

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТЫ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО СКАНИРОВАНИЯ ПРИЕМНИКОМ ИЗЛУЧЕНИЯ ДАЛЬНОГО ИК-ДИАПАЗОНА

В.В. ДУДНИК

(Донской государственный технический университет),

В.В. РОЖЕНЦОВ

(Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики),

Г.Г. ПАДАЛКО

(ОАО «Азовский оптико-механический завод»)

Рассмотрены принципы работы и применение тепловизионных сканеров, устанавливаемых на летательных аппаратах, описаны возможности их использования. Представлена схема работы перспективного тепловизора с адаптивным сканированием. Приведена методика расчета высоты полета с учетом требований максимальной дальности обнаружения тепловизионного излучения объектов.

Ключевые слова: тепловизионный сканер, сверхлегкий летательный аппарат, высота полета, атмосфера.

Введение. В настоящее время широко применяются сканирующие устройства, в первую очередь тепловизионные, для решения самых разнообразных народнохозяйственных задач. В нашей стране чаще всего они используются для контроля состояния продуктопроводов с целью определения мест утечек нефти, газа, воды, несанкционированных врезок и утечек тепловой энергии, оценки состояния теплоизоляции. Тепловизионные сканеры могут активно эксплуатироваться и в сельском хозяйстве. Однако основным препятствием для их более широкого применения является высокая стоимость.

Установка сканера на сверхлегкий летательный аппарат и использование серийного тепловизора в качестве чувствительного элемента позволит существенно снизить стоимость и оборудования, и самих работ.

Инфракрасная (ИК) аэросъемка. Нефте- и газопроводы имеют температуру, отличающуюся от температуры с окружающей средой, поэтому даже в случае подземной прокладки формируются достаточные для регистрации тепловые контрасты, которые обнаруживаются тепловизорами. Засуха 2010 г. обострила вопросы исследования влажности земель и потребности в мелиорации. Наличие достаточного количества влаги в почве на небольшой глубине в утреннее время регистрируется пониженным тепловым фоном. Проводя ежедневную теплосъемку, можно контролировать изменение состояния почвы на разных участках сельскохозяйственных угодий.

На рис. 1 показаны примеры тепловизионных изображений мест обводнения железно-дорожной насыпи и подземного пожара.

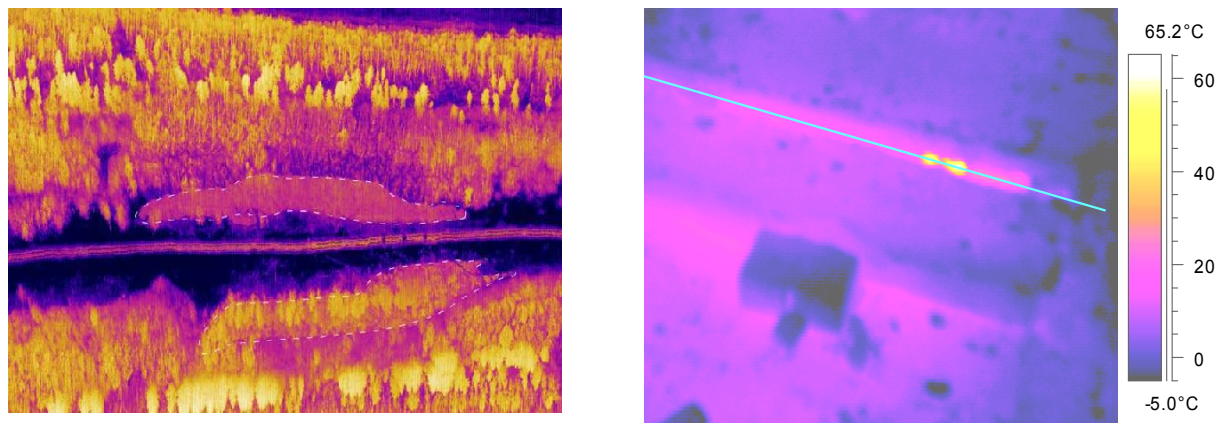


Рис. 1. Теплоснимки обводнения насыпи железной дороги (слева) и подземного пожара (справа), сделанные с воздуха 500

