



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2013–6  
ЛДС

С.А. Горохов, М.К. Полковников

**Система управления и обработки данных для линейки  
GaAs детекторов рентгеновского сканера**

*Направлено в журнал " Медицинская техника "*

Протвино 2013

**Аннотация**

Горохов С.А., Полковников М.К. Система управления и обработки данных для линейки GaAs детекторов рентгеновского сканера: Препринт ИФВЭ 2013–6. – Протвино, 2013. – 16 с., 9 рис., библиогр.: 15.

В работе описана на программном уровне система управления и обработки данных для рентгеновского сканера, ее основные подсистемы, ответственные за получение данных изображения. Представлены программные процедуры управления подсистемами сканера и алгоритмы обработки данных сканера для компенсации эффекта разброса темновых токов детекторов и выравнивания различной чувствительности детекторов к рентгеновскому излучению.

**Abstract**

Gorokhov S.A., Polkovnikov M.K. System for control and data processing of GaAs linear array detector of the x-ray scanner: IHEP Preprint 2013–6. – Protvino, 2013. – p. 16, figs. 9, refs.: 15.

Current work describes the construction of the x-ray scanner and its main subsystems, responsible for correct image acquisition and the structure of the software to control these subsystems. Basic procedures and algorithms for detector's data correction have been shown, specifically the algorithm for dark current compensation which required for maximum dynamic range of the signal and the algorithm of normalization of different detector's x-ray sensitivity. These algorithm are required to obtain a good quality results.

## **Введение**

В настоящей работе приводятся результаты разработки программной оболочки для управления линейкой микрополосковых арсенид-галлиевых (GaAs) детекторов и создаваемых в ГНЦ ИФВЭ на их основе рентгеновских сканеров [1-4]. Система управления сканерами [3, 4] включает в себя следующие компоненты: подготовка линейки детекторов к работе, мониторинг состояния и контроля основных параметров в режиме ожидания, управление экспозицией и сбором данных с линейки детекторов, предварительная обработка и визуализация данных. Полученные изображения затем записываются в формате DICOM 3.0.

## **Устройство сканера и программная оболочка**

Разрабатываемые рентгеновские сканеры состоят из четырех подсистем: линейки GaAs детекторов, механической системы для синхронного перемещения линейки и источника рентгеновского излучения, системы сбора данных и источника рентгеновского излучения. Программное управление этими системами включает в себя: предварительную подготовку линейки детекторов к экспозиции, проведение экспозиции, реконструкцию и последующую обработку изображения, сохранение изображения в виде графического файла или пересылка на PACS (picture archiving and communication system) сервер.

Основным элементом, ответственным за формирование изображения, является линейка GaAs детекторов, которая конструктивно состоит из 16 модулей M1-M16 (Рис. 1). В состав каждого модуля входят 128 канальный микрополосковый детектор и 128 канальная интегрирующая КМОП микросхема с мультиплексором и цифровым управлением темновыми токами [13] для формирования выходных сигналов откликов детекто-

ров на рентгеновское излучение. Данные с микросхем приходят на мультиплексоры МП1, МП2, МП3, МП4. ПЛИС Altera управляет оцифровкой, записью данных в ОЗУ (32 МБ статической памяти) и чтением данных из памяти.

Контроллер АТмега64 по команде от РС вырабатывает сигналы управления для ПЛИС Altera, управляет источником питания подсистемы термостабилизации детекторов, измеряет температуру внутри детектирующего блока, вычитывает данные из локальной памяти и передает их в ПК, реализует запись кодов управления многоканальными интеграторами в КМОП микросхемы для компенсации темновых токов детекторов, управляет шаговыми двигателями. При помощи стандартного интерфейса RS232, управляет источником рентгеновского излучения (на рисунке – Рентген).

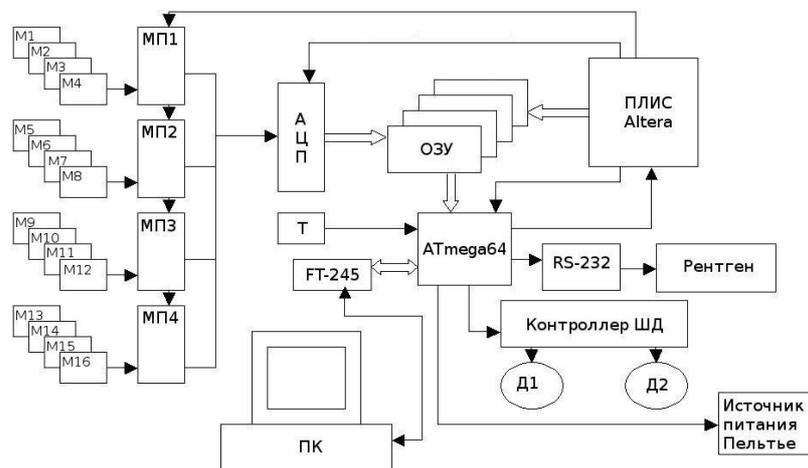


Рис. 1. Блок-схема рентгеновского сканера.

