



Проект комплекса гиперспектрального дистанционного зондирования земель с помощью БПЛА

Часть 2

М. В. Агринский¹, А. В. Голицин¹, В. В. Старцев²

¹ ТЦ «Инженер», Лыткарино, Московская обл., Россия

² ОКБ «Астрон» Лыткарино, Московская обл., Россия

С помощью беспилотного летательного аппарата, оборудованного гиперспектральной аппаратурой, можно с высоким разрешением собрать спектрально-топологическую информацию об интересующем локальном районе. Такие возможности открывают большой потенциал использования гиперспектральных комплексов в мониторинге за использованием и состоянием земель сельскохозяйственного назначения. В первой части статьи (см. ФОТОНИКА. 2019; 13(2): 184–201) была рассмотрена конструкция телевизионной камеры и ее взаимодействие с сопрягаемыми узлами. Во второй части статьи проведен анализ принципов работы и создана практическая модель отечественного гиперспектрометрического комплекса, предназначенного для наблюдения за использованием и состоянием земель сельскохозяйственного назначения с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Комплекс может обеспечить сбор спектрально-топологических данных высокого разрешения в интересующем районе. Продолжено описание разработанного гиперспектрометрического комплекса и приведены расчеты, подтверждающие заложенные технические характеристики, расчеты зоны обзора телевизионной камеры.

Ключевые слова: гиперспектральная съемка, мониторинг земель сельскохозяйственного назначения, беспилотные летательные аппараты, топографическая съемка.

Статья поступила: 16.08.2019. Принята к публикации: 24.09.2019.

Hyperspectral Remote Complex Project Sounding Land Using UAVs

Part 2

M. V. Agrinsky¹, A. V. Golitsin¹, V. V. Startsev²

¹ TsT «Engineer», Lytkarino, Moscow Region, Russia

² OKB Astron Lytkarino, Moscow Region, Russia

Using an unmanned aerial vehicle equipped with hyperspectral equipment, it is possible to collect spectro-topological information about a local area of interest with high resolution. Such opportunities offer great potential for using hyperspectral complexes in monitoring the use and condition of agricultural land. In the first part of the article (see PHOTONICS. 2019; 13 (2):) In the first part of the article, the design of the television camera and its interaction with mating nodes were considered. The second part of the article analyzes the operating principles and creates a practical model of a domestic hyperspectrometric complex designed

to monitor the use and condition of agricultural land using an unmanned aerial vehicle (UAV). The complex can provide collection of high-resolution spectral and topological data in the region of interest. The description of the developed hyperspectrometric complex is continued and the calculations are presented that confirm the inherent technical characteristics and the calculations of the viewing area of the television camera.

Key words: hyperspectral survey, monitoring of agricultural lands, unmanned aerial vehicles, topographic survey.

Received: 16.08.2019. Accepted: 24.09.2019.

ВВЕДЕНИЕ

Для реализации задач мониторинга сельскохозяйственных угодий и получения объективной информации об их использовании и состоянии предлагается использовать методы дистанционного зондирования сельскохозяйственных земель с помощью беспилотных летательных аппаратов, оснащенных аппаратурой для проведения авиационной цифровой съемки протяженных площадей и объектов.

Расчеты, подтверждающие заложенные технические характеристики:

1. Расчет полей зрения, углового и линейного разрешения телевизионного канала

Математическая зависимость угла поля зрения от фокусного расстояния объектива определяется формулой:

$$a = 2 \arctg(b/2f), \quad (1.1)$$

где: a – угол поля зрения по выбранной координате (по вертикали или по горизонтали), градус; b – линейный размер рабочей зоны фотоприемника по выбранной координате (по вертикали или по горизонтали), мм; f – фокусное расстояние объектива, мм.

Угловое разрешение описывается выражением:

$$\alpha = \arctg[b/(f \cdot N)], \quad (1.2)$$

где: α – угловое разрешение (радиан/pixel); N – количество элементов разложения фотоприемника по выбранной координате (по вертикали или по горизонтали), pixel; b – линейный размер рабочей зоны фотопри-

емника по выбранной координате (по вертикали или по горизонтали), мм; f – фокусное расстояние объектива, мм.

