



УДК 621.3.082.52

П. В. Столбов, В. И. Сиротинин  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)  
А. В. Воронин  
ООО "МСД-Холдинг" (Санкт-Петербург)

## Матричная камера в составе телевизионной системы для обнаружения контактного провода

*Представлен способ повышения эффективности работы системы обнаружения контактного провода модернизацией аппаратных и программных элементов системы. Приведены обоснование выбора новой элементной базы, а также разработки нового программного обеспечения. Представлены функциональная схема камеры на основе высокоскоростного протокола передачи видеоданных "Camera Link", а также алгоритм захвата изображения с матричного сенсора.*

### Матричный сенсор, ЛПЗС, стереотелевизионная система, захват и обработка видеоизображения, высокоскоростные камеры, системы обнаружения, "Camera Link"

Одним из способов контроля инфраструктуры контактных сетей железных дорог является использование специального вагона-лаборатории испытаний контактной сети (ВЛИКС), который регулярно объезжает главные пути электрифицированных железнодорожных магистралей. Для обнаружения и бесконтактного измерения положения (высота, смещение) контактного провода (КП) в составе ВЛИКС используется телевизионная система (ТС). Структурная схема ТС (рис. 1) включает в себя:

– три телевизионные камеры К0, К1, К2 на линейных приборах с зарядовой связью (ЛПЗС) со

встроенными микропроцессорными контроллерами управления фотоприемником;

– четырехканальный мультиплексор сигналов от телевизионных камер, обеспечивающий их связь микропроцессорным контроллером, помещенным на системную шину процессорного блока ЭВМ рабочего места оператора;

– микропроцессорный контроллер на системной шине ЭВМ, предназначенный для обработки информации, получаемой от телевизионных камер;

– светодиодный осветитель КП, включающий в себя блок светодиодов и драйвер для программного управления освещением.

В основу работы ТС положен принцип определения КП в пространстве (рис. 1), основанный на измерении углового положения объекта (углов визирования  $\alpha$  и  $\beta$ ) относительно осей оптических систем двух разнесенных в пространстве на базовое расстояние  $B/2$  телевизионных камер. Поля зрения оптических приемников камер К0, К1, К2 на ЛПЗС ориентированы поперек оси железнодорожного пути и лежат в одной плоскости. Начало лучей визирования КП каждой камерой определяется положением некоторой узловой точки в оптической системе камеры. Узловые точки камер К1 и К2 размещаются на базовой линии, расположенной поперек вагона параллельно его полу,

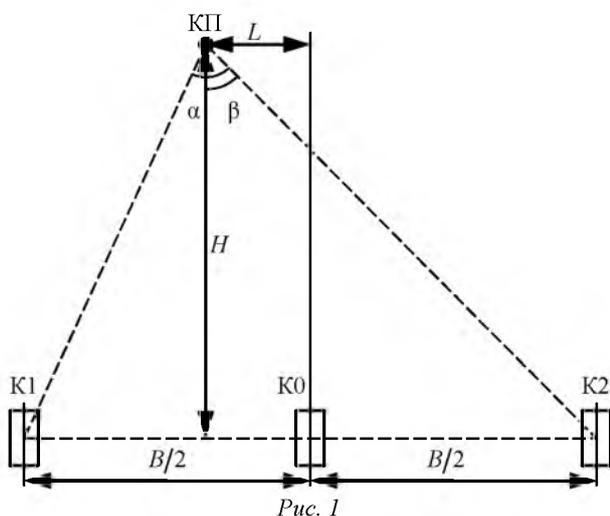


Рис. 1

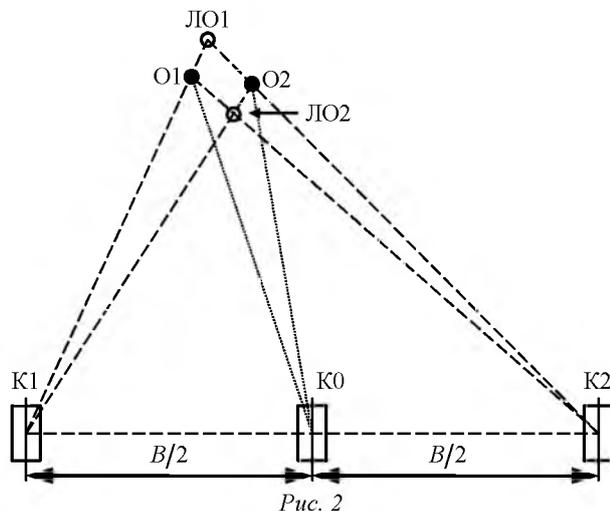
на расстоянии  $B$  друг от друга. Узловая точка центральной камеры  $K0$  размещается на той же линии. Как следует из рис. 1, измеренные значения углов визирования КП камерами  $K1$   $\alpha$  и  $K2$   $\beta$  при известном расстоянии  $B$  позволяют вычислить высоту  $H$  контактного провода над базовой линией и смещение  $L$  его проекции на базовую линию относительно диаметральной плоскости кузова вагона:

