

На правах рукописи



Власенко Андрей Николаевич

СИСТЕМА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы
(машиностроение)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Малыхина Галина Федоровна

Официальные оппоненты: **Волхонский Владимир Владимирович**
доктор технических наук, доцент, кафедра световых технологий и оптоэлектроники, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», профессор

Газин Дмитрий Игоревич
кандидат технических наук, ООО «Комплек-ресурс», начальник отдела ИТ

Ведущая организация: **Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева»**

Защита состоится 29 декабря 2016 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.229.10 на базе ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 21, 9-й учебный корпус, ауд. 121.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте <http://www.spbstu.ru/science/defences/>

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Богач Наталья Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При эксплуатации ядерных энергетических установок, обращения с радиоактивными изотопами, а также в случае ядерного терроризма могут возникнуть чрезвычайные ситуации, связанные с попаданием высокоактивных источников гамма-излучения в окружающую среду. Такие источники представляют серьезную опасность для здоровья и жизни человека и должны быть незамедлительно изъяты и помещены в соответствующие хранилища.

Как правило, местонахождение и точные координаты радиоактивного загрязнения в районе чрезвычайного происшествия заранее неизвестны. Следовательно, первоочередной задачей ликвидации последствий радиационной катастрофы является локализация источников гамма-излучения на местности.

Одной из важнейших характеристик технических средств, предназначенных для поиска источников, является время локализации, так как длительное время определения координат радиоактивного загрязнения приводит к увеличению дозовой нагрузки на ликвидаторов радиационной аварии.

Создание устройства, использующего в основе своей работы методы визуализации полей гамма-излучения, позволит значительно сократить время поиска источника. Видеокамера позволит оператору наглядно представить зону зрения угломерного устройства, а совмещение визуализированной картины распределения источников излучения с видеоизображением исследуемого участка местности обеспечит однозначную идентификацию излучаемых объектов. Если радиоактивное загрязнение содержит несколько радиоактивных фрагментов, данное устройство за один акт измерения способно определить координаты каждого источника, расположенного в его зоне зрения.

Если дозовая нагрузка запрещает даже кратковременное присутствие человека в месте радиационной аварии, для решения задачи локализации источников излучения требуется применение мобильных робототехнических комплексов (МРТК). В этом случае в состав комплекса должна входить интегрированная система, предназначенная для измерения мощности дозы, визуализации источников гамма-излучения и определения их координат, позволяющая оператору выполнять навигацию робота в радиационных полях.

Степень разработанности проблемы. В середине 1990-х и начале 2000-х годов конструирование приборов для визуализации источников гамма-излучения, получивших название гамма-визоры, шло по пути создания громоздких блоков детектирования, заключенных в массивную защиту от гамма-излучения. Среди разработок можно отметить следующие: «Портативный прибор для получения рентгеновских и гамма-изображений с кодирующей маской» (РНЦ «Курчатовский институт», Россия), система гамма-видения «Мультиплекс» (НПМСП «Опыт», Украина), «CARTOGAM» («Canberra Industries», США), «RadScan 800 4pi Gamma Imager» («BIL Solutions», США).

Представленные гамма-визоры в большинстве своем имеют общие недостатки – детектирующий блок имеет большие габариты и вес, необходимо дополнительное оборудование для установки блока и сканирования местности, обработка и отображение измерительной информации производится на персональном компьютере, питание осуществляется от внешних источников. Такая компоновка прибора ограничивает его применение в труднодоступных местах.

В настоящее время разработчики гамма-визоров переходят к созданию малогабаритных и автономных устройств. Так, например, РИЦ «Курчатовский институт» разработал ультра-легкую гамма-камеру весом 2,6 кг. Специалистами фирмы H3D (Энн-Арбор, США) был разработан спектрометр для получения гамма-изображений «Polaris-H», обладающий полем зрения 4π стерадиан и весом 3,9 кг. Фирма «Canberra» (США) также представила свою малогабаритную разработку, получившую название «iPix - Ultra Portable Gamma-Ray Imaging System» размерами 9×9×18,8 см и весом 2,5 кг. Представленные образцы обладают хорошей чувствительностью и малой величиной углового разрешения, но имеют ограниченный диапазон по регистрируемой энергии гамма-излучения (до 1,0 – 1,2 МэВ) и температуре окружающей среды (не ниже минус 10 градусов Цельсия).

Цели и задачи. Целью диссертационной работы является разработка малогабаритной портативной и энергонезависимой системы, предназначенной для получения изображений источников гамма-излучения и определения их координат, а также совмещения гамма-изображений с телевизионной картиной обследуемой территории для определения положения источников на местности. Достижение поставленной цели требует решения следующих научно-прикладных задач:

1. Исследование методов визуализации источников рентгеновского и гамма-излучения на предмет обеспечения высокой чувствительности обнаружения и малой погрешности определения координат источника.
2. Разработка позиционно-чувствительного детектора гамма-излучения (ПЧД), обладающего широким рабочим диапазоном по энергии и мощности дозы гамма-излучения, а также температуре окружающей среды.
3. Разработка трехмерных моделей детектирующего элемента и системы визуализации в программной среде моделирования процессов регистрации ионизирующих излучений с целью подтверждения правильности принятых технических решений.
4. Разработка алгоритмов восстановления изображений источников гамма-излучения и совмещения изображений источников и кадров видеопоследовательности, полученных от телевизионной камеры.
5. Экспериментальное исследование технических характеристик опытного образца системы визуализации и сравнение полученных характеристик с расчетными.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использовались методы компьютерного моделирования, аналитических расчетов, проводились экспериментальные исследования опытного образца

системы с использованием источников гамма-излучения различной активности и радионуклидного состава. При математическом моделировании использовалась программное обеспечение МСС 3D, для реализации алгоритмов восстановления изображений источников – язык программирования высокого уровня Delphi и пакет программ OriginPro 2015.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1. Впервые предложен позиционно-чувствительный детектор для системы с кодированной апертурой, представляющий собой матрицу счетчиков Гейгера-Мюллера.
2. Предложена математическая модель счетчика Гейгера-Мюллера и позиционно-чувствительного детектора, позволяющая выполнять конструирование ПЧД и исследовать его характеристики.
3. Впервые разработана и создана портативная, автономная и энергонезависимая система для получения изображения источников гамма-излучения на основе кодирующей апертуры.
4. Экспериментально исследована зависимость минимального времени получения изображения источника излучения от уровня мощности дозы, создаваемого источником в точке расположения системы, для оценки времени экспозиции.

