

УДК 621.383

Блок электронной обработки сигналов многорядных матричных фотоприемных устройств

В. Н. Соляков, А. С. Медведев

ФГУП «Научно-производственное объединение "Орион"» — государственный научный центр Российской Федерации, Москва, Россия

О. В. Катаев, И. В. Петручук, Г. Л. Трунов

НИИ МВС ТРТУ, г. Таганрог, Россия

Представлены результаты разработки и создания блока электронной обработки (БЭО) сигналов для матричных фотоприемных устройств (МФПУ) формата 4×288, разрабатываемых в ФГУП «НПО "Орион"». БЭО предназначен для преобразования аналоговых сигналов МФПУ в цифровую форму, выполнения предварительной обработки полученной информации и отображения ее на экране черно-белого монитора. Формат формируемого тепловизионного кадра изображения 576 строк на 768 столбцов. Формат МФПУ — 4×288 фоточувствительных элементов.

Матричное фотоприемное устройство содержит в своем составе восемь линеек (А, В, С, D, E, F, G, H) фоточувствительных элементов (ФЧЭ) по 144 элемента в каждой. Элементы линеек А, В, С, D сдвинуты относительно элементов линеек E, F, G, H наполовину шага ФЧЭ в линейке. Формирование тепловизионного кадра осуществляется последовательным сканированием изображения в направлении, перпендикулярном линейкам, при этом за один проход сканера регистрируется 288 строк изображения. В сканере предусмотрено смещение изображения в последовательных сканах вдоль линейки на четверть шага ФЧЭ в отдельной линейке, таким образом за два прохода сканера регистрируется 576 строк изображения с пространственным периодом дискретизации, равным четверти шага ФЧЭ в линейке. Расстояние между линейками в направлении сканирования составляет $\frac{3}{4}$ шага ФЧЭ в линейке. За время перемещения одного пикселя изображения между соседними линейками производится три цикла считывания сигналов с каждой линейки МФПУ.

Ввод полукадра представляет собой последовательность 768 периодов (циклов) опроса строки, каждый из которых, в свою очередь, содержит 144 такта опроса ФЧЭ линеек. Информация от одноименных i -х элементов выводится параллельно. С учетом топологии расположения ФЧЭ в матрице в каждом i -м такте могут формироваться одновременно два пикселя изображения $SABCD(i, j)$ и $SEFGH(i, j)$ в соответствии с выражениями

$$\begin{aligned} SABCD(i, j) &= A(i, j) + B(i, j-3) + C(i, j-6) + \\ &\quad + D(i, j-9); \\ SEFGH(i, j) &= E(i, j-12) + F(i, j-15) + \\ &\quad + G(i, j-18) + H(i, j-21), \end{aligned} \quad (1)$$

где j — номер периода опроса линейки МФПУ, начиная с начала сканирования полукадра;

$SABCD(i, j)$ и $SEFGH(i, j)$ — пиксели, формируемые элементами A_i, B_i, C_i, D_i и элементами E_i, F_i, G_i, H_i соответственно;

$A(i, j), B(i, j), C(i, j), D(i, j), E(i, j), F(i, j), G(i, j), H(i, j)$ — значения сигналов, полученных при регистрации сигналов i -го ФЧЭ в линейке на j -м цикле опроса.

Учитывая временные задержки при прохождении различными линейками ФЧЭ через одни и те же фрагменты сканируемого изображения, становится очевидным, что для формирования 768 столбцов изображения необходимо использовать $21+768$ циклов опроса строк.

Для обеспечения возможности использования МФПУ с отдельными неисправными ФЧЭ необходимо иметь возможность исключения из выражений (1) сигналов от неисправных ФЧЭ и подачи на входы четырехвходовых сумматоров ABCD и EFGH сигналов от соседних исправных элементов.

Для определения дефектных элементов используются калибровки по минимальной и максимальной температуре излучения от опорных источников излучения. По сигналу "Калибровка 1" МФПУ сканирует опорный источник излучения с минимальной температурой, и в течение 32 циклов опроса столбцов накапливается информация от каждого ФЧЭ МФПУ. Полученные данные затем усредняются и сохраняются как результаты калибровки 1 (K1).

Во время следующего сканирования может быть выполнена "Калибровка 2" по опорному источнику с максимальной температурой. В результате второй калибровки в память калибровочных результатов будет записан второй массив данных K2.

