

Джанджгава Гиви Ивлианович – ОАО «Раменское Приборостроительное Конструкторское Бюро»; e-mail: L_Avgustov@rpkb.ru; 140103, Московская область, г. Раменское, ул. Гурьева, 2; тел.: 84955562393; д.т.н.; профессор; президент; генеральный конструктор.

Герасимов Геннадий Иванович – тел.: 84959925695; главный конструктор.

Августов Лев Иванович – тел.: 84964640473; к.т.н.; главный специалист.

Dhzandzhgava Gbvi Ivlianovich – JSC "Ramenskoye Design Company"; e-mail: L_Avgustov@rpkb.ru; 2, Gur'eva street, Ramenskoe, Moscow region, 140103, Russia; phone: +74955562393; dr. of eng. sc.; professor; president; general designer.

Gerasimov Genadij Ivanovich – phone: +74959925695; chief designer.

Avgustov Lev Ivanovich – phone: +74964640473; cand. of eng. sc.; chief specialist.

УДК 778.35:629.7

Ю.Г. Веселов, А.С. Островский, Н.И. Сельвесюк, И.В. Красавин

**ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ ЦИФРОВЫХ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ЛИНЕЙНЫХ
СИСТЕМ***

Представлен аналитический метод оценки предельного разрешения цифровых оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли видимого и инфракрасного диапазонов, основанный на применении теории линейных оптико-электронных систем.

Предложен математический аппарат для реализации оценки возможностей цифровых оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли видимого и инфракрасного диапазонов по критерию максимального значения их предельного разрешения.

Получены зависимости предельных возможностей таких систем от характеристик их аппаратного обеспечения и проведен их детальный анализ.

Определены основные подходы к синтезу параметров цифровых оптико-электронных систем.

Оптико-электронные системы; теория линейных систем; предельное разрешение.

Ju.G. Veselov, A.S. Ostrovskiy, N.I. Selvesyuk, I.V. Krasavin

**ESTIMATION OF THE LIMITING RESOLUTION OF DIGITAL
OPTOELECTRONIC SYSTEMS OF REMOTE SENSING USING THE
THEORY OF LINEAR SYSTEMS**

This paper presents an analytical method of estimation of the limiting resolution of digital electro-optical systems of remote sensing of the visible and infrared ranges, based on the theory of linear electro-optical systems.

A mathematical apparatus for the implementation of digital electro-optical systems for remote sensing of the visible and infrared range capabilities estimation by limiting their maximum resolution.

The dependencies of limiting capabilities of such systems on the characteristics of the hardware were obtained and a detailed analysis was performed.

The main approaches to the synthesis parameters of digital electro-optical systems were defined.

Optoelectronic systems; the theory of linear systems; limiting resolution.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 11-08-00850.

Оценка предельных возможностей цифровых оптико-электронных систем (ЦОЭС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является одним из перспективных направлений их исследования. Она не только позволяет проводить сравнение разнотипных ЦОЭС, но и помогает формировать научно-техническую политику развития современных технических средств оптико-электронного ДЗЗ (спланировать распределение сил и средств при разработке их стратегии развития).

Для оценки потенциальных возможностей ЦОЭС ДЗЗ предлагается метод расчета предельного разрешения. Его суть заключается в следующем: с использованием аналитического метода определения разрешающей способности [1] оценивается предельное разрешение объектива ЦОЭС (предельное дифракционное разрешение) R_o для различных значений $f/d_{вх}$ и предельное разрешение, обусловленное размерами элементарного приемника излучения (пиксела) многоэлементного приемника излучения (МПИ) (предельное геометрическое разрешение) $R_{эпи}$ и как следствие предельное разрешение, обусловленное обоими факторами $R_{рпр}$. Таким образом, предельное разрешение определяет физический предел разрешения оптики и приемника излучения.

Определение предельного разрешения объектива ЦОЭС ДЗЗ видимого диапазона (ВД) R_o осуществляется с использованием выражения для функции передачи модуляции (ФПМ), учитывающей только дифракционные явления [2]:

$$T_o(N) = \frac{2}{\pi} \cdot \left(\arccos\left(\frac{\lambda \cdot f_{об} \cdot N}{d_{вх}}\right) - \left(\frac{\lambda \cdot f_{об} \cdot N}{d_{вх}}\right) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda \cdot f_{об} \cdot N}{d_{вх}}\right)^2} \right),$$

где $f_{об}$ – фокусное расстояние объектива; λ – длина волны падающего монохроматического излучения; $d_{вх}$ – диаметр входного отверстия объектива, а также пороговой модуляции глаза ($K_r = 0,02$) в качестве пороговой модуляционной характеристики.

