

Лебедев Михаил Борисович

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МНОГОКАНАЛЬНЫХ НЕПРЕРЫВНО -
СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ

Специальности: 05.11.13 - «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»;
05.13.01 - «Системный анализ, управление и обработка информации (в отраслях информатики, вычислительной техники и автоматизации)»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в НИИ Интроскопии Томского политехнического университета и Московском государственном институте радиотехники, электроники и автоматики (техническом университете)

Научные руководители:

доктор технических наук, старший научный сотрудник
Сидуленко Олег Анатольевич
доктор технических наук, старший научный сотрудник
Удод Виктор Анатольевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, старший научный сотрудник
Косарина Екатерина Ивановна
доктор технических наук, _____ -
Капанов Борис Иванович

Ведущая организация:

ЗАО "Научно-исследовательский институт интроскопии
МНПО "СПЕКТР"

Защита состоится _____ апреля 2009г. в _____ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.09 при Томском политехническом университете по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, библиотека НИИ Интроскопии.

С диссертацией можно ознакомиться в научно – технической библиотеке Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2009 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций
кандидат технических наук, доцент

Б.Б. Винокуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время под термином «цифровая рентгенография» понимают совокупность методов неразрушающего контроля и диагностики, при которых радиационное изображение просвечиваемого объекта контроля преобразуется на определенном этапе в цифровой сигнал. В дальнейшем этот цифровой сигнал заносится в память компьютера и перераспределяется там в двумерный массив измерительных данных, который может подвергаться различным видам цифровой обработки (контрастирование, масштабирование, препарирование, сглаживание и т.п.) и, наконец, воспроизводится на экране графического дисплея или ТВ-монитора в виде полутонового изображения, непосредственно воспринимаемого оператором.

Среди различных типов систем цифровой рентгенографии (на основе оцифровки традиционных рентгенограмм, на основе усилителей радиационных изображений, на основе запоминающих люминофоров и т.д.) одними из наиболее перспективных являются сканирующие системы цифровой рентгенографии на основе линейки детекторов (ССЦР), что обусловлено целым рядом существенных преимуществ данных систем перед остальными: отсечка рассеянного излучения; малая дозовая нагрузка на исследуемый объект; большой динамический диапазон; высокая эффективность регистрации излучения; возможность контроля крупногабаритных объектов; высокая восприимчивость к автоматизации.

При проектировании вновь создаваемых ССЦР неизбежно возникает задача выбора их основных параметров и характеристик (размеры и форма фокусного пятна источника излучения, размера и формы апертур детекторов, фокусное расстояние, время измерения сигналов радиационных изображений и т.д.). При этом совершенно очевидно, что по возможности указанный выбор должен быть осуществлен в том или ином смысле оптимальным образом.

Общеизвестно, что пространственная разрешающая способность (РС) является одним из важнейших показателей качества систем неразрушающего контроля и диагностики с визуальным отображением дефектоскопической информации. Вследствие этого вполне закономерной становится задача оптимизации значений основных параметров ССЦР из условия максимума её РС. Насколько нам известно, данная задача ранее не рассматривалась, а между тем её решение позволит получить точную теоретическую оценку потенциальных возможностей ССЦР и тем самым формировать обоснованные технические требования на их создание.

В связи с вышеизложенным тема, избранная для диссертационных исследований, является актуальной. Это подтверждается тем, что работа выполнена в рамках работы "Разработка рентгено-телевизионного интроскопа (РТИ) конвейерного типа для контроля ручной клади авиапассажира на наличие ВВ", выполненной в 2008г. МИРЭА.

Объект исследования – ССЦР.

Предмет исследования – закономерности формирования и обработки радиометрической информации в ССЦР.

Цель диссертационной работы – совершенствование теории проектирования ССЦР на основе оптимизации значений основных параметров ССЦР по критерию максимума РС данных систем с учетом возможности применения в них цифровой обработки радиометрической информации.

Для достижения поставленной цели решались следующие **основные задачи**:

1. Разработка математической модели процесса функционирования ССЦР с учетом основных факторов, влияющих на качество воспроизведения радиационного изображения объекта контроля на экране дисплея.

2. Вывод выражений для теоретической оценки РС ССЦР на основе разработанной модели.

3. Оптимизация, по критерию максимума РС, значений основных параметров ССЦР с учетом возможности применения в данных системах цифровой фильтрации результатов регистрации излучения.

4. Получение аналитических соотношений, которые дают возможность для данного объекта контроля по заданным значениям РС ССЦР и производительности контроля определить, с учетом цифровой фильтрации результатов регистрации излучения, оптимальные значения основных параметров ССЦР и минимально необходимое значение мощности экспозиционной дозы излучения от источника.

Методы исследования базируются на использовании теории переноса излучения, теории линейных систем, теории обработки сигналов и изображений, теории случайных процессов.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов подтверждена корректным применением математического анализа и теоретических положений в области взаимодействия ионизирующего излучения с веществом и их согласованностью с экспериментальными данными и с результатами, известными в литературе.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель ССЦР с непрерывным сканированием (НССЦР), которая учитывает возможность применения в НССЦР как источника излучения с анизотропным угловым распределением и неравномерным распределением квантового выхода по его фокусному пятну, так и детекторов с неоднородной пространственной чувствительностью к падающему излучению, а также нормализацию результатов регистрации излучения и их цифровую фильтрацию.

2. Решена задача оптимального выбора значений основных параметров НССЦР по критерию максимума её РС по направлению сканирования с учетом цифровой фильтрации результатов регистрации излучения.

3. Решена задача оптимального выбора значений основных параметров НССЦР по критерию максимума её РС в «наихудшем случае» с учетом цифровой фильтрации результатов регистрации излучения.

Практическая ценность диссертационной работы состоит в том, что полученные в ней аналитические соотношения могут быть взяты за основу при проектировании НССЦР с оптимальными по РС значениями их основных параметров с учетом цифровой фильтрации результатов регистрации излучения.

