Оценка пространственного и спектрального разрешения сканирующей гиперспектральной аппаратуры для космических аппаратов формата CubeSat

Н.А. Ивлиев [1,2]

[1] Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34;

[2] Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт», 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151

Аннотация

В работе предложена методика оценки пространственного и спектрального разрешения сканирующей гиперспектральной аппаратуры, предназначенной для эксплуатации на наноспутниках формата CubeSat. В основе методики лежит фотометрический расчет, учитывающий характеристики основных элементов обобщенной оптической схемы сканирующей гиперспектральной аппаратуры и параметры орбитального движения космического аппарата. Базовыми положениями при расчете требуемого времени экспозиции матричного фотоприемника является равенство количества сигнальных электронов, формируемых под действием светового потока, максимальному количеству электрического заряда, которое может удержать один пиксель матричного фотоприемника до насыщения, а также равенство пространственных разрешений вдоль и перпендикулярно направлению движения. Показано, что такой подход позволяет осуществить выбор матричного фотоприемника, характеристики которого удовлетворяют необходимому пространственному и спектральному разрешению. Приведены примеры оценки пространственного и спектрального разрешения для гиперспектральной аппаратуры с объективами Юпитер-37А 3,5/135 и Рубинар 4,5/300. Сделаны выводы о применимости указанных объективов в гиперспектральной аппаратуре для космических аппартов формата CubeSat.

Ключевые слова: гиперспектральная аппаратура, наноспутники, пространственное и спектральное разрешение.

Цитирование: **Ивлиев, Н.А.** Оценка пространственного и спектрального разрешения сканирующей гиперспектральной аппаратуры для космических аппаратов формата CubeSat / Н.А. Ивлиев // Компьютерная оптика. – 2026. – Т. 50, № 5. – 1850. – doi: 10.18287/COJ1850.

Citation: Ivliev NA. Evaluation of spatial and spectral resolution of scanning hyperspectral equipment for CubeSat spacecraft. Computer Optics 2026; 50(5): 1850. doi: 10.18287/COJ1850.

Введение

В последние годы наблюдается рост интереса к космическим аппаратам (КА) малого размера, в частности к наноспутникам [1 – 3]. Стандарт наноспутников CubeSat был создан для упрощения всей цепочки жизненного цикла КА от проектирования и производства до запуска и эксплуатации. Наиболее часто КА подобного класса используются для низкоорбитальных образовательных [4, 5] и исследовательских миссий [6, 7]. Минимальная единица объема наноспутников CubeSat-1U представляет собой куб с размерами 10×10×10 см^3. Кроме этого, стандарт особо оговаривает предельную массу 1U величиной 1,33 кг [8].

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является основным сектором, в котором используются CubeSat, что соответствует примерно 45 % всех приложений [1]. Этот факт указывает на коммерческий потенциал такой платформы. По данным на 2024 год портала «Nanosats Database», наиболее используемая конфигурация CubeSat – 3U (около 42,5 %), за ней следует 6U (14,6 %), далее 1U (11,2 %). Возросшая популярность первых двух конфигураций для задач ДЗЗ обусловлена наличием существенного по сравнению с 1U внутреннего объема, выделяемого под полезную нагрузку (ПН), и возможностью оснащения бортовыми приборами с более высокими характеристиками.

В конфигурации 3U объем свободного пространства варьируется от 0,5U до 1,5 U [9, 10]. В то время как в конфигурации 6U – от 2U до 3U [11, 12]. Конкретное значение указанного параметра определяется составом оборудования, необходимого для выполнения миссии. Состав оборудования КА конфигураций 3U и 6U для задач ДЗЗ схож и содержит следующие подсистемы [8, 13 – 14]:

- ориентации и стабилизации;
- управления и обработки данных;
- электропитания;
- связи и передачи данных;
- терморегулирования.

Функциональные характеристики указанных подсистем связаны между собой и в комплексе должны соответствовать характеристикам ПН.

В настоящей работе в качестве ПН рассматриваются изображающие системы, состоящие из оптического тракта, приемника излучения, устройства записи и хранения видеоданных. К таким изображающим системам относятся оптические фото- и видеокамеры различных диапазонов, мульти- и гиперспектральная аппаратура, а также камеры на основе гармонических линз.