В качестве критерия дефектности ФЧЭ используется величина разности между одноименными значениями сигналов, полученных при этих калибровках.

После выполнения четырех циклов калибровок К1 и К2 формируется матрица дефектности элементов МФПУ. С помощью этой матрицы определяется таблица выбора конфигурации входов сумматоров ABCD и EFGH при опросе каждой i -й линейки ФЧЭ.

В связи с тем, что выходные сигналы МФПУ имеют разброс выходных уровней и чувствительности, возникает необходимость корректировки неоднородности изображения, формируемого на экране телевизионного приемника. При коррекции неоднородности также используются результаты калибровок (К1 и К2).

Алгоритм двухточечной коррекции неоднородности изображения выглядит следующим образом:

$$S_k(I, J) = \frac{S(I, J) - K1(i)}{K2(i) - K1(i)} \cdot K_{st}, \quad (2)$$

где $S_k(I, J)$ — скорректированный элемент изображения;

$S(I, J)$ — элемент изображения, формируемый на выходе четырехвходового сумматора;

$K1(i)$ — элемент изображения, формируемый на выходе четырехвходового сумматора при калибровке по опорному источнику с минимальной температурой;

$K2(i)$ — элемент изображения, формируемый на выходе четырехвходового сумматора при калибровке по опорному источнику с максимальной температурой;

K_{st} — нормировочный коэффициент, определяемый экспериментальным путем при отладке БЭО.

Схема, формирующая скорректированные элементы изображения, в соответствии с выражением (2), должна иметь следующие основные блоки:

четыrehвходовый сумматор (См1);

двухвходовые сумматоры-вычитатели (См2, См3);

матричный умножитель (Умн.);

устройство деления (Дел.);

регистр нормировочного коэффициента (PrK_{st}).

Сумматор См1 формирует значения величин $S(I, J)$, при этом разрядность слагаемых 14 бит, а разрядность выходного кода сумматора 16 бит.

Сумматор-вычитатель См2 формирует разность $S(I, J) - K1(i)$, а сумматор-вычитатель См3 — разность $K2(i) - K1(i)$.

Двоичный код разности $S(I, J) - K1(i)$ поступает на вход умножителя Умн., на второй вход

которого поступает нормировочный коэффициент K_{st} . На выходе умножителя формируется произведение разности $[S(I, J) - K1(i)] \cdot K_{st}$. Это произведение поступает на вход устройства деления Дел. как делимое, а на вход операнда-делителя поступает разность $K2(i) - K1(i)$. В результате выполнения операции деления на выходе данного устройства формируется окончательный результат $S_k(I, J)$.

Для формирования видеосигнала в соответствии с ГОСТ 7845—92 блок электронной обработки должен генерировать 625 строк в кадре с длительностью 64 мкс. При этом строками, несущими информацию, являются строки с номерами 23—310 и 336—623, остальные строки — служебные. Следует также учитывать, что в 23-й строке для вывода информации используется вторая половина строки, а в 623-й — первая.

Для формирования полного телевизионного сигнала в БЭО используются два синхронно работающих узла — узел формирования сигнала изображения (УФИ) и узел формирования синхросигналов (УФС). Последний формирует импульсы синхронизации и гашения, а также уравнивающие импульсы и кадровый синхроимпульс.

Для возможности наблюдения тепловизионной картины при различных температурах фона необходимо предусмотреть возможность изменения температуры опорных источников излучения и подстройки диапазона входных сигналов АЦП. В БЭО реализован следующий алгоритм формирования сигналов подстройки температуры опорных источников.

Для 14-разрядного АЦП (максимальный отсчет 16 К) сигналы при калибровке 1 должны быть около 2 К (2047) в единицах счета АЦП, а при калибровке 2 — около 12 К. Среднее значение сигнала в видеобufferе желательно поддерживать в середине диапазона, т. е. на уровне 8 К. При уходе среднего значения в видеобufferе выше некоторого порога (скажем 10 К) необходимо выдать команду на сдвиг диапазона входного сигнала вниз, а при снижении ниже некоторого порога (скажем 6 К) — на сдвиг диапазона входного сигнала вверх. После этого выдать команду на подстройку температуры опорных источников.

Схема формирования сигналов подстройки температуры опорных источников включает в свой состав:

схемы сравнения СС1 — СС4;

счетчики Ст1, Ст2.

Схема сравнения СС1 сравнивает значение каждого элемента изображения в полукадре с верхним порогом, равным 10 К, и формирует единичный сигнал в случае, если значение элемента изображения больше 10 К.