Практическая значимость работы. Разработанная система визуализации источников гамма-излучения представляет собой универсальную разработку и позволяет:

1. Визуализировать множественные источники гамма-излучения различных конфигураций.
2. Существенно ускорить локализацию источников радиоактивного загрязнения и значительно снизить дозовую нагрузку на персонал при проведении дезактивационных работ.
3. В случае установки на мобильный робототехнический комплекс осуществлять навигацию МРТК в радиационных полях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложенная кодирующая маска на основе однородно-избыточного массива и содержащая два неполных периода повторения базового элемента, состоящего из 7×5 ячеек, позволяет получать изображения множественных и протяженных источников, работать в условиях шума и подавлять фантомные изображения источников, расположенных на границах зоны зрения.
2. Разработанная математическая модель счетчика Гейгера-Мюллера позволяет оценить его функцию отклика на гамма-излучение в диапазоне углов падения излучения на счетчик от 0 до 360 градусов.
3. Разработанная математическая модель позиционно-чувствительного детектора позволяет выполнять конструирование ПЧД для систем визуализации на основе матрицы счетчиков Гейгера-Мюллера.
4. Предложенные алгоритмы восстановления изображения и совмещения кадров видеопоследовательности с изображением источников гамма-излучения позволяют визуализировать распределение радиоактивных источников на

местности в режиме реального времени и определять их координаты.

Апробация и реализация результатов. Основные положения исследования были обсуждены и одобрены на научно-технических конференциях: «Экстремальная робототехника ЭР-2003» (22-27 сентября, 2003г., пос. Дивноморское), «Технические средства для предотвращения радиационного терроризма и ликвидации его последствий» (18-20 октября 2004г. ЦНИИ РТК. г. Санкт-Петербург), «Экстремальная робототехника» (18-20 мая 2010 г., Москва), Четырнадцатая Всероссийская научно-практическая конференция РАРАН (4-7 апреля 2011 г., Санкт-Петербург).

Макет системы визуализации проходил испытания 14 октября 2009 года на Ленинградской АЭС, в хранилище отработанного ядерного топлива (ХОЯТ, зд. 428, г. Сосновый Бор) при непосредственном участии автора.

Внедрение результатов диссертации. Система визуализации источников гамма-излучения включена в состав аппаратуры поиска и визуализации источников ионизирующего излучения изделия «Мобильный робототехнический комплекс легкого класса для ведения разведки» Т71.330.068 («РТК-10»). Согласно Государственному контракту №147/2476-300 система поставлена Федеральному казенному учреждению «Центр обеспечения деятельности федеральной противопожарной службы Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» России.

Публикации. По материалам исследования были опубликованы 14 работ (из них 2 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России), получено 2 патента на изобретение и 1 патент на полезную модель.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы составил 135 страниц текста, включающий 63 рисунка, 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, представлен краткий обзор развития методов и аппаратуры визуализации источников рентгеновского и гамма-излучения. Сформулированы цели и задачи, приведена научная новизна и практическая значимость работы. Представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации проведен аналитический обзор методов визуализации источников гамма-квантов и практических реализаций аппаратуры для определения местоположения радиоактивных загрязнений. В отдельный параграф вынесено исследование возможности применения систем визуализации в составе мобильных робототехнических комплексов. Отмечается, что многие практические решения не отвечают современным требованиям мобильности, простоты применения и работы в опасных для человека условиях. Поставлена задача диссертационного исследования, заключающаяся в разработке универсальной системы визуализации,

предназначенной для использования как в составе МРТК, так и в качестве отдельного прибора для проведения пешего мониторинга.

Вторая глава посвящена проектированию малогабаритной системы визуализации на основе кодированной апертуры. Необходимость в апертурном кодировании возникает в связи с отсутствием фокусирующих устройств, способных работать в диапазоне волн рентгеновского и гамма-излучений. Суть метода, схема которого представлена на рисунке 1, заключается в следующем:

- параллельный поток гамма-квантов от источника проходит через кодирующую маску, состоящую из расположенных определенным образом прозрачных и непрозрачных для излучения элементов;
- тень маски регистрируется позиционно-чувствительным детектором (ПЧД), при этом распределение скорости счета по разрешающим элементам детектора соответствует структуре маски;
- информация, полученная на детекторе, декодируется на ЭВМ.