$$H = \frac{B}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta}; \quad L = \frac{H (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta)}{2}.$$

Углы визирования  $\alpha$  и  $\beta$  в камерах  $K1$  и  $K2$  измеряются при помощи координатно-чувствительных ЛПЗС, установленных в фокальных плоскостях объективов камер. Результатом обработки изображения, поступающего с выхода ЛПЗС, является номер пикселя, соответствующего середине КП, наблюдаемого на фоне неба [1].

В случае одновременного наблюдения в рабочей зоне двух и более объектов ( $O1$ ,  $O2$ , рис. 2) в точках пересечения лучей визирования боковых камер  $K1$  и  $K2$  возникают ложные объекты ЛО1, ЛО2, которые отбрасываются при анализе сигнала от дополнительной центральной камеры  $K0$ .

При использовании светочувствительных сенсоров для обнаружения и определения положения КП необходимо выделять соответствующий ему сигнал из совокупности мешающих сигналов, создаваемых внешним фоном. В зависимости от погодных условий и от времени суток в качестве фоновых источников выступают небо, облака, луна, искусственные источники освещения, находящиеся в непосредственной близости от железной дороги. При определенном соотношении мешающих факторов могут создаваться неблагоприятные условия, влияющие на такие показатели эффективности системы измерения (СИ), как точность, скорость и достоверность измерений.



Обнаружение КП достигается за счет их контраста по отношению к фону. В дневное время сигнал от КП имеет меньший уровень по сравнению с фоновыми сигналами (КП темнее фона). В ночное время суток эффективность работы телевизионных камер достигается за счет светодиодного осветителя. КП обычно изготавливают из электролитической меди [2], обладающей высокой отражающей способностью, благодаря чему освещенный КП будет выделяться на фоне темного неба (КП светлее фона).

При наличии кучевых облаков могут возникнуть неблагоприятные условия для функционирования ТС. Фон, на котором обнаруживается КП, содержит множество контрастных участков. При этом за счет большой яркостной разницы между облаками и небом может возникнуть ситуация, при которой сигнал от КП, обнаруживаемый на фоне неба, начнет сливаться с фоновым сигналом. Следовательно, возникают возможности пропуска объекта или ложного обнаружения из-за высокого динамического диапазона вариаций света неба с кучевыми облаками и ограниченного динамического диапазона ЛПЗС.

Такая ситуация может привести к снижению точности измерения положения КП, а также к невозможности его достоверного обнаружения. Необходимо отметить, что при использовании линейных фоточувствительных датчиков, когда обрабатывается лишь одна строка изображения, сложно достичь высокой вероятности правильного обнаружения КП в таких условиях, поскольку сигнал о КП теряется на фоне помех.

Повысить эффективность работы ТС позволит применение высокоскоростного матричного сенсора с глобальным затвором. При использовании матричного КМОП-сенсора возможна внутрикадровая обработка изображения – анализ полученных в одном кадре строк для выделения полезного сигнала, что повысит вероятность правильного обнаружения КП. Помимо внутрикадровой обработки, так же, как и в ТС с ЛПЗС, будет использоваться и межкадровая обработка. Также эффективность работы ТС повысится и за счет более высокого динамического диапазона матрицы по сравнению с используемым ЛПЗС.

