яркости; N – общее элементов разрешения изображения.

Тогда для полутоновых изображений возможно определение метрик информативности на основе оценки энтропии. В работах [18,19] показано, что использование энтропийных мер информации целесообразно для определения рациональных подходов распознавания изображений по семантической информации при визуальном восприятии. В работе [13] обосновано использование энтропийных мер как задачи оценивания плотностей распределения вероятностей. В случае известных моментов случайного распределения яркостей пикселей изображения – оценка энтропии по Шеннону является наименее смещенной из всех возможных оценок, что также согласуется с зрительным восприятием качества изображения. Однако она не отражает пространственной структуры изображений. Поэтому

рассмотрим ряд других информационных метрик для определения энтропии, основанных также на работе с гистограммой яркости пикселей исходного изображения. При этом их использование для оценки информативности изображений, полученных наземными оптическими средствами, не распространено. К ним относятся такие как: энтропия Капюра, энтропия Вайда, энтропия Рейна, энтропия Хаварда-Чарвата и энтропия Цалиса.

За исходную оценку информативности изображения космического объекта примем оценку первого порядка энтропии по Шеннону:

$$\tilde{H}_{Ш} = -\sum_{k=1}^m p(k) \log_2(p(k)) \quad (4)$$

и сравним с ней оценку информативности изображения космического объекта с использованием других энтропийных метрик.

Оценка энтропии изображения по Капюру определяется выражением [17-21]

$$\tilde{H}_K = \left(\frac{\sum_{k=1}^m p(k)^{\alpha+\beta-1}}{\sum_{k=1}^m p(k)^\beta} \right) (2^{1-\alpha} - 1)^{-1} \quad (5)$$

где добавочные коэффициенты α и β введены для регулировки чувствительности к форме распределения вероятности.

Частным случаем энтропии Капюра для параметра $\beta = 1$ является энтропия Вайда [20-25]. Она используется для ускоренного вычисления энтропии Капюра и определяется выражением

$$\tilde{H}_B = \left(\frac{\sum_{k=1}^m p(k)^\alpha}{\sum_{k=1}^m p(k)} \right) (2^{1-\alpha} - 1)^{-1} \quad (6)$$

Энтропия Реньи [20-22] является обобщением для определения характеристик неопределенности или случайности системы. Она определяется выражением

$$\tilde{H}_p = \log_2 \left(\sum_{k=1}^m p(k)^\alpha \right) \frac{1}{(1-\alpha)} \quad (7)$$

при этом соблюдается ограничение на параметр $\alpha \neq 1, \alpha > 0$

И энтропия Хаварда-Чарвата [20-25] степени α определяется выражением

$$\tilde{H}_{хч} = \left(\sum_{k=1}^m p(k)^\alpha - 1 \right) \frac{1}{(2^{1-\alpha} - 1)} \quad (8)$$

Энтропия Цалиса [20-25] определяется выражением


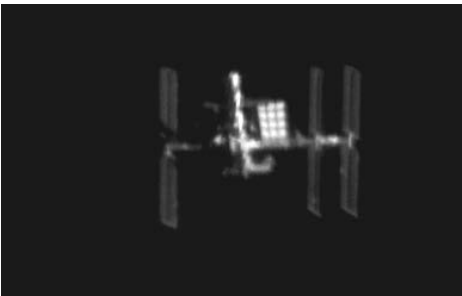
$$\tilde{H}_ц = \left(1 - \sum_{k=1}^m p(k)^\alpha \right) \frac{1}{(\alpha - 1)} \quad (9)$$

Таким образом нами определены ранее не использовавшиеся в задаче постдетекторной обработки полутоновых изображений космических объектов энтропийные метрики. Используя формулы (4) - (9) возможно провести качественную оценку информативности изображений космических объектов, получаемых наземными высокоразрешающими оптическими средствами. Полученные результаты позволят предварительно оценить применимость рассмотренных энтропийных метрик для отбраковки изображений на стадии предварительной отбраковки при отборе изображений подлежащих постдетекторной обработке типа слепой деконволюции и в дальнейшем поступающих оператору для визуального дешифрования и распознавания типа космического объекта.