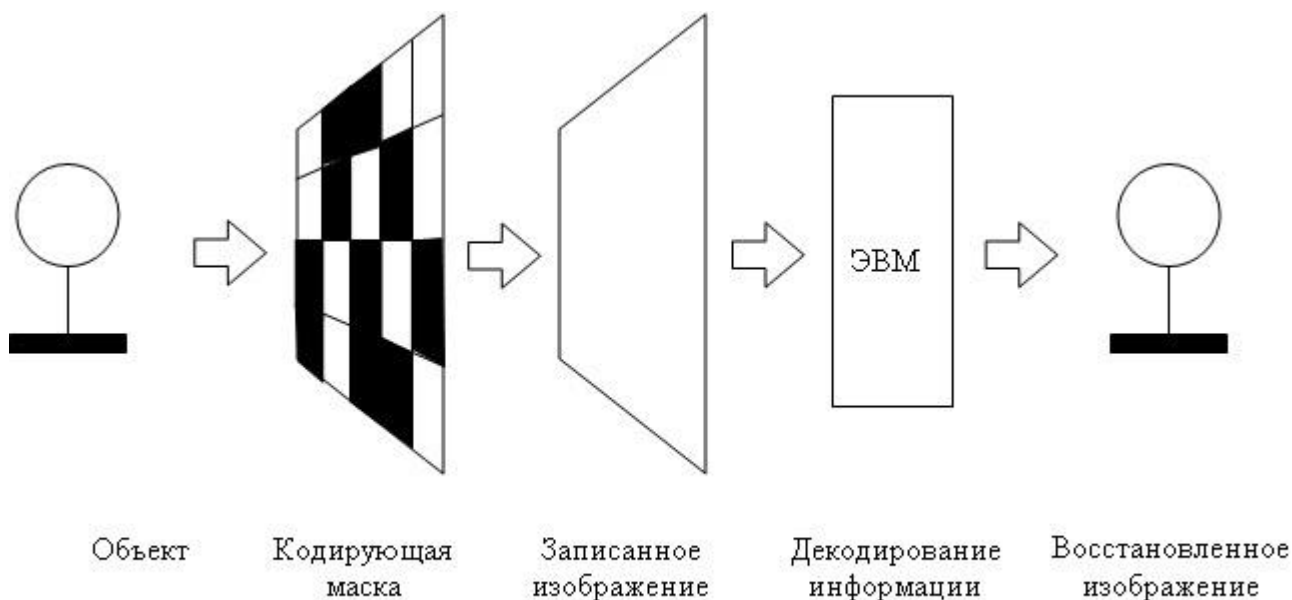


Рисунок 1 – Процесс получения изображения источника гамма-излучения

При восстановлении изображения поле зрения системы в границах азимутального угла φ и полярного угла θ разбивается на определенное число ячеек с координатами (φ_k, θ_l) . Для каждой ячейки взаимно-корреляционная функция маски (ВКФ) и записанного на детекторе изображения вычисляется по формуле:

$$C(\varphi_k, \theta_l) = \frac{k}{M_x \cdot M_y} \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y} (f_{ij}(\varphi_k, \theta_l) - \bar{f}(\varphi_k, \theta_l)) \cdot (N_{ij} - \bar{N})$$

где $C(\varphi_k, \theta_l)$ – взаимно-корреляционная функция; k – нормировочный множитель; M_x и M_y – количество элементов в позиционно-чувствительном детекторе; $f_{ij}(\varphi_k, \theta_l)$ – функция отклика прибора на источник гамма-излучения (функция отклика показывает, насколько открыт или закрыт i, j -элемент ПЧД)

для гамма-излучения, падающего под углами (φ_k, θ_l) ; N_{ij} – количество гамма-квантов в i,j -элементе ПЧД, накопленное в результате измерения;

$$\bar{f}(\varphi_k, \theta_l) = \sum_{ij} \frac{f_{ij}(\varphi_k, \theta_l)}{M_x M_y};$$

$$\bar{N} = \sum_{ij} \frac{N_{ij}}{M_x M_y};$$

здесь $\sum_{ij} \rightarrow \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y}$ - условное сокращение;

M_x и M_y – число детекторов в матрице по координатам x и y соответственно.

Раскрывая выражение под знаком сумм:

$$\begin{aligned} \sum_{ij} (f_{ij} - \bar{f})(N_{ij} - \bar{N}) &= \sum_{ij} f_{ij} \cdot N_{ij} - \bar{f} \cdot \sum_{ij} N_{ij} - \bar{N} \cdot \sum_{ij} f_{ij} + \bar{f} \cdot \bar{N} \cdot M_x \cdot M_y = \\ &= \sum_{ij} f_{ij} \cdot N_{ij} - 2 \cdot M_x \cdot M_y \cdot \bar{f} \cdot \bar{N} + \bar{f} \cdot \bar{N} \cdot M_x \cdot M_y = \sum_{ij} f_{ij} \cdot N_{ij} - M_x \cdot M_y \cdot \bar{f} \cdot \bar{N}, \end{aligned}$$

получаем:

$$C(\varphi_k, \theta_l) = \frac{k}{M_x \cdot M_y} \left\{ \sum_{ij} N_{ij} \cdot f_{ij}(\varphi_k, \theta_l) - \frac{\sum_{ij} N_{ij} \cdot \sum_{ij} f_{ij}(\varphi_k, \theta_l)}{M_x \cdot M_y} \right\}$$

Запишем число зарегистрированных гамма-квантов в ячейке N_{ij} в виде:

$$N_{ij} = \frac{N_s \cdot f_{ij}}{\sum_{ij} f_{ij}} + B$$

где B – среднее значение отсчетов фонового излучения, одинаковое для всех элементов детекторной матрицы (свойство кодирующих масок URA); N_s – число квантов от источника, падающих на плоскость детекторной матрицы через открытые элементы маски; f_{ij} – функция отклика прибора на излучение, приходящее от конкретного источника, расположенного под углами (φ, θ) , причем f_{ij} принимает значения $0 \leq f_{ij} \leq 1$.

Выберем нормировочный множитель k таким, чтобы максимум корреляционной функции равнялся числу событий от источника N_s . Подставляя выражение для числа зарегистрированных гамма-квантов, получаем:

$$N_s = \frac{k}{M_x \cdot M_y} \left\{ \sum_{ij} \left(\frac{N_s \cdot f_{ij}}{\sum_{ij} f_{ij}} + B \right) \cdot f_{ij} - \sum_{ij} \left(\frac{N_s \cdot f_{ij}}{\sum_{ij} f_{ij}} + B \right) \cdot \frac{\sum_{ij} f_{ij}}{M_x \cdot M_y} \right\}$$

Упрощаем выражение в фигурных скобках:

$$N_s = \frac{k}{M_x \cdot M_y} \cdot N_s \cdot \left(\frac{\sum_{ij} f_{ij}^2}{\bar{f} \cdot M_x \cdot M_y} - \bar{f} \right)$$

Получаем выражение для нормировочного множителя k :

$$k = \frac{M_x^2 \cdot M_y^2 \cdot \sum_{ij} f_{ij}}{M_x \cdot M_y \cdot \sum_{ij} f_{ij}^2 - \left(\sum_{ij} f_{ij} \right)^2}$$

В результате первоначальное выражение принимает вид:

$$C(\varphi_k, \theta_l) = \frac{M_x M_y \sum_{ij} f_{ij}}{M_x M_y \sum_{ij} f_{ij}^2 - \left(\sum_{ij} f_{ij} \right)^2} \left\{ \sum_{ij} f_{ij} N_{ij} - M_x M_y \cdot \bar{f} \cdot \bar{N} \right\}$$

Для достоверной оценки получаемых результатов необходимо определить функцию плотности вероятности для этого метода. Считая, что распределение событий соответствует пуассоновскому, и преобразовывая исходное выражение к виду:

$$C(\varphi_k, \theta_l) = \sum_{ij} a_{ij} N_{ij},$$

где

$$a_{ij} = k \cdot \frac{M_x \cdot M_y \cdot f_{ij} - \sum_{ij} f_{ij}}{M_x^2 \cdot M_y^2},$$