Схема сравнения СС2 сравнивает значение каждого элемента изображения с нижним порогом и формирует единичный сигнал в случае, если величина элемента изображения меньше 6 К.

Счетчики Ст1 и Ст2 подсчитывают количество элементов изображения в каждом полукадре, значения которых больше верхнего и меньше нижнего граничных значений, соответственно.

Схемы сравнения СС3 и СС4 формируют единичные сигналы в случае, если количество элементов изображения больших 10 К и меньших 6 К, соответственно, превышает заранее заданное значение (например больше половины всех элементов полукадра).

Таким образом, за время формирования каждого полукадра изображения можно определить количество элементов изображения, выходящих за пороговые значения, и при необходимости сгенерировать сигналы на подстройку температуры опорных источников.

Обобщенная структура БЭО представлена на рис. 1. Аналого-цифровые преобразователи АЦПА, ..., АЦПН осуществляют преобразование аналоговых сигналов, поступающих от линеек фоточувствительных элементов в цифровой вид. Буферы FIFO ("первый вошел — первый вышел") предназначены для синхронизации информации, поступающей от ФЧЭ. Модули замены дефектных элементов позволяют использовать матрицу ФЧЭ при наличии отказов отдельных фоточувствительных элементов путем исключения неисправных ФЧЭ из рабочей конфигурации. Четырехходовые сумматоры ABCD и EFGH формируют значения $S(I, J)$ пикселей сканируемого изображения. Запоминающие устройства данных коррекции накапливают калибровочные данные при выполнении калибровок и при поиске дефектных фоточувствительных эле-

ментов. Модуль коррекции неоднородности изображения реализует алгоритм двухточечной коррекции в соответствии с выражением (2). В видеопамяти хранится сканируемое изображение. Модуль формирования видеосигнала формирует в цифровом виде черно-белый видеосигнал в соответствии с требованиями ГОСТ 7845 и на основании информации, содержащейся в видеопамати. Цифроаналоговый преобразователь выполняет преобразование цифрового видеосигнала в аналоговый. Узел управления и синхронизации осуществляет управление всеми узлами и модулями БЭО и синхронизирует их работу. Кроме того, УУС формирует четыре синхросерии F1, F2, F3 и F4, которые обеспечивают синхронизацию работы БЭО и МФПУ. Для согласования времени работы БЭО и времени сканирования изображения МФПУ длительность цикла F3 должна регулироваться в определенных пределах.

Кроме синхросигналов F1—F4 УУС формирует сигнал синхронизации развертывающего устройства (РУ) с частотой 50 Гц. От РУ в БЭО поступает сигнал "начало сканирования" (НС), который синхронизирует работу БЭО и РУ. Для выполнения калибровок из РУ в БЭО приходят два управляющих сигнала "Калибровка 1" (K1) и "Калибровка 2" (K2).

Для наблюдения тепловизионной картины при различных температурах фона в БЭО предусмотрена возможность выдачи сигналов для подстройки диапазона входных сигналов вверх и вниз ("Сдвиг вверх" и "Сдвиг вниз").