На рис. 2 представлена блок-схема программы и программных подсистем сканера. Управление сканером осуществляется через программный «Менеджер», объект класса С++, где хранится информация об изображении, данные состояния сканера и источника рентгеновского излучения. Контроллер АТмега64 используется для приема команд менеджера, и передачи данных в программу управления. Все процедуры обработки данных выполняются не в микропрограмме контроллера, а в пользовательском приложении.

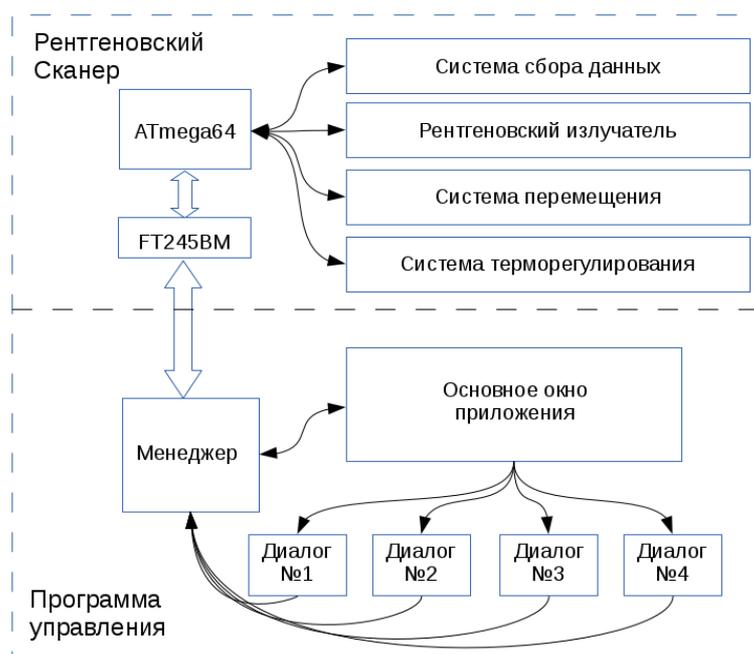


Рис. 2. Блок-схема программы и систем рентгеновского сканера.

Программа управления написана на языке программирования C++ под операционную систему GNU/Linux и использует в своей структуре следующие пакеты и библиотеки:

- Glibmm и Gtkmm — C++ интерфейс библиотеки glib2 и GTK+ для графического интерфейса пользователя (GUI) [5];
- DCMTK — набор библиотек и утилит командной строки для реализации стандарта DICOM 3.0 [6];
- ImageMagick — набор библиотек и утилит командной строки для обработки цифровых изображений [7];
- csmath, gsl — библиотеки математических функций и алгоритмов [8, 9];
- PostgreSQL и PQXX — SQL база данных для хранения информации о пациентах и изображениях [10, 11];
- Conquest — сервер медицинских изображений для хранения отснятых файлов на локальной машине (персональном компьютере) [12].

## Команды управления сканером и линейкой детекторов

Команды, посылаемые в устройство сканера с персонального компьютера (ПК), подразделяются на следующие группы: команды линейки детекторов, команды системы сбора данных, команды системы термостабилизации, команды источника рентгеновского излучения, команды системы перемещения линейки детекторов и источника рентгеновского излучения.

Команды линейки:

- Запись данных в КМОП микросхемы, управляющие детекторами
- Сброс / стоп КМОП микросхемы

Команды системы термостабилизации:

- Чтение данных о температуре детекторов
- Запись параметров в цифровой резистор для изменения напряжения на источнике питания элементов Пельтье

Команды источника рентгеновского излучения:

- Включение и выключение высокого напряжения
- Проверка состояния соединения

Команды системы сбора данных:

- Запись оцифрованных данных и запись в статическую память сканера
- Передача данных из статической памяти сканера в ПК

Команды системы перемещения:

- Задание параметров и направления перемещения
- Остановка

Команды, для передачи из ПК в устройство сканера, преобразуются в последовательность байт (буфер). Буфер состоит из заголовка фиксированной длины в 8 байт, где указывается тип команды, и данных, максимальной длины в 64 байта. Микропрограмма контроллера ATmega64, по внешнему прерыванию от контроллера FT-245BM, считывает буфер команды и в зависимости от типа заголовка пишет данные команды в одну из подсистем сканера. При этом, процедура обработки команды реализована в виде конечного автомата.

## Программные процессы и нити управления сканером

При запуске программы в ее процессе операционной системы для управления сканером задействованы две нити (thread), которые переключаются при поступлении команд для работы со сканером (Рис. 3). Нить, работающая при простое сканера (фоновый режим) обеспечивает контроль температурного режима линейки детекторов и состояние источника рентгеновского излучения. При активном режиме (сканирование, калибровка, выравнивание пьедесталов или изменение параметров сканирования), фоновая нить приостанавливается через условную переменную с мьютексом (condition variable и mutex) и возобновляется после выполнения операций со сканером.