то для M_x и M_y независимых переменных можно записать:

$$\frac{\delta C(\varphi_k, \theta_l)}{\delta N_{ij}} = a_{ij}$$

Исходя из общего правила дисперсии сложной функции, имеем:

$$\sigma^2(C) = \sum_{ij} \left(\frac{\delta C(\varphi_k, \theta_l)}{\delta N_{ij}} \right)^2 \sigma^2(N_{ij}),$$

причем для распределения Пуассона $\sigma^2(N_{ij}) = N_{ij}$. Таким образом:

$$\sigma^2(C) = \sum_{ij} N_{ij} \cdot a_{ij}^2$$

Подставляя выражение для a_{ij} , получаем:

$$\sigma^2(C) = \sum_{ij} \left\{ \left(k \cdot \frac{M_x \cdot M_y \cdot f_{ij} - \sum_{ij} f_{ij}}{M_x^2 \cdot M_y^2} \right)^2 N_{ij} \right\}$$

Итоговое выражение для среднеквадратического отклонения $\sigma(C)$ выглядит следующим образом:

$$\sigma(C) = \frac{\sum_{ij} f_{ij}}{M_x M_y \sum_{ij} f_{ij}^2 - \left(\sum_{ij} f_{ij} \right)^2} \sqrt{\left(M_x^2 M_y^2 \sum_{ij} f_{ij}^2 N_{ij} - \left(\sum_{ij} f_{ij} \right)^2 \sum_{ij} N_{ij} \right)}$$

Обнаружение источников состоит в поиске корреляционным методом статистически значимого превышения над флуктуациями ВКФ $C(\varphi_k, \theta_l)$. Таким образом, если отношение функции $C(\varphi_k, \theta_l)$ к её среднеквадратичному отклонению $\sigma(C)$ для какой-либо пары углов (φ_k, θ_l) принимает достаточно большое значение (например, больше трех значений СКО), то это может указывать на неравномерность распределения и, возможно, содержит источник гамма-квантов.

Оценка взаимно-корреляционной функции содержит ошибку, величина которой определяется пуассоновским шумом. Поэтому для определения координат центра источника (φ_k, θ_l) необходимо выполнить сглаживание взаимно-корреляционной функции. Для этой цели предлагается использовать аппроксимацию ВКФ суммой двумерных гауссианов путем адаптации весов, центров, расстояний и корреляционных матриц аппроксимирующих гауссианов. Текущее значение углов $(\varphi_k, \theta_l)_i$, характеризующих положение центра i -го источника (где $i = 1 \dots m$, и m – общее количество всех источников на изображении), определяется как максимальное значение аппроксимирующего i -го гауссиана.

Предлагаемый метод экстремальной корреляции позволяет определять центры источников в поле зрения системы. Метод заключается в минимизации ошибки аппроксимации ВКФ суммой гауссианов.

Аппроксимирующая функция ВКФ для множества источников:

$$F(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m w_i G(\|\mathbf{x} - \mathbf{t}_i\|^2)$$

$$G(\|\mathbf{x} - \mathbf{t}_i\|^2) = \exp\left(-\frac{m}{d_{\max}^2} \|\mathbf{x} - \mathbf{t}_i\|^2\right), \quad i = 1, 2, \dots, m$$

где \mathbf{t}_i – центр аппроксимирующего гауссиана,
 m – число центров (источников в поле зрения системы),
 d_{\max} – расстояние между центрами

$$\sigma = \frac{d_{\max}}{\sqrt{2m}}$$

Ошибка аппроксимации ВКФ функцией суммы гауссианов:

$$e_j = r_j - F(\mathbf{x}_j) = r_j - \sum_{i=1}^M w_i G(\|\mathbf{x}_j - \mathbf{t}_i\|_{C_i})$$

где r_j – значения взаимно-корреляционной функции между маской и отображением на плоскости детектора;

Оцениваемые параметры:

w_i – весовые коэффициенты;

\mathbf{t}_i – центры гауссианов;

Σ^{-1} – матрица гауссиана.

Параметры w_i , \mathbf{t}_i , Σ^{-1} оцениваются исходя из минимума суммарной ошибки аппроксимации:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N e_j^2$$

Адаптация линейных весов:

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_i(n)} = \sum_{j=1}^N e_j(n) G \left(\left\| \mathbf{x}_j - \mathbf{t}_i(n) \right\|_{C_i} \right)$$

$$w_i(n+1) = w_i(n) - \eta_1 \frac{\partial E(n)}{\partial w_i(n)}, \quad i = 1, 2, \dots, \mathbf{m}_i$$

Адаптация позиций центров:

$$\frac{\partial E(n)}{\partial \mathbf{t}_i(n)} = 2w_i(n) \sum_{j=1}^N e_j(n) G' \left(\left\| \mathbf{x}_j - \mathbf{t}_i(n) \right\|_{C_i} \right) \Sigma_i^{-1} [\mathbf{x}_j - \mathbf{t}_i(n)]$$

$$\mathbf{t}_i(n+1) = \mathbf{t}_i(n) - \eta_2 \frac{\partial E(n)}{\partial \mathbf{t}_i(n)}, \quad i = 1, 2, \dots, \mathbf{m}_i$$

Адаптация ширины гауссианов:

$$\frac{\partial E(n)}{\partial \Sigma_i^{-1}(n)} = -w_i(n) \sum_{j=1}^N e_j(n) G' \left(\left\| \mathbf{x}_j - \mathbf{t}_i(n) \right\|_{C_i} \right) \mathbf{Q}_{ij}(n)$$

$$\mathbf{Q}_{ij}(n) = [\mathbf{x}_j - \mathbf{t}_i(n)] [\mathbf{x}_j - \mathbf{t}_i(n)]^T$$

$$\Sigma_i^{-1}(n-1) = \Sigma_i^{-1}(n) - \eta \frac{\partial E(n)}{\partial \Sigma_i^{-1}(n)}$$

Полученные в результате аппроксимации ВКФ координаты центров аппроксимирующих гауссианов принимаются в качестве центров источников гамма-излучения. Координаты центров $[\mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2 \dots \mathbf{t}_m]$ являются локальными максимумами сглаженной ВКФ.

Шум Пуассона оказывает влияние на ВКФ, что вызывает погрешность определения координат центров пиков, соответствующих положениям источников гамма-излучения на изображении. Предложенный метод позволяет уменьшить случайную погрешность с помощью суммы гауссианов с последующим определением координат центров. Дальнейшим развитием метода могут служить нейронные сети с радиальными базисными функциями, которые предоставляют эффективный механизм реализации предложенного метода.