Личный вклад автора. Все теоретические и экспериментальные исследования, составляющие основное содержание диссертации, были проведены автором лично, либо при его непосредственном участии. Личный вклад автора состоит: в анализе современного состояния и развития систем цифровой рентгенографии и формулировке выводов; в разработке (выборе, построении) структурной и функциональной схемы исследуемой НССЦР; в разработке математической модели НССЦР; в выводе выражений для теоретической оценки РС НССЦР; в получении аналитических соотношений для нахождения оптимальных значений основных параметров НССЦР как без учета, так и с учетом цифровой фильтрации результатов регистрации излучения; в разработке программы экспериментальных исследований и обработке их результатов.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель НССЦР.
2. Выражения для теоретической оценки РС НССЦР.
3. Решение задач оптимального по РС выбора значений основных параметров НССЦР как без учета, так и с учетом цифровой фильтрации результатов регистрации излучения.
4. Совокупность аналитических соотношений, позволяющих для данного объекта контроля по заданным значениям РС НССЦР в «наихудшем случае» и производительности контроля определить, с учетом цифровой фильтрации результатов регистрации излучения, оптимальные значения основных параметров НССЦР и минимально необходимое значение мощности экспозиционной дозы излучения от рентгеновского источника.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационных исследований использованы:

1. При выполнении опытно-конструкторской работы «Разработка рентгено-телевизионного интроскопа (РТИ) конвейерного типа для контроля ручной клади авиапассажира на наличие ВВ»(МИРЭА).
2. При разработке сканера для контроля почтовой корреспонденции XR-PSCAN-2611 (ООО «Диагностика-М», Москва).
3. При проектировании ряда сканирующих рентгеновских установок в в/ч 35533, в/ч 43753, ФГУП «НИИЭФА им. Д.В.Ефремова».

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих конференциях и симпозиумах: 6-й Международной конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности» (Москва, 2007, два доклада); 3-й Российской научно-технической конференции «Разрушение, контроль и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2007); 8-м Всероссийском симпозиуме по прикладной и промышленной математике (осенняя сессия,

Сочи-Адлер, 2007); Международной научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика» (Томск, 2008); Международной научной конференции «Становление и развитие научных исследований в высшей школе», посвященная 100 – летию со дня рождения профессора А.А. Воробьева (Томск, 2009).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, из которых 7 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, и 5 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 129 наименований. Работа содержит 166 страниц машинописного текста, включая 15 рисунков и 13 таблиц.

Автор выражает благодарность научным руководителям – д.т.н., с.н.с. Сидуленко О.А. и д.т.н., с.н.с. Удоду В.А. – за помощь в проведении исследований и обсуждение их результатов. Автор благодарит к.ф.-м.н. Чахлова С.В. – за помощь при численном решении оптимизационных задач и Акимова К.В. – за помощь в проведении экспериментов. Автор выражает признательность коллегам из МИРЭА и НИИ интроскопии при Томском политехническом университете.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, изложены научная новизна и практическая ценность полученных результатов, дана общая характеристика выполненной работы.

В первой главе проведен обзор литературных данных, посвященный анализу современного состояния и развития систем цифровой рентгенографии (СЦР) и обоснованы основные задачи диссертационных исследований.

В настоящее время СЦР широко используются в промышленной дефектоскопии, в медицинской диагностике и для проведения досмотра багажа, ручной клади, опломбированных контейнеров и т. д. с целью обеспечения безопасности пассажирских и грузовых перевозок. В обзоре представлены различные классификации СЦР, описанные ранее в работах Ключева В.В., Соснина Ф.Р., Бару С.Е., Недавнего О.И., Кантера Б.М., Зеликмана М.И., Yaffe M.J., Rowlands J.A., Harrison R.M. и других исследователей. В соответствии с одной из них, получившей наибольшее распространение, существующие СЦР делятся по способам детектирования радиационного изображения и формирования, адекватного ему, полутонового изображения на следующие основные типы: системы на основе оцифровки традиционных рентгенограмм; системы на основе запоминающих люминофоров; системы на основе фоторезистивных экранов; системы на основе усилителей радиационных изображений; системы на основе двумерных матричных детекторов; сканирующие системы на основе линейки детекторов (одномерных матричных детекторов); сканирующие системы на основе бегущего рентгеновского луча.

В обзоре приведено описание принципа действия, уровня развития на современном этапе и отмечены преимущества и недостатки СЦР каждого из

указанных типов. В результате анализа приведённых данных были сделаны выводы, один из которых, в частности, заключается в том, что в настоящее время среди различных типов СЦР одними из наиболее перспективных являются сканирующие СЦР на основе линейки детекторов (ССЦР), что обусловлено целым рядом существенных преимуществ данных систем перед остальными (отсечка рассеянного излучения; малая дозовая нагрузка на исследуемый объект; большой динамический диапазон; высокая эффективность регистрации излучения; возможность контроля крупногабаритных объектов; высокая восприимчивость к автоматизации). В рамках развития этого направления были сформулированы основные задачи исследований.

Во второй главе разработана математическая модель ССЦР, структурная схема которой представлена на рис.1, для случая применения в данной системе непрерывного режима сканирования, т. е. разработана математическая модель многоканальной непрерывно – сканирующей системы цифровой рентгенографии (НССЦР), а именно (рис.2.7):

$$B(x, y) = B_{\text{вА}}(\tilde{\sigma}, \acute{\sigma}) * \hat{h}_0(\tilde{\sigma}, \acute{\sigma}) * \hat{h}_{\text{А}}(x, y) * \hat{h}_{\text{вi0}}(x, y) * \hat{h}_{\text{Ав}}(x, y) * \hat{h}_0(x, y) + B_0(x, y). \quad (2.192)$$

Здесь $B(x, y)$ – полутоновое изображение, синтезируемое НССЦР;

$$B_{\text{ид}}(x, y) = B_{\text{гр}} [1 + \Delta\mu S(x, y)] + B_0 \quad (2.170)$$

- идеальное полутоновое изображение, синтезируемое идеальной НССЦР, т.е. такой гипотетической НССЦР, в которой отсутствуют линейные и статистические искажения теневого радиационного изображения объекта контроля (ОК) в процессе его формирования и воспроизведения на экране дисплея; $B_{\text{ф}} = B_{\text{гр}} + B_0$ - яркость фона идеального полутонового изображения; $B_{\text{гр}}$ - составляющая яркости фона, соответствующая градиенту амплитудной характеристики НССЦР; B_0 - составляющая яркости фона, соответствующая аддитивной составляющей амплитудной характеристики НССЦР;

$$B_{\text{гр}} = \gamma_{\text{гр}} \bar{A} \lambda_{\text{оф}} T; \quad (2.171)$$

