



ПРОЕКТ КОМПЛЕКСА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЕЛЬ С ПОМОЩЬЮ БПЛА.

ЧАСТЬ 1

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

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

²ОКБ «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.

Для целей получения детальной, а не интегральной спектральной информации рассмотрена элементная база, выбраны структурные элементы и создана практическая модель отечественного комплекса гиперспектрального зондирования. В первой части статьи рассмотрена конструкция телевизионной камеры и ее взаимодействие с сопрягаемыми узлами.

Статья поступила в редакцию 16.11.2018

Статья принята к публикации 24.11.2018

Наблюдение за использованием и состоянием земель сельскохозяйственного назначения – необходимый элемент системы регулирования агропромышленного комплекса. Информация о наличии и использовании пахотных земель должна содержать данные о пространственном размещении используемых пахотных земель и посевов сельскохозяйственных культур, а также данные оперативного обнаружения заболеваний хозяйственно значимых растений, степени поражений посевов различными фитопатогенами и оценки состояния земель. Таким образом, создание комплекса мониторинга земель сельскохозяйствен-

PROJECT OF HYPERSPECTRAL REMOTE LAND SENSING COMPLEX USING UAVS.

PART 1

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

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

²EDB «Astron» Lytkarino, Moscow Region, Russia

Using unmanned aerial vehicles equipped with hyperspectral equipment, it is possible to collect high-resolution spectral and topological information about the local area of interest. Such opportunities open up a great potential for the use of hyperspectral complexes in monitoring the use and condition of agricultural land. For the purpose of obtaining detailed, rather than integral spectral information, the element base has been considered, structural elements have been selected and a practical model of the domestic complex of hyperspectral sensing has been created. The first part of the article describes the design of a television camera and its interaction with the mating assemblies.

Article was received on 16.11.2018

Article was accepted for publication 24.11.2018

Monitoring the use and condition of agricultural land is a necessary element of the regulation system of the agricultural and industrial complex. Information on the availability and use of arable land should contain the data on the spatial distribution of arable land used and crops, as well as the data on the rapid detection of diseases of economically significant plants, the extent of damage to crops by various pathogens and assessments of the state of the land. Thus, the creation of a complex for monitoring agricultural lands is associated with the tasks of providing interested users with information about the areas of arable land and crops of various types, their productivity, and current information about their condition.

To implement the tasks of monitoring agricultural land and obtaining objective information about their use and condition, it is proposed to use methods of remote sensing of agricultural land using unmanned aerial vehicles equipped with hardware for conducting aerial digital surveys of extended areas and objects. The use of modern remote sensing data allows for



ного назначения связано с задачами обеспечения заинтересованных пользователей информацией о площадях пахотных земель и посевов различных типов, их продуктивности, оперативной информацией о их состоянии.

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. Применение современных данных дистанционного зондирования позволяет оптимизировать и повысить эффективность территориальной организации сельского хозяйства.

Типичными задачами здесь являются:

- обеспечение текущего контроля за состоянием посевов сельскохозяйственных культур;
- раннее прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур;
- мониторинг темпов уборки урожая одновременно по территориям крупных регионов;
- оперативного мониторинга обнаружения заболеваний растений и степени поражений различными фитопатогенами;
- определение емкости пастбищ различных типов и продуктивности сенокосов и др.

При дистанционном зондировании (ДЗ), наряду с многоспектральными системами, все более широкое применение находят гиперспектральные системы, установленные на беспилотный летательный аппарат (БПЛА). Уникальность гиперспектральной системы заключается в ее возможности фиксировать излучение в сотнях очень узких спектральных диапазонах, которые позволяют оценить физико-химические свойства исследуемых объектов. Среди наиболее актуальных проблем мониторинга, решаемых с помощью гиперспектральных сенсоров, можно выделить следующие:

- определение фенофаз развития растений и своевременное выявление их аномалий;
- обнаружение процессов полегания, вымокания и увядания посевов, связанных с недостатком влаги;
- контроль фитосанитарного состояния посевов и лесных массивов;
- наблюдение за динамикой развития сельскохозяйственных культур и прогнозирование урожайности посевов.

Эти задачи могут быть успешно решены с помощью беспилотного летательного аппарата, обо-

тимизируя и улучшая эффективность территориальной организации сельского хозяйства.

The typical tasks are as follows:

- ensuring current monitoring of the state of crops;
- early forecasting of crop yields;
- monitoring the pace of harvesting simultaneously across the territories of large regions;
- operational monitoring of the detection of plant diseases and the extent of damage by various phytopathogens;
- determination of the capacity of pastures of various types and productivity of hayfields, etc.

In remote sensing (RS), the hyperspectral systems installed on an unmanned aerial vehicles (UAV) are becoming more widely used along with multispectral systems. The uniqueness of the hyperspectral system lies in its ability to record radiation in hundreds of very narrow spectral ranges, which allow for assessing the physicochemical properties of the objects under study. The most relevant problems of monitoring solved with the help of hyperspectral sensors include, *inter alia*, the following:

- determination of phenophases of plant development and timely detection of their anomalies;
- detection of the processes of lodging, soaking and binding crops, associated with a lack of moisture;
- control of the phytosanitary condition of crops and woodlands;
- observation of the dynamics of the development of crops and forecasting crop yields.

These tasks can be successfully solved with the help of an unmanned aerial vehicle equipped with hyperspectral instrumentation, which can ensure the collection of high-resolution spectral-topological data in the region of interest without significant costs.

Analysis of modern developments of hyperspectral equipment showed that the composition of domestic advanced developments is mainly represented by hyperspectral instruments for space purposes. For use in ground-based instruments of hyperspectral imaging, installed on UAVs, the market offers products by XIMEA, Resonon, Cubert and some others. However, these instruments provide only integral (areal), and not detailed information and, moreover, are expensive. We have created a practical model of a domestic hyperspectrometer complex designed to monitor the use and condition of agricultural land with an unmanned aerial vehicle (UAV). This work describes the analysis of the principles of work, considers the element base, justifies the choice of structural elements.



рудованного гиперспектральной аппаратурой, который сможет обеспечить сбор спектрально-топографических данных высокого разрешения в интересующем районе без значительных затрат.

Анализ современных разработок гиперспектрального оборудования показал, что состав отечественных перспективных разработок в основном представлен гиперспектральными приборами космического назначения. Для использования в наземном пространстве приборов гиперспектральной съемки, установленных на БПЛА, рынок предлагает продукцию фирм XIMEA, Resonon, Cubert и некоторых других. Однако эти приборы обеспечивают получение лишь интегральной (площадной), а не детальной информации и, кроме того, имеют высокую цену. Мы создали практическую модель отечественного гиперспектрометрического комплекса, предназначенного для наблюдения за использованием и состоянием земель сельскохозяйственного назначения с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА). В настоящей работе проведен анализ принципов работы, рассмотрена элементная база, обоснован выбор структурных элементов.

УСТРОЙСТВО ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА

Проведем анализ устройства гиперспектрометра для понимания принципов его работы и определения возможных составных частей его конструкции.

Гиперспектрометр – прибор, осуществляющий съемку изображения исследуемой поверхности, причем для каждой точки этого изображения можно получить спектр яркости отраженного излучения в заданном диапазоне электромагнитного излучения. Спектр яркости представляется ограниченным набором спектральных каналов с заданными полосами пропускания.

Наиболее распространенными на сегодняшний день являются гиперспектрометры, которые в каждый момент времени регистрируют узкий отрезок поверхности под собой. Такие гиперспектрометры относятся к типу «pushbroom». Функциональная схема гиперспектрометра типа pushbroom показана на рис. 1. Гиперспектрометр включает в себя оптическую систему формирования изображения, спектропреломитель и фотоприемное устройство.

Формирование изображения узкого отрезка поверхности производится посредством щели, которая устанавливается на задней фокальной плоскости входного объектива. После коллимирующего объектива изображение в параллельных лучах попадает на спектропреломитель, в качестве которого может использоваться плоская одномерная дифрак-

HYPERSPECTROMETER ARRANGEMENT

We will analyze the hyperspectrometer arrangement in order to understand the principles of its operation and determine the possible components of its design.

A hyperspectrometer is a device that captures images using following surface, and for each point of this image you can get the brightness spectrum of the reflected radiation in a given range of electromagnetic radiation. The luminance spectrum is represented by a limited set of spectral channels with given bandwidths.