При расчете полей зрения и углового разрешения телевизионного канала использовались следующие данные:

- тип фотоприемника: CMV4000 фирмы CMOSIS;
- размер фотоприемника: 11,26×11,26 мм;
- количество элементов: 2048×2048;
- размер элемента 5,5×5,5 мкм.

Результаты расчета полей зрения и углового разрешения телевизионного канала в зависимости от фокусного расстояния объектива приведены в табл. 4.

Исходя из компромисса между размером поля зрения, который в конечном итоге определяет зону обзора на местности и угловым разрешением, который определяет линейное разрешение на местности, целесообразно выбрать фокусное расстояние объектива гиперспектральной камеры в пределах 50–70 мм.

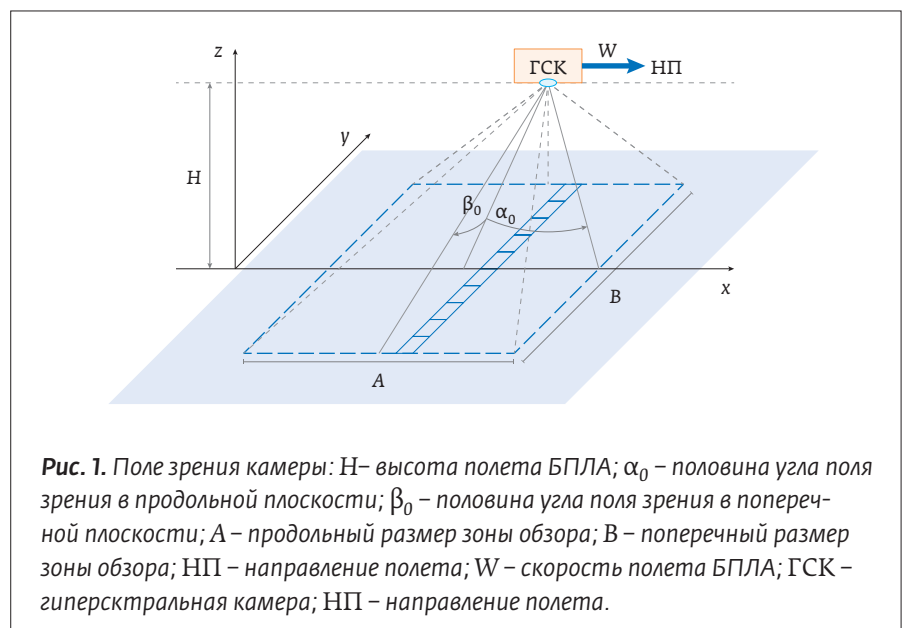


Рис. 1. Поле зрения камеры: H – высота полета БПЛА; α_0 – половина угла поля зрения в продольной плоскости; β_0 – половина угла поля зрения в поперечной плоскости; A – продольный размер зоны обзора; B – поперечный размер зоны обзора; НП – направление полета; W – скорость полета БПЛА; ГСК – гиперспектральная камера; НП – направление полета.



2. Расчет зоны обзора телевизионной камеры

Рассмотрим зону обзора телевизионной камеры. При полете на высоте H поле зрения камеры в проекции на горизонтальную подстилающую поверхность имеет вид, показанный на рисунке.

При расчете зоны обзора полагаем, что БПЛА находится на высоте H , а строительная ось параллельна подстилающей поверхности. Ширину полосы съемки земной поверхности, в зависимости от высоты полета БПЛА и угла обзора телевизионного канала, можно найти из очевидного соотношения:

$$B = 2H \operatorname{tg}(\beta/2), \quad (1.3)$$

где: H – высота полета БПЛА, м; β – угол поля зрения в поперечной плоскости, град; B – поперечный линейный размер зоны обзора, м.

Расчеты ширины полосы обзора земной поверхности в зависимости от высоты полета БПЛА приведены в табл. 5. Расчеты проводились для телевизионной камеры, имеющей поле зрения поперек направления полета 10° .