$\gamma_{\text{гр}}$ - градиент амплитудной характеристики НССЦР $\left[\frac{k_{\text{д}}}{\text{м}^2 B} \right]$; \bar{A} - среднее значение амплитуд электрических импульсов с выхода отдельного детектора [В]; $\lambda_{\text{оф}}$ - среднее число квантов излучения, регистрируемых в единицу времени центральным детектором линейки при отсутствии в ОК неоднородности $\left[\frac{1}{\text{с}} \right]$; T

– время регистрации излучения (постоянная времени каждого из временных интеграторов) [с]; $\Delta\mu = \mu - \mu_{\text{д}}$; μ , $\mu_{\text{д}}$ - линейный коэффициент ослабления излучения для материала ОК и инородного включения (неоднородности), соответственно; $S(x, y)$ - лучевой размер неоднородности;

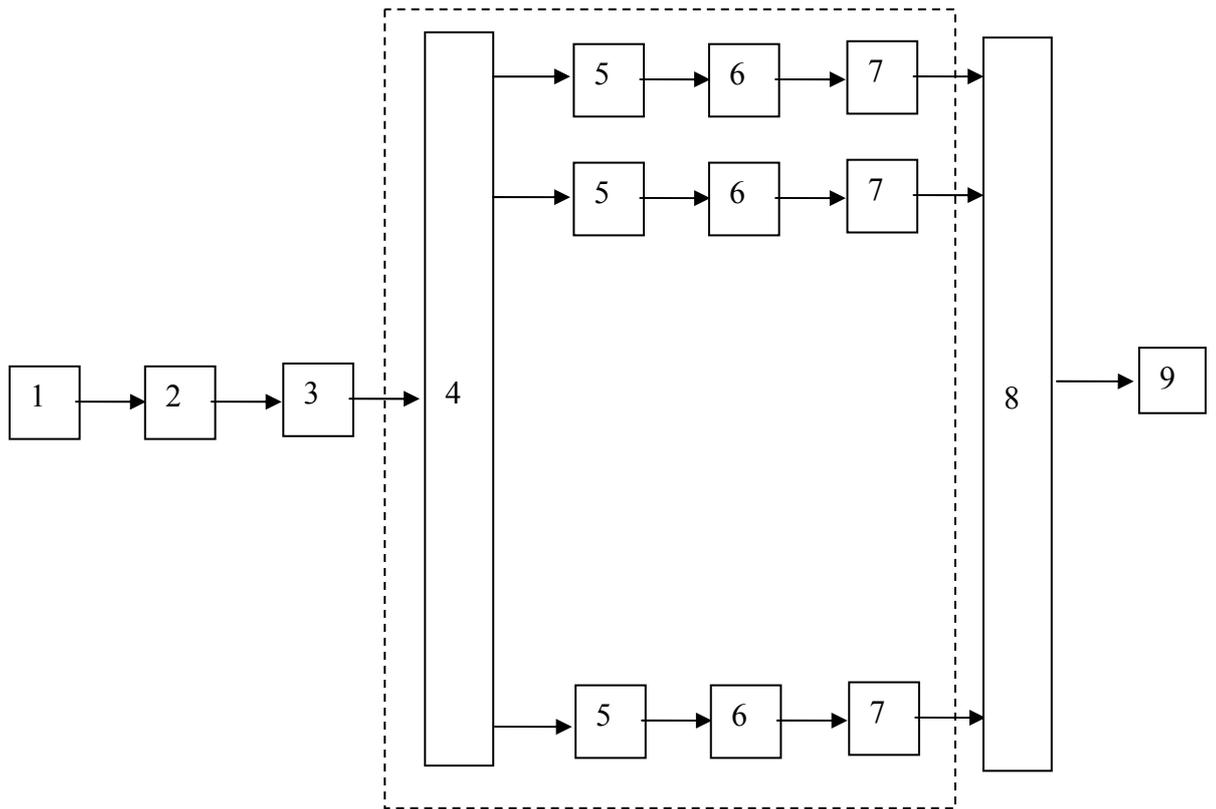


Рис.1. Структурная схема ССЦР:

1 – источник излучения; 2 – щелевой коллиматор источника; 3 – объект контроля; 4 – щелевой коллиматор детекторов; 5 – детекторы; 6 – временные интеграторы; 7 – аналого – цифровые преобразователи; 8 – компьютер; 9 – полутоновый дисплей.