Так как простой тепловизор может обеспечить качественное изображение только очень узкого участка местности, чаще применяют тепловизионные сканеры, которые поворачивают поле зрения тепловизора на некоторый угол в поперечной плоскости (рис. 2). Иногда доворот зеркала осуществляется и на небольшой угол в продольном направлении для компенсации поступательной скорости и колебаний летательных аппаратов (ЛА) по тангажу. Чаще всего используются сканеры ЛА с вращающимися призмами. При их использовании изображение проецируется сначала на призму, а затем поворачивается на объектив и матрицу тепловизора. Этим достигается неподвижность тепловизора при широком поперечном захвате кадров. Однако такие сканеры имеют ряд недостатков – в частности появление «размытости» на тепловом изображении вследствие явления виньетирования, невозможность использования строчных матриц. Для устранения этих недостатков был подготовлен проект маловысотного тепловизора с адаптивным сканированием – «смотрящей» матрицей.

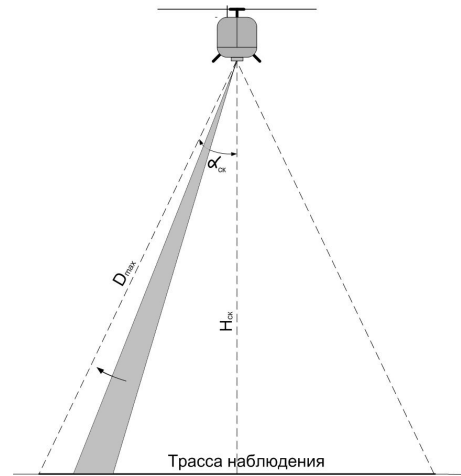


Рис. 2. Схема сканирования тепловизионным сканером

«Смотрящая» матрица, работающая в «дальнем» ИК-диапазоне, с длиной волны 9–12 мкм позволяет накапливать тепловое изображение и эффективно анализировать излучение сельскохозяйственных угодий и продуктопроводов. Однако для этого требуется «заморозить» ее в пространстве на 0,05 с, для этого необходимо использовать безредукторные электроприводы с большими моментами и легким элементом, меняющим направление движения (рис. 3). В этом устройстве можно проектировать на матрицу сравнительно небольших размеров (320x256 элементов) существующего тепловизора 4 изображение земной поверхности через зеркало 3 с линейно-дискретным изменяемым законом сканирования таким образом, чтобы на матрице периодически формировались неподвижные изображения (подкадры), из совокупности которых с помощью цифровой обработки далее формировалось бы полное изображение. Закон сканирования изменяется с помощью управляемого электропривода 2 в зависимости от изменения скорости и высоты полета носителя, а также углов крена, тангажа и сноса. Для снижения стоимости применения сканера на ЛА, повышения точности целесообразно использовать инерциальный измерительный блок, систему воздушных сигналов (СВС), спутниковую навигационную систему (СНС) и магнитометр самого ЛА. Объединение сканера с бортовыми измерительными системами ЛА позволяет вести запись совместно с определением пространственного положения теплового приемника, что кроме ориентации зеркала в дальнейшем может служить для «сшивания» изображения. Движение зеркала измеряется точными датчиками перемещения 1 и 5, использующими принцип оптической интерференции.