Исходя из компромисса между углом поля зрения, который в конечном итоге определяет ширину обзора на местности, и высотой полета летательного аппарата, целесообразно осуществлять полеты на высотах 400–500 м.

3. Расчет освещенности матрицы телевизионной камеры

Для определения пригодности выбранной матрицы и разрабатываемой камеры проведем расчет диапазонов возможной освещенности фотоприемника телевизионной камеры. Освещенность матрицы телевизионной камеры определяется следующим выражением:

$$E_o = E_m r_\phi t_o \tau_{\text{атм}} A_{\text{вх}} (p f^2)^{-1}$$

или

$$E_o = E_m r_\phi t_o \tau_{\text{атм}} 0,25(D/f)^2,$$

Таблица 4. Характеристики телевизионного канала

Фокусное расстояние объектива, мм	Поле зрения, град		Угловое разрешения, угл. мин		Угловое разрешения, мрад	
	Вертик.	Гориз.	Вертик.	Гориз.	Вертик.	Гориз.
20	31,46	31,46	0,95	0,95	0,275	0,275
30	21,27	21,27	0,63	0,63	0,183	0,183
40	16,03	16,03	0,47	0,47	0,137	0,137
50	12,85	12,85	0,38	0,38	0,110	0,110
60	10,73	10,73	0,32	0,32	0,092	0,092
70	9,20	9,20	0,27	0,27	0,079	0,079
80	8,05	8,05	0,24	0,24	0,069	0,069
90	7,16	7,16	0,21	0,21	0,061	0,061
100	6,45	6,45	0,19	0,19	0,055	0,055
110	5,86	5,86	0,17	0,17	0,050	0,050
120	5,37	5,37	0,16	0,16	0,046	0,046
130	4,96	4,96	0,15	0,15	0,042	0,042
140	4,61	4,61	0,14	0,14	0,039	0,039
150	4,30	4,30	0,13	0,13	0,037	0,037

где: E_o – освещенность фоточувствительного слоя матрицы; $A_{\text{вх}}$ – площадь входного зрачка $A_{\text{вх}} = pD^2/4$; D – диаметр входного зрачка объектива; f – фокусное расстояние объектива; t_o – коэффициент пропускания оптической системы; E_m – освещенность местности; r_ϕ – коэффициент отражения местности; r_ϕ – коэффициент отражения местности характеризует относительную величину отраженного потока излучения в заданном направлении по сравнению с освещающим потоком.

Таблица 5. Ширина полосы обзора земной поверхности в зависимости от высоты полета БПЛА

Высота полета, м	Ширина полосы обзора, м		
	Угол поля зрения 10°	Угол поля зрения 20°	Угол поля зрения 30°
50	8,7	17,6	26,8
100	17,5	35,3	53,6
200	35,0	70,5	107,2
300	52,5	105,8	160,8
400	70,0	141,1	214,4
500	87,5	176,3	267,9

Коэффициенты отражения некоторых объектов в видимом диапазоне приведены ниже:

- почва серая: 0,15;
- почва чернозем: 0,03;
- песок: 0,2;
- лес лиственный: 0,07;
- лес хвойный: 0,05;
- луг суходольный: 0,07;
- дороги грунтовые на суглинке: 0,2;
- дороги грунтовые на черноземе: 0,08;
- шоссе: 0,3.

Пропускание излучения атмосферой определяется формулой:

$$\tau_{\text{атм}} = \exp(-aL),$$

где: L – расстояние до местности; $\tau_{\text{атм}}$ – коэффициент пропускания излучения атмосферой; a – коэффициент ослабления излучения атмосферой. Он может быть оценен по эмпирической формуле:

$$a = 3,91/S_M^{-1}(\lambda/0,55)^{n_s},$$

где: S_M – метеорологическая дальность видимости; λ – длина волны максимума чувствительности фотоприемника; $n_s = 0,585S_M^{1/3}$ при $0 < S_M \leq 10$ км; $n_s = 1,256$ при $10 \text{ км} < S_M \leq 25$ км.