Геперспектральная аппаратура (ГСА) в настоящее время находит все большее применение в задачах мониторинга окружающей среды и активно внедряется в наноспутниковые системы [15 – 17]. ГСА сканирующего щелевого типа (в английской терминологии push-broom) получает информацию последовательно по одной из осей и характеризуется высоким пространственным и спектральным разрешением, а также легкостью интеграции со служебными системами КА.

В настоящей работе исследовано влияние орбитального движения КА на пространственное и спектральное разрешение ГСА сканирующего типа и предложен метод расчета ГСА с заданными характеристиками для решения задач ДЗЗ на борту КА формата CubeSat.

1. Обобщенная оптическая схема сканирующей ГСА

Сканирующая щелевая гиперспектральная камера является сложной изображающей системой, оптический тракт которой, помимо щелевой диафрагмы, содержит дисперсионный элемент, разделяющий свет на определенное количество длин волн (каналов). Обобщенная оптическая схема сканирующей ГСА представлена на рис. 1.

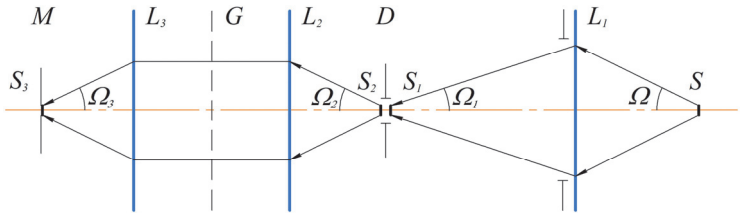


Рис. 1. Обобщенная оптическая схема гиперспектрометра: L_1 – входной объектив; L_2, L_3 – зеркальные/пропускающие линзы; G – дисперсионный элемент; M – матричный фотодетектор; S, S_1, S_2, S_3 – максимальные геометрические размеры луча в плоскости наблюдаемого объекта, диафрагмы и детектора соответственно; Ω_1, Ω_2, Ω_3 – половинные углы конуса света, который может войти или выйти из линз L_1, L_2, L_3 соответственно

Как видно из рис. 1, ГСА содержит следующие оптические элементы: входной объектив L_1, щелевая диафрагма D, отражающий или пропускающий дисперсионный элемент G, зеркальная или пропускающая линза L_2, формирующая необходимое электромагнитное поле на дисперсионный элемент G, и фокусирующая линза L_3, которая формирует разложение по длинам волн на матричном фотодетекторе M.

Пространственное и спектральное разрешение ГСА определяется множеством факторов, в том числе параметрами щелевой диафрагмы и дисперсионного элемента, однако при решении с помощью КА задач оперативного мониторинга на передний план выходит обеспечение необходимой светосилы оптической системы при минимальных габаритах и заданном пространственном разрешении, которое определяется входным объективом L_1.

Считается, что ГСА сконструирован с наилучшими характеристиками, если выполнятся условие [18]:

$$S_1 \sin^2 \Omega_1 = S_2 \sin^2 \Omega_2 = S_3 \sin^2 \Omega_3 , \quad (1)$$

где S_1, S_2, S_3 – максимальные геометрические размеры луча во входной/выходной плоскости диафрагмы и детектора соответственно; Ω_1, Ω_2, Ω_3 – половинные углы конуса света, который может войти или выйти из линз L_1, L_2, L_3 соответственно.

При соответствующей конструкции входной световой поток ограничивается относительным отверстием входного объектива. При этом чувствительность матричного фотодетектора (МФ) должна соответствовать выходному световому потоку спектральной системы для накопления необходимого количества заряда, позволяющего регистрировать спектральное распределение во всем рабочем диапазоне длин волн.

Очевидно, подсистема ориентации и стабилизации КА вместе с орбитальным движением оказывают прямое воздействие на формируемые ФМ сигналы.

2. Методика оценки пространственного и спектрального разрешения ГСА

Высокая орбитальная скорость КА и дискретность считывания значений сигналов МФ приводит к эффекту «смаза» изображения, что снижает пространственное и спектральное разрешение гиперспектральных снимков [19].

Рассмотрим следующую типовую схему формирования гиперспектрального изображения объекта на МФ, рис. 2.