Узор кодирующей маски построен на основе однородно-избыточного массива (uniformly redundant array - URA), содержит два неполных периода повторения базового элемента размерами 7×5 ячеек и представлен на рисунке 2. В данном случае повторения узора в углах маски наблюдаться не будет, и неоднозначность при восстановлении изображения источника, расположенного на границах зоны зрения, будет отсутствовать.

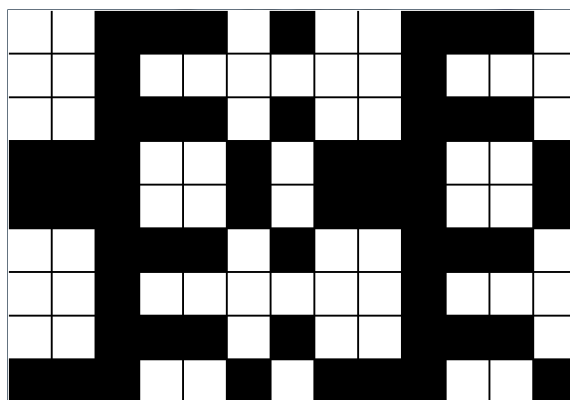


Рисунок 2 – Узор кодирующей маски, вид со стороны источника излучения

Для работы в широком диапазоне мощности дозы (от 0,2 мкЗв/ч до 0,1 Зв/ч) и большом диапазоне рабочих температур (от минус 60°С до 70°С) в качестве позиционно-чувствительного детектора целесообразно использовать матрицу счетчиков Гейгера-Мюллера СБМ21, обладающих простой конструкцией, что облегчает их установку и подключение в системе. Размер кодирующей маски и количество детекторов в матрице должны коррелировать друг с другом, с одной стороны обеспечивая высокие измерительные характеристики, а с другой не оказывая отрицательного влияния на габариты системы в целом. В результате проведенных исследований размеры маски составили 104 × 92 мм при толщине 10 мм. Расстояние между маской и детектором составило 90 мм.

В третьей главе приводятся результаты компьютерного моделирования процессов регистрации гамма-излучения счетчиком Гейгера-Мюллера СБМ21 и расчеты функции отклика системы на источник с целью получения изображения источника гамма-излучения и оценки основных технических характеристик системы.

Трехмерная модель счетчика СБМ21 и портативной системы визуализации источников гамма-излучения была разработана в программной среде «Программа для имитационного трехмерного моделирования систем детектирования и регистрации ионизирующих излучений МСС 3D» и представлена на рисунке 3.

В результате моделирования была получена функция отклика на гамма-излучение, падающее на счетчик в диапазоне углов от 0 до 360 градусов, для проверки возможных ориентаций счетчика в матрице относительно источника излучения, представленная на рисунке 4.

Расположение счетчика СБМ21 в матрице торцевой «нерабочей» поверхностью к источнику (поворот на 90 градусов) хоть и уменьшает эффективность регистрации гамма-излучения на 20%, но с другой стороны позволяет составить из счетчиков компактную матрицу и повысить на 20% верхнюю границу по мощности дозы гамма-излучения.

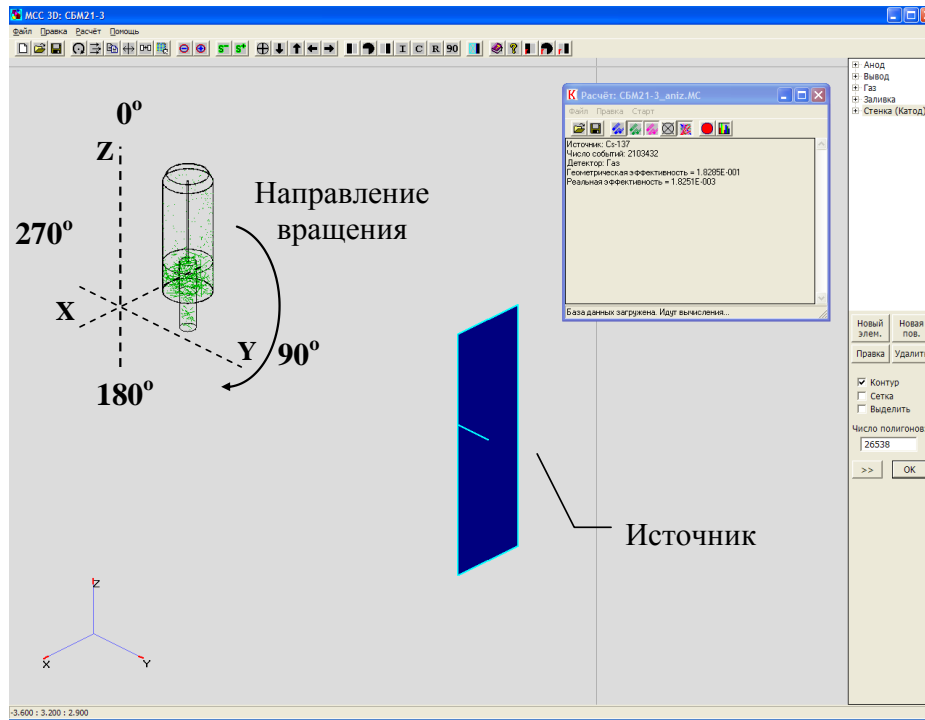


Рисунок 3 – Компьютерная модель для изучения анизотропии функции отклика счетчика СБМ21. Счетчик вращался в плоскости ZY, нулевое направление соответствует оси Z

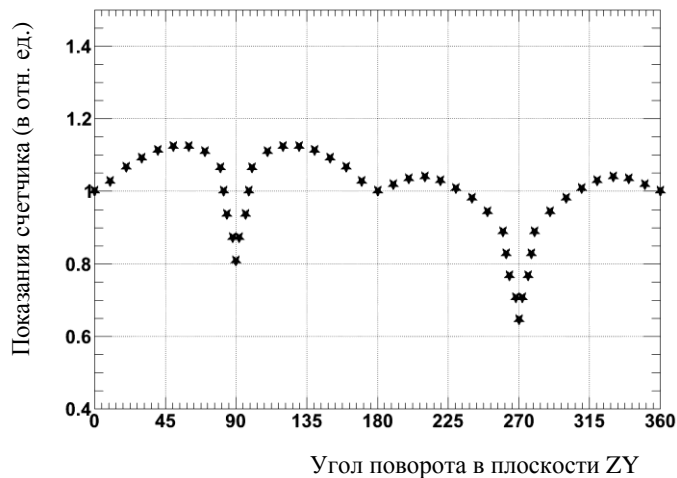


Рисунок 4 – Изменение функции отклика в зависимости от угла поворота счетчика СБМ21

Компьютерная модель системы визуализации в программной среде MCC 3D, включающая позиционно-чувствительный детектор, состоящий из счетчиков СБМ21, кодирующую маску, корпус и элементы блока электроники, представлена на рисунке 5.