Исходные данные для расчета: $D=25$ мм; $f=60$ мм; $t_0=0,8$; $E_M=1000$ лк, 85000 лк; $r_\phi=0,1$; $S_M=10$ км; $\lambda=0,6$ мкм; $L=500$ м.

Для указанных исходных данных $a=0,391$ км⁻¹. Для трассы с высотой полета $H=0,5$ км пропускание излучения атмосферой составляет $\tau_{\text{атм}}=0,82$. Подставляя значения параметров в формулу E_0 , получаем, что

$$E_0 = 1000 \times 0,1 \times 0,8 \times 0,82 \times 0,25 \times 0,11 = 1,8 \text{ лк}$$

при минимальной освещенности на местности 1000 лк и

$$E_0 = 85000 \times 0,1 \times 0,8 \times 0,82 \times 0,25 \times 0,11 = 153 \text{ лк}$$

при максимальной освещенности на местности 85000 лк.

В результате расчета получен диапазон освещенности на матрице камеры телевизионной в пределах от 1,8 лк при минимальной освещенности на местности до 153 лк при максимальной освещенности на местности, что соответствует допустимому диапазону рабочих освещенностей на матрице камеры телевизионной, который составляет от минимальной 0,2 лк до максимальной 500 лк с автоматической регулировкой чувствительности во всем диапазоне освещенностей на фотоприемнике.

Таким образом, обеспечивается работоспособность камеры телевизионной в диапазоне освещенностей на местности от 1000 до 85000 лк, что соответствует освещенности на поверхности Земли зимой при облачном небе и в солнечный летний день.

4. Оценка потока видеоданных от камеры телевизионной

Для выбора параметров системы накопления данных (объема и скорости записи информации), а также для выбора возможных высокоскоростных интерфейсов проведем оценку видеопотоков от блока регистрации изображения (камеры телевизионной).



АСТРОН
Оптико-механическое конструкторское бюро

ПРОИЗВОДСТВО ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ
140080, МО, г. Лыткарино, ул. Парковая, д.1; тел: +7 (495) 215-13-82; info@astrohn.ru, www.astrohn.ru



Размер несжатого кадра – это произведение ширины и высоты изображения в пикселах, умноженное на количество оттенков серого.

Размер кадра не зависит от того, что изображено в кадре, т. е. размер файла без сжатия будет одинаков для любого изображения. Количество оттенков серого задается количеством битов, используемых для кодирования точки (как правило, используется 8 бит для 256 градаций серого).

При расчете потока видеоданных от камеры телевизионной будем полагать:

- число фоточувствительных элементов матричного фотоприемника 2048×2048 ;
- частота кадров 50 кадров в секунду;
- количество разрядов 8 разрядов.

Количество пикселей одного кадра составляет: $2048 \times 2048 = 4194304$. При передаче 256 градаций серого (8 разрядов) информационная емкость одного кадра составит: $4194304 \times 8 = 33554432$ бит. При передаче с частотой кадров 50 кадров в секунду поток видеоданных составит:

$$33554432 \times 50 = 1677721600 \text{ бит/с или } 1,67 \text{ Гбит/с.}$$

Таким образом, система накопления данных и интерфейс между блоком регистрации изображения и системой накопления данных должны обеспечивать работу с приведенным выше потоком видеоданных.

5. Оценка скорости перемещения изображения по полю матрицы

При съемке с движущегося носителя изображение местности смещается во время экспозиции.

Сдвиг изображения рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta = W/Hft,$$

где: W – скорость движения носителя; H – высота съемки; f – фокусное расстояние камеры; t – время экспозиции. Оценим скорость перемещения изображения по полю матрицы при полете БПЛА на высоте H со скоростью W .