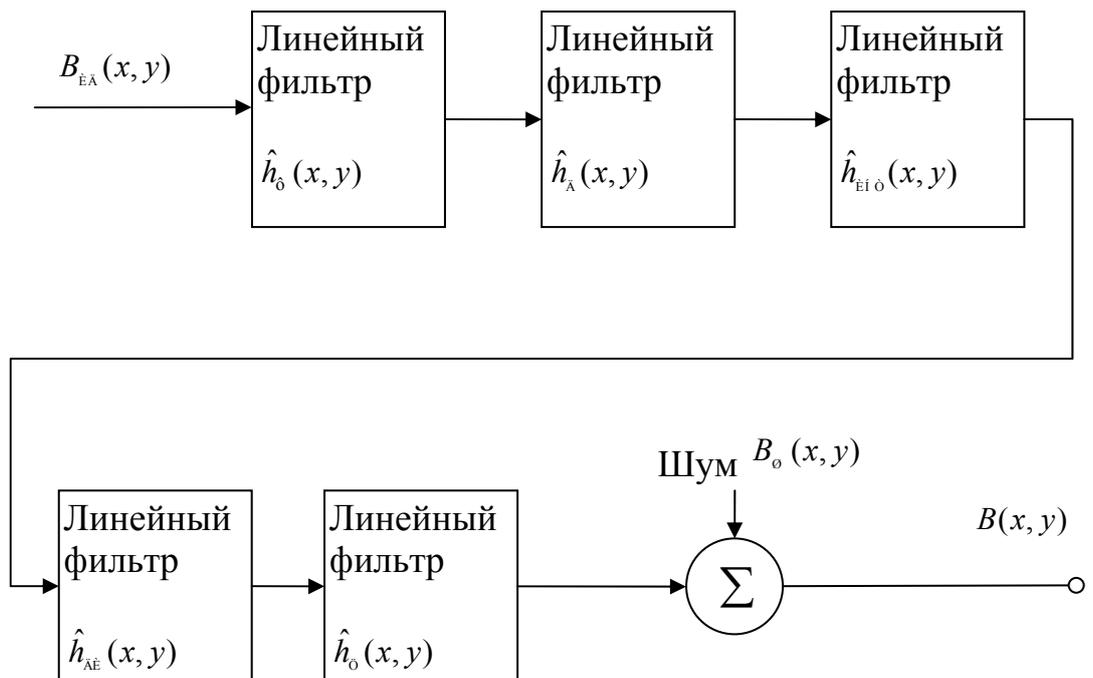


Рис. 2.7. Математическая модель НССЦР

$$\hat{h}_{\delta} (x, y) = \frac{1}{(1 - f_0)^2} \cdot \frac{\overline{P}\left(-\frac{x}{1 - f_0}, -\frac{y}{1 - f_0}\right)}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{P}(x, y) dx dy} \quad (2.178)$$

- нормированный по площади на единицу импульсный отклик фокусного пятна источника излучения; $\overline{P}(x, y)$ - функция, описывающая распределение квантового выхода по фокусному пятну коллимированного источника излучения; $1/f_0 = F/f$ - коэффициент геометрического увеличения; F – фокусное расстояние; f – расстояние от источника (фокусного пятна) до неоднородности вдоль оси Oz ;

$$\hat{h}_{\alpha} (x, y) = \frac{\cos \alpha}{f_0^2} \cdot \frac{\overline{\varepsilon}_0\left(-\frac{x}{f_0}, -\frac{y \cos \alpha}{f_0}\right)}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\varepsilon}_0(x, y) dx dy} \quad (2.180)$$

- нормированный по площади на единицу импульсный отклик апертуры крайнего (любого из крайних) детектора из линейки (с учетом её коллимирования); $\overline{\varepsilon}_0(x, y)$ - функция, описывающая эффективность регистрации излучения центральным детектором линейки (с учётом её коллимирования); α - угол между осью Oz и направлением от источника на крайний (любой из крайних) детектор линейки (фактически угол α совпадает с половинным углом раствора рабочего пучка излучения);

$$\hat{h}_{\delta i \delta} (x, y) = \frac{1}{\nu} \hat{\phi}\left(\frac{x}{\nu}\right) \delta(y) \quad (2.182)$$

- нормированный по площади на единицу импульсный отклик пространственного фильтра, соответствующего временному фильтру (интегратору со сбросом) с нормированным импульсным откликом

$$\hat{\phi}(t) = \frac{1}{T} \text{rect}\left(\frac{t}{T} - \frac{1}{2}\right); \quad (2.184)$$

$\delta(y)$ - дельта-функция Дирака; ν - скорость сканирования (перемещения) ОК;

$$\text{rect}(z) = \begin{cases} 1, & |z| \leq \frac{1}{2}, \\ 0, & |z| > \frac{1}{2}; \end{cases}$$

$\hat{h}_{\alpha \delta} (x, y)$ - нормированный по площади на единицу импульсный отклик процесса «дискретизация - ступенчатая интерполяция» (физически пространственная дискретизация изображения осуществляется за счет дискретизации сигналов радиационного изображения аналого-цифровыми преобразователями, а также за счет дискретности расположения детекторов в линейке, а ступенчатую

интерполяцию осуществляет дисплей, у которого распределение яркости в пределах каждого элемента разложения (пикселя) равномерное);

$$\hat{h}_0(x, y) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} c(i, j) \delta(x - i\Delta x, y - j\Delta y) \quad (2.188)$$

- нормированный по площади на единицу импульсный отклик пространственного фильтра, соответствующего цифровому фильтру с нормированным импульсным откликом $\{c(i, j)\}$; $\delta(x, y)$ - двумерная дельта - функция Дирака; $\Delta x, \Delta y$ - шаги дискретизации радиационного изображения ОК вдоль соответствующих координатных осей;

$$\Delta x = vT; \quad \Delta y = f_0 d_y, \quad (2.185)$$

где d_y - максимальный шаг расположения детекторов в линейке (для плотноупакованной линейки детекторов $d_y = g / \cos \alpha$, где g - ширина апертуры отдельного детектора из линейки); символ «*» означает двумерную свертку; $B_{ш}(x, y)$ - шум (обусловленный квантовой природой излучения) с нулевым средним значением и дисперсией

$$\sigma^2[B_{ш}(x, y)] = \gamma_{гр}^2 \cdot \frac{\lambda_{оф}^2}{\lambda} (\overline{A^2}) T \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} c^2(i, j), \quad (2.190)$$

где $\overline{A^2}$ - среднее значение квадрата амплитуд электрических импульсов с выхода отдельного детектора линейки; λ - среднее число квантов излучения, регистрируемых в единицу времени крайним (любым из крайних) детектором линейки при отсутствии в ОК неоднородности;

$$\lambda = \frac{\exp\left(-\frac{\mu(E_{эфф})H}{\cos \alpha}\right)}{F^2} \cos^2 \alpha \cdot \psi(\alpha) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{P}(x, y) dx dy \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{\epsilon}_0(x, y) dx dy; \quad (2.191)$$

$\lambda_{г0} = \lambda$ при $\alpha = 0$; $E_{эфф}$ - эффективная энергия излучения; H - толщина ОК; $\psi(\theta)$ - функция, описывающая угловое распределение источника (нормирована на 1 квант в телесный угол $4\pi sr$).

Проведено сравнение полученной модели с ранее известными моделями СССЦР. Среди таковых наиболее полной является модель, представленная в [1]. Отличие же полученной модели () - () от модели, представленной в [1], состоит в том, что в ней учитывается: анизотропия углового распределения источника излучения; нормализация результатов регистрации радиационного изображения ОК (с целью получения полутонового изображения с равномерным фоном); возможность цифровой фильтрации результатов регистрации радиационного изображения без ограничения на малость шагов дискретизации $\Delta x, \Delta y$; более общий вид линейной амплитудной характеристики НССЦР (дополнительно вводится аддитивная составляющая).