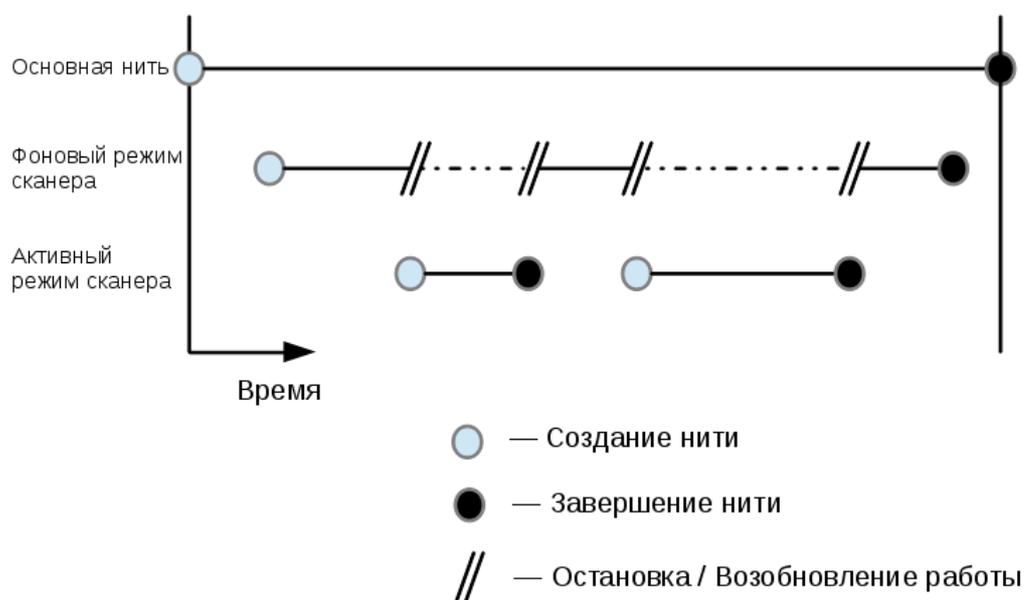


Рис. 3. Временная диаграмма нитей программы для работы со сканером.

Фоновый режим:

- Контроль параметров излучателя и температурного режима линейки детекторов. Температура линейки GaAs детекторов, режим термостабилизации и состояние источника рентгеновского излучения передаются основной нити графического интерфейса пользователя (main GUI thread) через асинхронный сигнал, что не приводит к эффекту «зависания» программы.

Активный режим:

- Сканирование (экспозиция и сбор данных).

- Компенсация темновых токов детекторов.
- Выравнивание чувствительности детекторов (Калибровка).
- Изменение параметров системы сканирования и сбора данных.

Нить фонового режима — это бесконечный цикл, который с частотой в 1 секунду производит измерение температуры детекторов и на основе текущего значения температуры, программный ПИД-регулятор изменяет значение для записи в цифровой потенциометр, управляющий током элементов Пельтье (элементов охлаждения). Пределы удержания температуры устанавливаются в пределах  $(+5,0 \pm 0,3)$  °С. Охлаждение до такой температуры необходимо для уменьшения темновых токов и разброса амплитуд сигналов с разных детекторов. На рис. 4 показана логическая блок-схема фонового режима работы сканера.

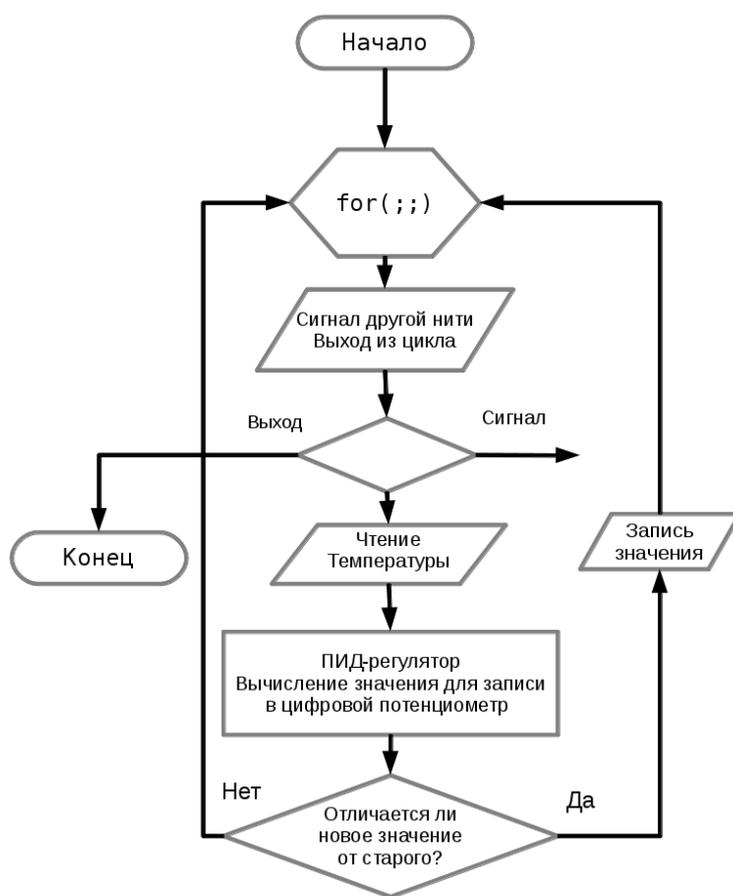


Рис. 4. Логическая блок-схема фонового режима работы сканера

Запуск активного режима сканера происходит, когда оператор активирует, например, кнопку «Сделать снимок», или производит одну из процедур подготовки сканера к работе. Процедуры подготовки к работе необходимы для задания правильной работы линейки детекторов и включают в себя: компенсацию темновых токов детекторов, необходимую для установки амплитуд сигналов детекторов на определенную начальную позицию без рентгеновского излучения и выравнивание чувствительности детекторов к рентгеновскому излучению для удаления артефактов при последующей обработке данных детекторов. На рис. 5 показана логическая блок-схема активного режима работы сканера.