The most common today are hyperspectrometers, which at each point in time register a narrow segment of the surface below. Such hyperspectrometers are of the «pushbroom» type. The functional diagram of the pushbroom-type hyperspectrometer is shown in Fig. 1. The hyperspectrometer includes an optical imaging system, a spectral divider and a photodetector.

The image formation of a narrow segment of the surface is performed by a slit, which is installed on the rear focal plane of the input lens. After the collimating lens, the image in parallel rays falls on the spectrometer, which can be used as a flat one-dimensional diffraction grating, where decomposition occurs in the spectrum, and then projected onto a photo-receiving array of a television camera.

The optical system and the diffraction grating of the hyperspectrometer form an image on the photodetector array. Along one axis of the image, the Y coordinate of a narrow strip of the Earth's surface (see Fig. 1) is plotted; on the other, λ is the wavelength of radiation reflected from the Earth's surface, and the amount of charge accumulated inside each array element (pixel) is proportional to the spectral radiation density at a given wavelength. Thus, a set of spectral dependences of the radiation reflected from the Earth's surface is obtained on the photodetector array, depending on the Y coordinate of a certain part of the Earth's surface.

The magnitude of the band in terms of Y is determined by the angle of view of the camera of the television α and the altitude of the UAV.

Due to the fact that the UAV, on which the hyperspectrometer is located, moves along the X coordinate (see Fig. 1), the Earth's surface is scanned in the X direction.

A array photoreceiving device (array) is used as a photodetector. To control the array, the acquisition, storage and output of digital video data, a programmable logic integrated circuit (FPGA) with an integrated processor is used, which is a television camera as a whole [1–3].

ционная решетка, где происходит разложение в спектр и затем проецируется на фотоприемную матрицу камеры телевизионной.

Оптическая система и дифракционная решетка гиперспектрометра формируют на фотоприемной матрице изображение. По одной оси изображения отложена Y координата узкой полоски поверхности Земли (см. рис. 1), по другой λ – длина волны, отражаемого от поверхности Земли излучения, а величина заряда, накапливаемого внутри каждого элемента матрицы (пикселя), пропорциональна спектральной плотности излучения на данной длине волны. Таким образом, на фотоприемной матрице получается набор спектральных зависимостей отраженного от поверхности Земли излучения в зависимости от координаты Y определенного участка поверхности Земли.

Величина полосы по Y определяется углом поля зрения камеры телевизионной α и высотой полета летательного аппарата.

Вследствие того, что летательный аппарат, на котором находится гиперспектрометр, движется вдоль координаты X (см. рис. 1), то происходит сканирование поверхности Земли в направлении X .

В качестве фотоприемника используется матричное фотоприемное устройство (матрица). Для управления матрицей, организации съема и сохранения и выдачи цифровых видеоданных используется программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) со встроенным процессором, которая в совокупности представляет собой камеру телевизионную [1–3].

Далее приведем анализ основных составных частей гиперспектрометра для обоснованного выбора структурных элементов.

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ КАМЕРЫ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ

Камера телевизионная (КТ) предназначена для работы в составе гиперспектральной камеры на борту беспилотного летательного аппарата (БПЛА). КТ преобразует оптическое изображение, спроектированное оптической системой на фотоприемник телевизионной камеры, в видеосигнал изображе-

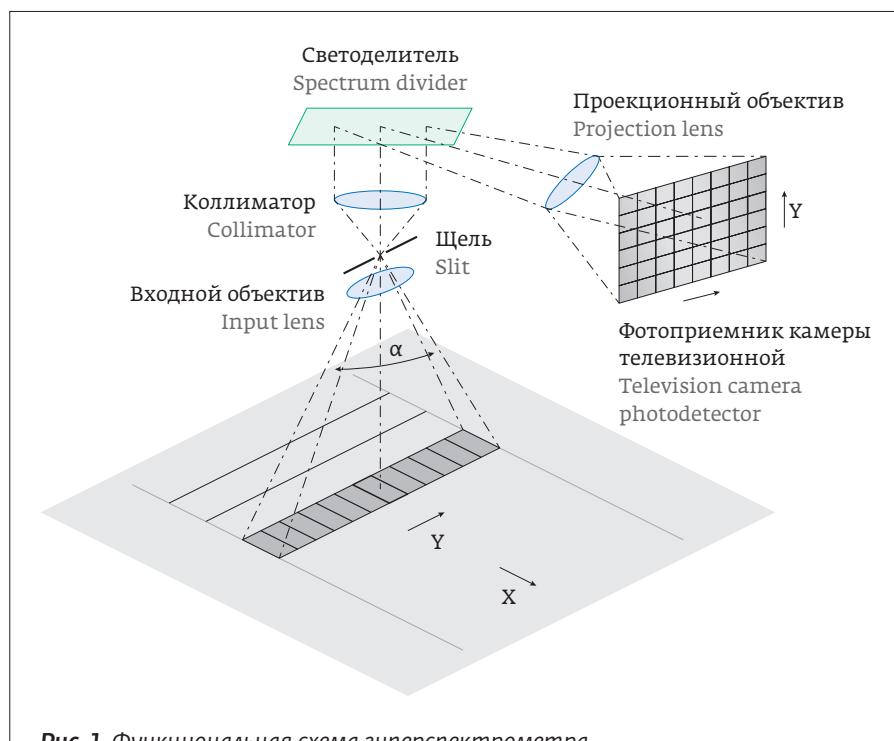


Рис. 1. Функциональная схема гиперспектрометра
Fig. 1. Functional scheme of hyperspectrometer

Further we present the analysis of the main components of the hyperspectrometer for a reasonable choice of structural elements.

ANALYSIS OF THE TELEVISION CAMERA DESIGN

The television camera (TC) is designed to work as part of a hyperspectral camera on board an unmanned aerial vehicle (UAV). A TC transforms an optical image projected by the optical system onto a photodetector of a television camera into a video signal of an image and issues it to interfacing systems in digital and analog form.

Main technical specifications

1. Number of photosensitive elements of the array used to form the output video signal of 2048×2048 elements (pixels), with a photosensitive element size of $5.5 \times 5.5 \mu\text{m}$.
2. Size of the active zone of the photosensitive field of the array is 11.264 mm horizontally and 11.264 mm vertically (diagonal 15.8 mm);
3. Spectral range of the TC is determined by the spectral characteristics of the photodetector (reference parameter) and ranges from 0.4 to $1.0 \mu\text{m}$.
4. TC operates in progressive scan mode and has a line resolution on the digital output in the



ния и выдает его в цифровом и аналоговом виде в сопрягаемые системы.

Основные технические характеристики

1. Число фоточувствительных элементов матрицы, используемых для формирования выходного видеосигнала 2048×2048 элементов (пикселов), с размером фоточувствительного элемента $5,5 \times 5,5$ мкм.
2. Размер активной зоны фоточувствительного поля матрицы составляет 11,264 мм по горизонтали и 11,264 мм по вертикали (диагональ 15,8 мм);
3. Спектральный диапазон работы КТ определяется спектральными характеристиками фотоприемника (справочный параметр) и составляет от 0,4 до 1,0 мкм.
4. КТ работает в режиме прогрессивной развертки и имеет разрешающую способность по строке на цифровом выходе в центральной зоне поля зрения не менее 750 телевизионных линий при освещенности в плоскости фоточувствительной поверхности матрицы не менее 10 лк и глубине модуляции 5%.
5. Рабочий диапазон освещеностей на фоточувствительной матрице КТ простирается от минимальной 0,2 лк до максимальной 700 лк с автоматической регулировкой чувствительности во всем диапазоне освещенностей на фотоприемнике.
6. КТ обеспечивает выходной цифровой видеосигнал по каналу Base Camera Link без сжатия видеоизображения, тип развертки – прогрессивный с частотой кадров не менее 50 Гц.
7. КТ обеспечивает выходной аналоговый видеосигнал по ГОСТ 7845-92 (для черно-белого изображения), используемый при технологических проверках и настройках.
8. Электропитание КТ осуществляется от бортовой системы электроснабжения постоянного тока основного объекта напряжением от 22 до 29 В, потребляемая мощность не превышает 10 Вт.
9. Время готовности КТ к работе с момента подачи питания не превышает 10 с.

Выбор типа преобразователя свет-сигнал

Главным структурным элементом цифровой телевизионной камеры, обеспечивающим реализацию основных характеристик камеры (разрешающей способности, частоте кадров, динамического диапазона и т.д.), является преобразователь свет-сигнал в качестве которого используются

central zone of the field of view of at least 750 television lines with an illumination in the plane of the photosensitive array surface of at least 10 lux and a modulation depth of 5%.