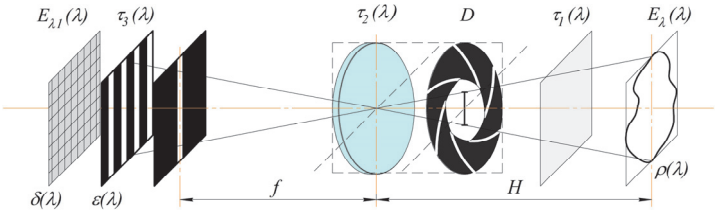


Рис. 2. Схема фотометрического расчета для гиперспектральной аппаратуры: $E_\lambda(\lambda)$ – спектральная энергетическая освещенность; $\rho(\lambda)$ – коэффициент диффузного отражения; $\tau_1(\lambda)$, $\tau_2(\lambda)$, $\tau_3(\lambda)$ – коэффициенты пропускания атмосферы, входного зрачка D и гиперспектрального блока соответственно; $\varepsilon(\lambda)$ – дифракционная эффективность (ДЭ) дисперсионного элемента; $\delta(\lambda)$ – квантовая эффективность МФ

Объект с коэффициентом диффузного отражения ρ(λ) подсвечивается естественным источником излучения, который создает спектральную энергетическую освещенность $E_\lambda(\lambda)$. Часть излучения, отраженного объектом, проходит через атмосферу, имеющую коэффициент пропускания $\tau_1(\lambda)$, и попадает в оптическую систему объектива с фокусным расстоянием f, диаметр входного зрачка D, коэффициент пропускания $\tau_2(\lambda)$, далее следует спектральный блок гиперспектрометра с коэффициентом пропускания $\tau_3(\lambda)$ и дифракционной эффективностью (ДЭ) дисперсионного элемента $\varepsilon(\lambda)$. Матричный фотоприемник установлен в рабочей плоскости гиперспектрометра (плоскости изображения) и имеет квантовую эффективность (КЭ) $\delta(\lambda)$. Изображение участка объекта, формируемое объективом, раскладывается дисперсионным элементом на N столбцов МФ и имеет спектральную энергетическую освещенность $E_{\lambda 1}(\lambda)$. Ширину щелевой диафрагмы примем равной размеру пикселя МФ, ввиду чего потерями на ней в расчетах можно пренебречь.

Связь между спектральной энергетической освещенностью в плоскости объекта и в плоскости изображения при ситуации $f << H$ определяется стандартной фотометрической формулой для освещенности в плоскости формирования изображения для объектива с диафрагменным числом $k=f/D$ при наличии потерь [20]:

$$E_{\lambda 1} = \frac{\tau_1(\lambda)\tau_2(\lambda)\tau_3(\lambda)\varepsilon(\lambda)\delta(\lambda)\rho(\lambda)}{4k^2} E_\lambda(\lambda). \quad (2)$$

Как показано в работе [17], энергетическая освещенность пикселей МФ определяется суммированием по спектральному диапазону:

$$E_1 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_1(\lambda)\tau_2(\lambda)\tau_3(\lambda)\varepsilon(\lambda)\delta(\lambda)\rho(\lambda)\mathrm{E}_\lambda(\lambda)}{4k^2} d\lambda\,, \quad (3)$$

где λ_1, λ_2 – границы спектрального диапазона, регистрируемого матрицей гиперспектрометра. Для каждого спектрального канала величина $\Delta\lambda=\lambda_2-\lambda_1$ мала, поэтому с высокой точностью можно вместо формулы (3) использовать приближенную формулу:

$$E_1 = \frac{\tau_1(\lambda)\tau_2(\lambda)\tau_3(\lambda)\varepsilon(\lambda)\rho(\lambda)}{4k^2} E_\lambda(\lambda)\Delta\lambda\,, \quad (4)$$

где $\Delta\lambda$ – ширина спектрального канала гиперспектрометра. При этом расчет спектральной энергетической освещенности на поверхности Земли можно осуществить по формуле:

$$E_\lambda(\lambda) = \tau_1(\lambda) X(\lambda, T) \frac{R_0^2}{R^2}\,, \quad (5)$$

где R_0 – радиус Солнца; R – расстояние от поверхности Земли до Солнца; $X(\lambda, T)$ – функция спектральной плотности светимости абсолютно черного тела (АЧТ).