Одним из основных объектов наблюдения и контроля станций ЭОП АСПОС является МКС. Как объект наблюдения, МКС характеризуется большими геометрическими размерами, сложной модульной конструкцией с большим количеством выносных элементов. Поэтому в качестве тестовых изображений будем использовать изображения МКС, полученные наземными оптическими средствами с различным визуальным качеством. Выбранные изображения представлены в таблице 1.

Таблица 1

Общий вид и характеристики используемых тестовых изображений

№ п/п	Условия получения и описание	Изображение	Размер, пиксели	Размер, кБ	Глубина цвета
3.		«МКС-1» Получено ЭОП без использования адаптивной оптической системы	1017x597	1780	24
4.		«МКС-2» Получено ЭОП с использованием адаптивной оптической системы	1043x737	2255	24

Одним из основных объектов наблюдения и контроля станций ЭОП АСПОС является МКС. Как объект наблюдения, МКС характеризуется большими

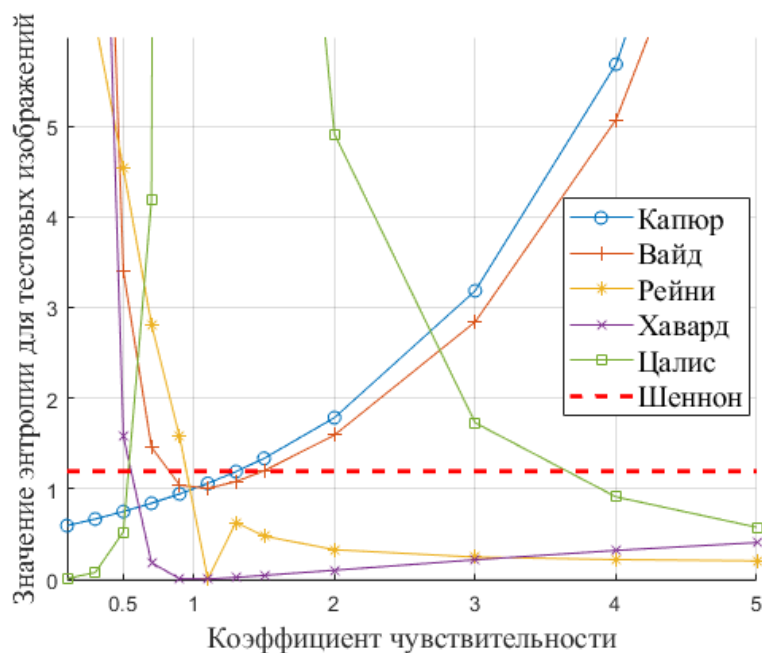
геометрическими размерами, сложной модульной конструкцией с большим количеством выносных элементов. Поэтому в качестве тестовых изображений будем использовать изображения МКС, полученные наземными оптическими средствами с различным визуальным качеством. Выбранные изображения представлены в таблице 1.

Для расчета энтропийных метрик информативности для рассматриваемого класса полутоновых изображений космических объектов были исследованы зависимости значения энтропии, определяемые выражениями (4)-(9), для тестовых изображений №1 и №2, в зависимости от параметра чувствительности α . Визуальное качество тестовых изображений оценивалось субъективно: изображение №1 – размытое изображение полученное без использования адаптивной оптической системы (плохое качество), изображение №2 – резкое изображение полученное при компенсации атмосферных фазовых искажений (хорошее качество). Анализировалась применимость предложенных метрик энтропии для определения степени пригодности для дальнейшей постобработки изображений. Оценка качества визуального восприятия человеком-оператором изображения интерпретировалась как различимость и наличие мелких деталей изображения.