Расчет предельного разрешения, обусловленного размерами элементарного приемника излучения МПИ (предельное геометрическое разрешение) $R_{эпи}$, производится на основе формул ФПМ элементарного приемника излучения МПИ:

$$T_{эпи}(N) = \text{sinc}(A_{пи} \cdot \pi \cdot N),$$

где $A_{пи}$ – размер элементарного приемника излучения.

Определение предельного разрешения, обусловленного обоими факторами, осуществляется путем расчета результирующей ФПМ:

$$T_{рпр}(N) = T_o(N) \cdot T_{эпи}(N).$$

Зависимости предельного $R_{рпр}$ и реального разрешений R_{pp} от размера элементарного приемника излучения (пиксела) и значения диафрагменного числа $f/d_{вх}$ представлены на рис. 1–3.

Проведенные исследования по оценке предельного разрешения показали, что фактические возможности исследуемой ЦОЭС ДЗЗ ВД имеют максимальное отличие от предельных (на 40 %) при размере пиксела около 1 мкм и практически не отличаются от теоретически предельно возможных при размере пиксела более 5 мкм.

Зависимости разрешающей способности от диафрагменного числа (в диапазоне от 1,42 до 32) при размере пиксела 6 мкм демонстрируют близость значений предельного и реального разрешения.

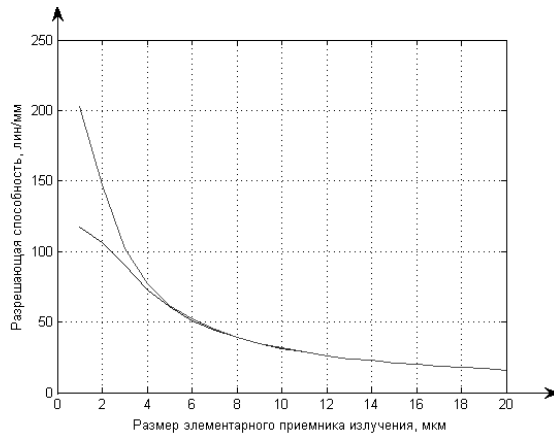


Рис. 1. Сравнительная оценка предельных и реальных возможностей ЦОЭС ДЗЗ ВД при изменении размера элементарного приемника излучения

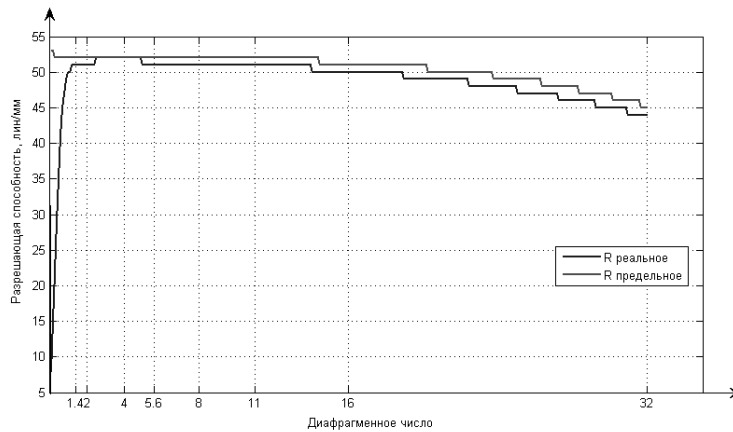


Рис. 2. Сравнительная оценка предельных и реальных возможностей ЦОЭС ДЗЗ ВД при изменении значения диафрагменного числа

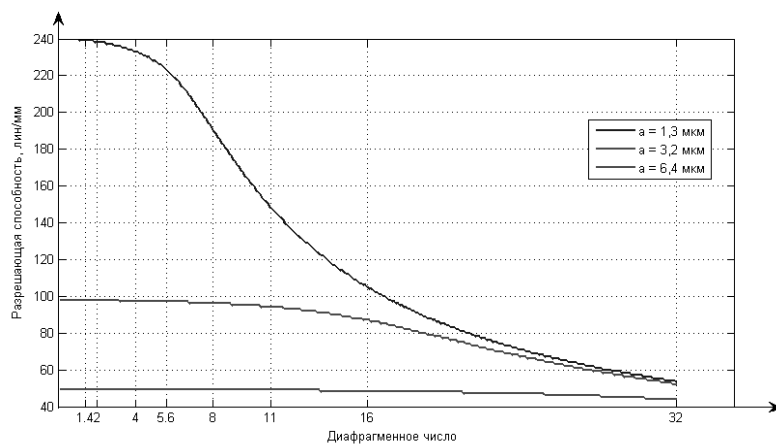


Рис. 3. Зависимость предельного разрешения ЦОЭС ДЗЗ ВД от диафрагменного числа для различных линейных размеров элементарного приемника излучения

Вместе с тем изменение линейного размера пиксела от 6 до 1 мкм приводит к увеличению предельного разрешения на 75 %, а реального – на 50 %.