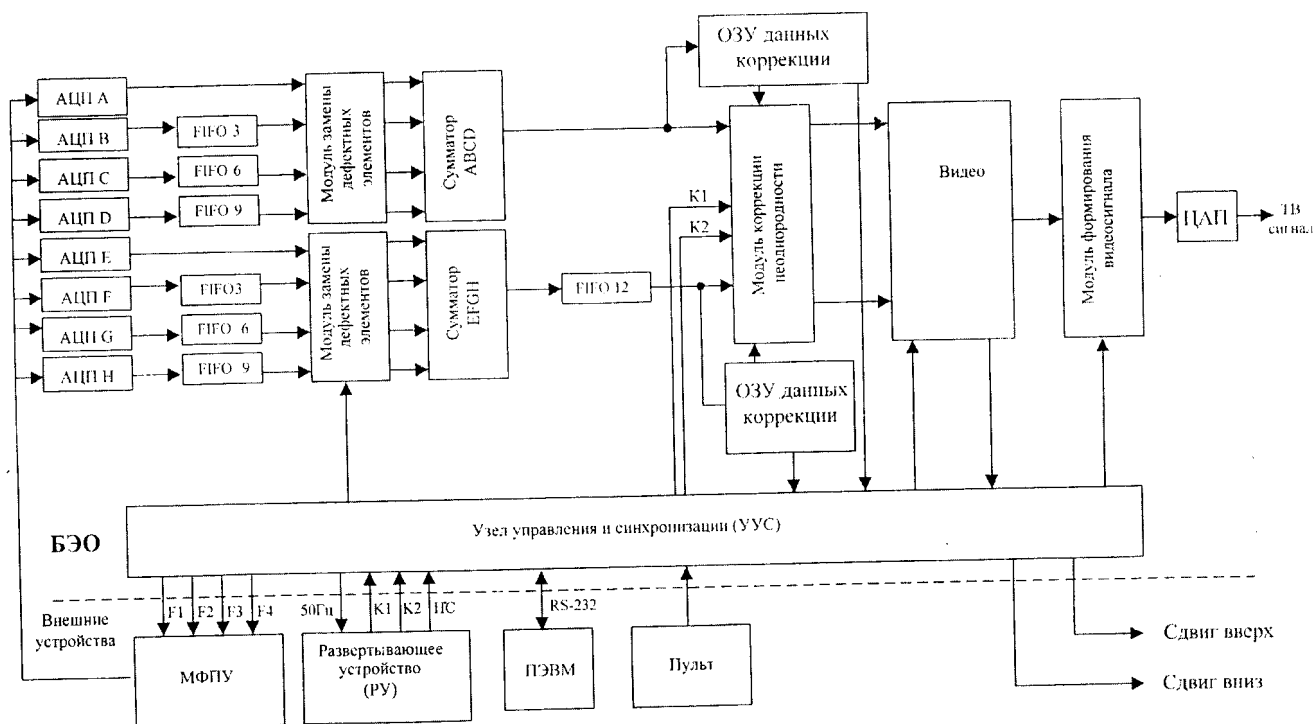


Рис. 1. Обобщенная структура БЭО

Для инициализации БЭО и изменения режимов его работы предусмотрена возможность подключения к БЭО технологической ПЭВМ и пульта управления (ПУ). ПЭВМ обеспечивает доступ к видеопамяти, памяти данных коррекции, к адресуемым регистрам БЭО. Пульт управления позволяет оператору сформировать сигналы: ручная коррекция 1 и 2, изменение яркости и/или контрастности, позитивное или негативное изображение.

На рис. 2 приведена структура БЭО, реализованная в данной работе. В состав БЭО входят следующие основные узлы и модули:

- усилители-нормализаторы входных аналоговых сигналов от МФПУ (УН);
- аналого-цифровые преобразователи линеек А, В, С, D, E, F, G, H (АЦПА, ..., АЦПН);
- модули ввода информации (МВИ1 и МВИ2);
- память калибровочных данных (ОЗУ1КД и ОЗУ2КД);
- генератор опорной синхросерии (Г);
- модуль формирования видеосигнала (МВС);
- видеопамять (ВОЗУ);
- память синхросигналов (СОЗУ);
- цифроаналоговый преобразователь (ЦАП);
- модуль интерфейсов (МИ);
- пульт управления (ПУ).

Усилители-нормализаторы входных сигналов предназначены для согласования уровней входных сигналов и входного диапазона АЦП. АЦП выполняют преобразование аналоговых входных сигналов в цифровой вид. Модули ввода ин-

формации выполняют формирование пикселей изображения, осуществляя при этом двухточечную коррекцию геометрического шума МФПУ. МВИ включают в себя буферы FIFO, схемы замены дефектных элементов, четырехходовые сумматоры, запоминающие устройства данных коррекции и схему коррекции неоднородности изображения. Кроме того, в МВИ входит часть узла управления и синхронизации БЭО. Память калибровочных данных предназначена для накопления калибровочных данных при выполнении калибровок К1 и К2 и поиске дефектных ФЧЭ.

Генератор опорной серии синхросигналов формирует синхросерию с частотой 32 МГц, на основании которой получают затем все внутренние синхросерии, а также синхросерии F1—F4 и частота 50 Гц.

Модуль формирования видеосигнала формирует в цифровом виде видеосигнал в соответствии с ГОСТ 7845—92 на основе информации, хранящейся в видеопамяти и в памяти синхросигналов. Кроме того, МВС управляет записью в видеопамять информации от МВИ1 и МВИ2 и формирует выходные сигналы БЭО: F1—F4, $f = 50$ Гц, "Сдвиг вверх", "Сдвиг вниз".