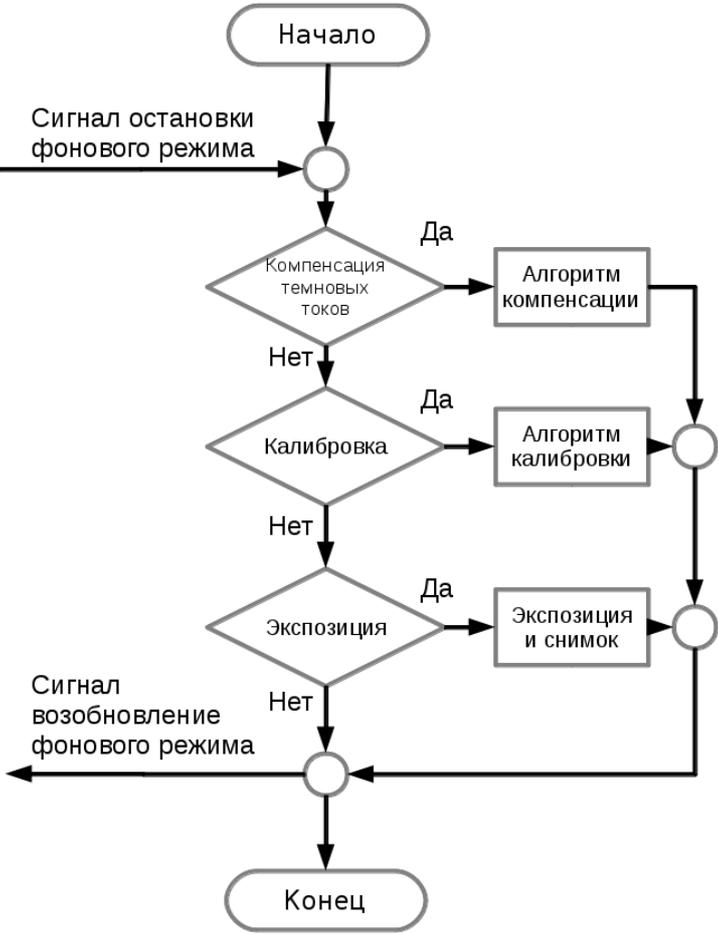


Рис. 5. Логическая блок-схема активного режима работы сканера.

В случае успешного завершения экспозиции менеджер запускает считывание данных изображения со сканера. Данные при сканировании записываются в статическую память, причем для хранения одного пикселя используется 2 байта. ПЛИС Altera, ответственная за запись данных АЦП в память, также пишет дополнительно два бита синхронизации, нулевой бит - признак первого модуля, первый бит — признак первого детектора в первом модуле, таким образом, передается начало строки изображения (Рис. 6).

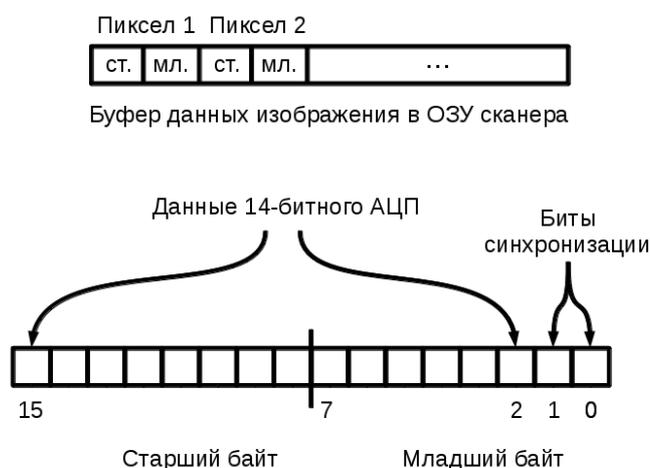


Рис. 6. Формат хранения данных изображения в ОЗУ сканера.

При завершении сканирования и после считывания данных с линейки детекторов, стартует нить обработки данных, производящая предварительную обработку данных, калибровку и постобработку изображения.

Предварительная обработка:

- Реконструкция отсчетов АЦП в «сырое» изображение
- Перемасштабирование изображения к пропорции 1:1

Калибровка

- Выравнивание чувствительности детекторов по опорной величине

Постобработка

- Подбор контраста и уровней яркости для наилучшего восприятия изображения

## Описание алгоритма компенсации темновых токов

Перед началом экспозиции полупроводниковые детекторы проходят процедуру компенсации темновых токов для выравнивания разброса значений, наблюдаемых в связке детектор-КМОП микросхема. Для этого в микросхеме для каждого детектора предусмотрен 8-разрядный регистр и схема компенсации, в который записываются в цифровом виде значения от 0 до 255. Таким образом, можно менять выходной сигнал с детектора во всем диапазоне амплитуд.