Целесообразность разработки ТС с матричными камерами в роли координатно-чувствительных элементов должна быть определена, исходя из анализа представленных на рынке матричных камер. Возможные варианты матричных камер на основе КМОП-фотоприемников могут быть следующими:

- телевизионная камера стандартного разрешения, работающая в стандартном телевизионном режиме с аналоговым выходом;
- телевизионная камера стандартного разрешения, работающая в стандартном телевизионном режиме с цифровым выходом;
- телевизионная камера высокого разрешения с цифровым выходом;
- телевизионная камера высокого разрешения с цифровым выходом и со встроенной обработкой видеосигнала;
- телевизионная камера низкого разрешения;
- камерные модули.

Деление это несколько условно, так как многие образцы выпускаемых промышленностью КМОП-фотоприемников способны работать в нескольких режимах [3].

Сравнение характеристик велось для камер высокого разрешения с цифровым выходом, а также для камер со встроенными блоками обработки видеосигнала как наиболее подходящих для задачи обнаружения и определения местоположения КП.

В рассмотренных камерах используются высокоскоростные матрицы с регулируемым затвором, программируемым окном интереса (передача только интересующих строк изображения, что повышает скорость работы). Расширение динамического диапазона обеспечивается адаптивной коррекцией свет-сигнальной характеристики, формирующей кусочно-линейный отклик  $U_{\text{ВЫХ}}$  в зависимости от накапливаемого при экспозиции числа электронов  $N_{\text{э}}$  (пример дан на рис. 3). Параметры представленных на рисунке сегментов могут изменяться программно.

В камере также присутствуют настраиваемые АЦП с разрядностью 8/10/12 бит на пиксель. Обычно имеются встроенная флеш-память, регулируемая диафрагма объектива, а также возможность автономного использования камеры. В подобных высокоскоростных камерах применяются три основных протокола для связи с персональным

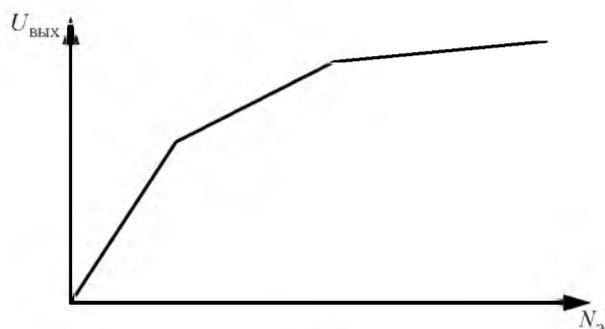


Рис. 3

компьютером (ПК): USB3.0; "Gigabit Ethernet" и "Camera Link".

Протоколы USB3.0 и Gigabit Ethernet полностью совместимы с имеющимися технологиями ПК, что снижает стоимость камеры и облегчает конфигурацию оборудования при ее подключении. Недостатком разработанных различными производителями камер, использующих эти протоколы, является отсутствие схем обработки получаемого изображения. В результате для обнаружения КП и определения его местоположения в режиме реального времени предъявляются высокие требования к производительности ПК, так как необходимо обеспечить одновременную обработку потоков данных со скоростью до 350 Мбайт/с с трех цифровых камер.

Протокол "Camera Link" применяется для камер со скоростью передачи данных от 100...800 Мбайт/с. В них присутствуют специальные схемы захвата и обработки изображения – фреймграбберы. Они позволяют реализовать интерфейс "Channel Link", суть которого заключается в управлении работой матрицы, получении последовательных LVDS-данных с матрицы, их десериализации и последующей отправке на встроенные интегральные микросхемы, обеспечивающие необходимую программную обработку и дальнейшее согласование передачи данных с оборудованием ПК [4]. Так, появляется возможность использовать встроенные средства обработки для получения данных о положении КП в режиме реального времени и передавать полученную информацию на ПК.

Существенным недостатком использования фреймграбберов является их стоимость. Стоимость согласующей платы может превышать стоимость самой камеры. Кроме того, для обнаружения КП и использования для этого различных алгоритмов внутрикадровой и межкадровой обработок изображений необходимы разработка специализированного программного обеспечения, а также подготовка получаемой информации к передаче в измерительно-вычислительный комплекс ВЛИКС.

Таким образом, для решения рассматриваемой задачи необходимо разработать матричную камеру с платой приема получаемого от сенсора видеосигнала и со схемами его обработки и получения информации в режиме реального времени, согласованном с работой остальных СИ ВЛИКС, которая будет удовлетворять требованиям скорости и точности измерений. В результате будет обеспечена оптимизация расходов при выборе элементной базы для данной задачи и при разработке программного обеспечения.

