

Моделирование и расчет основных параметров оптических устройств при проектировании систем дистанционного зондирования для нужд лесного хозяйства

А.А. Роженцов, К.С. Ключев

Поволжский Государственный Технологический Университет, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3, kluzhevks@volgatech.net.

Описываются математические модели ключевых параметров бортовой системы первичной обработки данных для беспилотного летательного аппарата. Формулируются и анализируются основные принципы проектирования бортовых систем дистанционного зондирования (БСДЗ).

Paper gives a description of the methodology for onboard primary data processing system, that can be used at unmanned aerial vehicle. The basic principles of the design of on-board remote sensing systems are formulated and analyzed.

Несколько последних десятилетий продолжается интенсивное развитие и внедрение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) не только в военно-промышленном комплексе, но и во многих гражданских целях. Это связано с тем, что благодаря миниатюризации полезной электронной нагрузки БПЛА значительно расширился круг задач, потенциально решаемых при дистанционном зондировании с применением аэрофото- и видеосъемки в различных спектрах [1]. Однако до сих пор отсутствует универсальная методика для определения основных параметров бортовых систем дистанционного зондирования, основывающаяся на требованиях конечных пользователей с одной стороны и характеристиками существующей элементной базы с другой стороны.

Целью работы является разработка математических моделей БСДЗ по основным параметрам: пространственному, временному и спектральному разрешению. Построенные модели используются для подбора и проектирования оптических систем БПЛА для задач дистанционного зондирования с воздуха.

Для построения БСДЗ с желаемыми характеристиками изначально необходимо определить требования к временному, пространственному и спектральному разрешению системы и сопоставить их с существующей современной элементной базой: оптико-электронным и стабилизационным оборудованием, ИК-матрицами и т.д.

Общая схема работы пассивной БСДЗ показана на рисунке 1. Движение БПЛА происходит над центром исследуемой области S вдоль оси y с неизменной скоростью V_y на высоте H . Исследуемая область размещается в фокальной плоскости объектива с фокусным расстоянием f' . Сканирование по оси x производится со скоростью v_x при этом должно выполняться условие $v_x \gg v_y$, где v_y – скорость цифровой передачи изображения. Целый кадр обрабатывается за время T_{k0} , т.е. требуемая частота обработки кадров $f_{k0} = 1/T_{k0}$.

Пространственное разрешение в первую очередь будет зависеть от геометрического и оптического разрешения БСДЗ. При сканировании зоны $A_{m0} = L_{x0} \times L_{y0}$ с угловыми размерами $2\Omega_x \times 2\Omega_y$ происходит также наложение кадров τ , поэтому будет справедливо условие $\Omega'_x = \Omega'_y = 0^\circ$. Размеры элементов сканируемого поля как d_x и d_y , а соответствующие им размеры наложения по оптической оси как $2\omega_{x0}$ и $2\omega_{y0}$. Пиксели оптической системы проецируются на исследуемую местность без

искажений перспективы, поэтому пространственное разрешение по осям можно определить как $l_{x0} \approx \frac{Hd_x}{f'}$ и $l_{y0} \approx \frac{Hd_y}{f'}$ соответственно [2].

В случае отклонения от изначального направления просмотра БСДЗ сканирует кадры 8. Новое положение однозначно определяется текущим угловым положением Ω' оси просмотра относительно линии наложения, которая проходит через фокусную точку объектива и центр элемента разложения. Тогда пространственное разрешение по осям x и y для каждого i -го пикселя можно представить как:

$$l_{xi} \approx l_{x0}k_{xi}; k_{xi} = \frac{\cos^2 \theta_i}{\cos^2(\Omega'_x \pm \theta_i)} \quad l_{yi} \approx l_{y0}k_{yi}; k_{yi} = \frac{\cos^2 \theta_i}{\cos^2(\Omega'_y \pm \theta_i)} \quad (1)$$

где углы $\theta_i \approx \text{tg}(\frac{d_{xi}}{f'})$ изменяются в пределах $2\Omega_x$ по отношению к центру каждого пиксельного столбца, а знак «+» или «-» указывает на его расположение относительно оптической оси; k_{xi} и k_{yi} - коэффициенты искажения по осям x и y .