В третьей главе выведены выражения для теоретической оценки РС НССЦР и решен ряд задач оптимального по РС выбора значений основных

параметров НССЦР как без учета, так и с учетом цифровой фильтрации результатов регистрации излучения.

Исходя из современного формализованного описания РС как критерия оценки качества изображающих систем [2] и разработанной во второй главе математической модели () – () нами были выведены следующие выражения для теоретической оценки РС НССЦР:

$$R = \begin{cases} \sup\{\bar{v} | \bar{v} \geq 0, Q(\bar{v}) \geq K\}, & 0 < K \leq 1, \\ 0, & K > 1 \end{cases} \quad (3.49)$$

- РС НССЦР в «наихудшем случае»;

$$R_x = \begin{cases} \sup\{\bar{v} | \bar{v} \geq 0, Q_x(\bar{v}) \geq K\}, & 0 < K \leq 1, \\ 0, & K > 1 \end{cases} \quad (3.62)$$

- продольная РС НССЦР (РС НССЦР по направлению сканирования (вдоль оси Ox)). Здесь $\bar{v} (\bar{v} \geq 0)$ - пространственная частота;

$$K = \frac{M_{i\delta}}{k_0} \delta = \frac{L \sqrt{\sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \tilde{n}^2(m, k)}}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{\varepsilon}_0(x, y) dx dy T}} \quad (3.51)$$

- относительный пороговый контраст; $M_{\text{пор}}$ – пороговое отношение сигнал/шум;

$\delta = \frac{\sigma [B_\delta(x, y)]}{B_\delta}$ - относительное среднеквадратическое значение шума на выходе системы; $\sigma [B_\delta(x, y)]$ – среднеквадратическое значение шума на выходе системы; k_0 - исходный контраст (контраст идеального полутонного изображения); $k_0 = \frac{B_{\text{ад}}}{B_\delta} k_r$; k_r - радиационный контраст;

$$L = \frac{M_{\text{пор}} \gamma}{k_r \sqrt{\exp\left[-\frac{\mu(E_{\text{эфф}}) H}{\cos \alpha}\right] F^{-2} \cos^2 \alpha \psi(\alpha) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{P}(x, y) dx dy}} \quad (3.50)$$

- обобщенный параметр НССЦР; $\gamma = \sqrt{A^2 / \bar{A}}$ - коэффициент амплитудного разброса электрических импульсов с выхода отдельного детектора линейки;

$$Q(\bar{v}) = \inf_{\substack{0 \leq v \leq \bar{v} \\ 0 \leq \theta \leq 2\pi}} G_\theta(v) = \inf_{\substack{0 \leq v \leq \bar{v} \\ 0 \leq \theta \leq 2\pi}} D(v \cos \theta, v \sin \theta) = \inf_{v_x^2 + v_y^2 \leq \bar{v}^2} D(v_x, v_y); \quad (3.12)$$

$$Q_x(\bar{v}) = \inf_{0 \leq v \leq \bar{v}} D(v, 0); \quad (38)$$

$G_\theta(v) = D(v \cos \theta, v \sin \theta)$ - частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) НССЦР по направлению θ ($0 \leq \theta \leq 2\pi$); $v (v \geq 0)$ - пространственная частота;

$D(v_x, v_y) = \frac{|\tilde{h}(v_x, v_y)|}{|\tilde{h}(0, 0)|}$ - двумерная ЧКХ НССЦР; $\tilde{h}(v_x, v_y)$ - передаточная функция НССЦР; v_x, v_y - пространственные частоты вдоль соответствующих координатных осей.

В предположении, что толщина ОК намного меньше фокусного расстояния, а сам ОК располагается в непосредственной близости от линейки детекторов (а значит $f_0 = 1$) нами было выведено следующее выражение для двумерной ЧКХ НССЦР

$$D(v_x, v_y) = \frac{\left| \tilde{\varepsilon}_0 \left(v_x, \frac{v_y}{\cos \alpha} \right) \right|}{\left| \tilde{\varepsilon}_0(o, o) \right|} \cdot \left| \frac{\sin \pi v_x \nu T}{\pi v_x \nu T} \right| \cos(\pi v_x \Delta x) \cos(\pi v_y \Delta y) \cdot \text{rect}(v_x \Delta x) \text{rect}(v_y \Delta y) \cdot \left[\left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} c(m, k) \cos[2\pi(v_x m \Delta x + v_y k \Delta y)] \right\}^2 + \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} c(m, k) \sin[2\pi(v_x m \Delta x + v_y k \Delta y)] \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3.53)$$

Совокупность соотношений () – () явилась основой для теоретического исследования РС рассматриваемой НССЦР и её оптимизации по данному показателю качества.

Для формализации и решения, рассматриваемых далее, оптимизационных задач предполагалось, что линейка детекторов плотно упакована, а сами детекторы имеют прямоугольную апертуру и в случае применения в НССЦР цифровой фильтрации используется так называемый КИХ – фильтр, т.е. такой цифровой фильтр, у которого импульсный отклик содержит лишь конечное число ненулевых отсчетов (элементов). С учетом данных предположений было решено в общей сложности восемь оптимизационных задач, описание которых представлено ниже.

Решены три задачи оптимального выбора значений длины апертуры отдельного детектора из линейки и времени регистрации излучения из условия максимума продольной РС НССЦР применительно к случаю, когда в системе не применяется цифровая фильтрация результатов регистрации излучения и используются детекторы с различной формой пространственной чувствительности к падающему излучению, а именно:

- с однородной пространственной чувствительностью (в первой задаче);
- с неоднородной, по направлению сканирования, пространственной чувствительностью, описываемой функцией «треугольного вида» (во второй задаче);
- с неоднородной, по направлению сканирования, пространственной чувствительностью, описываемой функцией «экспоненциального вида» (в третьей задаче).

Сравнительный анализ результатов решения данных задач показал, что ни в случае применения детекторов с «треугольной» (вдоль оси Ox) пространственной чувствительностью, ни в случае применения детекторов с «экспоненциальной» (вдоль оси Ox) пространственной чувствительностью не наблюдается выигрыша по максимуму продольной РС НССЦР по сравнению с детекторами, обладающими однородной пространственной чувствительностью. Это, в свою очередь, послужило основанием к тому, чтобы при решении последующих оптимизационных задач, учитывающих цифровую фильтрацию результатов регистрации излучения, рассматривать только детекторы с однородной пространственной чувствительностью.