Тогда максимальное количество сигнальных электронов n, которые возникают в пикселе под воздействием светового потока за время накопления t_n, можно определить по выражению:

$$n = \delta(\lambda)(\Delta d)^2 \frac{E_1}{E_{pmax}} t_\text{н} = \frac{(\Delta d)^2\tau_1(\lambda)\tau_2(\lambda)\tau_3(\lambda)\varepsilon(\lambda)\delta(\lambda)\rho(\lambda)\mathrm{E}_\lambda(\lambda)\Delta\lambda\lambda_{\max}\mathrm{t}_\text{н}}{4k^2hc}, \quad (6)$$

где $E_{pmax} = hc/\lambda_{max}$ – энергия фотона на длине λ_{max}; λ_{max} – длина волны максимальной чувствительности МФ; Δd – размер пиксела матрицы.

Согласно классическому фотометрическому расчету получение приемлемого качества изображения основано на равенстве количества сигнальных электронов среднеквадратичному отклонению (СКО) шумовых электронов. Суммарный уровень шума, возникающий при фотоэлектрическом преобразовании, состоит из фотонного шума потока излучения от объекта и собственных шумов МФ и его электронной схемы усиления. Ввиду сложности оценки результирующего фотонного шума в настоящей работе предлагается в качестве критерия накопления необходимого заряда использовать равенство количества сигнальных электронов n и максимального количества электрического заряда, которое может удержать один пиксель матрицы до насыщения N_{sat} (в английской терминологии Full well Capacity), что соответствует режиму съемки, при котором используется весь

динамический диапазон МФ. N_{sat} является одним из паспортных параметров МФ согласно стандарту EMVA 1288, созданному для сравнения итоговых характеристик фотоприемных устройств с учетом электронной схемы усиления.

Исходя из вышесказанного время накопления не должно превышать значения, которое приведет к превышению количества заряда, полученого пикселем МФ, величины N_{sat} в спектральном канале, соответствующем максимуму функции спектральной плотности мощности. Для задач ДЗЗ в качестве источника выступает Солнце (T=5780K) и функция спектральной плотности мощности, излучаемая с поверхности единичной площади, определяется формулой Планка:

$$X(\lambda,T)=\frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5}\frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)-1}. \quad (7)$$

Расчетная длина волны, соответствующая максимуму функции (7), при этом определяется выражением:

$$\lambda_{psd}=\frac{0{,}002898}{T}. \quad (8)$$

Время накопления $t_н$, соответствующее времени экспозиции МФ, которое может изменяться в процессе съемки при изменении освещенности поверхности:

$$t_{\text{н}}=\frac{4N_{sat}k^2hc}{(\Delta d)^2\tau_1(\lambda)\tau_2(\lambda)\tau_3(\lambda)\varepsilon(\lambda)\delta(\lambda)\rho(\lambda)\text{E}_\lambda(\lambda)\Delta\lambda\lambda_{max}}. \quad (9)$$

Время накопления – это характеристика, которая влияет в первую очередь на разрешение гиперспектрального изображения вдоль траектории движения. При сканирующей съемке величина проекции пикселя на поверхность Земли вдоль траектории ΔY определяется временем накопления по формуле:

$$\Delta Y=vt, \quad (10)$$

где v – скорость движения проекции спутника по поверхности планеты.

Необходимо отметить, что скорость v в общем случае является суммой скорости орбитального движения и проекции скорости, вызванной угловой нестабильностью СОС спутника. Для наноспутников угловая скорость стабилизации в первую очередь определяется точностью датчиков ориентации [17, 21]. На КА конфигурации 6U, предназначенных для решения задач ДЗЗ, применяются звездные трекеры с точностью ориентации от 0,01 до 0,001 град при частоте опроса от 1 до 10 Гц [22, 23]. В худшем случае угловая скорость составляет 0,01 град / с, что будет учтено далее при расчетах.

Величина проекции пикселя на поверхность Земли в направлении, перпендикулярном траектории движения, определяется размером пикселя МФ и фокусным расстоянием объектива по формуле.

$$\Delta X=\frac{H\Delta x}{f}, \quad (11)$$

где h – высота орбиты.