Математически представим функцию отсчетов АЦП для одной сборки (КМОП микросхема — линейка детекторов)  $f(i, j)$ , где  $i \in [0, 255]$  — диапазон значений цифрового кода,  $j \in [1, 128]$  — координата соответствующего детектора в линейке. Пусть задано значение «В» в отсчетах АЦП, к которому необходимо привести амплитуду темновых токов детекторов (опорный темновой ток), тогда значение, записываемое в детектор с координатой  $k$  будет определяться как  $\alpha_k = \arg \min_i |f(i, k) - B|$ , или  $\alpha_k = \arg \min_i \sqrt{(f(i, k) - B)^2}$ . Выполнив подобный расчет для всех детекторов, получаем набор значений для компенсации темновых токов и приведения их к одной величине.

## Описание алгоритма выравнивания чувствительности

При подаче рентгеновского излучения на линейку GaAs детекторов, сигнал, считываемый с детекторов, не является одинаковым в силу как различной чувствительности детекторов к рентгеновскому излучению, так и технологическим разбросом параметров электронного тракта внутри КМОП микросхемы для разных детекторов. Изображение, реконструируемое на основе исходных данных, получается состоящим из полос разной яркости.

Для исправления этого эффекта выполняется выравнивание чувствительности всех детекторов к одной величине. Основой алгоритма выравнивания является передаточная функция интенсивности излучения в отсчетах АЦП  $C = F(I, d)$ , где  $I$  — интенсивность рентгеновского излучения на поверхности объекта,  $d$  — толщина просвечива-

емого объекта,  $S$  — интенсивность излучения, зафиксированная в детекторе (отсчеты АЦП).

Для коллимированного, моноэнергетического излучения зависимость определяется формулой  $I = I_0 e^{-\mu \cdot x}$ , где  $I_0$  — интенсивность излучения без объекта,  $\mu$  — коэффициент линейного ослабления излучения,  $x$  — толщина просвечиваемого объекта. Для излучения рентгеновской трубки, состоящего из тормозного и характеристического спектров была использована полиномиальная зависимость вида  $I = \sum_{i=0}^{i=4} K_i \cdot x^i$ , где коэффициенты  $K$  полинома определяются на основе решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) [15] для разных интенсивностей и толщин объекта. В качестве набора интенсивностей может использоваться как калибровочный объект типа «ступеньки», так и модулирование рентгеновского излучения.

На рис. 7А представлены калибровочные данные из шести разных интенсивностей (ступеней): первая ступень — сигнал от рентгеновского излучения без объекта, шестая ступень — сигнал при отсутствии излучения, либо при очень большой толщине объекта. На рис. 7Б представлен объект, для которого выполняется калибровка и который представляет собой произвольное тело. В качестве амплитуды сигнала детектора выступают отсчеты АЦП.

На рис. 7А представлены калибровочные данные из шести разных интенсивностей (ступеней): первая ступень — сигнал от рентгеновского излучения без объекта, шестая ступень — сигнал при отсутствии излучения, либо при очень большой толщине объекта. На рис. 7Б представлен объект, для которого выполняется калибровка и который представляет собой произвольное тело. В качестве амплитуды сигнала детектора выступают отсчеты АЦП.

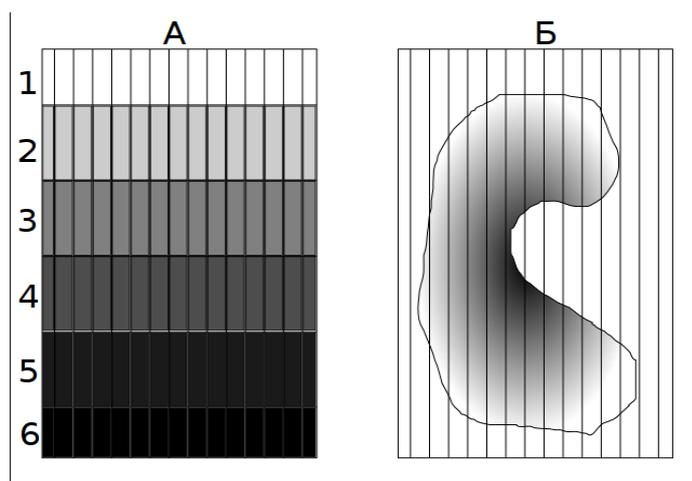


Рис. 7. Пример изображения калибровочных данных и объекта сканирования.

Пусть  $C$  калибровочная матрица, а  $C_{ij}$  — ее элементы равные отсчетам АЦП ( $1 \leq i \leq m$   $1 \leq j \leq n$ ), в данном случае  $m = 6$ ,  $n$  — число микрополосковых детекторов

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_{m1} & C_{m2} & \dots & C_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Матрица изображения для калибровки  $A$ , где элементы  $A_{ij}$  ( $1 \leq i \leq k$ ,  $1 \leq j \leq n$ ), т.е. количество столбцов для матриц  $A$  и  $C$  одинаковое.