Наряду с этим анализ полученных теоретических зависимостей (см. рис. 3) показал, что чем меньше линейный размер пиксела, тем чувствительней ЦОЭС ДЗЗ ВД по предельному разрешению к изменению диафрагменного числа. Изменение диафрагменного числа от 1,4 до 32 приводит к изменению предельного разрешения ЦОЭС ДЗЗ ВД для пиксела размером 1,3 мкм на 77 %, размером 3,2 мкм – на 45 %, а размером 6,4 мкм – всего на 10 %.

Анализ полученных зависимостей позволяет также сделать вывод о том, что значительное уменьшение размера элементарного приемника излучения с 6,4 мкм до 1,3 мкм при малых входных отверстиях не вызывает значительного увеличения разрешающей способности ЦОЭС ДЗЗ ВД (всего на 18 %). Это явление объяснимо дифракционными явлениями в объективе. Напротив, при таком же уменьшении размера элементарного приемника излучения на больших d_{ex} ($f/d_{ex}=1,4$), когда влияние дифракции на входном отверстии незначительно, приводит к существенному увеличению предельного разрешения ЦОЭС ДЗЗ (на 79 %). В связи с тем, что используемое аналитическое выражение ФПМ дифракционного объектива не учитывает абберационных явлений, в действительности увеличение предельного разрешения на больших d_{ex} будет несколько ниже.

Принцип определения предельного разрешения цифровых инфракрасных систем (ЦИКС) аналогичен определению предельного разрешения ЦОЭС ДЗЗ ВД. ФПМ дифракционного объектива ИКС описывается формулой

$$T_{iO}(N) = \frac{\int_{\lambda_H}^{\lambda_B} \frac{2}{\pi} \cdot \left[\arccos\left(\frac{\lambda \cdot f \cdot N}{d_{BX}}\right) - \frac{\lambda \cdot f \cdot N}{d_{BX}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda \cdot f \cdot N}{d_{BX}}\right)^2} \right] \cdot \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot (e^{\frac{C_2}{\lambda^4}} - 1)} d\lambda}{\int_{\lambda_H}^{\lambda_B} \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot (e^{\frac{C_2}{\lambda^4}} - 1)} d\lambda},$$

где λ_H, λ_B – нижняя и верхняя границы волнового инфракрасного диапазона; f/d_{ex} – диафрагменное число; C_1, C_2 – константы Планка.

ФПМ элементарного приемника излучения (апертуры) для ЦИКС – $T_{iПП}(N)$. Эта составляющая определяется геометрией приемника излучения и описывается Фурье-преобразованием пространственного распределения чувствительности отдельного приемника излучения. Выражение аналогично выражению ФПМ элементарного приемника излучения $T_{iПП}(N)$ для ОЭС ВД.

Зависимости предельного $Ri_{ПП}$ и реального разрешений Ri_{PP} цифровой ИКС от размера элементарного приемника излучения a и значения диафрагменного числа f/d_{ex} представлены на рис. 4, 5.

Анализ полученных зависимостей показывает существенное различие между реальным и предельным разрешением ЦИКС. Предельное разрешение гипотетической ЦИКС хотя и имеет значительно более низкие значения по сравнению с ЦОЭС ДЗЗ ВД, однако по сравнению с реальными значениями разрешения ЦИКС, превышает их в разы. Для размера пиксела 1 мкм разница между реальным и предельным разрешением составляет 89 %, а для размера пиксела 20 мкм – 41 %.

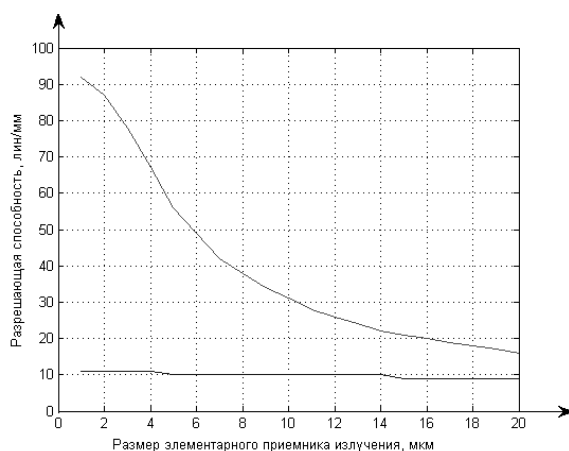


Рис. 4. Зависимость реального и предельного разрешения от размера элементарного приемника излучения