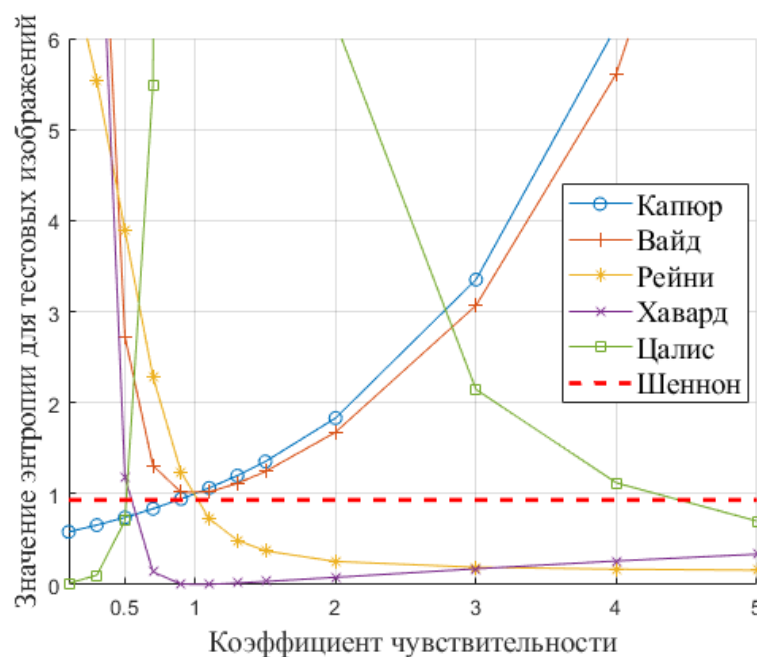
На рисунке 1 приведены расчетные графики зависимости энтропийных мер информативности H от параметра чувствительности α для представленных в таблице 1 тестовых изображений МКС. По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

Классическое определение энтропии по Шеннону $H_{Ш}$ для тестовых изображений МКС дало обратный относительно зрительного восприятия результат. Более резкое и детальное тестовое изображение №2 получило энтропийную оценку информативности ниже чем размытое тестовое изображение №1. Это позволяет говорить о том, что использование такой метрики для решения рассматриваемой задачи не оправдано.

Энтропийные метрики информативности Хаварда-Чарвата $H_{ХЧ}$ и Реньи H_R являются обратно пропорциональными и достигают схожих значений в окрестности значения параметра чувствительности $\alpha=3$. При этом оба значения энтропии $H_{ХЧ}$ и H_R



a)



б)

Рис.1. Графики зависимости энтропийных мер информативности H от параметра чувствительности α для а) тестового изображения «МКС-1» и б) тестового изображения «МКС- 2»

оказываются меньше значения энтропии $H_{Ш}$ и слабо реагируют на разность зрительного восприятия рассмотренных тестовых изображений МКС.

Значения энтропийных метрик энтропии Капюра H_K и энтропии Вайда H_B имеют идентичный характер поведения для обоих тестовых изображений. Наблюдается их пропорциональный рост значений в соответствии с увеличением коэффициента чувствительности в диапазоне от $\alpha=0,1$ до $\alpha=5$. Значения энтропии H_K и H_B на всем диапазоне исследования показывают превышение значений метрики энтропии $H_{Ш}$ для соответствующего тестового изображения МКС, что в целом совпадает субъективной оценкой качества зрительного восприятия.

Наибольшую чувствительность, коррелированную с качеством зрительного восприятия при оценке информативности тестовых полутоновых изображений, на наш взгляд, имеет метрика энтропии Цалиса $H_{Ц}$. Ее значения однозначно превышают значения энтропии $H_{Ш}$ в широком диапазоне коэффициента чувствительности α , что совпадает с оценкой качества зрительного восприятия. При этом характер нарастания и убывания значений энтропии $H_{Ц}$ имеет более сложный характер, чем у остальных рассмотренных энтропийных метрик, что позволит в дальнейшем определить более конкретные пороговые значения для предварительной отбраковки неинформативных для визуального дешифрирования «сырых» изображений.

На основе общего рассмотрения зависимости метрик энтропии от коэффициента чувствительности также можно сделать вывод о том, что после значения $\alpha=3$ идет либо бесконечное нарастание значений энтропии ($H_{ХЧ}$, $H_{К}$, $H_{В}$), либо убывание значений энтропии ($H_{Р}$, $H_{Ц}$). Поэтому использование значений параметра чувствительности энтропийных метрик $\alpha>3$ нецелесообразно.

