

Нгуен Хунг Ван

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ
УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ В ТЕПЛОВИЗИОННЫХ
ПРИБОРАХ**

Специальность: 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и
комплексы

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2005

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор
Мосягин Г.М.

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
Жилкин А.М.
Кандидат технических наук
Тимашов А.П.

Ведущая организация: ФНПЦ ОАО «Геофизика-НВ», г. Москва

Защита диссертации состоится « 22 » июня 2005 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д212.141.11 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана

Автореферат разослан 18. 05. 2005 г.

Отзывы, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.11



Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

 Власов И.Б.

Актуальность темы исследования

Тепловизионные приборы (ТВП) относятся к оптико-электронным приборам, предназначенным для наблюдения объектов по их собственному тепловому излучению. Пороговая чувствительность современных ТВП достигает десятых и даже сотых долей градуса. ТВП существенно расширяют возможности зрения человека и, в связи с этим, находят широкое применение в промышленности, медицине, в военном деле и других областях.

ТВП непрерывно совершенствуются в направлении повышения их технических и эксплуатационных характеристик. Если раньше приборы этого типа представляли собою устройства с системами оптико-механического сканирования (ОМС), то в настоящее время в связи с достижениями в области разработки и производства матричных приёмников излучения (МПИ) серийно выпускаются ТВП, в которых не требуется использование систем ОМС. Более того, появились МПИ, которые обладают высокими пороговыми характеристиками и не требуют охлаждения.

Вместе с тем следует отметить, что в ТВП сканирующего типа в настоящее время достигается более высокая пороговая чувствительность и возможности их совершенствования ещё не исчерпаны. Особенностью ТВП сканирующего типа является то, что эффекты пространственной и временной дискретизации, сопровождающие процесс преобразования сигналов, приводят к появлению помех, которые могут существенно отличаться для различных законов сканирования и развёртки изображения, используемых в этих приборах. Поэтому одним из направлений улучшения качества изображения в ТВП может быть являться оптимизация параметров законов сканирования. Как показал анализ литературных источников исследованию этой проблемы не уделено достаточного внимания. В настоящей диссертации проведён сравнительный анализ прогрессивного и чересстрочного законов сканирования и развёртки изображений в ТВП с использованием теории трёхмерного преобразования сигналов и помех, а также с учётом свойств зрительного восприятия. Результаты сравнительного анализа могут быть использованы для обоснования закона сканирования и развёртки изображения в перспективных ТВП.

Применение МПИ в ТВП поставило новые задачи, которые должны решаться при их совершенствовании. Дело в том, что матричным фотоприёмным устройствам (МФПУ) или линейкам приёмников излучения (ПИ) свойственна неравномерность параметров его отдельных каналов. В результате разброса параметров могут появляться дополнительные помехи в выходном изображении. Для уменьшения этих эффектов в ТВП применяется схема коррекции неравномерности чувствительности отдельных каналов ПИ. Однако в ряде исследований был установлен тот факт, что выравнивание чувствитель-

ности отдельных каналов может приводить к увеличению дисперсии помех, обусловленных разбросом среднеквадратического отклонения (СКО) аддитивного шума элементов ПИ, что может привести к ухудшению чёткости изображений, и в связи с этим, этот алгоритм нуждается в дополнительном рассмотрении.

В последнее время цифровая обработка сигналов стала вытеснять «традиционную» (аналоговую) во многих прикладных областях. Интенсивно идёт процесс перехода тепловидения на цифровую основу. Несомненно, что использование цифровых методов обработки изображений в ТВП даёт мощный импульс совершенствованию этих приборов.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка методов улучшения качества изображения в ТВП на основе оптимизации законов сканирования и развёртки изображения, а также алгоритмов обработки сигналов.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1. Обоснование критерия оценки качества изображения ТВП, позволяющего учитывать влияние помех пространственной дискретизации на основе свойств зрительного восприятия изображения человеком-оператором.
2. Анализ преобразования сигналов и аддитивных помех в ТВП с прогрессивным и чересстрочным законами сканирования и развёртки изображения.
3. Разработка методики анализа помех пространственной дискретизации изображения с учётом временных соотношений законов сканирования и свойств зрительного восприятия.
4. Анализ помех, обусловленных разбросом параметров МПИ.
5. Анализ методов цифровой обработки изображений на современной элементной базе.
6. Проведение экспериментальных исследований для подтверждения основных теоретических положений диссертации.

Научная новизна работы:

Научная новизна включает в себя:

- методику сравнительного анализа ТВП с различными законами сканирования и развёртки изображения;
- методику анализа эффективности алгоритмов выравнивания чувствительности отдельных каналов ФПУ.

Практическая ценность:

1. Теоретически и экспериментально доказаны преимущества прогрессивного закона сканирования и развёртки изображения по сравнению с чересстрочным.