Для обнаружения КП предусмотрим использование высокоскоростной камеры высокого разрешения с сенсором, разработанным для работы с наиболее высокоскоростным протоколом "Camera Link". Это позволит получать видеоданные с разрешением не менее 2 Мп и с частотой не менее 150 кадр./с, не достигая предельно допустимых значений скорости передачи данных для указанного протокола. Необходимость внешних плат захвата и обработки изображения для этого протокола вписывается в концепцию разработки камеры для определения положения КП.

Функциональная схема (рис. 4) содержит основные блоки разрабатываемой камеры. Матричный сенсор помимо LVDS-каналов передачи видеоизображения имеет синхронные и асинхронные каналы для настройки режима работы и внешнего управления затвором.

Сигнальный процессор осуществляет обработку захваченного изображения и передачу полученной информации на ПК, на котором идут вывод и сохранение результатов. Также он формирует управляющие сигналы для матрицы в соответствии с выбранным режимом работы камеры.

Структура программы обработки сигнала изображений существенно зависит от принятого алгоритма обработки для обнаружения КП, в связи с чем ее описание выходит за рамки настоящей статьи. Однако любая программа предусматривает захват изображения, описанный далее. Необходимо отметить, что разработанный блок захвата изображения для протокола "Camera Link" применим для матричных сенсоров различных производителей при введении в него незначительных изменений (под конкретный сенсор и конкретные задачи), что уменьшит затраты при разработке других СИ, использующих камеры.

Предусмотрим использование матричного сенсора, разработанного для протокола "Camera Link". Для задачи обнаружения КП используем матрицу CMV4000 от производителя CMOSIS. Она позволяет получать изображение объемом 2 Мпикс со скоростью 360 кадр./с. В матрице используются 16 LVDS-каналов для вывода изображения, а также один управляющий LVDS-канал, обеспечивающий правильное получение кадра при захвате

изображения. Для управления режимом работы матрицы в ней реализован последовательный интерфейс SPI, по которому программируются такие параметры, как выбор области интереса, управление затвором, управление свет-сигнальной характеристикой, выбор используемых LVDS-каналов, определение разрядности АЦП и др.

Устройство захвата изображения реализовано в программируемой логической интегральной микросхеме ПЛИС типа FPGA (field-programmable gate array) производителя "Altera", семейства "CycloneV". Особенностью данной FPGA является наличие встроенных приемников LVDS-сигналов, обеспечивающих согласование волновых сопротивлений, соответствующих стандарту LVDS [5]. При работе с высокоскоростным синхронным интерфейсом для получения достоверных данных необходима синхронизация тактовой частоты и последовательных LVDS-данных для каждого канала приема. Синхронизация упрощается с помощью высокоточной разводки схемы, обеспечивающей близкие по значениям электрической длины пути от каждого LVDS-передатчика матрицы до каждого LVDS-приемника ПЛИС. В дополнение к этому необходимо выполнить и программную синхронизацию, обеспечивающую правильное время взятия битовых отсчетов, а после этого по запрограммированной в ПЛИС передаваемой последовательности получить соответствующее ей значение десериализованных данных.

Битовая синхронизация выполняется с помощью встроенных в ПЛИС схем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с возможностью программного изменения фазы выходного колебания относительно колебания опорной частоты. В основе LVDS-приемника лежит последовательно-параллельный сдвиговой регистр, управляемый генерируемым схемой ФАПЧ тактовым сигналом. Как видно из рис. 5, момент взятия битового отсчета может лежать во временной области стабильного значения сигнала (установленное единичное или нулевое значение) либо приближаться к области переключения значения сигнала (где наблюдается джиттер сигнала). Целью битовой синхронизации является установка позиции взятия отсчета посередине стабильного интервала каждого бита. Это достигается с помощью постепенного