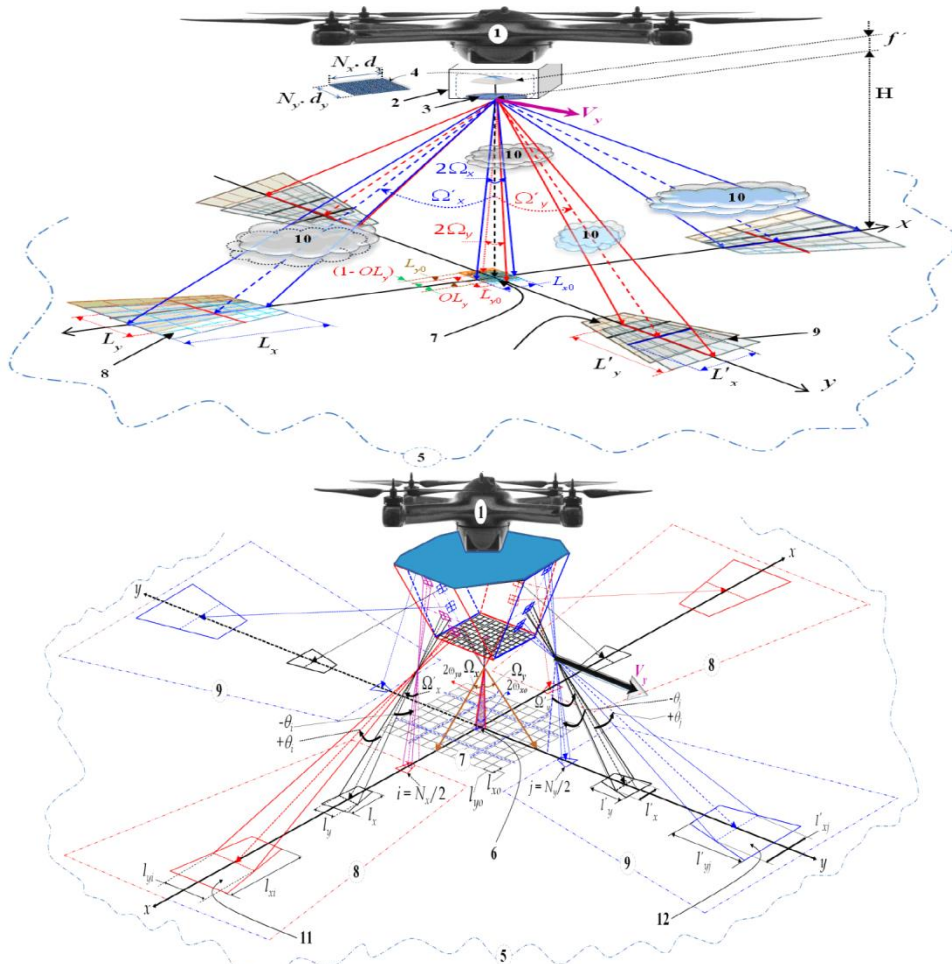


Рис. 1. Состав БСДЗ. 1 – БПЛА, 2 – БСД, 3 – объектив, 4 – матрица $N_x \times N_y$, 5 – центр сцены, 6 – элементарная исследуемая зона размера $L_{x0} \times L_{y0}$, 7 – зона наложения, 8, 9 – кадры боковые и фронтальные, 10 – атмосфера

Временное разрешение БСДЗ будет определять резкость получаемого изображения при движении БПЛА. Временное разрешение будет определяться периодом построчного сканирования T_{y0} [3], время которого рассчитывается как:

$$T_{y0} = \frac{l_{y0}}{V_y} \quad (2)$$

где V_y – скорость по оси y . Тогда:

$$T_{yi} \approx \frac{T_{y0} \cos^2 \theta_i}{\cos(\Omega'_y \pm \theta_i)} \approx T_{y0} k_{yi} \quad (3)$$

$$T_{yj} \approx \frac{T_{y0} \cos^2 \theta_j}{\cos(\Omega'_y \pm \theta_j)} \approx T_{y0} k_{yj}$$

Частота построчного сканирования с наложением не должна превышать $f_{y0} = 1/T_{y0}$.

Перекрытие OL обеспечивает непрерывное сканирование поверхности сцены без пропуска кадров, при этом время, затраченное на кадр, увеличивается до:

$$T_{k0} = \frac{N_y (1 - OL_y)}{\eta_k} T_{y0} \quad (4)$$

По приведенным формулам для различных углов наклона главной оптической оси БСДЗ возможно провести оценку размеров пиксельных проекций на исследуемую местность. Также возможно оценить величину временного разрешения системы с учетом перспективных искажений.