5. Operating range of illumination on the photosensitive array TC extends from a minimum of 0.2 lux to a maximum of 700 lux with automatic adjustment of sensitivity in the whole range of illumination on the photodetector.
6. TC provides digital video output via Base Camera Link without video compression, scan type – progressive with a frame rate of at least 50 Hz.
7. TC provides an analog video output signal in accordance with GOST 7845-92 (for a black and white image) used in process checks and settings.
8. Power supply of the TC is carried out from the onboard power supply system of the direct current of the main object with a voltage of 22 to 29 V, the power consumption does not exceed 10 watts.
9. Availability time of the TC for operation from the moment of power supply does not exceed 10 s.

Selecting the type of light-signal converter

The main structural element of a digital television camera, ensuring the realization of the main characteristics of the camera (resolution, frame rate, dynamic range, etc.) is a light-signal converter, which uses semiconductor solid-state array photodetectors or arrays.

Currently, modern digital television cameras mainly use two types of arrays: CCD arrays (Fig. 2) (Charge Coupled Device) and CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS).

In the CCD and CMOS arrays, photodiodes are used to convert light into an electrical image signal. However, their operating principle varies significantly.

In charge coupled devices, the incident light detected by the photodiode of each pixel is converted into an electric charge (Fig. 3). The pixel charge is moved to the vertical «transport bus», located on the side of the pixel. The applied voltage then moves the charges along the vertical and horizontal transport buses until they reach the amplifier. The analog signal with different voltages (depending on the amount of light per pixel) is obtained at the output. Before processing, this signal is sent to a separate (located outside the chip) analog-to-digital converter, and

полупроводниковые твердотельные матричные фотоприемные устройства или матрицы.

В настоящее время в современных цифровых телевизионных камерах в основном используются два типа матриц: ПЗС-матрицы (рис. 2) (прибор с зарядовой связью, англ. Charge Coupled Device, CCD) и КМОП-матрицы (комплементарный металлооксидный полупроводник, англ. Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS).

В ПЗС- и КМОП-матрицах для преобразования света в электрический сигнал изображения используются фотодиоды. Однако их принцип работы существенно отличается.

В приборах с зарядовой связью падающий свет, регистрируемый фотодиодом каждого пикселя, преобразуется в электрический заряд (рис. 3). Заряд пикселя перемещается в вертикальную «транспортную шину», расположенную сбоку от пикселя. Прилагаемое напряжение затем перемещает заряды по вертикальным и горизонтальным транспортным шинам, пока они не достигнут усилителя. На выходе получается аналоговый сигнал с различным напряжением (в зависимости от количества света, попавшего на пиксель). Перед обработкой этот сигнал пересыпается на отдельный (расположенный вне чипа) аналого-цифровой преобразователь, и получившиеся цифровые данные преобразуются в байты, представляющие строку изображения, полученного сенсором.

Так как ПЗС-устройства передают электрический заряд, который обладает низким сопротивлением и меньше подвержен помехам других электронных компонентов, то результирующий сигнал, как правило, содержит меньше различных шумов по сравнению с сигналом КМОП-сенсоров.

Информация с каждой чувствительной ячейки считывается последовательно, что не позволяет сделать следующий кадр до того, как считаются все данные прошлого кадра (в данный момент от этой проблемы частично избавились, увеличив буфер памяти). Это не позволяет использовать ПЗС-технологии в потоковой видеозаписи, поэтому данные матрицы постепенно вытесняются технологией КМОП, матрицы которых могут производить видеозапись посредством самой матрицы.

В конструкции ПЗС-матриц существует проблема, называемая «тянущиеся продолжения» («смаз»). Они возникают, когда очень яркий падающий свет за счет утечки попадает на вертикальную транспортную шину и создает избыточный заряд, который проявляется на изображении как яркая вертикальная полоса. Однако радикально

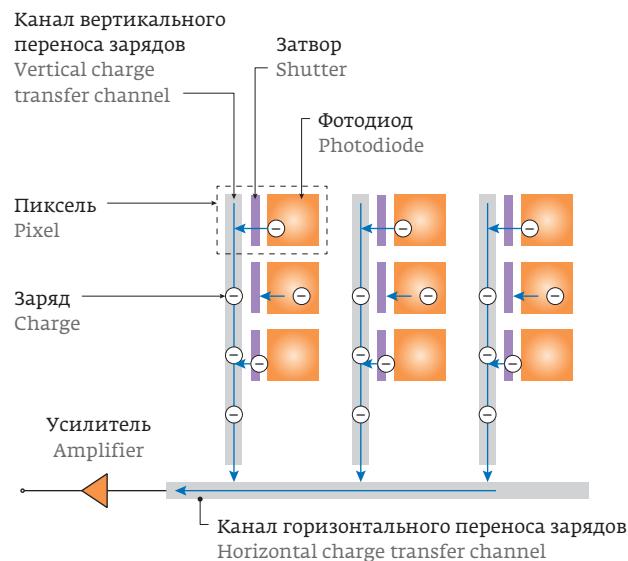


Рис. 2. Структура ПЗС-матрицы
Fig. 2. CCD array structure

the resulting digital data is converted into bytes representing the line of the image received by the sensor.

Since the CCD transmits electric charge, which has a low resistance and is less susceptible to interference from other electronic components, the resulting signal, as a rule, contains less different noise compared to the CMOS sensor signal.

Information from each sensitive cell is read sequentially, which prevents the next frame from being taken before all the data from the previous frame are considered (at the moment, this problem has been

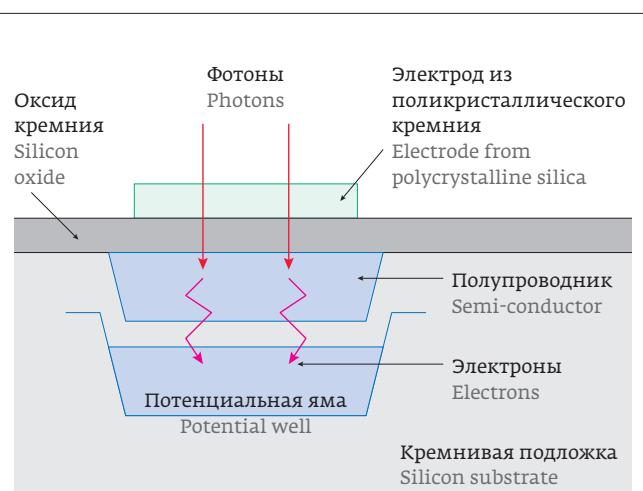


Рис. 3. Сечение пикселя ПЗС-матрицы
Fig. 3. CCD array pixel cross-section



проблема смаза решается в приборах с межстрочным переносом, завоевавших доминирующее положение на рынке бытовой видеотехники.

В отличие от матриц с кадровым переносом, функции накопления заряда и его переноса здесь разделены. Заряд из элементов накопления (это, как правило, фотодиоды – они тоже обладают емкостью и способны накапливать заряд) передается в закрытые от света ПЗС-регистры переноса, то есть секция переноса как бы вставлена в секцию накопления. Теперь перенос зарядового рельефа всего кадра происходит за один такт, и «смаз», связанный с переносом, не возникает. По сравнению с матрицами с кадровым переносом фактор заполнения в матрицах с межстрочным переносом примерно вдвое меньше, так как около половины площади фоточувствительной поверхности закрыто от света.

Подобная структура также требует высоких напряжений для попеременного открывания и закрывания затворов, которые должны иметься в составе всех пикселов для управления временной последовательностью потока зарядов.

Мощность, потребляемая ПЗС-матрицами, особенно велика для формата высокой четкости, когда требуется быстрое считывание большого числа пикселов. ПЗС обладают лучшей квантовой эффективностью и низким уровнем шумов и обеспечивают гибкость с точки зрения затрат при разработке системы. Они продолжают господствовать там, где требуется наилучшее качество изображения, например, в большинстве промышленных, научных и медицинских применений.

В КМОП-датчиках каждый пиксел имеет свой преобразователь заряда в напряжение (рис. 4). И датчик часто содержит схемы для оцифровки, благодаря чему на выход микросхемы поступает цифровой сигнал. Сечение пикселя КМОП-матрицы приведено на рис. 5.

Эти дополнительные функциональные узлы отнимают площадь кристалла, доступную для сбора падающего света. Кроме того, однородность выходов, ключевой фактор качества изображения, у этих датчиков хуже, так как каждый пиксел имеет свой преобразователь. Но, с другой стороны, КМОП-датчик требует меньше внешних схем для выполнения основных операций.