В результате моделирования были получены функции отклика ПЧД на различные положения источника гамма-излучения относительно системы. Функции отклика использовались в программе восстановления изображений для построения изображений источников гамма-излучения и проверки выбранной конструкции системы.

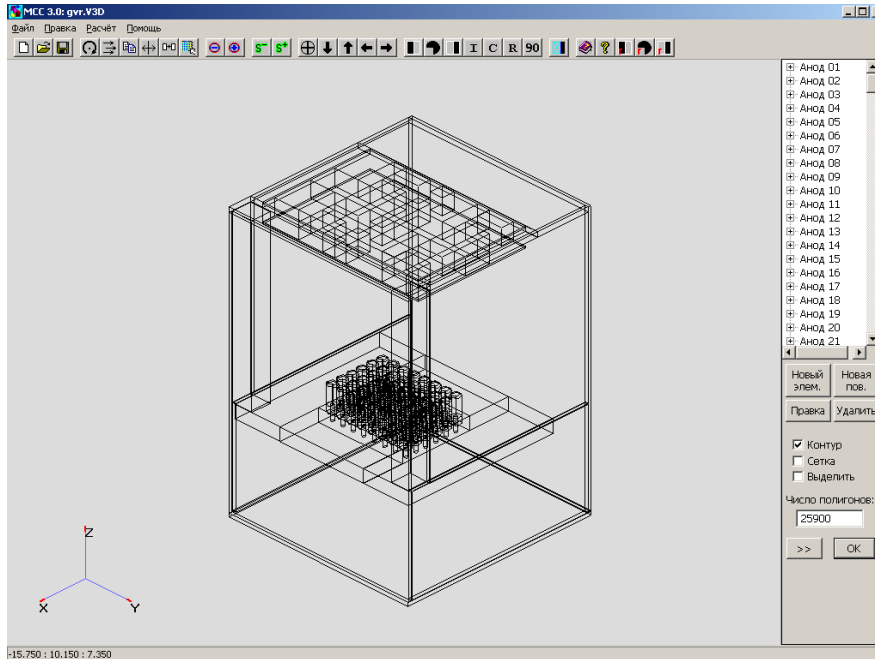


Рисунок 5 – Трехмерная компьютерная модель портативной системы в программной среде MCC 3D

При восстановлении изображения источников гамма-излучения по полученным функциям отклика выяснилось, что количество счетчиков в матрице равно количеству ячеек в базовом элементе маски дает на конечном изображении ряд ложных всплесков. Было принято решение о том, что детекторная матрица должна содержать 48 счетчиков (6 рядов по 8 счетчиков в каждом ряду – на один ряд и на один столбец больше, чем размерность базового элемента маски). Пример восстановленного изображения источника излучения, расположенного в центре зоны зрения, представлен на рисунке 6.

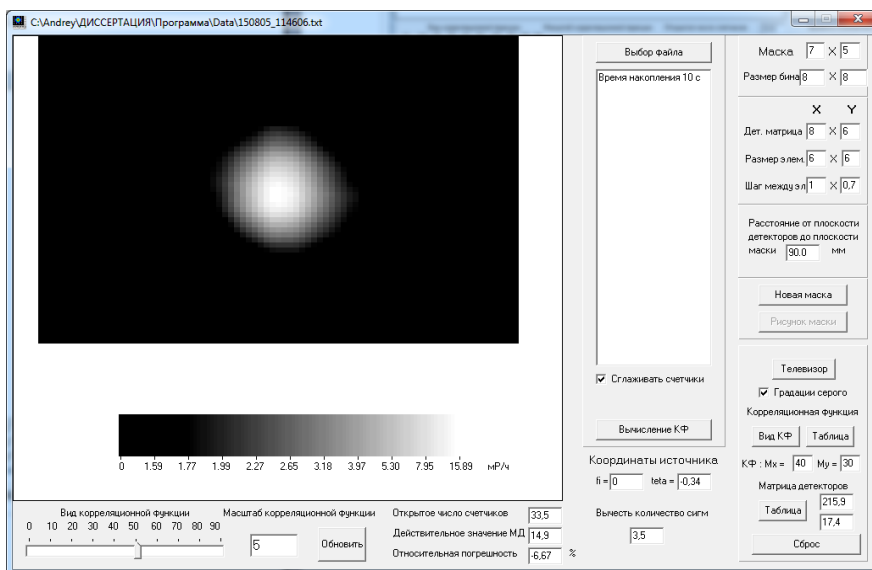


Рисунок 6 – Изображение точечного источника излучения, полученного в результате математического моделирования

Проведенные исследования показали, что источник гамма-излучения должен находиться на расстоянии не менее 3 метров от системы для минимизации систематической ошибки при совмещении гамма- и видеоизображений, возникающей вследствие параллакса, вызванного взаимным расположением ПЧД и телевизионной камеры.

В четвертой главе приводятся результаты исследований технических характеристик системы визуализации. Испытанию подвергался опытный образец системы (схема и внешний вид которого представлен на рисунках 7 и 8) по программе экспериментальных исследований с источниками гамма-излучения радионуклида Cs-137 различной активности.