Решены две задачи оптимального выбора значений длины апертуры отдельного детектора из линейки, времени регистрации излучения и импульсного отклика цифрового фильтра из условия максимума продольной РС НССЦР применительно к случаю, когда в системе используются детекторы с однородной пространственной чувствительностью и применяется продольная (осуществляемая вдоль оси Ox) цифровая фильтрация результатов регистрации излучения, причем в различных режимах, а именно:

- постоянно, т.е. осуществляется цифровая фильтрация всего массива измерительных данных (в первой задаче);
- избирательно, т.е. цифровая фильтрация осуществляется лишь по мере необходимости дообследования «подозрительных» участков ОК (во второй задаче).

При этом оптимизация НССЦР для случая применения в ней режима избирательной цифровой фильтрации проводилась по следующей схеме (алгоритму):

- на первом этапе осуществлялся оптимальный выбор значений параметров НССЦР из условия максимума её РС, но в предположении, что цифровая фильтрация не применяется (основной режим работы системы);
- на втором этапе осуществлялся оптимальный выбор импульсного отклика цифрового фильтра из того же условия – максимума РС НССЦР, но уже при выбранных на первом этапе значениях параметров НССЦР.

Из результатов решения данных оптимизационных задач следует, что применение цифровой фильтрации позволяет существенно повысить максимум продольной РС НССЦР. В частности, такое повышение (выигрыш) может составлять порядка 79% при использовании постоянной и 49.4% - избирательной цифровой фильтрации. Из этих же результатов следует, что предпочтительнее использовать в НССЦР режим постоянной цифровой фильтрации.

Решена задача оптимального выбора значений длины и ширины апертуры отдельного детектора из линейки и времени регистрации излучения из условия максимума РС НССЦР в «наихудшем случае» применительно к случаю, когда в системе не применяется цифровая фильтрация результатов регистрации излучения и используются детекторы с однородной пространственной чувствительностью.

Решены две задачи оптимального выбора значений длины и ширины апертуры отдельного детектора из линейки, времени регистрации излучения и импульсного отклика цифрового фильтра из условия максимума РС НССЦР в «наихудшем случае» применительно к случаю, когда в системе используются детекторы с однородной пространственной чувствительностью и применяется цифровая фильтрация результатов регистрации излучения, причем в различных режимах, а именно:

- постоянно (в первой задаче);
- избирательно (во второй задаче).

При этом само выражение для указанной РС в описываемом случае имеет следующий вид

$$R = \left\{ \begin{array}{l} \sup_{\left| \bar{v} \right| \geq 0} \left\{ \inf_{v_x^2 + v_y^2 \leq \bar{v}^2} \left(\left| \frac{\sin \pi v_x b}{\pi v_x b} \right| \cdot \left| \frac{\sin \pi \frac{v_y}{\cos \alpha} g}{\pi \frac{v_y}{\cos \alpha} g} \right| \cdot \left| \frac{\sin \pi v_x \nu T}{\pi v_x \nu T} \right| \cdot \right. \right. \\ \cdot \cos(\pi v_x \nu T) \cdot \cos \left(\pi \frac{v_y}{\cos \alpha} g \right) \cdot \text{rect}(v_x \nu T) \cdot \text{rect} \left(\frac{v_y}{\cos \alpha} g \right) \cdot \\ \cdot \left[\left\{ \sum_{m=-(M-1)}^{M-1} \sum_{k=-(M-1)}^{M-1} c(m, k) \cos \left[2\pi \left(v_x m \nu T + v_y k \frac{g}{\cos \alpha} \right) \right] \right\}^2 + \right. \\ \left. \left. + \left\{ \sum_{m=-(M-1)}^{M-1} \sum_{k=-(M-1)}^{M-1} c(m, k) \sin \left[2\pi \left(v_x m \nu T + v_y k \frac{g}{\cos \alpha} \right) \right] \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \geq \quad (3.144) \\ \left. \begin{array}{l} \geq \frac{L_1 \sqrt{\sum_{m=-(M-1)}^{M-1} \sum_{k=-(M-1)}^{M-1} c^2(m, k)}}{\sqrt{bgT}}, \quad \text{аñëè} \quad 0 < \frac{L_1 \sqrt{\sum_{m=-(M-1)}^{M-1} \sum_{k=-(M-1)}^{M-1} c^2(m, k)}}{\sqrt{bgT}} \leq 1, \\ 0, \quad \text{аñëè} \quad \frac{L_1 \sqrt{\sum_{m=-(M-1)}^{M-1} \sum_{k=-(M-1)}^{M-1} c^2(m, k)}}{\sqrt{bgT}} > 1. \end{array} \right\} \end{array} \right.$$

Здесь b и g – соответственно длина и ширина апертуры отдельного детектора из линейки; M – натуральное число; $(2M-1)^2$ – площадь апертуры (окна) цифрового фильтра; $L_1 = \frac{L}{\sqrt{\varepsilon_0}}$; ε_0 – эффективность регистрации излучения отдельным детектором из линейки в пределах его апертуры.

Из результатов решения данных оптимизационных задач следует, что применение цифровой фильтрации позволяет существенно повысить максимум РС НССЦР в «наихудшем случае». В частности, такое повышение (выигрыш)

может составлять порядка 48 % при использовании постоянной и 27,6% - избирательной цифровой фильтрации. Из этих же результатов следует, что предпочтительнее использовать в НССЦР режим постоянной цифровой фильтрации.

В четвертой главе получена совокупность аналитических соотношений, которые дают возможность для данного ОК по заданным значениям РС НССЦР и производительности контроля определить, с учетом цифровой фильтрации результатов регистрации излучения, оптимальные по РС значения основных параметров НССЦР и минимально необходимое для этого значение мощности экспозиционной дозы излучения, генерируемого источником. Приведены результаты экспериментов и пример практического использования полученных соотношений.

Для проектирования НССЦР, на наш взгляд, наибольший практический интерес представляют собой результаты решения задачи оптимального выбора длины и ширины апертуры отдельного детектора из линейки, времени регистрации излучения и импульсного отклика цифрового фильтра, применяемого в режиме постоянной цифровой фильтрации, из условия максимума РС НССЦР в «наихудшем случае», описываемой выражением (3.144).