Если стремиться повышать разрешение в направлении, перпендикулярном траектории, за счет уменьшения размера пикселя Δd, то разрешение ΔY вдоль траектории будет уменьшаться, поэтому критерием оптимального соответствия МФ выбранному объективу является равенство $\Delta Y=\Delta X$. При этом значение требуемого максимального количества электронов N_{sat} МФ можно определить по выражению:

$$N_{sat}=\frac{(\Delta d)^3\tau_1(\lambda)\tau_2(\lambda)\tau_3(\lambda)\varepsilon(\lambda)\delta(\lambda)\rho(\lambda)\text{E}_\lambda(\lambda)\Delta\lambda\lambda_{max}H}{4N_{sat}k^2cvhf}. \quad (12)$$

Стоит отметить, что равенство (12) содержит ширину спектрального канала $\Delta\lambda$, которая определяется параметрами дисперсионного элемента. Для гиперспектрометров космического применения, предназначенных для наноспутников, данный параметр варьируется от 2,4 до 20 нм [15 – 17].

3. Анализ полученных результатов

На рис. 3*а*, *б* представлены графики зависимости необходимого значения параметра N_{sat} от размера пикселя МФ Δd при различных значениях ширины спектрального канала $\Delta\lambda$ для двух объективов: Юпитера-37А 3,5/135 и Рубинара 4,5/300 соответственно. Расчет приведен с учетом скорости угловой стабилизации, равной 0,01 град / с.

По графикам видно, что требуемое значение параметра N_{sat}, соответствующее насыщению, существенно возрастает при увеличении ширины спектрального канала и размера пикселя МФ. Причем N_{sat}, рассчитанный для Рубинара, на порядок ниже Юпитера. В табл. 1 представлены примеры моделей МФ, применяемых в аппаратуре ДЗЗ, и их технические характеристики [15 – 17, 24 – 26].

Из табл. 1 видно, что наиболее близкими к целевым характеристикам N_{sat} являются МФ IMX252, IMX296, CMV4000. Но их быстродействие также не соответствует требуемой ширине спектрального диапазона, особенно

при высоком спектральном разрешении (рис. 3*а*, *б*, кривые 1). Как видно из рис. 3*а*, *б*, улучшить ситуацию можно путем увеличения ширины спектрального диапазона.

Выбор МФ с большим размером пикселя не приводит к уменьшению N_{sat} до требуемого уровня и, как уже отмечалось, снижает пространственное разрешение. График зависимости проекции пикселя на поверхность Земли в направлении, перпендикулярном траектории движения ΔX, от размера пикселя МФ Δd представлен на рис. 4. Расчеты выполнены для высоты орбиты 600 км.

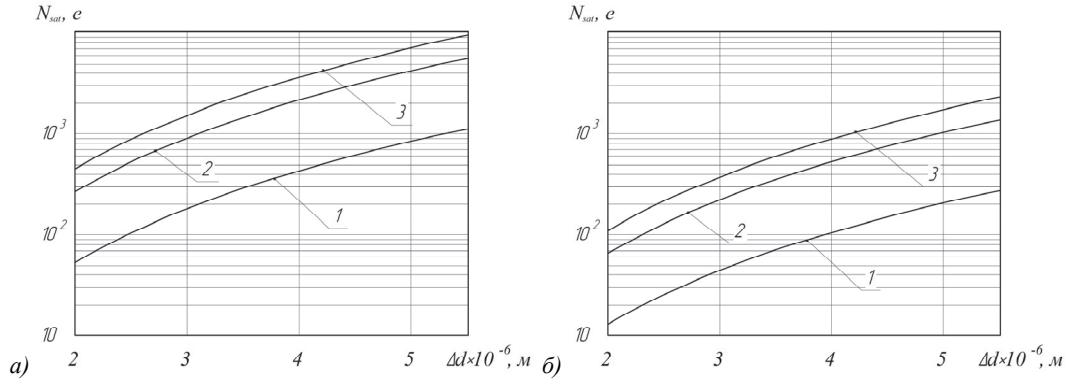


Рис. 3. График зависимости значений максимального количества электронов N_{sat} от размера пикселя МФ Δx при различных значениях ширины спектрального канала $\Delta\lambda$ для объектива Юпитер-37А 135/3,5 (а) и Рубинар 4,5/300 (б): 1 – 2,4 нм; 2 – 12 нм; 3 – 20 нм

Табл. 1. Характеристики МФ, применяемых в аппаратуре ДЗЗ

Модель МФ	Размер пикселя, мкм	Полная ёмкость пикселя МФ, электронов
IMX296	3,40	11000
IMX174	5,86	30500
IMX249	5,86	33000
IMX252	3,45	9900
CMV4000	5,50	13500