Пусть полет БПЛА происходит на высоте 200 м со скоростью 20 м/с (72 км/час), тогда при частоте кадров 50 кадр/с (длительности кадра 20 мс) местность в течение одного кадра переместится на 0,04 м, что в проекции изображения местности на светочувствительное поле матрицы при фокусном расстоянии объектива 60 мм будет составлять:

$$\Delta = 20/500 \times 0,06 \times 0,02 = 0,000048 \text{ м (или } 4,8 \text{ мкм).}$$

Из чего следует, что при максимальном времени экспозиции, равном 20 мс, что практически соответствует минимальной освещенности на матрице, изображение переместится по поверхности матрицы на 4,8 мкм, что меньше размера одного пикселя матрицы. В реальных условиях освещенность на матрице будет существенно выше минимальных значений, что приведет к уменьшению времени экспозиции, а следовательно, величина перемещения изображения в течение одного кадра по поверхности светочувствительного слоя матрицы будет еще меньше и будет укладываться в размер одного пикселя матрицы. Исходя из этого, высоту полета летательного аппарата целесообразно осуществлять на высотах не ниже 200 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами создана практическая модель отечественного комплекса гиперспектрального зондирования. С помощью беспилотного летательного аппарата, оборудованного гиперспектральной аппаратурой, можно с высоким разрешением собрать спектрально-топологическую информацию об интересующем районе. Такие возможности открывают большой потенциал использования гиперспектральных комплексов в мониторинге за использованием и состоянием земель сельскохозяйственного назначения.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят ФГБУ «Фонд содействия инновациям» за финансовую поддержку работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Агринский М. В., Голицин А. В., Старцев В. В.** Проект комплекса гиперспектрального дистанционного зондирования земель с помощью БПЛА. Часть 1. Фотоника. 2019; 13(2):184–201. DOI: 10.22184 / FROS.2019.13.2.184.201.
2. **Гонсалес Р., Вудс Р.** Цифровая обработка изображений / Пер. с англ. под ред. Чочиа П. А. – М.: Техносфера. 2005.
3. **Brailean J. C., Kleihorst R. P., Efstratiadis S., Katsaggelos A. K., Legendijk R. L.** Noise Reduction Filters for Dynamic Image Sequences: A Review. *Proceedings of IEEE*. 2015; 83(9): 1272–1292.
4. **Голицин А. В., Ефремов В. С., Шлишевский В. Б.** Некоторые варианты оптических систем на основе жидкостных элементов. Сборник трудов XI Международной конференции «Прикладная оптика-2014». – СПб.: Опт. общ. им. Д. С. Рождественского. 2014; 3: 55.

REFERENCE

1. **Agrinskij M. V., Golitsin A. V., Starcev V. V.** Proekt kompleksa giperspektral'nogo distantsionnogo zondirovaniya zemel' s pomoshch'yu BPLA. CHast' 1. *Fotonika*. 2019; 13(2):184–201. DOI: 10.22184 / FROS.2019.13.2.184.201.
2. **Gonsales R., Vuds R.** *Cifrovaya obrabotka izobrazhenij* / Per. s angl. pod red. Chochia P. A. – M.: Tekhnosfera. 2005.
3. **Brailean J. C., Kleihorst R. P., Efstratiadis S., Katsaggelos A. K., Legendijk R. L.** Noise Reduction Filters for Dynamic Image Sequences: A Review. *Proceedings of IEEE*. 2015; 83(9): 1272–1292.
4. **Golitsyn A. V., Efremov V. S., Shlishevskij V. B.** Nekotorye varianty opticheskikh sistem na osnove zhidkostnykh elementov. *Sbornik trudov XI Mezhdunarodnoy konferencii "Prikladnaya optika-2014"*. – SPb.: Opt.obsh. im. D. S. Rozhdstvennskogo. 2014; 3: 55.

МОСКВА, ВДНХ, ПАВИЛЬОН №75

22-25 ОКТЯБРЯ 2019

XXIII МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА

INTERPOLITEX



СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГОСУДАРСТВА



WWW.INTERPOLITEX.RU

ОРГАНИЗАТОРЫ



МВД РОССИИ



ФСБ РОССИИ



РОСГВАРДИЯ

ОРГАНИЗАТОР
ВЫСТАВКИ «ГРАНИЦА»



ПС ФСБ РОССИИ

ЭКСПОНЕНТ-КООРДИНАТОР
ОТ МВД РОССИИ



ФКУ «НПО «СТИС»
МВД РОССИИ

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ
УСТРОИТЕЛЬ



ЗАО «ОВК «БИЗОН»