Видеопамять накапливает и хранит пиксели формируемого изображения.

Память синхросигналов хранит информацию, позволяющую формировать импульсы синхронизации, гашения, уравнивающие импульсы и кадровый синхроимпульс.

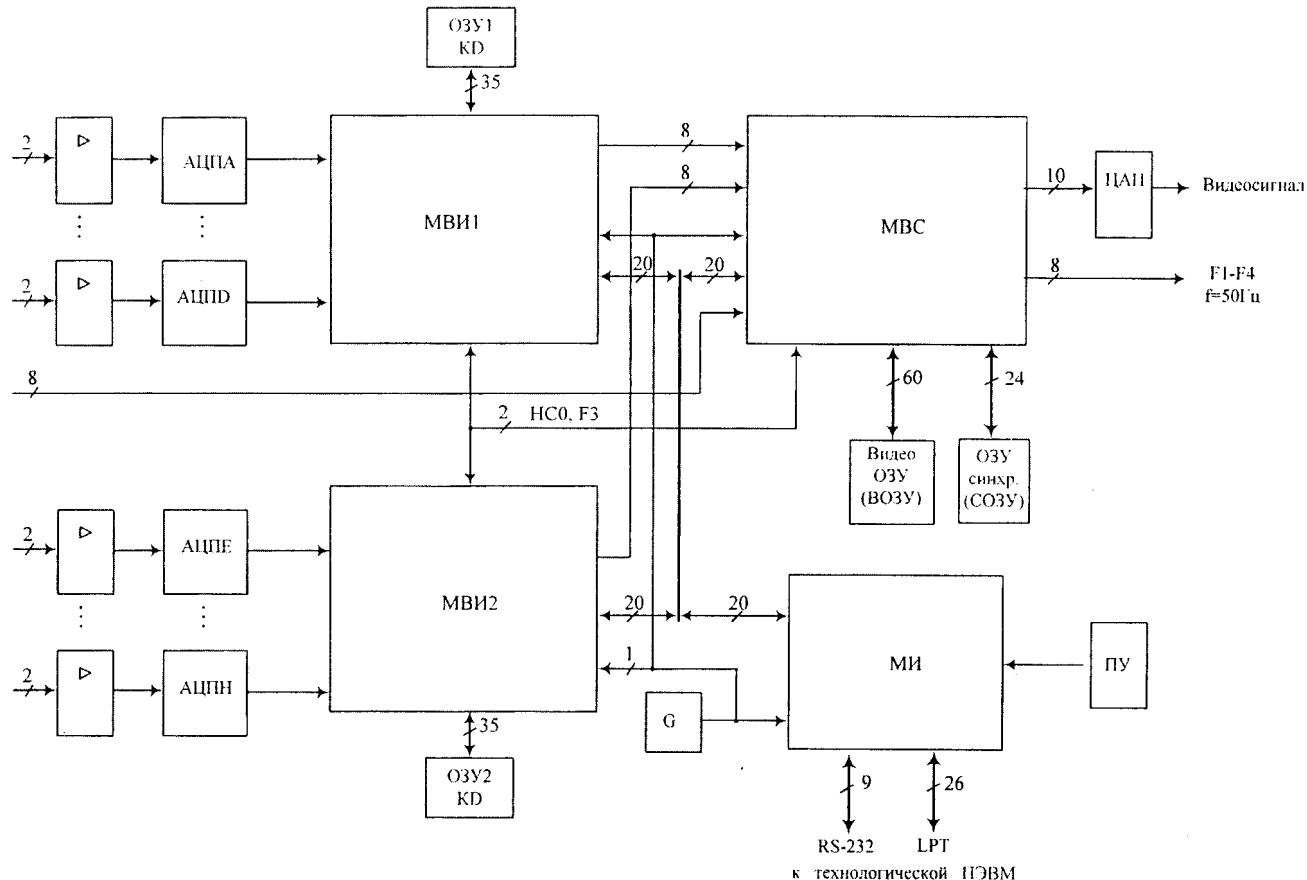


Рис. 2. Структура БЭО

Цифроаналоговый преобразователь выполняет преобразование цифрового видеосигнала в аналоговый.

Модуль интерфейсов обеспечивает взаимодействие между ПЭВМ и БЭО, позволяя иметь доступ ко всем адресуемым регистрам и памяти модулей БЭО. Взаимодействие ПЭВМ и БЭО осуществляется через последовательный интерфейс RS-232. Параллельный интерфейс (LPT) является вспомогательным и предназначен для доступа к памяти программ и оперативной памяти микроконтроллера, являющегося ядром МИ. Пульт управления также подключен к МИ.