Проблема с тянувшимися продолжениями и здесь отсутствует, так как падающий свет не оказывает воздействия на электрический сигнал. Вместо затворов в КМОП-матрице используются переключатели и внутренние цепи, управляющие последовательностью выходных сигналов. Использование внутренних переключателей позволяет существенно

partially eliminated by increasing the memory buffer). This does not allow to use in streaming video, because these arrays are gradually being superseded by CMOS technology, the arrays of which can produce video through the array itself.

In the design of CCD arrays, there is a problem of «smearing effect» («slur»). It occurs when a very bright incident light falls on a vertical transport bus due to a leak and creates an excess charge, which manifests itself in the image as a bright vertical strip. However, the problem of slurring is radically solved in devices with interline transfer, which have gained a dominant position in the consumer video market.

Unlike arrays with frame transfer, the functions of charge accumulation and its transfer are separated. The charge from the accumulation elements (these are usually photodiodes; they also have capacity and are able to accumulate charge) is transmitted to the CCD transfer registers closed from light, i.e., the transfer section is sort of inserted into the accumulation section. Now the transfer of the charge relief of the entire frame occurs in a single cycle, and the «slurring» associated with the transfer does not occur. Compared to the frame transfer arrays, the filling factor in the interline transfer arrays is about half as much, since about half of the photosensitive surface area is protected from light.

Such a structure also requires high voltages to alternately open and close the shutters, which should be included in all pixels to control the time sequence of the flow of charges.

The power consumed by CCD arrays is especially great for high definition when you need to quickly read a large number of pixels. The CCDs have better quantum efficiency and low noise and provide flexibility in terms of cost when designing a system. They continue to dominate where the best image quality is required, e.g., in most industrial, scientific and medical applications.

In CMOS sensors, each pixel has its own charge-to-voltage converter (Fig. 4). And the sensor often contains circuits for digitizing, so that the digital signal is output at the chip output. The CMOS pixel cross section is shown in Fig. 5.

These additional functional assemblies take the area of the crystal available to collect incident light. Furthermore, the uniformity of the outputs (a key factor in image quality) of these sensors is worse, since each pixel has its own converter. But, on the other hand, the CMOS sensor requires fewer external circuits to perform basic operations.

The problem with smearing effect is absent here, since the incident light does not affect the electrical

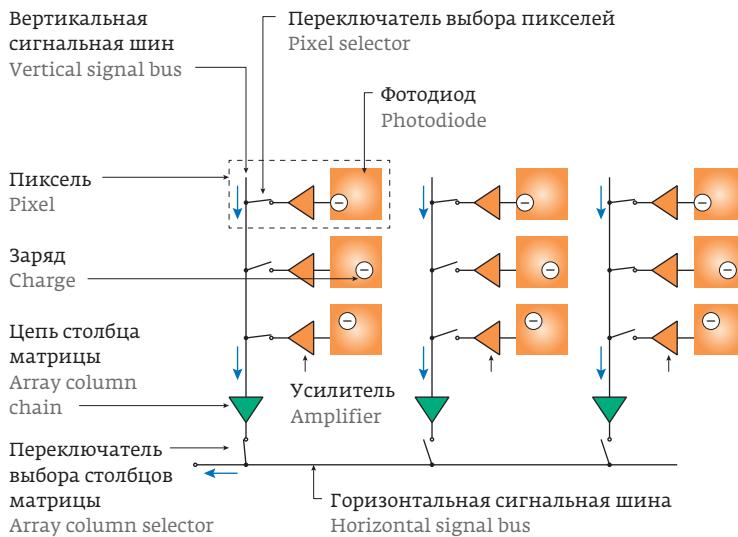


Рис. 4. Структура КМОП-матрицы
Fig. 4. CMOS array structure

снизить потребляемую мощность при ускорении процесса одновременного считывания большого числа пикселов. Эффективность считывания оказывается вполне достаточной для поддержки прогрессивного разложения HD изображений. В одночиповых КМОП-датчиках становится принципиально возможным одновременное считывание сигналов R, G и B.

КМОП-датчики обеспечивают большую интеграцию (больше функций на кристалле), меньшую

signal. Instead of shutters, switches and internal circuits are used in the CMOS array to control the sequence of output signals. The use of internal switches can significantly reduce power consumption while accelerating the process of simultaneously reading a large number of pixels. The reading efficiency is quite sufficient to support the progressive decomposition of HD images. In single-chip CMOS sensors, it becomes fundamentally possible to simultaneously read the R, G and B signals.

The CMOS sensors provide greater integration (more functions on the chip), less power dissipation (at the chip level) and a smaller system size due to image quality and flexibility. They are well suited for small-sized products.

The cost of crystals for both types of sensors (CCD and CMOS) is about the same. Previously, the supporters of the CMOS sensors installation claimed that they are much cheaper, since they can be manufactured on the same process lines as most high-density logic and memory chips. It turned out to be wrong. In order to obtain good image quality, the production of CMOS sensors requires special technological processes inherent to low-density mixed-signal processing devices. The CMOS sensors also require more silicon per pixel. A CMOS camera may contain fewer components and consume less power, but it may also require signal processing to compensate for the loss of image quality.

To increase the efficiency of photon collection, a micro-array of small microlenses is used. Its formation is very simple: a layer of optical low-melting plastic is applied onto the surface of a plate with already formed array structures, from which isolated squares are cut out above each element using photolithography. The gap between the individual squares is small. Then the plate heats up, the plastic melts and the surface of the individual squares acquires a close to spherical shape, focusing the light incident on its

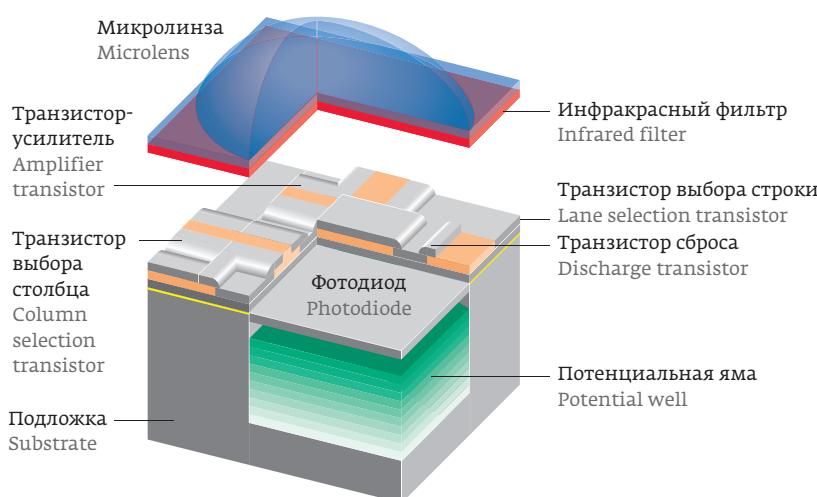


Рис. 5. Сечение пикселя КМОП-матрицы
Fig. 5. CMOS array pixel cross-section

рассеиваемую мощность (на уровне кристалла) и меньший размер системы за счет качества изображения и гибкости. Они хорошо подходят для малогабаритных изделий.

Стоимость кристаллов для обоих типов датчиков (ПЗС и КМОП) примерно одинакова. Раньше сторонники установки КМОП-датчиков утверждали, что они намного дешевле, так как их можно изготавливать на тех же технологических линиях, что и большинство микросхем логики и памяти высокой плотности. Это оказалось не так. Чтобы получить хорошее качество изображения, для производства КМОП-датчиков требуются специальные технологические процессы, характерные для устройств обработки смешанных сигналов низкой плотности. КМОП-датчики также требуют больше кремния на пиксель. КМОП-камера может содержать меньше компонентов и потреблять меньшую мощность, но она может также потребовать применения схем обработки сигнала для компенсации потерь качества изображения.

Чтобы повысить эффективность сбора фотонов, используется микрорастр – массив небольших микролинз. Он формируется очень просто: на поверхность пластины с ужеформированными структурами матрицы наносится слой оптической легкоплавкой пластмассы, из которого методом фотолитографии вырезаются изолированные квадратики, лежащие над каждым элементом. Зазор между отдельными квадратиками невелик. Затем пластина нагревается, пластмасса подплавляется, и поверхность отдельных квадратиков приобретает близкую к сферической форму, фокусируя приходящий на ее поверхность свет на фоточувствительный элемент матрицы (рис. 6).