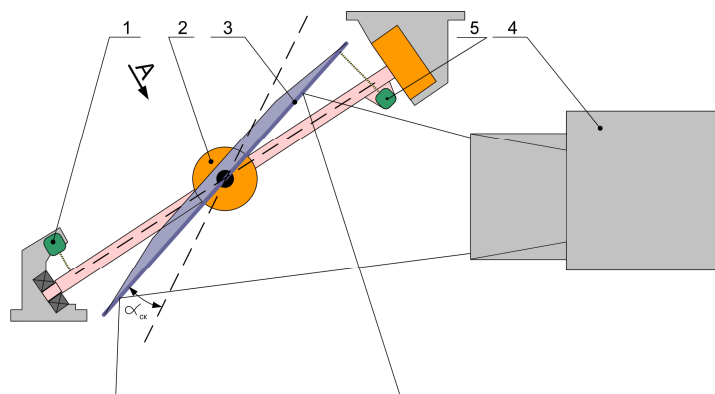


Рис. 3. Схема тепловизора с адаптивным сканированием (вид по полету)

Для исключения размытости изображения используется «замораживание» изображения на заданное время по сигналам контроллера, обрабатывающего данные от датчиков скорости, высоты и углового положения носителя. Для упрощения «сшивания» подкадров изображения в сканере используется принцип косого сканирования. В связи с тем, что система «отслеживает» изменение параметров полета, заложенный в нем принцип называется адаптивным цифровым сканированием. Применение этого принципа позволяет обеспечить обзор наблюдаемой поверхности

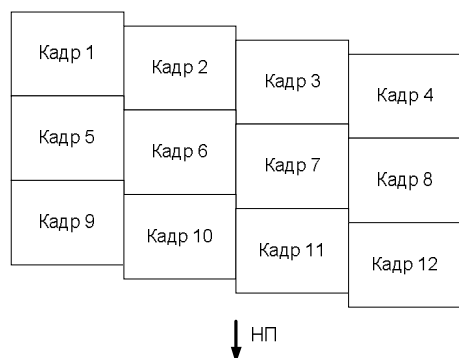


Рис. 4. Сшитые в ленту изображения подкадры (НП – направление полета ЛА)

сти в широком поле зрения и избавиться от необходимости применения широкоугольных объективов без потери углового разрешения. Сам процесс сшивания производится по определенным координатам снимков, однако погрешности измерения координат могут привести к искажениям на местах «склейки», поэтому целесообразно применять алгоритмы перебора неявно выраженных объектов снимков с последующей их идентификацией и соединением. В связи с наличием продольной скорости движения ЛА снимки несколько сдвигаются относительно друг друга в продольном направлении (рис. 4).

Наименьшую стоимость эксплуатации на сегодняшний день обеспечивают сверхлегкие летательные аппараты (СЛА), которые и могут стать носителями сканирующего оборудования для сельского хозяйства. Часто СЛА оснащаются импортными системами ориентации и измерения фирм Dynon, Stratomaster и некоторых других. Главным условием использования бортовой измерительной системы СЛА для ориентации зеркала сканера является наличие цифрового выхода и приемлемой точности при определении значений углов в 0,25–0,3 величины мгновенного поля зрения аппаратуры. Это стало возможным вследствие развития электронных технологий, позволяющих заменить сложные гироскопические приборы простыми твердотельными элементами. В настоящее время выпускается значительное количество приборов для СЛА, выходные данные параметров которых могут быть использованы для управления зеркалом сканера.

Структура интегрированного со СЛА маловысотного тепловизора с адаптивным сканированием – «смотрящей» матрицей представлена на рис. 5.

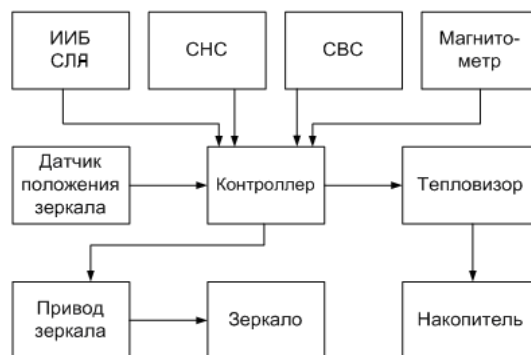


Рис. 5. Структура интегрированного со СЛА тепловизора с адаптивным сканированием

Считается, что тепловизионная аэросъемка объектов оптимально должна выполняться с малых высот – 100–200м. Однако в действительности высоту сканирования необходимо определять в зависимости от решаемых задач, размеров, температуры объекта, который должен быть исследован, и характеристик приемника излучения. Определение высоты полета для тепловизионной съемки местности зависит, в первую очередь, от максимальной дальности определения объекта измерения. Соответственно высота полета:

$$H_{\text{ск}} = D_{\text{max}} \cos \alpha_{\text{ск}}, \quad (1)$$

где D_{max} – максимальная дальность обнаружения объекта; $\alpha_{\text{ск}}$ – максимальный угол отклонения зеркала сканера.

Целесообразно допустить объект обнаружения плоским «серым» излучателем, с постоянным коэффициентом излучения, трассу наблюдения – горизонтальной, угол между нормалью к поверхности излучения и линией максимального удаления объекта от тепловизионного сканера равный углу максимального отклонения зеркала сканера $\alpha_{\text{ск}}$. В этом случае высота полета по максимальной дальности определения объекта [1]

$$H_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{\tau_{\text{об}} S_{\text{об}} \varepsilon_{\text{ц}} T_{\text{ц}}^4 \cos^3 \alpha_{\text{ск}} \sigma_T S_{\text{ц}} K_{\text{ск}}}{\pi m_T \sqrt{q_T \Delta f_T} \Phi_{\text{пор}} \chi_T} \left[z \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_M} \right) - z \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_M} \right) \right]}, \quad (2)$$

где $\tau_{\text{об}}$ – коэффициент пропускания передающей камеры тепловизора – определяется по паспортным характеристикам тепловизора; $S_{\text{об}}$ – площадь объектива передающей камеры тепловизора; $\varepsilon_{\text{ц}}$ – коэффициент теплового излучения объекта, определяется по таблицам в зависимости от свойств планируемого объекта сканирования; $T_{\text{ц}}$ – температура объекта, задаваемая по минимальным требованиям идентификации объекта; σ_T – постоянный коэффициент, $\sigma_T = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $S_{\text{ц}}$ – площадь объекта, задаваемая по минимальным требованиям идентификации объекта; $K_{\text{ск}}$ – коэффициент использования теплового излучения объекта и пропускания объекта, зависит от характеристик зеркала сканера; m_T – допустимое значение отношения сигнал/шум для тепловизора; q_T – площадь чувствительной площадки приемника излучения; Δf_T – полоса пропускания частот усилителя фототока; $\Phi_{\text{пор}}$ – порог чувствительности приемника излучения; χ_T – коэффициент использования приемника излучения.

$$K_{\text{ск}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{M_{e\lambda}}{(M_{e\lambda})_{\text{max}}} S_{\lambda} \tau_{\alpha} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{M_{e\lambda}}{(M_{e\lambda})_{\text{max}}} d\lambda}, \quad (3)$$

где $M_{e\lambda}$ – энергетическая светимость объекта; $\frac{M_{e\lambda}}{(M_{e\lambda})_{\text{max}}}$ – функция относительной спектральной плотности энергетической светимости объекта, которая может быть вычислена по таблицам [2] в зависимости от безразмерного отношения частот:

$$x_{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_m},$$

где λ_m – частота спектрального максимума потока излучения, определяемая по закону Вина:

$$\lambda_m = \frac{c_v}{T_{\text{ц}}}, \quad (4)$$

где $c_v = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$; S_{λ} – спектральная характеристика приемника излучения тепловизора, зависящая от спектральных характеристик оптического фильтра, объектива и зеркала; λ_1, λ_2 – границы диапазона длин волн чувствительности приемника излучения; τ_{α} – коэффициент пропускания атмосферы в диапазоне частот $\lambda_1 - \lambda_2$.