При дальнейшей работе с банком «стандартизованных» изображений возможно определить более четкие границы применимости отдельных видов энтропийных метрик. На данном этапе возможно сделать два вывода:

1. На базе кривых получаемых при расчете значений энтропий по формулам (4)-(9) возможно проведение их нормализации, то есть получение обобщенной кривой информативности по типу количества информации Мура.

2. Различный характер поведения получаемых кривых позволит выбрать наиболее подходящий для адаптивной сегментации изображений, что востребовано, например, при обработке аэрокосмической съемки.

Заключение

В статье рассмотрены особенности наблюдения космических объектов наземными оптическими средствами в интересах мониторинга околоземного космического пространства и на примере тестовых изображений МКС проведен сравнительный анализ метрик количественной оценки информативности полутоновых изображений космических объектов, получаемых наземными оптическими средствами. Рассмотрены различные нешенноновские оценки энтропии изображений и проанализирована их согласованность с субъективной оценкой визуального качества изображений. В рамках проведенных исследований сделаны выводы о применимости и нежелательности использования различных энтропийных метрик и их согласованности со структурно-семантическим подходом визуального восприятия изображений человеком-оператором.

Библиографический список

1. Вениаминов С.С. Космический мусор - угроза человечеству. - М.: Изд-во ИКИ РАН, 2013. – 312 с.
2. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / под. ред. Б.М. Шустова, Л.В. Рыхловой. – М.: Физматлит, 2010. – 384 с.
3. Марр Д. Зрение. Информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов. – М.: Радио и связь, 1987. - 400 с.

4. Аксенов А.Ю., Олейников И.И., Покучаев В.Н., Пнырин В.В. Автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве // Полет. 2013. № 10. С. 11 – 16.
5. Молотов И.Е., Воропаев В.А., Юдин А.Н. и др. Комплексы электронно-оптических средств для мониторинга околоземного космического пространства // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2017. Т. 14. № 4-2. С. 110 - 116.
6. Шилин В.Д., Лукьянов А.П., Молотов И.Е., Агапов В.М. и др. Проблемы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве. Планы и возможности. Роль оптических наблюдений // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2013. Т. 10. № 4-2. С. 171 – 175.
7. Зиновьев Ю.С., Мишина О.А., Глущенко А.А. Перспективы развития оптических телескопов наземного и космического базирования // Труды МАИ. 2018. № 101.
URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=96976>
8. Кириченко Д.В., Клейменов В.В., Новикова Е.В. Крупногабаритные оптические телескопы // Известия вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 7. С. 589 - 602.
9. Бельский А.Б., Здор С.Е., Колинко В.И., Яцкевич Н.Г. Новый подход к разработкам оптико-электронных средств мониторинга околоземного космического пространства // Оптический журнал. 2009. № 8. С. 22 - 28.
10. Мальцев Г.Н. Организация оптических наблюдений и обработки данных о «космическом мусоре» // Оптический журнал. 2001. № 10. С. 65 - 69.
11. Верба В.С. и др. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.

12. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
13. Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
14. Чен Ш.-К. Принципы проектирования систем визуальной информации: Пер. с англ. - М.: Мир, 1994. - 408 с.
15. Шигаев А.К., Лучкин Р.С., Машкин М.Н., Тюрин В.С. Робастный алгоритм выделения изображения космического объекта на снимке невысокого качества // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=58775>
16. Pantin E., Starck J.-L. Deconvolution of astronomical images using the multiscale maximum entropy method // Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 1996, vol. 118, no. 3, pp. 575 – 585. DOI: <https://doi.org/10.1051/aas:1996221>
17. Starck J.-L., Murtagh F., Querre P., Bonnarel F. Entropy and astronomical data analysis: Perspectives from multiresolution analysis // Astronomy and Astrophysics, 2001, vol. 368, pp. 730 – 746. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20000575>
18. N. Ageorges, C. Dainty. Laser Guide Star Adaptive Optics for Astronomy, Springer Science & Business Media, 2000, 340 p.
19. Казбеков Б.В. Совмещение инфракрасных изображений с изображениями видимого диапазона в задачах идентификации подвижных наземных целей с борта беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35912>