Для получения максимально качественных изображений с минимумом шумов лучше использовать ПЗС-матрицы. Однако при необходимости вести высокоскоростную съемку оптимальным выбором будет КМОП-матрица. Для съемки научных экспериментов, регистрации быстропротекающих процессов, наладки и контроля технологических процессов в производстве широко используются высокоскоростные видеокамеры на базе КМОП-матриц.

В настоящее время наблюдается значительный прогресс в технологии КМОП-матриц, их характеристики приближаются к характеристикам ПЗС-матриц. Однако в ряде задач КМОП-матрицы обладают существенными преимуществами, например, при необходимости

surface onto the photosensitive element of the array (Fig. 6).

To obtain the highest quality images with a minimum of noise, it is better to use the CCD arrays. However, if you need to conduct high-speed shooting, the CMOS array will be the optimal choice. High-speed video cameras based on CMOS arrays are widely used for surveying scientific experiments, registering fast processes, setting up and monitoring technological processes in production.

Currently, there is significant progress in the technology of CMOS arrays, their characteristics are close to the characteristics of CCD arrays. However, in a number of tasks, the CMOS arrays have significant advantages, e.g., if arbitrary sampling is required by coordinates, when tracking processes are performed using an object (window) of a given size, which can change during the tracking process, and also when hardware processing is required (in the CMOS array itself) in real time.

The CCD technology has been around for more than 30 years, and today, as part of this technology, numerous modifications have been developed that are adapted to solve various problems.

The lack of arrays produced by this technology is the limitation of the clock frequency of reading of 30–40 MHz. To overcome this drawback, the array developers have to make several output devices, which in turn leads to complex problems of black level alignment and gain linearity. In the image, this appears as a different brightness of the halves or quarters of the image (depending on whether two or four outputs are used).

Furthermore, the circuit design of TV cameras developed based on CCD arrays is significantly more

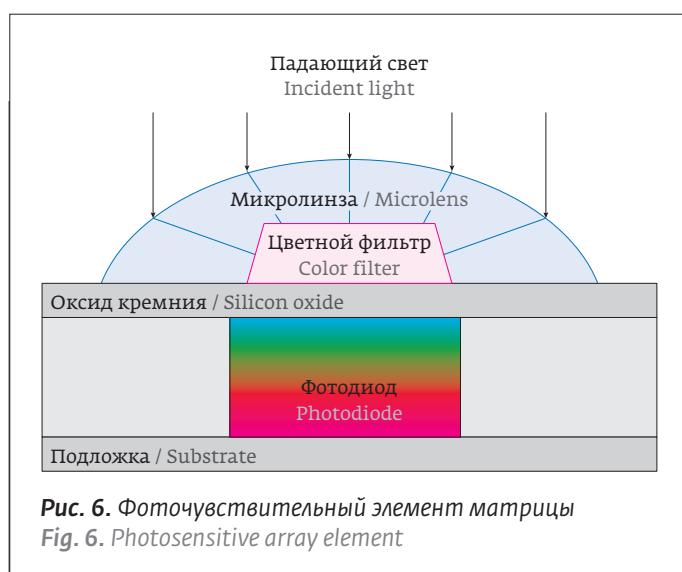


Рис. 6. Фоточувствительный элемент матрицы
Fig. 6. Photosensitive array element



произвольной выборки по координатам, при реализации процессов слежения за объектом с помощью окна (области) заданного размера, который может меняться в процессе слежения, а также при необходимости аппаратной обработки данных (в самой КМОП-матрице) в режиме реального времени.

Технология ПЗС существует уже более 30 лет, и на сегодня в рамках этой технологии разработаны многочисленные модификации, приспособленные для решения разных задач.

Недостаток матриц, изготовленных по этой технологии, – ограничение тактовой частоты считывания величиной 30–40 МГц. Для преодоления этого недостатка разработчикам матриц приходится делать несколько выходных устройств, что в свою очередь приводит к сложным проблемам выравнивания уровня черного и линейности усиления. На изображении это проявляется как разная яркость половинок или четвертинок изображения (в зависимости от того, два или четыре выхода используются).

Кроме того, схемотехника ТВ-камер, разработанных на базе ПЗС-матриц, существенно сложнее, чем у ТВ-камер, построенных на базе КМОП-матриц, что приводит еще и к увеличению потребления этих ТВ-камер.

Технология КМОП имеет преимущество – дешевизна производства (матрицы производятся по хорошо отработанной КМОП-технологии) и возможность размещать схемотехнические решения для обработки сигнала с матрицы на одном кристалле с самой матрицей. Таким образом, микросхема может содержать не только преобразователь свет-сигнал, но и аналого-цифровой преобразователь (АЦП), синхрогенератор и т. д.

Недостатком данной технологии до последнего времени являлись более низкая чувствительность матриц и ограниченная регулировка времени накопления (shutter).

Однако в последнее время новые технологические достижения в разработке КМОП-матриц позволили в значительной степени преодолеть эти недостатки и привели к появлению современных сенсоров, сопоставимых с ПЗС-матрицами по чувствительности и уровню шумов, которые, вкупе с большой кадровой частотой, делают их незаменимыми для огромного количества применений.

Семейство высокоскоростных КМОП-сенсоров с кадровым затвором имеют разрешение от VGA до 20 миллионов пикселов. Сенсоры состоят из матриц пикселов конвейерного типа с «кадровым» затвором, позволяющих производить

complicated than that of TV cameras built based on CMOS arrays, which also leads to an increase in the consumption of these TV cameras.

The CMOS technology has the advantage of low production (the arrays are produced using well-proven CMOS technology) and the ability to place circuit solutions for processing the signal from the array on the same chip as the array itself. Thus, a microcircuit can contain not only a light-signal converter, but also an analog-to-digital converter (ADC), a synchronous generator, etc.

The disadvantage of this technology until recently was the lower sensitivity of the arrays and the limited adjustment of the accumulation time (shutter).

Recently, however, the new technological advances in the development of the CMOS arrays have largely overcome these shortcomings and have led to the emergence of modern sensors comparable to the CCD arrays in sensitivity and noise level, which, together with a large frame frequency, make them indispensable for a huge number of applications.

The family of high-speed CMOS sensors with a frame shutter has a resolution from VGA to 20 million pixels. The sensors consist of arrays of conveyor-type pixels with a «frame» shutter, allowing exposure during the reading of the previous frame, as well as performing double correlated sampling (DCS), which significantly reduces the proportion of noise and dark currents in the useful signal. A distinctive feature of modern CMOS sensors is their ultra-high frame frequency at full resolution and the possibility of its increase through partial reading, window mode and sub-sampling mode.

The readout circuit consists of LVDS digital serial outputs. The sensor includes an amplifier with a programmable gain and has the ability to adjust the offset. All settings are typically made through the SPI serial peripheral interface. The internal clock generates the synchronization signals necessary for reading and controlling the exposure. External exposure control is also possible. Depending on the model, the sensors support 8-, 10- and/or 12-bit ADC.

Distinctive features of the CMOS sensors:

- high frame rate;
- ability to highlight several areas of interest;
- built-in PLL (phase locked loop);
- built-in temperature sensor;
- built-in clock generator;
- SPI interface;
- monochrome and color versions.

The CMOS sensors are widely used in the following areas:

- machine vision;



экспозицию во время считывания предыдущего кадра, а также осуществлять двойную коррелированную выборку (ДКВ), значительно уменьшающую долю шумов и темновых токов в полезном сигнале. Отличительной чертой современных КМОП-сенсоров является их сверхвысокая кадровая частота при полном разрешении и возможность ее увеличения посредством частичного считывания, оконного режима и режима субдискретизации.

Схема считывания состоит из цифровых последовательных выходов LVDS. Сенсор включает в себя усилитель с программируемым коэффициентом усиления и имеет возможность регулировки смещения. Все настройки, как правило, производятся через последовательный периферийный интерфейс SPI. Внутренний тактовый генератор выдает сигналы синхронизации, необходимые для считывания и управления экспозицией. Внешнее управление экспозицией также возможно. В зависимости от модели сенсоры поддерживают 8-, 10- и/или 12-битный АЦП.

Отличительные особенности КМОП-сенсоров:

- высокая частота кадров;
- возможность выделения нескольких областей интереса;
- встроенная ФАПЧ (фазовая автоподстройка частоты);
- встроенный датчик температуры;
- встроенный тактовый генератор;
- интерфейс SPI;
- монохромная и цветная версии.