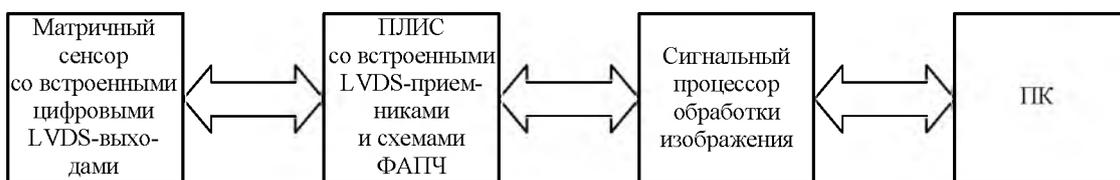
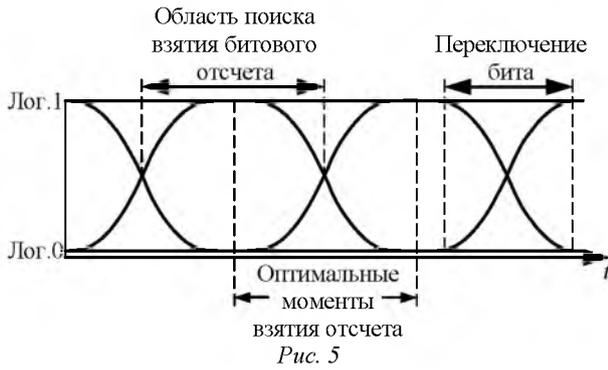
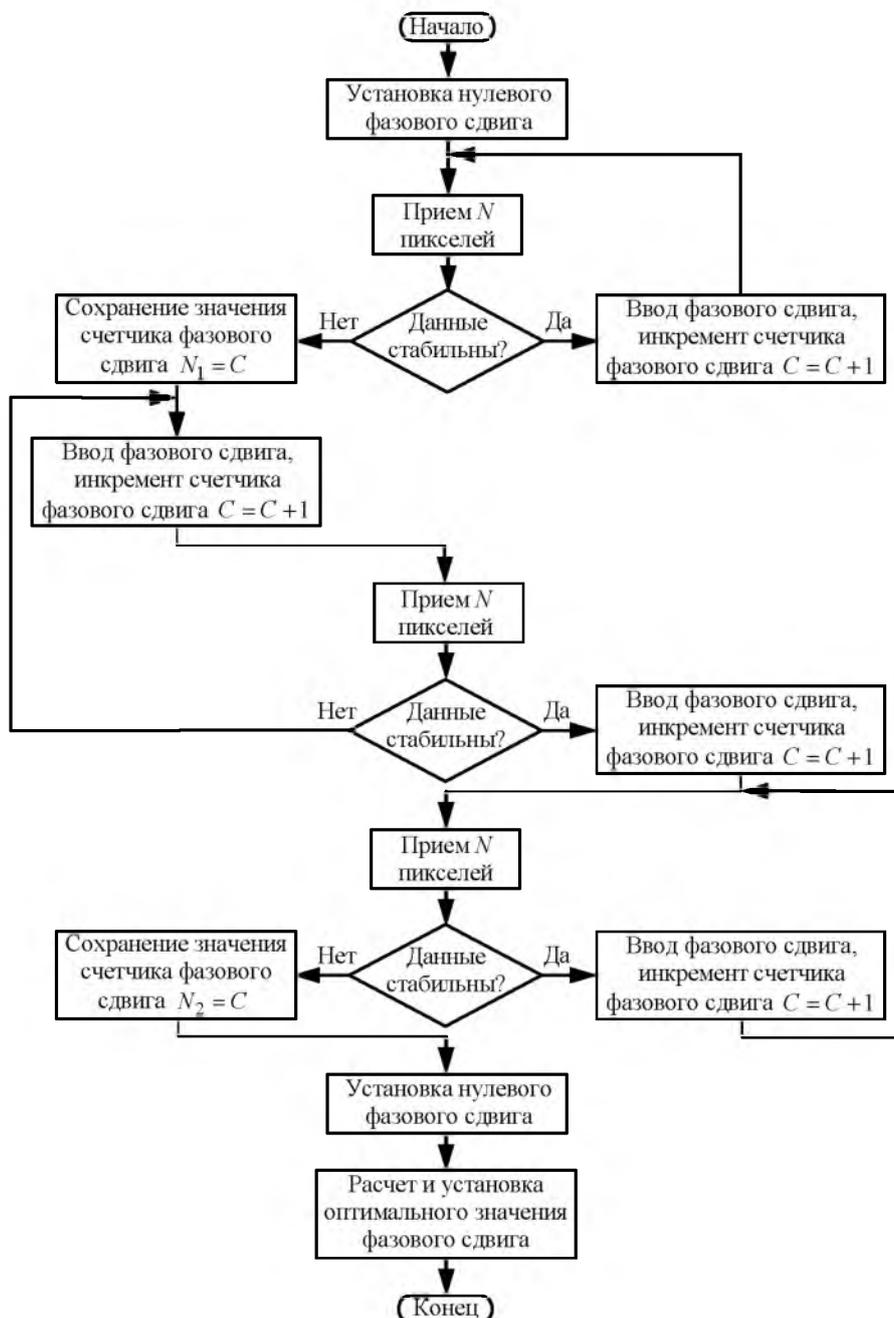


Рис. 4



изменения фазы вырабатываемого в схеме ФАПЧ тактового сигнала относительно принимаемых по LVDS-каналу последовательных данных.