20. Цыцулин А.К., Адамов Д.Ю., Манцветов А.А., Зубакин И.А. Твердотельные телекамеры: накопление качества информации. – СПб.: Изд-во ЛЭТИ, 2014. - 272 с.
21. Чумак О.В. Энтропии и фракталы в анализе данных. - М. - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2011. - 164 с.
22. Patni G.C., Jain K.C. Axiomatic Characterization of Some non-additive measures of Information // *Metrika: International Journal for Theoretical and Applied Statistics*, 1977, vol. 24, issue 1, pp. 23 – 34.
23. Amelia Carolina Sparavigna. On the Role of Tsallis Entropy in Image Processing // *International Scientific Research Journal, IRJ Science*, 2015, no. 1 (6), pp.16 - 24.
24. A. Ramírez, A. Raúl Hernández, G. Herrra, I. Domínguez. Determining the Entropic Index q of Tsallis Entropy in Images through Redundancy // *Entropy*, 2016, no. 18, pp. 299 – 313, available at: <https://doi.org/10.3390/e18080299>
25. M.S.R. Naidua, P.Rajesh Kumar, K. Chiranjeevic. Shannon and Fuzzy entropy based evolutionary image thresholding for image segmentation // *Alexandria Engineering Journal*, 2018, vol. 57, issue 3, pp. 1643 – 1655. DOI: [10.1016/j.aej.2017.05.024](https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.05.024)

Comparative analysis of entropic metrics of space objects optical images informativity

Timoshenko A.V.^{1,2*}, Koshkarov A.S.^{3}**

¹*Radiotechnical Institute named after academician A.L. Mintz,
10-1, str. 8 March, Moscow, 127083, Russia*

²*National Research University of Electronic Technology,
1, sq. Shokina, Moscow, Zelenograd, 124498, Russia*

³*Military and space academy named after A.F. Mojaiskiy,
13, Zdanovskaya, Saint-Petersburg, 197198, Russia*

**e-mail: atimosenko@rti-mints.ru*

***e-mail: vka@mil.ru*

Abstract

The existing tendency to the intensity increasing of near-Earth space employing by ever-increasing number of states, expanding spectrum and increasing complexity level of the space operations, the expected deployment of the extra-large satellite systems for group space missions are increasing the risks for the space activities associated with technogenic contamination. Optical images are the most informative type of information on the situation in outer space. The article brings up issues concerning preliminary images rejection obtained by the ground-based optical means, unfit for the human operator recognition. Specifics of the space objects surveillance by the ground-based optical means with account for dangers for national space vehicles and manned flights safety are considered. Estimation of the conventional network of optical means is performed. The necessity of performing preliminary rejection of the images, being obtained, prior to the analysis performing by the human operator is substantiated. It is shown that the main post-detector processing method

is blind deconvolution of images. The work with the functional of the entropy of the image being restored is required while deconvolution operations performing. Entropy metrics by Shannon, Tsallis, Capture and Rennie were selected for the study. A comparative analysis of the entropy metrics of informativity, which application is in demand when computing the deconvolution functional, was performed. Test images with different visual quality were selected. On the example of real images a possibility of their employing with account of images visual perception by the human operator was estimated. Within the framework of the conducted studies inferences were drawn on the applicability of employing various entropy metrics and the degree of their consistency with the structural-semantic approach of visual perception of images by a human operator. The trends of future studies on determining the generalized metric for the images of such class, as well as applicability of entropy metrics to the processing satellite-obtained data on the remote Earth monitoring were determined.

Keywords: images analysis, space debris, images informativity, visual perception.

References

1. Veniaminov S.S. *Kosmicheskii musor - ugroza chelovechestvu* (Space debris is a threat to humanity), Moscow, Izd-vo IKI RAN, 2013, 312 p.
2. Shustov B.M., Rykhlova L.V. *Asteroidno-kometnaya opasnost': vchera, segodnya, zavtra* (Asteroid and comet danger: yesterday, today, tomorrow), Moscow, Fizmatlit, 2010, 384 p.