Из данных результатов следует, что максимум РС НССЦР в «наихудшем случае» будет равен

$$R_{\max} = 0,288 \frac{(\cos \alpha)^{\frac{1}{3}}}{L_1^{\frac{2}{3}} \nu^{\frac{1}{3}}}, \quad (4.1)$$

что достигается при следующих (оптимальных) значениях указанных параметров НССЦР:

$$b_{opt} = 1,529 \frac{L_1^{\frac{2}{3}} \nu^{\frac{1}{3}}}{(\cos \alpha)^{\frac{1}{3}}}; \quad g_{opt} = 0,650 (\cos \alpha)^{\frac{2}{3}} L_1^{\frac{2}{3}} \nu^{\frac{1}{3}}; \quad T_{opt} = 0,471 \frac{L_1^{\frac{2}{3}}}{\nu^{\frac{2}{3}} (\cos \alpha)^{\frac{1}{3}}} \quad (4.2)$$

или, что то же самое (учитывая (4.1))

$$b_{opt} = \frac{0,440}{R_{\max}}; \quad g_{opt} = \frac{0,187 \cos \alpha}{R_{\max}}; \quad T_{opt} = \frac{0,136}{\nu R_{\max}}. \quad (4.3)$$

При этом оптимальный импульсный отклик цифрового фильтра будет представлен в виде таблицы 4.1.

Следует заметить, прежде всего, что выражение (4.1) позволяет для заданных условий контроля находить теоретически максимальное значение РС исследуемой НССЦР. С другой стороны, по условиям технического задания на контроль того или иного объекта значение РС довольно часто задается заранее. В этом случае представляется разумным приравнять теоретический максимум РС данной системы т.е. величину R_{\max} заданному, по техническим условиям, значению РС R_T , т.е. положить

$$R_{\max} = R_T \quad (4.4)$$

Табл.4.1.Оптимальные значения отсчетов $c(m,k)$ импульсного отклика цифрового фильтра

		k		
		-1	0	1
m	-1	0,0877	0,1249	0,0874
	0	0,1212	0,1582	0,1209
	1	0,0875	0,1248	0,0875

и использовать в дальнейшем уравнение (4.4) как обобщённое условие, например, для выбора источника излучения.

С учетом (4.4) соотношения (4.3) для оптимальных значений параметров НССЦР преобразуются к виду

$$b_{opt} = \frac{0,440}{R_T}; \quad g_{opt} = \frac{0,187 \cos \alpha}{R_T}; \quad T_{opt} = \frac{0,136}{\nu R_T}. \quad (4.6)$$

Равенство (4.4) было использовано нами для выбора рентгеновского источника излучения. А именно, в результате преобразований данного равенства с использованием выражения (4.1) для максимума РС НССЦР и известных соотношений между различными характеристиками поля излучения нами было выведено выражение (4.19) для минимальной мощности экспозиционной дозы излучения на расстоянии 1м от фокуса рентгеновской трубки вдоль оси пучка при отсутствии объекта, при которой НССЦР может обеспечить контроль заданного объекта с априорно заданными значениями её РС и производительности контроля:

$$X = \frac{E_{\gamma\delta} \mu_{\Gamma\delta} (E_{\gamma\delta}) 1,6 \cdot 10^{-6} M_{\Gamma\delta}^2 \gamma^2 \nu R_T^3 \exp \left[\frac{\mu(E_{\gamma\delta}) H}{\cos \alpha} \right] F^2}{0,11 \cdot 240 \cos^3 \alpha k_r^2 \varepsilon_0 \psi_H(\alpha)}. \quad (4.19)$$

Здесь 0,11 – энергетический эквивалент $1p$ в воздухе $\left[\frac{\gamma\delta\tilde{n}}{\tilde{n}^3 \delta} \right]$; X – мощность экспозиционной дозы излучения на расстоянии 1 м от фокуса рентгеновской трубки вдоль оси пучка при отсутствии ОК $\left[\frac{p}{c} \right]$; $\mu_{\Gamma\delta}$ - линейный коэффициент истинного поглощения излучения для воздуха $\left[\frac{1}{cm} \right]$; $1,6 \cdot 10^{-6}$ - энергетический эквивалент 1 МэВ $\left[\frac{эрг}{МэВ} \right]$; сомножитель 240 имеет размерность \tilde{n}^2 .

Оптимальное фокусное расстояние

$$F_{opt} = \frac{D}{2tg\alpha}, \quad (4.20)$$

где D – ширина ОК (его протяженность вдоль линейки детекторов), было найдено нами из условия максимального использования рабочего пучка излучения. Геометрически данное условие равносильно тому, что ОК как – бы «вписывается» по ширине в рабочий пучок излучения.

Итак, нами были выведены соотношения (4.6), (4.19) и (4.20), которые в сочетании с таблицей 4.1, т.е. с оптимальным импульсным откликом цифрового фильтра являются основой для расчета оптимальных значений основных параметров НССЦР для заданного ОК при заданных условиях контроля.

Совокупность полученных соотношений была использована в ООО «Диагностика-М» (г.Москва) при проектировании установки для контроля почтовой корреспонденции, а также при проектировании ряда сканирующих рентгеновских установок в в/ч 35533, в/ч 43753, ФГУП «НИИЭФА им. Д.В.Ефремова».

На рис.4.1 приведена фотография описываемой системы контроля, на рис.4.2 - фотографии полутоновых изображений, синтезированных в данной системе в результате визуализации радиационных изображений ОК (слоя бумаги толщиной 10мм) с наложенным на него испытательным образцом – мирой.



Рис. 4.1 Внешний вид НССЦР, предназначенной для контроля недозволенных вложений в почтовых отправлениях



Рис. 4.2. Полутоновое изображение, синтезированное в системе, представленной на рис. 4.1, в результате визуализации радиационного изображения объекта контроля с наложенной на него мирой.

Как видно из рис.4.2, РС настоящей системы составляет около 1,5 пар линий/мм, что несколько выше задаваемого по условиям ТЗ (1,3 пар линий/мм). Однако, это небольшое отличие, на наш взгляд, отчасти объясняется тем, что при проведении эксперимента мира располагалась вблизи оси пучка излучения, а не на одном из краев ОК (по его ширине), что соответствовало бы наиболее неблагоприятному варианту, для которого, собственно говоря, и были проведены теоретические исследования в настоящей работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен аналитический обзор современного состояния и развития систем цифровой рентгенографии, в ходе которого было, в частности, выявлено, что в настоящее время одними из наиболее перспективных систем данного вида являются сканирующие системы цифровой рентгенографии на основе линейки детекторов, т.е. ССЦР.