КМОП-сенсоры находят широкое применение в следующих областях:

- машинное зрение;
- высокоскоростной контроль;
- телевещание;
- аэрофотосъемка;
- космос/астрономия;
- видеонаблюдение.

Для сравнения приведем характеристики наиболее высококачественных матриц, созданных по ПЗС- и КМОП-технологиям (см. табл. 1).

Матрица KAI-02050 создана по ПЗС технологии, имеет 4 выхода (для обеспечения высокой кадровой частоты) и, соответственно, требует четыре АЦП, много драйверов для управления фазами матрицы, несколько источников питания для обеспечения работы матрицы. Кроме того, ее чувствительность уступает матрице EV76C560.

Матрица EV76C560 фирмы E2V при испытаниях показала следующие результаты: при освещенности в плоскости матрицы $5 \cdot 10^{-3}$ лк отношение сигнал/шум S/N=4 при экспозиции 40 мс. В данной матрице

- high-speed control;
- television broadcasting;
- aerial photography;
- space/astronomy;
- CTCV.

For comparison, we give the characteristics of the most high-quality arrays created by CCD and CMOS technologies (see Table 1).

The KAI-02050 array was created using CCD technology, it has 4 outputs (to ensure a high frame rate) and, therefore, requires four ADCs, many drivers for controlling the phases of the array, and several power sources for the operation of the array. Furthermore, its sensitivity is inferior to the EV76C560 array.

The EV76C560 array (by E2V) when tested, showed the following results: when the illumination in the array plane is $5 \cdot 10^{-3}$ lux, the signal-to-noise ratio S/N=4 with an exposure of 40 ms. This array also has a possibility to use 2 different methods of reading the signal from the array – the so-called Global shutter and Rolling shutter.

The Global shutter is the reading of the charge from all pixels of the array at the same time, and the Rolling shutter is the sequential reading of lines of the array. Therefore, if there is a moving object in the frame, the exposure of the Global shutter type will be a «slur», the value of which depends on the speed of the observed object and the exposure time, and with the Rolling shutter type of exposure, the object will be distorted geometrically, since its different parts will be read at different times.

However, with a rolling shutter in a CMOS array, the noise is substantially less (signal-to-noise ratio S/N=8 at illumination of $5 \cdot 10^{-3}$ lux and exposure at 40 ms). The reading modes are switched by commands via the serial interface with the array during operation.

Also, a binning mode was introduced in this array (combining four adjacent pixels into one) for the first time for arrays manufactured using CMOS technology. This provides in low light conditions increased sensitivity by reducing the spatial resolution by half.

The sensitivity level of this array in the binning and the Rolling shutter mode approaches the characteristics of the most sensitive CCD arrays (e.g., SONYICX429ALL arrays).

Our tests performed using CMV4000 array by CMOSIS showed that the sensitivity of this array is somewhat inferior to that of the EV76C560 array, besides, there is no binning mode and Rolling shutter in this array, but this array allows forming an image with a frequency of up to 180 fps.

Таблица 1. Характеристики наиболее высококачественных матриц, созданных по ПЗС- и КМОП-технологиям
Table 1. Characteristics of the most high-quality arrays created using CCD and CMOS technologies

Фирма-производитель Manufacturer	Тип Type	Технология Technology	Формат матрицы Array format	Размер пикселя, мкм Pixel size, micron	Диагональ, мм Diagonal, mm	Частота кадров (fps) Frame rate (fps)
SONY	IMX174	КМОП / CMOS	1920×1200	5,86×5,86	13,4	128
SONY	ICX445	ПЗС / CCD	1280×960	3,75×3,75	6	25
SONY	ICX625	ПЗС / CCD	2448×2050	3,45×3,45	11	43
KODAK	KAI-02050	ПЗС / CCD	1600×1200	5,5×5,5	11	60
E2V	EV76C560	КМОП / CMOS	1280×1024	5,3×5,3	8,7	60
TRUESEHSE	KAI-02150	ПЗС / CCD	1920×1080	5,5×5,5	12,1	64
TRUESEHSE	KAI-04070	ПЗС / CCD	2048×2048	7,4×7,4	21,4	28
CMOSIS	CMV4000	КМОП / CMOS	2048×2048	5,5×5,5	15,8	180
CYPRESS	VITA5000	КМОП / CMOS	2592×2048	4,8×4,8	20,2	75

есть возможность также использовать 2 разных метода считывания сигнала с матрицы – так называемые режимы Global shutter и Rolling shutter.

Global shutter – это считывание заряда со всех пикселов матрицы одновременно, а Rolling shutter – это последовательное считывание строк матрицы. Следовательно, при наличии движущегося объекта в кадре при экспозиции типа Global shutter будет «смаз», величина которого зависит от скорости объекта наблюдения и времени экспозиции, а при экспозиции типа Rolling shutter объект будет искажен геометрически, т. к. разные его части будут считаны в разное время.

Однако при Rolling shutter в КМОП-матрице существенно меньше шум (отношение сигнал/шум $S/N=8$ при освещенности $5 \cdot 10^{-3}$ лк и экспозиции 40 мс). Режимы считывания переключаются командами по последовательному интерфейсу с матрицей в процессе работы.

Также в этой матрице впервые для матриц, изготовленных по КМОП-технологии, введен режим биннинга (объединение четырех рядом расположенных пикселов в один). Это обеспечивает в условиях низкой освещенности повышение чувствительности за счет уменьшения пространственного разрешения в два раза.

Уровень чувствительности этой матрицы в режиме биннинга и Rolling shutter приближается к характеристикам наиболее чувствительных ПЗС матриц (например, матрицы SONY ICX429ALL).

Based on the analysis of the above materials, it is advisable to use the CMV4000ES-3E5M1PP CMOS array and color CMV4000ES-3E5C1PP array, respectively, in the television camera for the hyperspectral channel. Tab. 2 shows the main technical characteristics of CMV4000ES CMOS-array.



Рис. 7. Структурная схема камеры телевизионной
Fig. 7. Television camera structural scheme



Проведенные нами испытания матрицы CMV4000 фирмы CMOSIS показали, что чувствительность этой матрицы несколько уступает матрице EV76C560, кроме того, режимов биннинга и Rollingshutter в этой матрице не имеется, однако эта матрица позволяет формировать изображение с частотой до 180 кадр/с.

На основании анализа выше-приведенных материалов целесообразно в телевизионной камере для гиперспектрального канала применить КМОП-матрицу CMV4000ES-3E5M1PP и цветную CMV4000ES-3E5C1PP соответственно. В табл. 2 приведены основные технические характеристики КМОП-матрицы CMV4000ES.

Анализ структурной схемы камеры телевизионной

Ниже приведено описание разработанной нами для работы в составе гиперспектрометра телевизионной камеры.

Структурная схема камеры телевизионной (КТ) изображена на рис. 7.

Камера телевизионная состоит из следующих модулей:

- видеосенсора;
- модуля цифровой обработки (МЦО);
- модуля питания.

Видеосенсор представляет собой матричное фотоприемное устройство (МФПУ), работающее в видимом диапазоне длин волн 0,4–1,0 мкм. В качестве видеосенсора используется КМОП-матрица CMV4000 форматом 2048×2048 пикселов фирмы CMOSIS (Бельгия).

Видеосенсор на матрице CMV4000 осуществляет преобразование изображения с фоточувствительной поверхности матрицы в массив цифровых

Таблица 2. Основные технические характеристики КМОП-матрицы CMV4000ES

Table 2. Main technical characteristics of CMOS array (CMV4000ES)

Параметр Parameter	Значение Value
Число активных пикселов Number of active pixels	2048×2048
Размер пикселя, мкм Pixel size, μm	5,5×5,5
Частота кадров, кадр/с Frame frequency, fps	180
Выходной интерфейс Output interface	16 выходов LVDS 16 LVDS outputs
Видеовыход Video output	10-разрядный АЦП при частоте 180 кадр/с 10-bit ADC at 180 fps
Управление по кадрам и строкам Frame and line control	LVDS
Чувствительность, В/лк·с Sensitivity, V/lx·s	5,56
Темновой шум, e^- Dark noise, e^-	13
Темновой ток, e^-/s Dark current, e^-/s	125
Динамический диапазон, дБ Dynamic range, dB	60
Коэффициент преобразования, мл. разряд/ e^- Conversion factor, mln discharges/ e^-	0,075
Уровень сигнала, В Signal strength, V	3,3
Паразитная светочувствительность Parasitic sensitivity	1/50000
Потребляемая мощность, мВт Power consumption, mW	600
Корпус Housing	Керамический PGA 95 выводов Ceramic PGA 95-pin
Внутренний тактовый генератор Internal clock	Есть Available
Внутренний датчик температуры Internal temperature sensor	Есть Available



данных, который далее поступают в модуль цифровой обработки.