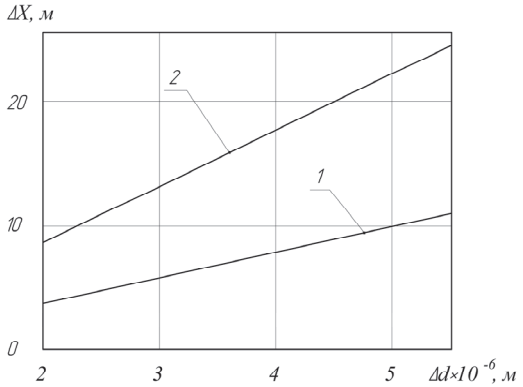


Рис. 4. График зависимости проекции пикселя на поверхность Земли в направлении, перпендикулярном траектории движения ΔX, от размера пикселя МФ Δd для двух объективов: 1 – Юпитер-37А 135/3,5; 2 – Рубинар 4,5/300

Стоит отметить, что значения полной емкости пикселей в табл. 1 указаны для базового (низкого) уровня усиления, поэтому при неполном соответствии МФ требуемому времени экспозиции возможна компенсация за счет повышения уровня усиления, однако это приводит к ухудшению соотношения сигнал/шум.

Возможен случай, когда коэффициента усиления МФ недостаточно для компенсации. Например, использование объектива Рубинар при ширине спектрального канала 2,4 нм требует коэффициента усиления более 10 дБ для параметров N_{sat} и Δd МФ CMV4000, что превышает его коэффициент усиления, равный 6 дБ. Компенсировать нехватку усиления возможно с помощью режима группирования пикселей МФ (бининг), что также приводит к ухудшению пространственного разрешения в два раза, что делает нецелесообразным использование длиннофокусных объективов.

Другим способом, позволяющим сохранить пространственное разрешение, является задание угловой скорости КА в направлении, обратном движению. Указанный режим съемки позволяет замедлить скорость движения проекции щелевой диафрагмы по поверхности Земли, но предъявляет повышенные требование к СОС спутника.

Заключение

В работе проведены оценки пространственного и спектрального разрешения сканирующей гиперспектральной аппаратуры на основе фотометрического расчета. Входными данными для расчета являются параметры объектива, определяющего пространственное разрешение, высота орбиты КА, необходимая ширина спектрального канала и характеристики орбитального движения.

Требуемое время экспозиции матричного фотоприемника в представленной методике определяется равенством количества сигнальных электронов, формируемых под действием светового потока, максимальному количеству электрического заряда, которое может удержать один элемент МФ до насыщения, что позволяет задействовать весь динамический диапазон МФ и обеспечить максимальную спектральную яркость.

Показано, что размер пикселя МФ, используемых на борту современных наноспутников, является определяющем фактором, влияющим на время накопления заряда. При этом увеличение размера пикселя МФ приводит к снижению пространственного разрешения ГСА. Снизить время накопления заряда при меньшем размере пикселя МФ можно за счет увеличения ширины спектрального канала. Если требуемое время накопления достигается, то согласование пространственного и спектрального разрешения ГСА в настоящей работе предлагается осуществлять установлением равенства величины проекции пикселя на поверхность Земли в направлении, перпендикулярном траектории движения, и пространственного разрешения в направлении вдоль траектории движения.

Благодарности

Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 075-15-2025-610.