2. Разработана математическая модель НССЦР (ССЦР с непрерывным сканированием), которая учитывает:

- линейные искажения радиационного изображения объекта контроля, обусловленными конечными размерами фокусного пятна источника и апертур детекторов, а также конечным временем регистрации (интегрирования) сигналов радиационного изображения объекта контроля и конечным шагом расположения детекторов в линейке;

- статистические искажения радиационного изображения объекта контроля, обусловленные квантовой природой излучения;

- возможность применения в НССЦР источников излучения, характеризующихся анизотропией углового распределения и неравномерным распределением квантового выхода по их фокусному пятну;
- возможность применения в НССЦР детекторов с неоднородной пространственной чувствительностью к падающему излучению;
- нормализацию результатов регистрации радиационного изображения объекта контроля;
- возможность применения в НССЦР цифровой фильтрации нормализованных результатов регистрации радиационного изображения, что позволяет использовать данную модель в качестве основы для разработки различных методик расчета оптимальных значений основных параметров и характеристик данной системы.

3. Получены выражения для теоретической оценки РС НССЦР.

4. Решен ряд задач оптимального по РС выбора значений основных параметров НССЦР как без учета, так и с учетом цифровой фильтрации результатов регистрации излучения. Из результатов их решения, в частности, следует, что применение цифровой фильтрации позволяет существенно повысить РС НССЦР, а из двух режимов цифровой фильтрации (постоянная и избирательная) предпочтительнее использовать режим постоянной цифровой фильтрации.

5. Выведены соотношения для оптимального выбора значений основных параметров НССЦР применительно к случаю, когда значение РС данной системы считается заданным.

6. Получено выражение для значения мощности экспозиционной дозы излучения на расстоянии 1м от источника (фокуса рентгеновской трубки) вдоль оси пучка при отсутствии объекта, которое является минимально необходимым для возможности контроля заданного объекта с заданными значениями РС НССЦР и производительности контроля.

7. Совокупность полученных соотношений была использована в ООО «Диагностика-М» (г.Москва) при проектировании установки для контроля почтовой корреспонденции, а также при проектировании ряда сканирующих рентгеновских установок в в/ч 35533, в/ч 43753, ФГУП «НИИЭФА им. Д.В.Ефремова».

Список цитируемой литературы

1. Недавний О.И., Удод В.А. Математическая модель многоканальных сканирующих систем цифровой рентгенографии // Контроль. Диагностика. – 2002. – № 2. – С. 27-33.

2. Удод В.А. Корректное формальное описание критерия пространственной разрешающей способности по Фуко // Обозрение прикл. и промышл. матем. – 2002. – Т. 9. – В. 2. – С. 473-474.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Чахлов С.В., Лебедев М.Б., Усачев Е.Ю. Метод сшивки рентгеновских изображений // Контроль. Диагностика. – 2006. - № 2. – С. 34-40.
2. Лебедев М.Б., Сидуленко О.А., Удод В.А. Выбор параметров дискретно-сканирующих систем цифровой рентгенографии // Дефектоскопия. – 2006. - № 11. – С. 81-88.
3. Лебедев М.Б., Усачев Е.Ю., Чумаков Д.М., Касьянов В.А., Касьянов С.В., Сидуленко О.А., Штейн М.М. Установка для рентгеновского контроля крупногабаритных объектов (грузовых и легковых автомобилей, контейнеров для морских и авиаперевозок) // 6-я Международная конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности»: Тез. докл. – Москва, 15-17 мая 2007 г. – С. 69-70.
4. Лебедев М.Б., Сидуленко О.А., Удод В.А. Выбор параметров систем цифровой рентгенографии с непрерывным сканированием // 3-я Российская научно-техническая конференция «Разрушение, контроль и диагностика материалов и конструкций»: Тез. докл. – Екатеринбург, 24-26 апреля 2007 г. – С. 111.
5. Лебедев М.Б., Сидуленко О.А., Удод В.А. Математическая модель непрерывно-сканирующих систем цифровой рентгенографии // 6 – я Международная конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности»: Тез. докл. – Москва, 15-17 мая 2007г. – С. 131-133.
6. Лебедев М.Б., Сидуленко О.А., Удод В.А. Математическая модель многоканальных непрерывно-сканирующих систем цифровой рентгенографии // Дефектоскопия. – 2007. - № 6. – С. 65-72.
7. Лебедев М.Б., Сидуленко О.А., Удод В.А. Выбор параметров многоканальных непрерывно-сканирующих систем цифровой рентгенографии // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 12. – С.17-26.
8. Лебедев М.Б., Сидуленко О.А., Удод В.А. Учет цифровой фильтрации при выборе параметров многоканальных непрерывно-сканирующих систем цифровой рентгенографии // Дефектоскопия. – 2008. – № 1. – С. 3-18.
9. Лебедев М.Б., Сидуленко О.А., Удод В.А. Оптимальный выбор параметров систем цифровой рентгенографии с непрерывным сканированием // Обзорные прикл. и промышл. матем. – 2008. – Т. 15. – В. 1. – С. 149.
10. Лебедев М.Б., Сидуленко О.А., Удод В.А. Анализ современного состояния и развития систем цифровой рентгенографии // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. - № 2. – С. 47-55.
11. Лебедев М.Б., Сидуленко О.А., Удод В.А. О выборе параметров многоканальных непрерывно-сканирующих систем цифровой рентгенографии // Международная научная конференция «Становление и развитие научных исследований в высшей школе», посвященная 100 – летию со дня рождения профессора А.А. Воробьева: Сборник трудов. – Т2.: Томск, 14 – 16 сентября 2009г. – С. 115 – 120.
12. Лебедев М.Б., Сидуленко О.А., Удод В.А. Оптимальный выбор параметров многоканальных непрерывно-сканирующих систем цифровой рентгенографии // Дефектоскопия. – 2009. - № 10. – С. 58 – 77.