Коэффициент использования приемника излучения определяется идентично коэффициенту использования теплового излучения, но без учета характеристик пропускания атмосферы:

$$\chi_T = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{M_{e\lambda}}{(M_{e\lambda})_{\text{max}}} S_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{M_{e\lambda}}{(M_{e\lambda})_{\text{max}}} d\lambda}. \quad (5)$$

Наибольшую сложность при расчетах на ЭВМ представляет собой коэффициент пропускания атмосферы τ_a . Он зависит от большого количества параметров. Однако, если рассматривать его только в узких рамках диапазона длины волны, задача его определения упрощается. В этом случае можно воспользоваться аппроксимационными зависимостями расчета коэффициента использования теплового излучения [3]. Для дальнего диапазона они имеют следующий вид:

$$K = -0,22 + 0,47x_{41} + 1,05x_{42} + 1,77 \cdot 10^{-2}x_{41}x_{42} + 1,45 \cdot 10^{-1}x_{41}^2 - 0,89x_{42}^2, \quad (6)$$

где

$$x_{41} = 1,06 - 2,15 \cdot 10^{-2}d_B - 1,15 \cdot 10^{-1}D_{\max} + 0,54 \cdot 10^{-3}d_B D_{\max} + 0,60 \cdot 10^{-3}d_B^2 + 0,35 \cdot 10^{-2}D_{\max}^2, \quad (7)$$

$$x_{42} = 1,23 - 1,81 \cdot 10^{-2}t_B - 2,31 \cdot 10^{-3}T_{\text{ц}} + 1,62 \cdot 10^{-5}t_B T + 7,06 \cdot 10^{-5}t_B^2 + 1,43 \cdot 10^{-6}T_{\text{ц}}^2; \quad (8)$$

d_B – дальность метеорологической видимости; t_B – температура воздуха у поверхности земли.

Оптимальная высота сканирования может быть определена для сканера фактически один раз и занесена в руководство по эксплуатации (РЭ). В дальнейшем в зависимости от видов объектов изучения и состояния атмосферы высота может выбираться по табличным данным РЭ.

Выводы. Предложенная методика определения высоты сканирования позволит добиться наилучших результатов идентификации исследуемых объектов с воздуха. Это обеспечит быстрое и эффективное применение тепловизионных устройств для решения ряда задач интенсификации сельскохозяйственного производства, таких, как определение всхожести сельскохозяйственных культур, влажности почвы на небольшой глубине, состояние листового покрова.

Библиографический список

1. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение / Ж. Госсорг. – М.: Мир, 1988. – 400 с.
2. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники / Л.З. Криксунов. – М.: Советское радио, 1978. – 400 с.
3. Криксунов Л.З. Тепловизоры / Л.З. Криксунов, Г.А. Падалко. – Киев: Техника, 1987. – 168 с.

Материал поступил в редакцию 01.02.11.

References

1. Gossorg J. Infrakrasnaya termografiya. Osnovy, tehnika, primeneniye / J. Gossorg. – M.: Mir, 1988. – 400 s. – In Russian.
2. Kriksunov L.Z. Spravochnik po osnovam infrakrasnoi tehniki / L.Z. Kriksunov. – M.: Sovetskoe radio, 1978. – 400 s. – In Russian.
3. Kriksunov L.Z. Teplovizory / L.Z. Kriksunov, G.A. Padalko. – Kiev: Tehnika, 1987. – 168 s. – In Russian.

FINDING SPATIAL SPECTRAL SCANNING ALTITUDE BY FAR INFRARED BAND RADIATION SENSOR

V.V. DUDNIK

(Don State Technical University),

V.V. ROZHENTSOV

(St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics),

G.G. PADALCO

(JSC 'Azov Mechano-Optical Plant')

Operation principles and application of the aircraft thermal vision scanners are considered. Their workability is described. The operation diagram of the future thermal vision device with adaptive scanning is presented. The calculation methods of the flight altitude taking into account maximum detection range of the object thermal vision emission are presented.

Keywords: thermal vision scanner, microlight, flight altitude, atmosphere.