Программное обеспечение БЭО позволяет выполнять следующие функции:

- инициализацию БЭО после подачи питающих напряжений;
- обработку калибровочных данных при выполнении калибровок и загрузку калибровочных коэффициентов в память калибровок МВИ;
- деселекцию дефектных фоточувствительных элементов и загрузка соответствующих данных в память адресов замен МВИ;
- изменение режимов работы БЭО через интерфейс связи с технологической ПЭВМ и от пульта управления;
- передачу массива оцифрованных сигналов МФПУ из видеопамати БЭО в технологическую ПЭВМ;
- обеспечение доступа ко всем адресуемым регистрам и памяти БЭО.

При инициализации программа-монитор микроконтроллера МИ автоматически загружает память синхросигналов, регистр внешних границ видеосигнала, регистр порогового значения видеосигнала, регистр количества циклов F3, регистры нормировочных коэффициентов, память адресов замен. После выполнения этих действий

БЭО готов к работе. Сигналом запуска является первый же пришедший сигнал "Начало сканирования".

На рис. 3 представлен обобщенный алгоритм работы программы-монитора БЭО. После выполнения инициализации программа-монитор переходит в режим сканирования команд, поступающих от технологической ПЭВМ или от пульта управления. По этим командам выполняются все остальные функции БЭО.

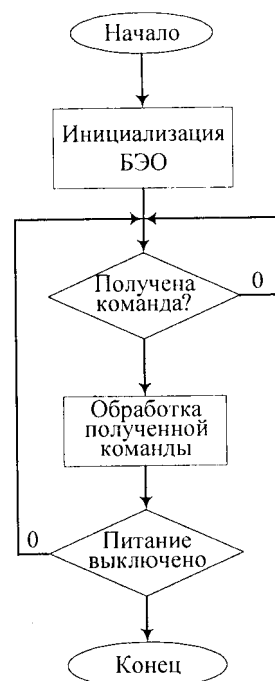


Рис. 3. Обобщенный алгоритм работы программы-монитора БЭО

На рис. 4 изображена структура программного обеспечения БЭО.

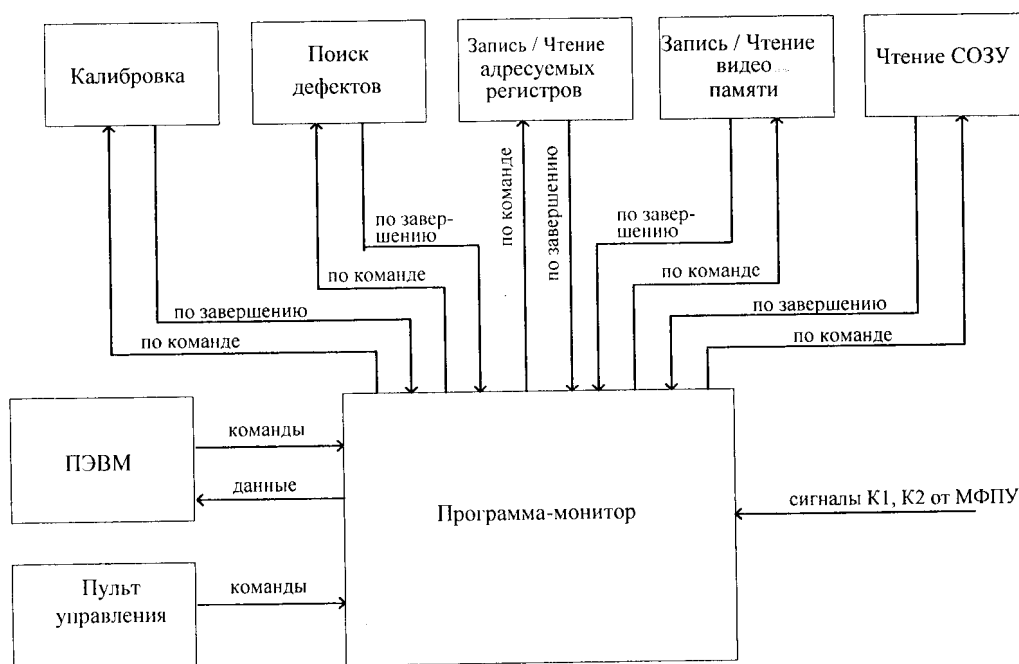


Рис. 4. Структура программного обеспечения БЭО

БЭО конструктивно состоит из трех печатных плат (двух плат модуля ввода информации, одной платы модуля формирования видеосигнала) и пульта управления. БЭО представляет собой мезонинную конструкцию из плат, установленных одна над другой на металлических стойках высотой 16 мм и соединенных между собой гибким шлейфом. Внешний вид БЭО представлен на рис. 5.