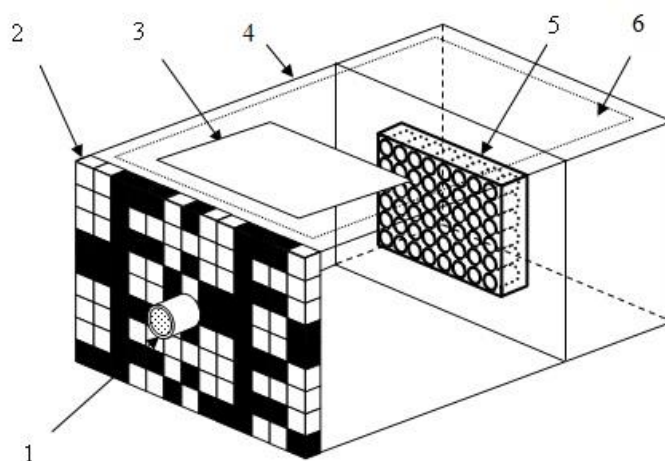


Рисунок 7 – Состав системы визуализации источников гамма-излучения: видеокамера (1), кодирующая маска (2), сенсорный дисплей (3), корпус (4), позиционно-чувствительный детектор (5), микроЭВМ и блок электроники (6)



Рисунок 8 – Внешний вид системы визуализации источников гамма-излучения

В результате экспериментальных исследований были определены технические характеристики системы, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Основные технические характеристики системы визуализации

Наименование характеристики	Значение
Диапазон регистрируемых энергий гамма-излучения	от 0,08 до 3,0 МэВ
Диапазон измерения мощности экспозиционной дозы гамма-излучения	от $1 \cdot 10^{-6}$ до 0,15 Зв/ч
Основная погрешность измерения мощности дозы	не более $\pm 20\%$
Зона зрения по азимутальному и полярному углу	30×20 град
Погрешность определения угловых координат отдельного источника гамма-излучения	не более ± 1 град
Угловое разрешение двух источников гамма-излучения	не более 5,5 град
Габариты	$224 \times 124 \times 166$ мм
Вес	не более 4,5 кг

Экспериментальная зависимость минимального времени получения изображения источника Cs-137 в зависимости от мощности дозы, создаваемой им в точке расположения системы, представлена на рисунке 9.

При помощи данной зависимости перед началом измерения можно оценить время получения изображения источника, предварительно измерив уровень мощности дозы в точке измерения. Совмещенное гамма- и видео-изображение точечного источника гамма-излучения Cs-137 представлено на рисунке 10.

Также были проведены испытания системы в варианте установки на мобильный робототехнический комплекс. Положительные результаты исследований показали целесообразность включения системы визуализации в состав МРТК, предназначенных для поиска и изъятия источников гамма-излучения. При использовании системы визуализации существенно сокращалось время определения местоположения источника на местности, даже в условиях присутствия в кадре видеокамеры посторонних предметов.

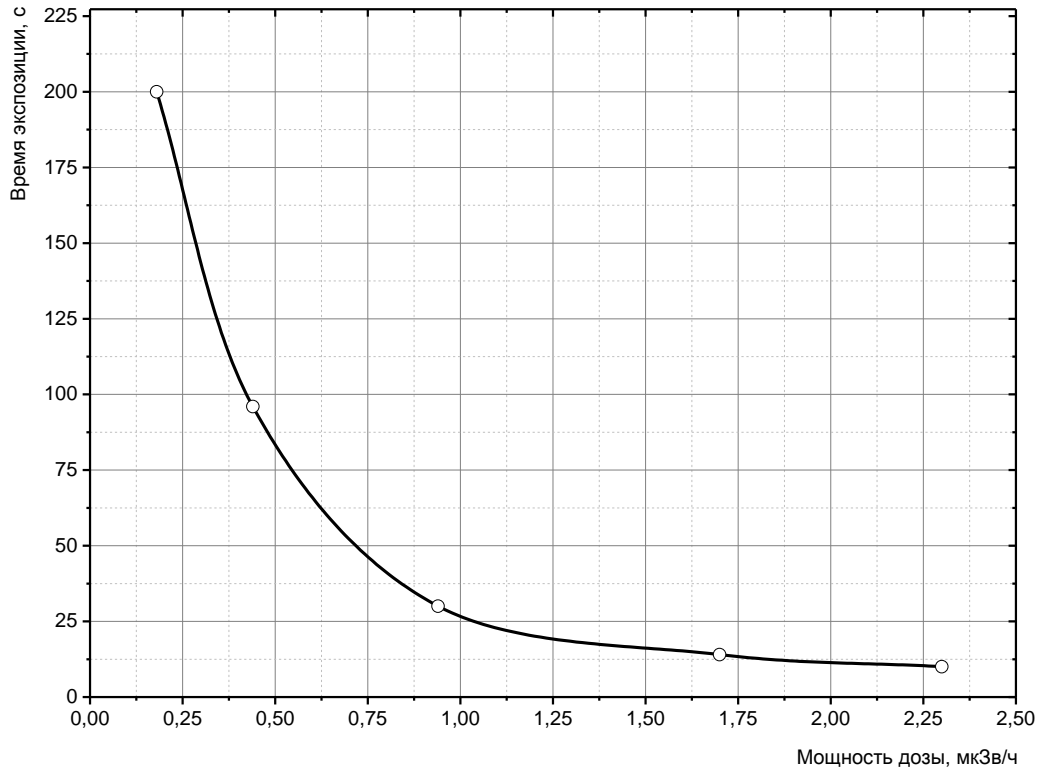


Рисунок 9 – Зависимость минимального времени экспозиции от мощности дозы, создаваемой источником Cs-137 в точке расположения системы визуализации