Блок-схема алгоритма нахождения оптимального фазового сдвига тактовой частоты представлена на рис. 6. Алгоритм выполняет поиск первого нестабильного участка при взятии отсчетов данных, сохраняет значение числа фазовых сдвигов схемы ФАПЧ, сделанных для достижения первой зоны нестабильности, вызванной переключением значения битов, после чего идет поиск второго нестабильного участка и сохранения числа соответствующих фазовых сдвигов. Номера фазовых сдвигов, лежащие между этими двумя значениями, соответствуют положению тактовых импульсов относительно данных, при которых



наблюдается стабильное взятие битовых отсчетов. Тогда для нахождения оптимального фазового сдвига используется простое соотношение:

$$N_{\text{opt}} = (N_1 + N_2)/2,$$

где  $N_{\text{opt}}$  – оптимальное значение фазовых сдвигов схемы ФАПЧ для стабильного взятия отсчетов;  $N_1$  и  $N_2$  – значения числа фазовых сдвигов, соответствующих первому и второму нестабильным участкам взятия данных соответственно.

После битовой синхронизации выполняется синхронизация по приему передаваемого слова. Матрица программируется на передачу известной последовательности по каждому LVDS-каналу. Полученные десериализованные отсчеты сравниваются с записанными в память. При несовпадении эталонного и принимаемого слов сдвигаемые в сдвиговом регистре LVDS-приемника данные задерживаются на один период тактовой частоты.

При их совпадении смещение данных в сдвиговом регистре прекращается и делается вывод о выполненной синхронизации по принимаемому слову.

Таким образом достигается захват изображения с последующей передачей десериализованных данных на параллельный порт сигнального процессора, выполняющего обработку изображения.

Разрабатываемая камера за счет замены ФПЗС на матричный сенсор и применения новых алгоритмов обработки изображения должна повысить эффективность работы СТС в задаче обнаружения КП, а также повысить скорость и информативность системы измерения. Представленный алгоритм захвата изображения при использовании высокоскоростных матриц высокого разрешения позволяет, используя соответствующие аппаратные средства, применять такие матрицы для широкого спектра задач, в том числе для обнаружения и определения местоположения КП.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафин В. Г. Метрологические характеристики устройства дистанционного измерения параметров контактного провода "Телекс-2" // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2010. № 9. С. 4–5.
2. Железнодорожный транспорт: энциклопедия / под ред. Н. С. Конарева. М.: Изд-во БРЭ, 1994. 559 с.
3. Горбачёв А. А., Коротаяев В. В., Ярышев С. Н. Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе. СПб.: Изд-во НИУ ИТМО, 2013. 98 с.

P. V. Stolbov, V. I. Sirotinin  
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"  
A. V. Voronin  
Open JSC "MSD-Holding" (Saint Petersburg)

### Matrix Camera, Composed Television System for the Detection of the Contact Wire

*A method for increasing the efficiency of the contact wire detection system by upgrading hardware and software elements of the system is presented. The substantiation of the choice of a new element base, as well as the development of new software. The functional diagram of the camera on the basis of high-speed video data transfer protocol Camera Link, and the image capture algorithm with a matrix sensor.*

Matrix sensor, Line CCD, Stereo Television System, Video Capture and Image Processing, High-Speed Camera, Detection System, "Camera Link"

Статья поступила редакцию 16 апреля 2016 г.

4. Specifications of the Camera Link Interface Standard for Digital Cameras and Frame Grabbers. URL: <http://www.fastvideo.ru/info/cameralink/CameraLinkOfficial.pdf> (дата обращения 17.07.2016).
5. Попов А. Ю. Проектирование цифровых устройств с использованием ПЛИС: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 80 с.