Модуль цифровой обработки (МЦО) обеспечивает реализацию следующих функций:

- ввод цифровых данных, поступающих от видеосенсора;
- обработку сигналов от видеосенсора и преобразование их в требуемый формат изображения при передаче пиксел в пиксел;
- формирование выходного цифрового видеосигнала, выдаваемого с частотой кадров 50 Гц по 5 LVDS парам, используя протокол Base Camera Link;
- формирование стандартного аналогового видеосигнала по ГОСТ 7845-92 на видеовыход при нагрузке $(75 \pm 7,5)$ Ом для технологических целей;
- регулировку времени накопления видеинформации в ручном и автоматическом режиме;
- возможность изменения положения и размера окна видеоданных;
- встроенный контроль готовности;
- дополнительную обработку изображения.

МЦО выполнен на базе ПЛИС CYCLONEIII фирмы ALTERA, обеспечивающей гибко программируемую логику управления телевизионной камерой и необходимую обработку сигнала. Пониженное потребление по сравнению с предыдущими поколениями ПЛИС (CYCLONEII) обеспечивает необходимый тепловой режим телевизионной камеры.

В ПЛИС реализуются все виды обработки сигнала, буферизация данных в ОЗУ, цифровые сигналы управления видеосенсором.

На ПЛИС реализовано управление ЦАП для вывода аналогового телевизионного сигнала по ГОСТ 7845-92, цифрового видеосигнала по 5 LVDS парам, используя протокол в формате CameraLink. ПЛИС также принимает управляющую информа-

The analysis of the structural diagram of the television camera

Below is a description of the television camera developed by us for operation within a hyperspectrometer.

The structural diagram of the television camera (TC) is shown in Fig. 7

The television camera consists of the following modules:

- video sensor;
- digital processing module (DPM);
- power module.

The video sensor is an array photodetector (APD) operating in the visible wavelength range of 0.4–1.0 μm . The CMOS array is used as a video sensor (CMV4000, format of 2048×2048 pixels by CMOSIS (Belgium)).

The CMV4000 array video sensor transforms the image from the photosensitive surface of the array

Таблица 3. Основные технические характеристики камеры телевизионной
Table 3. Main technical characteristics of the television camera

Наименование параметра Parameter	Значение Value
Число фоточувствительных элементов фоточувствительного поля, не менее Number of photosensitive elements of the photosensitive field, not less	2048×2048
Размер фоточувствительного поля, мм Size of photosensitive field, mm	$11,264 \times 11,264$
Размер фоточувствительного элемента, мкм Size of the photosensitive element, microns	$5,5 \times 5,5$
Интерфейс вывода цифрового видеосигнала Digital video signal output interface	CameraLink
Формат вывода аналогового видеосигнала Analog video signal output format	ГОСТ 7845-92 GOST 7845-92
Интерфейс управления Control interface	CAN2.0
Частота кадров прогрессивной развертки, Гц Progressive scan frame rate, Hz	50
Диапазон освещенности, лк Light range, lux	0,25–700
Спектральный диапазон, нм Spectral range, nm	400–1000
Напряжение питания, В Power supply, V	22–29
Габаритные размеры, мм, не более Dimensions, mm, maximum	$58 \times 58 \times 48$
Масса, кг, не более Weight, kg, maximum	0,22



цию от сопрягаемого оборудования и выдает телеметрию по интерфейсу CAN2.0b.

Модуль питания, размещаемый в камере, формирует вторичные источники для электропитания ПЛИС, матрицы, ОЗУ, ПЗУ, АЦП, цифровой и аналоговой части телевизионной камеры. Модуль питания обеспечивает выходные стабилизированные напряжения для питания составных частей камеры телевизионной при входном напряжении питания 22–29 В.

Модуль питания имеет гальваническую развязку по входу, фильтр синфазных помех и выходные фильтры. Основные технические характеристики камеры телевизионной приведены в табл. 3.

Взаимодействие с сопрягаемыми изделиями

Выходной информацией КТ является цифровой и аналоговый видеосигнал изображения, выдаваемый по 5-ти парам LVDS, с использованием протокола Base Camera Link и ГОСТ 7845-92 соответственно. Аналоговый видеосигнал используется для технологических целей.

Управление режимами работы КТ и режимами вывода видеонформации осуществляется по внешним командам (сигналам), поступающим по цифровому интерфейсу CAN2.0b согласно ISO-11898 (управление режимами работы КТ возможно осуществлять по цифровому последовательному интерфейсу RS-485). Информация о состоянии КТ (сигналы готовности, исправности и т.д.) выдается в оптико-электронную систему по цифровому интерфейсу CAN2.0b.

Для формирования выходного видеосигнала в режиме внешней синхронизации в КТ от внешней аппаратуры поступают синхроимпульсы с периодом повторения не менее 10 мс.

Интерфейс LVDS (Low Voltage Differential Signaling – низковольтный дифференциальный сигнал) использует дифференциальную передачу сигналов с малыми сигнальными уровнями. Наиболее часто LVDS- передатчик и приемник используются в конфигурации точка-точка.

Интерфейс LVDS обеспечивает высокую скорость передачи данных. Амплитуда дифференциального сигнала равна 350 мВ, что позволяет сделать более резкие фронты сигналов и теоретически возможную скорость передачи данных 1,923 Гбит/сек в среде без потерь. Этот интерфейс нечувствителен к синфазным наводкам

into a digital data array, which is then passed to the digital processing module.

The digital processing module (DPM) provides the following functions:

- input of digital data from the video sensor;
- processing signals from the video sensor and converting them into the required image format when transferring a pixel to a pixel;
- formation of the output digital video signal output with a frame rate of 50 Hz in 5 LVDS pairs using the Base Camera Link protocol;
- formation of a standard analog video signal according to GOST 7845-92 on the video output under load (75±7.5) Ohms for technological purposes;
- adjustment of the time of accumulation of video information in manual and automatic mode;
- ability to change the position and size of the video window;
- built-in readiness control;
- additional image processing.

The DPM is made on the basis of FPGA CYCLONEIII (ALTERA), which provides a flexibly programmable logic control of a television camera and the necessary signal processing. Reduced consumption compared with previous generations of FPGAs (CYCLONEII) provides the necessary thermal regime of a television camera.

The FPGA implements all types of signal processing, data buffering in RAM, digital video sensor control signals.

The DAC control is implemented on the FPGA to output an analog television signal according to GOST 7845-92, digital video signal over 5 LVDS pairs, using a protocol in the CameraLink format. The FPGA also receives control information from the mating equipment and provides telemetry via the CAN2.0b interface.

The power module, located in the chamber, forms the secondary power sources for the power supply of the FPGA, array, RAM, ROM, ADC, digital and analogue parts of the television camera. The power supply module provides output stabilized voltage to power the components of the television camera at an input supply voltage of 22–29 V.

The power module is galvanically isolated at the input, the common mode filter and output filters. The main technical characteristics of the television camera are given in Table. 3

Interaction with mating devices

The output information of the TC is digital and analog video signal of an image, output over LVDS5



до ± 1 В на дифференциальные входы. Так как LVDS использует при передаче информации режим переключения тока, то при проектировании устройств необходимо особое внимание уделять энергоемкости и электромагнитным наводкам на соседние шины, что является платой за скорость.

Передатчик управляет дифференциальной линией. В линию выдается токовая посылка с током 3,5 мА. Нагрузкой линии служат параллельно включенные дифференциальный LVDS-приемник и 100 Ом резистор. Сам приемник имеет высокое входное сопротивление, и основное формирование сигнала происходит на нагрузочном резисторе. При токе линии 3,5 мА на нем формируется падение напряжения 350 мВ, которое и детектируется приемником. При переключении направления тока в линии меняется полярность напряжения на нагрузочном резисторе, формируя состояния логического нуля и логической единицы.

Используемая схема передачи имеет целый ряд преимуществ. LVDS-интерфейс имеет высокую скорость передачи данных. Определенная стандартом максимальная скорость составляет до 622 Мбит/с, что сравнимо с оптическим интерфейсом. При этом реальное быстродействие LVDS-канала ограничивается двумя факторами: скоростью подачи и съема данных и параметрами среды передачи.