References

[1] Fevgas G, Lagkas T, Sarigiannidis P, Argyriou V. Advances in remote sensing and propulsion systems for Earth observation nanosatellites. Future Internet 2025; 17(1): 16. DOI: 10.3390/fi17010016.
[2] Villela T, Costa CA, Brandão AM, Bueno FT, Leonardi R. Towards the thousandth CubeSat: A statistical overview. International Journal of Aerospace Engineering 2019; 2019: 5063145. DOI: 10.1155/2019/5063145.
[3] Weston SV, Burkhard CD, Stupl JM, Ticknor RL, Yost BD, Austin RA, Galchenko P, Newman LK, Soto LS. State-of-the-art small spacecraft technology. NASA Technical Report NASA/TP-20250000142; 2025.
[4] Rodríguez-Osorio RM, Ramírez EF. A hands-on education project: Antenna design for inter-CubeSat communications. IEEE Antennas and Propagation Magazine 2012; 54(5): 211-224. DOI: 10.1109/MAP.2012.6348155.
[5] Helvajian H, Janson SW. Origin of CubeSat, Small Satellite: Past, Present and Future. El Segundo, CA: The Aerospace Press; 2009. ISBN: 978-1-884989-22-3.
[6] Cappelletti C, Robson D. CubeSat missions and applications. In: CubeSat Handbook: Mission Design to Operations. Academic Press; 2021: 53-65. DOI: 10.1016/B978-0-12-817884-3.00002-3.
[7] Heidt H, Puig-Suari J, Moore A, Nakasuka S, Twiggs RJ. CubeSat: A new generation of picosatellite for education and industry low-cost space experimentation. In: Proceedings of the 14th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites; 2000; Logan, UT, USA. Paper SSC00-V-5: 1-19.
[8] Puig-Suari J, Coelho R, Williams S. CubeSat Design Specification. Rev. 12. San Luis Obispo, CA: The CubeSat Program, California Polytechnic State University; 2009.
[9] Cho DH, Choi WS, Kim MK, Kim JH, Sim E, Kim HD. High-resolution image and video CubeSat (HiREV): Development of a space technology test platform using a low-cost CubeSat platform. International Journal of Aerospace Engineering 2019; 2019: 8916416. DOI: 10.1155/2019/8916416.
[10] Glavkosmos. Glavkosmos organized the launch of 42 small spacecraft from the Vostochny Cosmodrome. Available at: https://www.glavkosmos.com/en/glavkosmos-organized-the-launch-of-42-small-spacecraft-from-the-vostochny-cosmodrome. Accessed August 18, 2026.
[11] NASA. Earth Right Now. Available at: https://science.nasa.gov/earth-science/. Accessed August 18, 2026.
[12] National Research Council. Earth Science and Applications from Space: National Imperatives for the Next Decade and Beyond. Washington, DC: The National Academies Press; 2007. Available at: https://nap.nationalacademies.org/catalog/11820/earth-science-and-applications-from-space-national-imperatives-for-the-next-decade-and-beyond. Accessed August 18, 2026.
[13] Puig-Suari J, Turner C, Twiggs RJ. CubeSat: The development and launch support infrastructure for eighteen different satellite customers on one launch. In: Proceedings of the 15th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites; 2001; Logan, UT, USA: 13-16.
[14] Bouwmeester J, Guo J. Survey of worldwide pico- and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology. Acta Astronautica 2010; 67(7-8): 854-862. DOI: 10.1016/j.actaastro.2010.06.004.
[15] Aoyanagi Y, Doi T, Arai H, Shimada Y, Yasuda M, Yamazaki T, Sawazaki H. On-orbit performance and hyperspectral data processing of the TIRSAT CubeSat mission. Remote Sensing 2025; 17(11): 1903. DOI: 10.3390/rs17111903.
[16] Zhao D, Cheng X, Zhang H, Niu Y, Qi Y, Zhang H. Evaluation of the ability of spectral indices of hydrocarbons and seawater for identifying oil slicks utilizing hyperspectral images. Remote Sensing 2018; 10(3): 421. DOI: 10.3390/rs10030421.
[17] Ivliev N, Podlipnov V, Petrov M, Tkachenko I, Ivanushkin M, Fomchenkov S, Markushin M, Skidanov R, Khanenko Y, Nikonorov A, Kazanskiy N, Soifer V. 3U CubeSat-based hyperspectral remote sensing by Offner imaging hyperspectrometer with radially fastened primary elements. Sensors 2024; 24(9): 2885. DOI: 10.3390/s24092885.
[18] Sigernes F. Basic Hyperspectral Imaging. Longyearbyen: University Centre in Svalbard; 2008.