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{k1} & A_{k2} & \dots & A_{kn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Пусть также есть вектор-столбец  $X$  калибровочных значений для матрицы  $C$ , где  $X_i$  — среднее-арифметическое для вектор-строки  $C_i$ .

$$X = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_m \end{pmatrix} \quad X_i = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} C_{ij}}{n} \quad (3)$$

Рассчитаем матрицу  $C'$  поправочных коэффициентов.

$$C' = \begin{pmatrix} \frac{X_1}{C_{11}} & \frac{X_1}{C_{12}} & \dots & \frac{X_1}{C_{1n}} \\ \frac{X_2}{C_{21}} & \frac{X_2}{C_{22}} & \dots & \frac{X_2}{C_{2n}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{X_m}{C_{m1}} & \frac{X_m}{C_{m2}} & \dots & \frac{X_m}{C_{mn}} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Каждому элементу матрицы  $A$  поставим в соответствие вектор-столбец  $Z$ .

$$Z = \begin{pmatrix} |A_{ij} - C_{1j}| \\ |A_{ij} - C_{2j}| \\ \vdots \\ |A_{ij} - C_{mj}| \end{pmatrix}, \text{ или } Z = \begin{pmatrix} \sqrt{(A_{ij} - C_{1j})^2} \\ \sqrt{(A_{ij} - C_{2j})^2} \\ \vdots \\ \sqrt{(A_{ij} - C_{mj})^2} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Для каждого вектор-столбца  $Z$  найдем число  $q$  ( $1 \leq q \leq m$ ), которое удовлетворяет условию  $q = \arg \min_i Z_i$ , т.е. индекс минимального элемента вектор-столбца  $Z$ .

Тогда результат выравнивания — матрица  $A'$  будет иметь следующий вид

$$A' = \begin{pmatrix} A_{11} \times C'_{q1} & A_{12} \times C'_{q2} & \dots & A_{1n} \times C'_{qn} \\ A_{21} \times C'_{q1} & A_{22} \times C'_{q2} & \dots & A_{2n} \times C'_{qn} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{k1} \times C'_{q1} & A_{k2} \times C'_{q2} & \dots & A_{kn} \times C'_{qn} \end{pmatrix} \quad (6)$$

где индексы  $q$  рассчитываются для каждого элемента матрицы  $A$ . Пример работы алгоритма представлен на рис. 8.

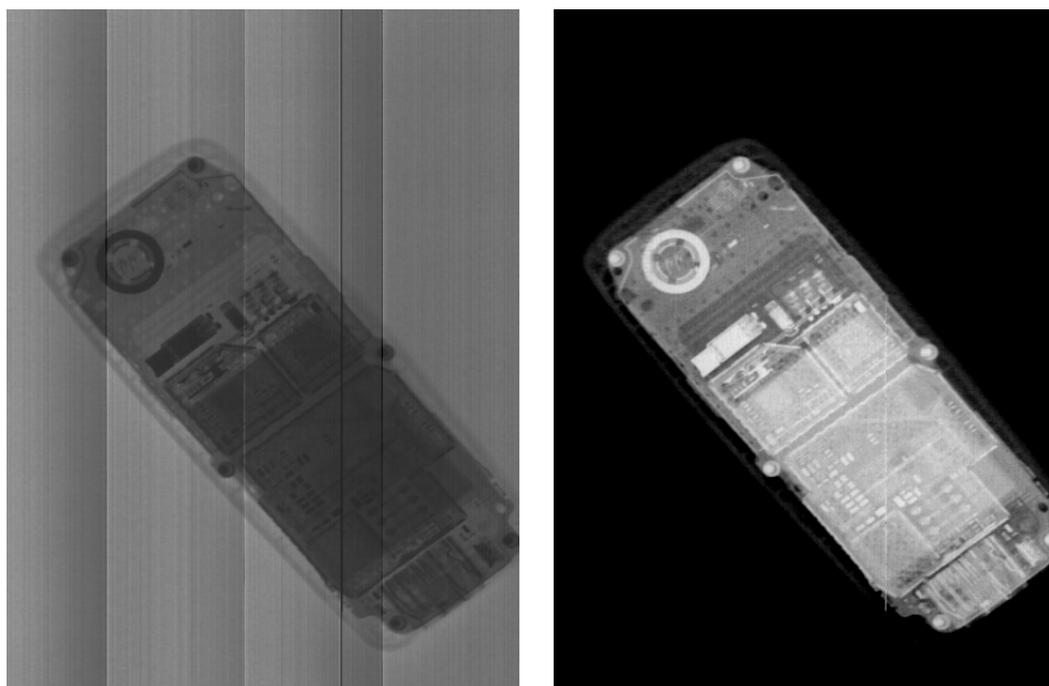


Рис. 8. Пример работы алгоритма выравнивания чувствительности детекторов. Изображение мобильного телефона (слева — до работы алгоритма, справа — после работы алгоритма).