3. Marr D. *Zrenie. Informatsionnyi podkhod k izucheniyu predstavleniya i obrabotki zritel'nykh obrazov* (Vision. Informational approach to studying visual images representation and processing), Moscow, Radio i svyaz', 1987, 400 p.
4. Aksenov A.Yu., Oleinikov I.I., Pokuchaev V.N., Pnyrin V.V. *Polet*, 2013, no. 10, pp. 11 – 16.
5. Molotov I.E., Voropaev V.A., Yudin A.N. et al. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov ChES*, 2017, vol. 14, no. 4-2, pp. 110 - 116.
6. Shilin V.D., Luk'yanov A.P., Molotov I.E., Agapov V.M. et al. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov ChES*, 2013, vol. 10, no. 4-2, pp. 171 – 175.
7. Zinov'ev Yu.S., Mishina O.A., Glushchenko A.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 101, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=96976>
8. Kirichenko D.V., Kleimenov V.V., Novikova E.V. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 2017, vol. 60, no. 7, pp. 589 - 602.
9. Bel'skii A.B., Zdor S.E., Kolin'ko V.I., Yatskevich N.G. *Opticheskii zhurnal*, 2009, no. 8, pp 22 - 28.
10. Mal'tsev G.N. *Opticheskii zhurnal*, 2001, no. 10, pp. 65 - 69.
11. Verba V.S. et al. *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* (Space-based ground survey radar systems), Moscow, Radiotekhnika, 2010, 680 p.
12. Gonsales R., Vuds R., Eddins S. *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii v srede MATLAB* (Digital image processing in MATLAB environment), Moscow, Tekhnosfera, 2006, 616 p.
13. Vasilenko G.I., Taratorin A.M. *Vosstanovlenie izobrazhenii* (Image Recovering), Moscow, Radio i svyaz', 1986, 304 p.

14. Chen Sh.-K. *Printsipy proektirovaniya sistem vizual'noi informatsii* (Principles of Visual Information Systems Design), Moscow, Mir, 1994, 408 p.
15. Shigaev A.K., Luchkin R.S., Mashkin M.N., Tyurin V.S. *Trudy MAI*, 2015, no. 82, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=58775>
16. Pantin E., Starck J.-L. Deconvolution of astronomical images using the multiscale maximum entropy method, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 1996, vol. 118, no. 3, pp. 575 – 585. DOI: <https://doi.org/10.1051/aas:1996221>
17. Starck J.-L., Murtagh F., Querre P., Bonnarel F. *Astronomy and Astrophysics*, 2001, vol. 368, pp. 730 – 746. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20000575>
18. N. Ageorges, C. Dainty. *Laser Guide Star Adaptive Optics for Astronomy*, Springer Science & Business Media, 2000, 340 p.
19. Kazbekov B.V. *Trudy MAI*, 2013, no. 65, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35912>
20. Tsytsulin A.K., Adamov D.Yu., Mantsvetov A.A., Zubakin I.A. *Tverdotel'nye telekamery: nakoplenie kachestva informatsii* (Solid-state cameras: accumulation of information quality), Saint-Petersburg, Izd-vo LETI, 2014, 272 p.
21. Chumak O.V. *Entropii i fraktaly v analize dannykh* (Entropy and fractals in data analysis), Moscow-Izhevsk, NITs «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2011, 164 p.
22. Patni G.C., Jain K.C. Axiomatic Characterization of Some non-additive measures of Information, *Metrika: International Journal for Theoretical and Applied Statistics*, 1977, vol. 24, issue 1, pp. 23 – 34.

23. Amelia Carolina Sparavigna. On the Role of Tsallis Entropy in Image Processing, *International Scientific Research Journal*, IRJ Science, 2015, no. 1 (6), pp.16 - 24.
24. A. Ramírez, A. Raúl Hernández, G. Herra, I. Domínguez. Determining the Entropic Index q of Tsallis Entropy in Images through Redundancy, *Entropy*, 2016, no. 18, pp. 299 – 313, available at: <https://doi.org/10.3390/e18080299>
25. M.S.R. Naidua, P.Rajesh Kumar, K. Chiranjeevic. Shannon and Fuzzy entropy based evolutionary image thresholding for image segmentation, *Alexandria Engineering Journal*, 2018, vol. 57, issue 3, pp. 1643 – 1655. DOI: [10.1016/j.aej.2017.05.024](https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.05.024)