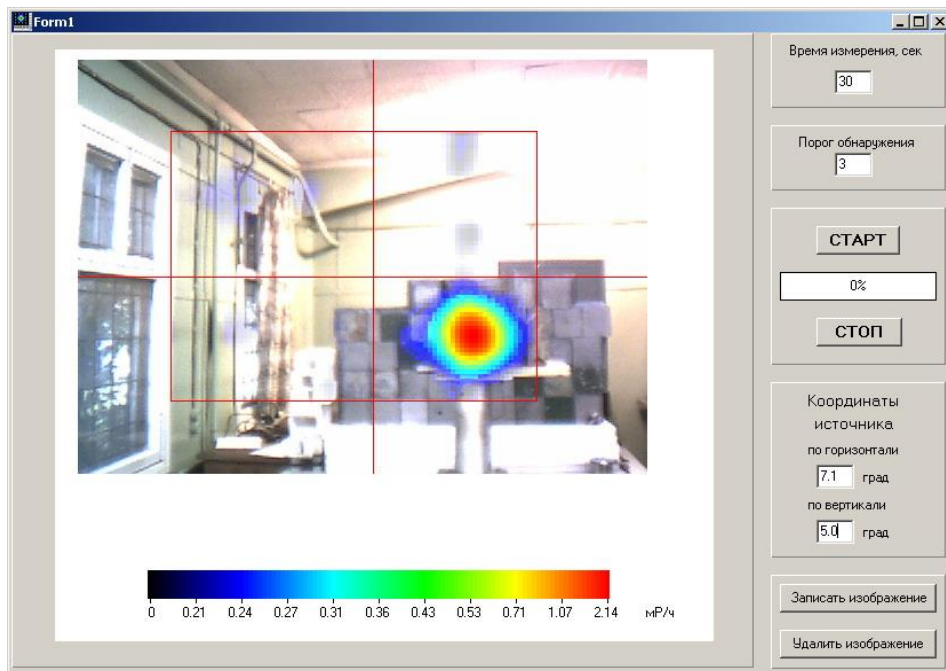


Рисунок 10 – Совмещенное видео и гамма-изображение, показывающее расположение источника излучения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в работе:

1. Разработана трехмерная компьютерная модель счетчика Гейгера-Мюллера СБМ21. Определены основные параметры счетчика, получена функция отклика на гамма-излучение в диапазоне углов поворота от 0 до 360 градусов относительно источника.
2. Разработана трехмерная компьютерная модель системы визуализации, включающая позиционно-чувствительный детектор, представляющий собой матрицу счетчиков СБМ21, кодирующую маску, корпус и элементы блока электроники. Получены функции отклика позиционно-чувствительного детектора на различные положения источника гамма-излучения, определено количество счетчиков в матрице.
3. Разработаны алгоритмы восстановления изображения источников гамма-излучения и совмещения изображений источников и кадров видеопоследовательности, полученных от телевизионной камеры. Произведена оценка расстояния до источника с целью минимизации систематической ошибки при совмещении гамма- и видеоизображений.
4. Определены технические характеристики системы визуализации в ходе экспериментальных исследований опытного образца. Получена зависимость минимального времени восстановления изображения источника гамма-излучения от мощности дозы, создаваемой источником в точке расположения системы.
5. Показана целесообразность включения системы визуализации в состав аппаратуры для поиска и изъятия источников гамма-излучения, устанавливаемой на мобильных робототехнических комплексах.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.

В рецензируемых журналах из списка ВАК

- 1 Власенко А.Н., В.Б. Аркадьев, О.А. Голубева. Аппаратура радиационного контроля для оснащения мобильных робототехнических комплексов // Информационно-измерительные и управляющие системы (вып. Интеллектуальные адаптивные роботы. Т.6. №1-2. 2011). М.:Радиотехника, 2011. Т.9. №8. С. 63-68.
- 2 Власенко А.Н. Портативная система визуализации источников гамма-излучения // Журнал «Аппаратура и новости радиационных измерений АНРИ», 2016. №1(84). С. 34-44.

Патенты

- 3 Малогабаритное устройство для визуализации источников гамма-излучения: пат. 2426151 Рос. Федерация. № 2010102783/28; заявл. 27.01.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 22.
- 4 Мультисенсорная система в составе мобильного робототехнического комплекса для поиска, локализации и идентификации

источников гамма-излучения: пат. 119896 Рос. Федерация. № 2011152347/28; заявл. 21.12.2011; опубл. 27.08.2012, Бюл. №24.

5 Способ поиска и получения координат источников гамма-излучения: пат. 2471205 Рос. Федерация. № 2011100561/28; заявл. 11.01.2011; опубл. 27.12.2012, Бюл. №36.

Публикации в других изданиях

6 Власенко А.Н., Малыхина Г.Ф. Метод экстремальной корреляции при определении координат источника гамма-излучения // Комплексная защита объектов информатизации: сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета, 2016. С. 34-39.

7 Власенко А.Н., Лапин О.Е. Малогабаритный прибор для визуализации гамма-источников в составе комплекса обнаружительной аппаратуры мобильного робота-разведчика // Экстремальная робототехника ЭР-2003. Материалы Второй научной молодежной школы научно-образовательного проекта «Интеллектуальные мехатронные и робототехнические системы». Пос. Дивноморское, Россия. 22-27 сентября 2003. С. 249-251.

8 Власенко А.Н., Лапин О.Е. Малогабаритный прибор для визуализации гамма-источников в составе мобильного робота-разведчика // Труды 15-ой научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». ЦНИИ РТК. г. С-Петербург, 6-7 апреля 2004г.

9 Власенко А.Н., Лапин О.Е., Ольков М.С. и др. Малогабаритный прибор для визуализации гамма-источников в составе комплекса обнаружительной аппаратуры мобильного робота-разведчика // Труды Международной конференции «Технические средства для предотвращения радиационного терроризма и ликвидации его последствий». ЦНИИ РТК. г. Санкт-Петербург. 18-20 октября 2004г.

10 Власенко А.Н., Лапин О.Е., Первишко А.Ф. и др. Портативная комбинированная система совмещения видео- и гамма-изображений источников излучения в составе мобильного робота-разведчика. // Экстремальная робототехника. Труды XXI международной научно-технической конференции (18-20 мая 2010 г., Москва). Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2010. С. 381.

11 Власенко А.Н., Аркадьев В.Б., Демченков В.П. и др. Системы радиационного контроля для предотвращения и ликвидации последствий актов радиационного терроризма // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды Четырнадцатой Всероссийской научно-практической конференции РАРАН (4-7 апреля 2011 г.). Том 5 «Экстремальная робототехника». Издание Российской академии ракетных и артиллерийских наук. Москва. 2011. С.146.

12 Власенко А.Н., Аркадьев В.Б., Лапин О.Е. Мультисенсорная система в составе мобильного робототехнического комплекса для поиска, локализации и идентификации источников гамма-излучения «Экстремальная робототехника» // Сборник докладов международной научно-технической

конференции (23-25 ноября 2011 г.) Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2011. С. 251-254.

13 Власенко А.Н., Аркадьев В.Б., Голубева О.А., Лапин О.Е., Первишко А.Ф. Аппаратура радиационного контроля для оснащения мобильных робототехнических комплексов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2011. № 5-6. С. 27-33.

14 Власенко А.Н., Лапин О.Е., Первишко А.Ф. и др. Портативная комбинированная система совмещения видео- и гамма-изображений источников излучения // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2012. № 7-8. С. 90-94.