Спектральное разрешение в достаточно широком оптическом диапазоне или нескольких диапазонах необходимо для целей автоматического распознавания образов и задач мониторинга окружающей среды. На сегодняшний день существующие многоспектральные оптические системы не отличаются низкой стоимостью и компактностью, поэтому решение при их выборе пока остается компромиссным. Для повышения спектрального разрешения возможно использовать оптические фильтры с адаптивной перестраиваемой спектральной характеристикой, например, фильтры на основе эталонов Фарби Перо (ФФП) размерностью $N_x \times N_y$. Величина его рабочей спектральной полосы равна [4]:

$$\Delta\lambda_{ij} = \lambda_{2ij} - \lambda_{1ij} \approx k_{\lambda ij} \Delta\lambda \quad (5)$$

$$k_{\lambda ij} \approx \sqrt{1 - \left(\frac{n_i}{n_{eff}} \sin^2 \theta_{ij} \right)^2} \quad (6)$$

где $\lambda_{2ij}, \lambda_{1ij}$ - верхняя и нижняя длины волн отсечки,

n_i, n_{eff} - коэффициенты преломления атмосферы и материала фильтра соответственно,

$k_{\lambda ij}$ - коэффициент влияния углов θ_{ij} на ширину спектральной полосы фильтра,

$\Delta\lambda_{ij}, \Delta\lambda$ - ширина спектральной полосы фильтра при перпендикулярном падении лучей ($\theta=0$).

При наклоне пучка лучей, которые падают на фильтр, полоса пропускания фильтра расширяется, но при этом пик пропускания сглаживается. При углах светового потока менее 5° этот эффект почти незаметен, однако при наклоне 7° и более необходимо вводить поправку, вычисляемую подстановкой значения угла падения в уравнение (6).

Величины пропускания τ_{Fij} ФФП при $\theta_{ij} \neq 0$ в спектральной полосе $\Delta\lambda_{ij}$ вычисляются соотношением

$$\tau_{Fij} \approx \tau_{F0} k_{Fij} \quad (7)$$

$$\tau_{F0} = \left(1 - \frac{A}{1 - \mathfrak{R}}\right)^2 \quad (8)$$

$$k_{Fij} \approx \frac{1}{1 + \frac{4\mathfrak{R}}{(1 - \mathfrak{R})^2} \sin^2 \sqrt{\pi k_{\lambda ij}^2}} \quad (9)$$

где τ_{F0} - коэффициент спектрального пропускания при сканировании с зоной наложения,

k_{Fij} - коэффициент угловых поправок,

\mathfrak{R} - коэффициент отражения Френеля для выбранного фильтра,

A - коэффициент поглощения интерференционного фильтра.

Фирма Northumbria Optical Coatings Ltd (NOC, Ltd) занимается производством широкополосных спектральных оптических фильтров, работающих в диапазоне 1,5 – 20 мкм. Также она производит узкополосные фильтры с переменным пропусканием, для работы в спектральном диапазоне 2,0 – 20 мкм [5].

При небольших углах отклонения светового потока от перпендикулярного падения на фильтр возможность регулировки может быть полезна при настройке фильтра на требуемую пиковую длину волны. Однако при углах падения более 30° спектральный сдвиг может привести к существенному уменьшению коэффициента пропускания и искажению формы полосы пропускания. Оценку сдвига пиковой длины волны λ_{ij} можно производить с помощью приведенной выше формулы (только для коллимированного светового потока при углах падения менее 10°). Величина пропускания и формы спектральной характеристики фильтра напрямую зависят от вида просветляющего покрытия, нанесенного на линзы БСДЗ.

Выводы. Пространственное, временное и спектральное разрешение полностью определяют качество и информативность получаемых данных при мониторинге сцены. В данной работе приведены подробные математические модели для расчета ключевых параметров при проектировании или выборе бортовых систем дистанционного зондирования, устанавливаемых на борт БПЛА.

Работа выполнена при поддержке программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» (У.М.Н.И.К) по государственному контракту «Научное обеспечение, высокотехнологичные разработки новых образцов техники в области машиностроения, средств связи и природопользования».

Литература

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Современные проблемы инфракрасной техники. - М.: Изд. МИИГАиК, 2011. - 84 с
2. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: Учебник для вузов. Изд. 6-е. М.: Логос, 2011. 568 с.
3. H. M. ElSheikh, Yakushenkov Y.G. Spatial and temporal resolutions pixel level performance analysis of the onboard remote sensing electro-optical systems. JEOS: RP., V.9 (2014), № 14035-6
4. Савиных В.П., Соломатин В.А. Оптико-электронные системы дистанционного зондирования: Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2014.- 432 с.
5. <http://www.noc-ltd.com>