## Удаление данных неисправных детекторов

Процедура отбраковки детекторов производится до этапа выравнивания чувствительности и необходима для ликвидации артефактов изображения из-за неисправных детекторов, алгоритм определения таких детекторов состоит из двух этапов:

- Первый этап — определение детекторов с отклонением амплитуды темновых токов относительно выбранной опорной величины более чем на 10 %.
- Второй этап — определение детекторов с недостаточной или запредельно высокой чувствительностью к рентгеновскому излучению.

Первый этап выполняется на основе данных выравнивания темновых токов. Если после выравнивания амплитуда детектора отличается от опорного сигнала более чем на 10 % в одну, либо в другую сторону — детектор помечается как неработающий.

Второй этап выполняется на основе данных выравнивания чувствительности детекторов к рентгеновскому излучению, т. к. эти данные содержат информацию о изменении амплитуды сигнала от интенсивности излучения.

На этом этапе детекторы помечаются как неработающие если:

- отсутствует корреляции между изменением интенсивности излучения и значениями отсчетов АЦП
- наблюдается переполнение АЦП — наличие максимального отсчета АЦП при какой-либо интенсивности

Таким образом, зависимость отсчетов АЦП от интенсивности должна быть монотонной функцией во всем диапазоне изменения интенсивности источника рентгеновского излучения.

Данные, получаемые с соответствующих неработающих детекторов, заменяются на интерполированные данные соседних детекторов.

## Визуализация данных

После выполнения всех процедур обработки изображения, в программу управления передаются: исходные данные изображения до калибровки, данные калибровки, данные изображения после калибровки и данные после обработки. Исходные данные

сохраняются для последующей правки возможных артефактов и перекалибровки. Данные после калибровки используются в случае дополнительной пост-обработки. На рис. 9 представлен пример передаваемых данных и интерфейс основного окна системы управления сканером.