Используемый дифференциальный метод передачи сигналов позволяет максимально снизить влияние внешних наводок. Малое изменение напряжения, симметричные линии пере-

pairs using the Base Camera Link protocol and GOST 7845-92, respectively. Analog video signal is used for technological purposes.

The control of the TC operating modes and the output modes of the video information is carried out by external commands (signals) received from the CAN2.0b digital interface using ISO-11898 (It is possible to control the operating modes of the TC via the digital RS-485 serial interface). Information on the state of the TC (readiness signals, health, etc.) is output to the opto-electronic system via the CAN2.0b digital interface.

In order to form the output video signal in the external synchronization mode, clock pulses with a repetition period of at least 10 ms are sent to the TC from the external equipment.

The LVDS (Low Voltage Differential Signaling) interface uses differential signaling with low signal levels. Most commonly, LVDS transmitter and receiver are used in a point-to-point configuration.

The LVDS interface provides high speed data transfer. The amplitude of the differential signal is 350 mV, which makes it possible to make sharper fronts of signals and a theoretically possible data transfer rate of 1.923 Gbit/s in a lossless environment. This interface is insensitive to common mode pickups up to ± 1 V to differential inputs. Since LVDS uses the current switching mode when transmitting information, it is necessary to pay special attention to power consumption and electromagnetic pickups on adjacent buses when designing devices, which is the price of speed.

The transmitter controls the differential line. A marking impulse with a current of 3.5 mA is output



дачи и низкое нарастание напряжения (1 В / нс) обусловливают малый уровень наводок от самого интерфейса. В свою очередь, малый уровень перекрестных наводок и низкая чувствительность к внешним наводкам позволяют использовать высокую плотность соединений как на печатной плате, так и в кабеле. Метод передачи LVDS не зависит от напряжения питания и работает при напряжении питания передатчика и приемника 5 В, 3 В или 2,5 В. При этом сопряжение устройств с разным напряжением питания не является проблемой.

Используемый метод передачи позволяет также существенно снизить энергопотребление интерфейса. На 100 Ом нагрузке LVDS при падении напряжения 400 мВ составляет 1,2 мВт. Для сравнения, интерфейс RS-422 имеет рассеиваемую мощность на нагрузке порядка 90 мВт, что в 75 раз больше.

Следует отметить и простоту терминирования сигнальных LVDS-линий – для этого требуется всего один резистор для каждой пары, и все. Для сравнения, другие скоростные методы требуют пары резисторов, один из которых подключается на землю, а второй к питанию, причем зачастую не напрямую, а через специальный источник.

Цифровой интерфейс CameraLink, основанный на интерфейсе LVDS, представляет собой последовательный протокол передачи данных, разработанный для задач машинного зрения. Диапазон частот интерфейса Camera Link позволяет работать с камерами, разрешающая способность которых достигает мегапикселов, а скорость – нескольких сотен кадров в секунду. Для камер, рассчитанных на пропускную способность канала 100–850 Мбайт/с, рекомендуется использовать стандартизованный интерфейс Camera Link.

Поскольку Camera Link был разработан специально для камер машинного зрения, он гарантирует очень высокую скорость видеосигнала, простоту использования и сохранность данных. Интерфейс Camera Link имеет три варианта конфигурации Base, Medium и Full. Скорость для разных вариантов конфигурации: Base – 255 Мбайт/с, Medium – 510 Мбайт/с; Full – 850 Мбайт/с.

Информационное взаимодействие КТ с сопрягаемыми системами в составе гиперспектральной камеры оформляется соответствующими схемами связей и протоколами взаимодействия, определяющими логику взаимодействия, параметры и сигналы связей, разрабатываемыми и согласуемыми на этапе разработки КД [4–6].

to the line. The load lines are parallel-connected differential LVDS receiver and 100 Ohm resistor. The receiver itself has a high input impedance, and the main signal shaping occurs at the load resistor. When the line current is 3.5 mA, a voltage drop of 350 mV is formed, which is detected by the receiver. When switching the direction of the current in the line, the polarity of the voltage across the load resistor changes, forming the states of a logical zero and a logical unit.

The transmission scheme used has a number of advantages. The LVDS interface has a high data transfer rate. The maximum speed determined by the standard is up to 622 Mbit/s, which is comparable with the optical interface. At the same time, the actual speed of the LVDS channel is limited by two factors: the feed rate and data retrieval rate and the transmission medium parameters.

The differential signaling method used allows minimizing the effects of external interference. A small voltage change, symmetrical transmission lines and a low voltage rise (1 V/ns) cause a low level of interference from the interface itself. In turn, the low level of crosstalk and low sensitivity to external pickups make it possible to use a high density of connections both on the printed circuit board and in the cable. The LVDS transmission method does not depend on the supply voltage and operates at the transmitter and receiver supply voltage of 5 V, 3 V or 2.5 V. At the same time, pairing devices with different supply voltages is not a problem.

The transmission method used also makes it possible to significantly reduce the power consumption of the interface. At 100 Ohms the LVDS load with a voltage drop of 400 mV is 1.2 mW. For comparison, the RS-422 interface has a power dissipation at a load of about 90 mW, which is 75 times more.

The simplicity of the termination signal LVDS-lines should also be noted: this requires only one resistor for each pair, and that's it. For comparison, other high-speed methods require a pair of resistors, one of which is connected to ground, and the second is connected to the power supply, and often not directly, but through a special source.

The CameraLink digital interface, based on the LVDS interface, is a serial data transmission protocol designed for machine vision tasks. The frequency range of the Camera Link interface allows you to work with cameras with the resolution reaching megapixels, and the speed reaching several hundred frames per second. For cameras designed for a channel capacity of 100–850 MB/s, a standardized Camera Link interface is recommended.



Электропитание и оценка энергопотребления

Электропитание КТ осуществляется постоянным напряжением от 22 до 29 В от источника питания основного объекта. Коэффициент пульсации в цепи питания от 22 до 29 В не более 7,4%. Мощность, потребляемая КТ от источника питания – не более 10 Вт. КТ имеет защиту от перегрузок в электрических цепях и короткого замыкания при неправильном подключении к источникам электропитания цепей питания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений / Пер. с англ. под ред. Чочия П.А. – М.: Техносфера, 2005.
Gonsales R., Vuds R. Cifrovaya obrabotka izobrazhenij / Per. s angl. pod red. Chochia P.A. – M.: Tekhnosfera, 2005.
2. Brailean J.C., Kleihorst R.P., Efstratiadis S., Katsaggelos A.K., Lagendijk R.L. Noise Reduction Filters for Dynamic Image Sequences: A Review. *Proceedings of IEEE*, 2015; 83(9): 1272–1292.
3. Голицын 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.
Golitsyn A. V., Efremov V. S., Shlishevskij V. B. Nekotorye varianty opticheskikh sistem na osnove zhidkostnykh elementov. *Sbornik trudov XI Mezhdunarodnoj konferencii «Prikladnaya optika–2014»*. – SPb.: Opt. obsh. im. D.S. Rozhdestvenskogo. 2014; 3: 55.
4. Каталог продукции. Камеры телевизионные ОКТБ «Омега»
<http://new.oktb-omega.ru/index.php/produktsiya>
Katalog produkci. Kamery televizionnye OKTB «Omega»
<http://new.oktb-omega.ru/index.php/produktsiya>
5. https://www.sony-semicon.co.jp/products_en/new_pro/october_2013/icx808ala_e.html.
6. <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/KAI-02150-D.PDF>.

Since Camera Link was designed specifically for machine vision cameras, it guarantees a very high video speed, ease of use and data integrity. The Camera Link interface has three configuration options, Base, Medium and Full. The speed for different configuration options: Base – 255 MB/s, Medium – 510 MB/s; Full – 850 MB/s [4–6].

Informational interaction of TC with interfaced systems in the composition of the hyperspectral camera is made out by appropriate communication schemes and interaction protocols defining the interaction logic, communication parameters and signals developed and coordinated during the design phase of the design documentation [4–6].

Power supply and energy consumption evaluation

The TC power supply is carried out with a constant voltage from 22 to 29 V from the power source of the main object. The ripple factor in the power circuit from 22 to 29 V is not more than 7.4%. The power consumed by the TC from the power source is not more than 10 W. The TC has protection against overloads in electrical circuits and short circuits, in case the power supply circuits are not properly connected to power supplies.