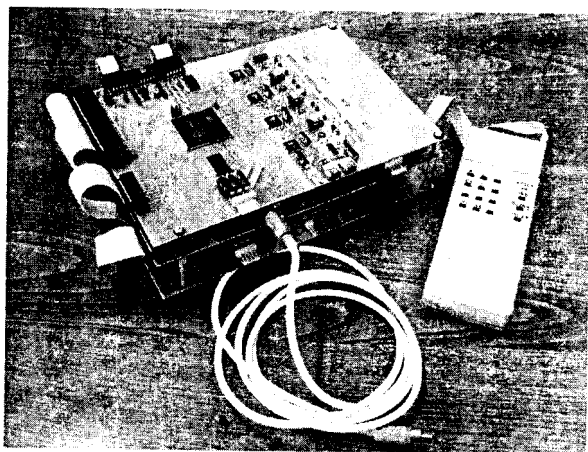


Рис. 5. Внешний вид БЭО

Функциональное назначение составных частей БЭО:

- плата МВИ преобразует входные аналоговые сигналы от МФПУ, формирует пиксели изображения на основе информации от фоточувствительных элементов (ФЧЭ), хранит данные калибровок, на основе которых производится затем деселекция дефектных элементов;
- плата МВС формирует видеоизображение на основе информации, полученной от МВИ,

синхронизирует полученное телевизионное изображение, преобразует цифровую информацию в аналоговую для последующей передачи ее в МФПУ, организует работу всего БЭО с технологической ПЭВМ по последовательному порту RS-232;

- пульт управления позволяет оперативно работать с БЭО и корректировать полученное видеоизображение на экране черно-белого ТВ-приемника.

Рассмотрим кратко элементную базу составных частей БЭО.

В качестве аналого-цифровых преобразователей плат МВИ используются 14-разрядные микросхемы АЦП AD9240 фирмы Analog Devices, обеспечивающие максимальную частоту преобразования 10 МГц и отношение сигнал/шум 75 дБ при частоте входного сигнала 5 МГц.

В качестве видеоЦАП используется микросхема ADV7128 фирмы Analog Devices, обладающая следующими основными характеристиками: разрядность — 10, частота преобразования — 30 МГц.

Основой для построения модулей ввода информации и формирования видеосигнала являются программируемые логические интегральные схемы фирмы Xilinx — XCV200E-7PQ240C.

В качестве микроконтроллера модуля интерфейсов используется микроконтроллер TN80C196KC20 фирмы Intel.

Внутренние и часть внешних соединений составных частей БЭО выполнены с использованием разъемов типа ВН (IDC), соединенных гибким плоским шлейфом. Внешние соединения для подачи питающих напряжений на БЭО выполнены витой парой, для связи с ТВ-приемником — коаксиальным кабелем.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

The electronic processing unit for TDI FPA

V. N. Solyakov, A. S. Medvedev

“Orion” Research-and-Production Association, Moscow, Russia

O. V. Kataev, I. V. Petruchuk, G. L. Trunov

SRI MCS TSURE, Taganrog, Russia

The results of design of the electronic processing unit (EPU) of signals from TDI focal plane array (FPA) are described. EPU designed for TDI FPA produced by “Orion”, SSC FSUE R&D Centre. The EPU perform converting analog signals from FPA to the digital form, digital processing of the converted data and forming video signal for black-and-white monitor. A format of the developed image is 576 lines by 768 columns. The EPU includes the following basic parts: ADC's, digital delay lines, signal summing unit, defective photosensitive elements replacement unit, unit for nonuniformity correction, video RAM, video DAC and control unit. Control unit forms a sequence of managing pulses for FPA, provides synchronism of input of signals with scanning system, forms signals for management of reference sources of radiation used for nonuniformity correction. Serial interface gives possibility for working algorithms modification and FPA signals transfer to the computer for processing and calculation of photo-electric parameters of FPA.