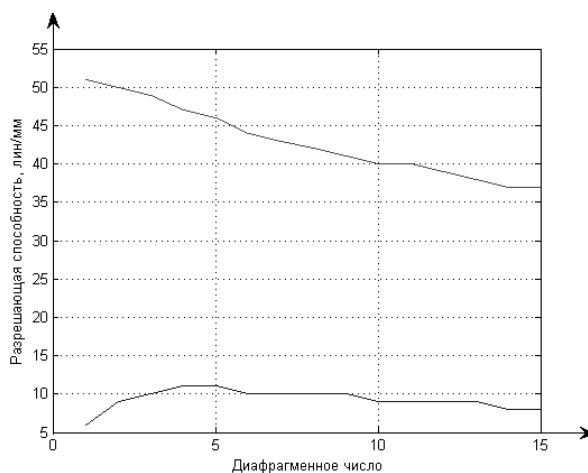


Рис. 5. Зависимость реального и предельного разрешения от диафрагменного числа (при размере пиксела 6 мкм)

Существенное отличие реального разрешения ЦИКС от предельного обусловлено целым рядом факторов. При прохождении через атмосферу тепловое излучение ослабляется вследствие поглощения и рассеяния молекулами газа, аэрозолями, водой, дымом, смогом. Молекулярное поглощение (если не считать поглощение в плотных дисперсионных средах) является главной причиной ослабления излучения.

Таким образом, можно отметить, что применение аналитического метода для оценки предельных возможностей цифровых оптико-электронных систем позволяет:

- ◆ выдать рекомендации по формированию научно-технической политики (направления) развития ЦОЭС;
- ◆ осуществить выбор конструктивных параметров на этапе проектирования этих систем;
- ◆ провести сравнительную оценку ЦОЭС в ходе их выбора для формирования комплекса ДЗЗ;
- ◆ разработать рекомендации по их применению.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Халтобин В.М., Шилевой Ю.М.* Аналитический метод оценки эффективности применения иконических оптико-электронных средств. Научно-методические материалы по автоматизации сбора и обработки информации. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1984.
2. *Коваленко В.П.* Оптико-электронное разведывательное оборудование летательных аппаратов. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1990.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.П. Харьков.

Сельвесюк Николай Иванович – Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»; e-mail: selvesyuk@yandex.ru; 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1; тел.: 84992636391; д.т.н.; доцент; кафедра информационной безопасности; профессор.

Веселов Юрий Геннадьевич – e-mail: vesel_foto@mail.ru; кафедра информационной безопасности; к.т.н.; доцент.

Островский Александр Сергеевич – e-mail: aleksandr_ostrovsky@mail.ru; кафедра информационной безопасности; ассистент.

Красавин Илья Владимирович – Федеральное государственное казенное учреждение «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации; e-mail: krasavinilya@gmail.com; 141006, МО, г. Мытищи, ул. Комарова, 13; тел.: 84992636391; к.т.н.; начальник лаборатории.

Selvesyuk Nikolay Ivanovich – Federal State Institution of Higher Professional Education "Bauman Moscow State Technical University"; e-mail: selvesyuk@yandex.ru; 5, 2nd Bauman street, p. 1, Moscow, 105005, Russia; phone: +74992636391; dr. of eng. sc.; associate professor; the department of information security; professor.

Veselov Yuriy Gennadievich – e-mail: vesel_foto@mail.ru; the department of information security; cand. of eng. sc.; associate professor.

Ostrovskiy Aleksandr Sergeevich – e-mail: aleksandr_ostrovsky@mail.ru; the department of information security; assistant.

Krasavin Ilya Vladimirovich – Federal State Government Institution «Chief scientific metrology center» Ministry of Defence; e-mail: krasavinilya@gmail.com; 13, Komarova street, Mytishchi, 141006, Russia; тел.: +74992636391; cand. of eng. sc.; head of laboratory.

УДК 004.923

А.В. Чумаченко

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ SAD ДЛЯ ЗАДАЧИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕЛЬЕФА ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ СТЕРЕОПАР В ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ СТЕРЕОЗРЕНИЯ

Представлен метод оптимизации вычисления целевой функции SAD для локальных алгоритмов установления пиксельных соответствий на стереопарах. Суть оптимизации состоит в вычислении вспомогательного двумерного массива сумм, позволяющего на основном шаге некоторого алгоритма за константное количество операций получать значения целевой функции SAD. Метод позволяет снизить асимптотическую верхнюю границу сложности основного шага алгоритма на два порядка для прямоугольных опорных областей, и на один порядок для опорных областей непрямоугольной (адаптивной) формы. Метод может быть реализован в системах с процессорами общего назначения и не предполагает использование векторных операций.

Стереопара; пиксельное соответствие; корреляция; опорное окно; оптимизация; высокопроизводительная система стереозрения; адаптивное окно.