[19] Gecha VYa, Zhilenev MYu, Fedorov VB, Khrychev DA, Khudak YuI, Shatina AV. Image motion speed during optoelectronic imaging of a planetary surface [In Russian]. Russian Technological Journal 2018; 6(4): 65-77.
[20] Knyazev MG, Bondarenko AV, Dokuchaev IV. Calculation of threshold values of radiation flux and illuminance for Kodak KAI-1003M, Kodak KAI-1020, and Philips FTF3020M CCD matrices [In Russian]. Digital Signal Processing 2006; (3): 1-18.
[21] Liu X, Xing F, Fan S, You Z. A compact and high-accuracy star tracker with an on-orbit deployable baffle for remote sensing CubeSats. Remote Sensing 2021; 13(13): 2503. DOI: 10.3390/rs13132503.
[22] CubeSpace. Your global ADCS partner. Available at: https://www.cubespace.co.za. Accessed August 18, 2026.
[23] Precision Aerospace Solutions. Available at: https://www.arcsecspace.com. Accessed August 18, 2026.
[24] Rosero-Montalvo PD, Priest JCP. CubeSat imaging payload design for environmental monitoring of Greenland. Electronics 2025; 14(1): 18. DOI: 10.3390/electronics14010018.
[25] Mukhtar S, Arbabi A, Viegas J. Compact spectral imaging: A review of miniaturized and integrated systems. Laser & Photonics Reviews 2025; 19(21): e01042. DOI: 10.1002/lpor.202501042.
[26] Raskin G, Delabie T, De Munter W, Sana H, Vandenbussche B, Vandoren B, Antoci V. CUBESPEC: Low-cost space-based astronomical spectroscopy. In: Proceedings of SPIE 10698, Space Telescopes and Instrumentation 2018: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. SPIE; 2018: 106985R. DOI: 10.1117/12.2314074.

Сведения об авторе

Ивлиев Николай Александрович, 1987 года рождения, в 2010 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет (ныне Самарский национальный исследовательский университет, сокращенно Самарский университет) по специальности «Конструирование и технология радиоэлектронной техники». Кандидат технических наук (2015). В настоящее время работает научным сотрудником отделения «Институт систем обработки изображений – Самара» Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», доцентом кафедры технической кибернетики Самарского университета. Область научных интересов: физика поверхности, микро- и нанотехнологии. E-mail: *ivliev.na@ssau.ru*

Поступила в редакцию 01 октября 2025 г. *Окончательный вариант – 09 апреля 2026 г.*

Evaluation of spatial and spectral resolution of scanning hyperspectral equipment for CubeSat spacecraft

N.A. Ivliev [1,2]
[1] *Samara National Research University, Moskovskoye Shosse 34, Samara, 443086, Russia;*
[2] *Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute", Molodogvardeiskaya Str. 151, Samara, 443001, Russia*

Abstract

This paper proposes a methodology for estimating the spatial and spectral resolution of scanning hyperspectral equipment designed for use on CubeSat nanosatellites. The methodology is based on photometric calculations that take into account characteristics of the main elements of the generalized optical design of the scanning hyperspectral equipment and orbital motion parameters of the spacecraft. The fundamental assumptions for calculating the required exposure time of the array photodetector are that the number of signal electrons generated by the light flux is equal to the maximum amount of electric charge that can be held by one pixel of the array photodetector before saturation, as well as the equality of spatial resolutions along and perpendicular to the direction of motion. It is shown that this approach enables the selection of an array photodetector with characteristics that satisfy the required spatial and spectral resolution. Examples of estimating the spatial and spectral resolution for hyperspectral equipment with Jupiter-37A 3.5/135 and Rubinar 4.5/300 lenses are provided. A conclusion is made that the lenses analyzed are applicable for the hyperspectral equipment for Cubesat format spacecraft.

Citation: Ivliev NA. Evaluation of spatial and spectral resolution of scanning hyperspectral equipment for CubeSat spacecraft. Computer Optics 2026; 50(5): 1850. doi: 10.18287/COJ1850.

Acknowledgements: This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant No 075-15-2025-610.

About authors

Nikolay Aleksandrovich Ivliev, born in 1987, graduated from Samara State Aerospace University (now Samara National Research University, abbreviated as Samara University) in 2010 with a degree in "Design and Technology of Radio-electronic Equipment." Candidate of Technical Sciences (2015). He is a researcher at the department of the Institute of Image Processing Systems - Samara of the Kurchatov Complex of Crystallography and Photonics of the Federal State Budgetary Institution National Research Center Kurchatov Institute and an associate professor of Technical Cybernetics department of Samara University. Area of scientific interests: surface physics, micro and nanotechnologies. Email: *ivliev.na@ssau.ru*

Received October 01, 2025. *The final version – April 09, 2026.*