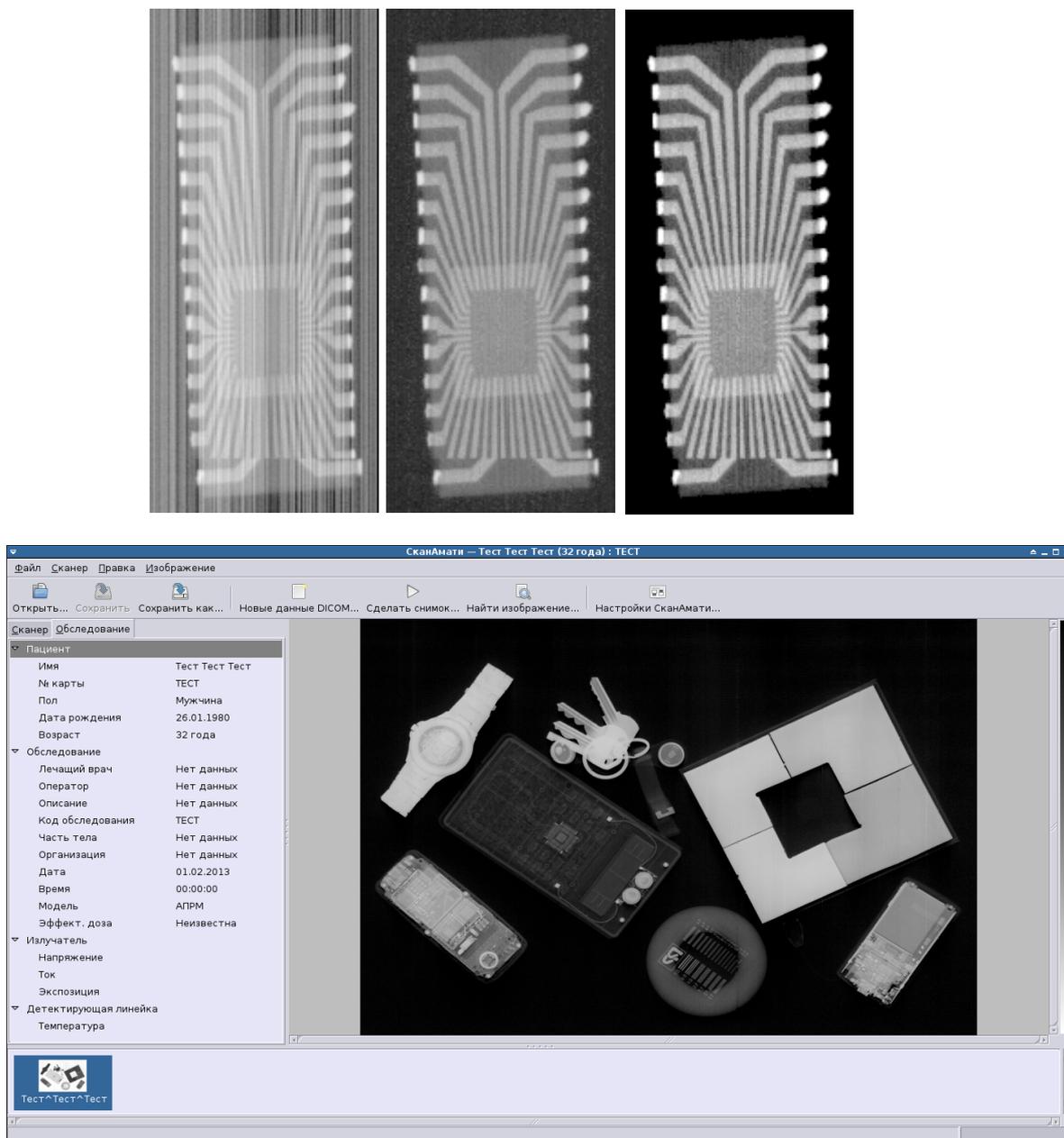


Рис. 9. Вверху — пример передаваемых данных. Слева-направо: исходные данные, данные после калибровки, данные после пост-обработки. Внизу — основное окно системы управления сканером.

## **Использование локального PACS сервера**

Полученные изображения совместно с данными о пациенте и результаты обследования передаются для хранения на PACS сервер Conquest. Особенностью сервера является хранение файлов изображений на жестком диске компьютера и хранение данных о пациенте, обследовании, серии снимков в SQL базе данных. В зависимости от необходимости могут быть задействованы PostgreSQL, MySQL или SQLite базы данных. Программа взаимодействует с сервером как с использованием стандартных DICOM запросов (C-GET, C-ECHO, C-MOVE, C-FIND), так и непосредственно с SQL базой данных. Использование запросов к базе данных позволяет значительно расширить условия выборки изображений за счет использования операторов условия, сравнения и т. д. Для общения с PACS серверами в сети Интернет используются следующие команды из набора библиотек DCMTK: C-ECHO — проверка соединения, C-STORE — сохранение изображения на сервере, C-MOVE — получение изображения с сервера в соответствии с запросом от программы управления.

## **Заключение**

В результате разработки программного пакета для управления линейкой микрополосковых арсенид-галлиевых (GaAs) детекторов и создаваемых в ГНЦ ИФВЭ на их основе рентгеновских сканеров были решены на программном уровне проблемы термостабилизации линейки GaAs детекторов и их первичной настройки на рабочий режим, разработаны процедуры программной компенсации темновых токов детекторов и выравнивания чувствительности детекторов к рентгеновскому излучению, решены вопросы управления механическими узлами сканеров, реконструкции и последующей обработки изображения, хранения изображения в виде графического файла.

## **Список литературы**

[1] А.П. Воробьев, С.А. Горохов, С.Н. Головня, М.К. Полковников, Ю.В. Роднов, Г.И. Айзенштат, О.П. Толбанов, Д.В. Бородин, Ю.В. Осипов. Системы цифровой регистрации изображения для рентгеновских аппаратов сканирующего типа. // Прикладная физика, 2009, № 3, с. 132-137.

- [2] Е.Н. Ардашев, А.П. Воробьёв, С.А. Горохов, П.П. Коробчук, М.К. Полковников. Устройство мобильного цифрового малодозового рентгенографического аппарата. Патент РФ на полезную модель № 85284. Приоритет от 22 января 2009.
- [3] E.N. Ardashev, S.A. Gorokhov, M.K. Polkovnikov, I.S. Lobanov, A.P. Vorobiev, A portable X-ray apparatus with GaAs linear array. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 648 (2011) S8–S11.
- [4] Е.Н. Ардашев, А.П. Воробьёв, С.А. Горохов, М.К. Полковников. Настройка и характеристики линейки GaAs детекторов рентгеновского сканера (направлено в журнал «Медицинская физика», декабрь 2012). Препринт ИФВЭ 2012-21 ЛДС, <http://web.ihep.su/library/pubs/rep2012/12-21-w.html>
- [5] <http://www.gtkmm.org>
- [6] <http://www.dcmk.org>
- [7] <http://www.imagemagick.org>
- [8] <http://freecode.com/projects/ccmath>
- [9] <http://www.gnu.org/software/gsl/>
- [10] <http://www.postgresql.org/>
- [11] <http://www.pqxx.org>
- [12] <http://ingenium.home.xs4all.nl/dicom.html>
- [13] Бородин Д.В., Осипов Ю.В., Шушкевич Н.А. и соавт. Многоканальная микросхема первичного преобразования сигнала с рентгеновских чувствительных элементов. // Прикладная физика, 2003, № 1, с. 154-156.
- [14] K.J. Åström, T. Hägglund. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. Research Triangle Park, NC: ISA (The Instrumentation, Systems, and Automation Society), 1995.
- [15] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. — 13-е изд., исправленное. - М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. Лит., 1986, с. 161-164.

*Рукопись поступила 18 марта 2013 г.*

С.А. Горохов, М.К. Полковников

Система управления и обработки данных для линейки GaAs детекторов  
рентгеновского сканера.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

---

Подписано к печати 25.03.2013.                      Формат 60 × 84/16.      Цифровая печать.  
Печ. л. 1, 25.    Уч.– изд. л. 1,73.                      Тираж 80.      Заказ 21.                      Индекс 3649.

---

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ  
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

---

ПРЕПРИНТ 2013-6, ИФВЭ, 2013

---