2. Разработанный метод анализа эффективности алгоритма выравнивания чувствительности отдельных каналов ФПУ может использоваться при синтезе алгоритмов обработки сигналов в ТВП с МПИ.
3. Предложенная практическая реализация цифровых методов обработки изображений на цифровых сигнальных процессорах позволяет значительно улучшать качество тепловизионных изображений.

Защищаемые положения

1. Методика рационального выбора закона и параметров сканирования и развёртки изображения в ТВП.
2. Методика анализа эффективности алгоритма выравнивания чувствительности отдельных каналов ФПУ.
3. Практическая реализация цифровых методов обработки изображений на цифровых сигнальных процессорах.

Методы исследований

Для решения поставленных задач использовались: теория вероятностей и математической статистики; корреляционная теория анализа случайных процессов; статическая теория принятия решений и оценок параметров сигналов на фоне помех; теория линейных систем; теория помех пространственной дискретизации изображения с учётом особенностей зрительного восприятия; методы цифровой обработки изображений.

Реализация результатов работы

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при разработке перспективных тепловизионных приборов.

Апробация результатов

Результаты диссертации обсуждались на кафедре «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Основные положения диссертации докладывались на 5-ой Международной научно-технической конференции // Оптическое приборостроение, Санкт-Петербург, 2004, а также на Международном научно-техническом симпозиуме «175 лет МГТУ им. Н.Э. Баумана // Образование через науку», Москва 2005.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она изложена на 126 страницах, содержит 25 иллюстраций и 4 таблицы. Библиография включает 103 наименования.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы его цель и основные задачи, приведены выносимые на защиту научные положения и дано краткое описание глав диссертации.

В первой главе проведён анализ типовых структурных схем ТВП. Изложены основные положения проблемы сравнительного анализа ТВП, их современное состояние и тенденции развития.

Рассмотрены основные критерия оценки качества ТВП: эквивалентная шуму освещённость на входном зрачке системы, критерий по эквивалентной шуму разности температур, минимальная обнаруживаемая разность температур, минимальная разрешаемая разность температур и критерий Дж. Джонсона. Эти критерия используются для предварительного расчёта при проектировании, проверке и испытании тепловизоров. Отмечено, что основным недостатком первых трёх критериев является то, что они не позволяют учесть свойства зрительной системы человека-оператора. Критерий МРТ и критерий Джонсона учитывают свойства зрительной системы человека-оператора, но не учитывают помех пространственной и временной дискретизации, сопровождающих процесс преобразования сигналов в ТВП.

Отмечено, что методика оценки качества ОЭП наблюдения по эквивалентным синусоидальным мирам основана на многоканальной модели зрительной системы человека оператора и позволяет производить анализ ОЭП наблюдения с учётом структуры наблюдаемого объекта, а также помех пространственной и временной дискретизации изображения. В многоканальной модели обнаружение и распознавание объектов являются результатом действия не одного пространственного фильтра, а множества фильтров, настроенных на разные пространственные частоты и ориентации. При этом, «воспринимаемое» отношение сигнала к шуму (ОСШ) (m, n) – ого канала имеет вид

$$\mu_{mn} = \mu_{\Pi} \sqrt{\frac{2\nu_k \tau_{зр} A_0}{A_{\Pi}}} \cdot |\tilde{L}'_H(\nu_m V_x, \nu_n)| \cdot |\tilde{H}_{\Pi c}(\nu_m, \nu_n)| \cdot |\tilde{H}_3(\nu_m V_x, \nu_n)|, \quad (1)$$

где: $\mu_{\Pi} = \frac{\Delta L_M}{\sigma_{\Pi}}$ – пиковое ОСШ, причём ΔL_M – максимальный перепад яркости в ТВИ, σ_{Π} – среднеквадратичное отклонение шума чувствительного элемента ПИ, ν_k – частота кадра, $\tau_{зр}$ – постоянная времени зрения человека, A_0 – площадь объекта прямоугольной формы размерами l_x, l_y в изображении, A_{Π} – площадь корреляции аддитивного шума, $\tilde{L}'_H(\nu_m V_x, \nu_n) = \tilde{L}_H(\nu_m V_x, \nu_n) / A_0$, причём $\tilde{L}_H(\nu_x, \nu_y)$ – нормированный спектр яркости объекта, $\tilde{H}_{\Pi c}(\nu_x, \nu_y)$ – передаточная функция (ПФ) приёмной

системы тепловизора, $\tilde{H}_3(\nu_x, \nu_y)$ – ПФ электронного тракта, $\nu_m = n/l_x$ и $\nu_n = n/l_y$ – пространственные частоты гармоник, V_x – скорость сканирования визирной оси по горизонтальному направлению.

Выделены математические выражения, позволяющие произвести расчёт вероятности обнаружения произвольных гармонических составляющих образов объектов при любых значениях пространственного распределения контраста этих объектов относительно фона.

Описаны две возможных структурных схем ТВП: с фокальной матрицей (ФМ) и с ОМС.

Изложена методика оценки качества изображения в тепловизионных приборах на основе многоканальной модели зрительной системы человека-оператора

Методика оценки качества изображения по эквивалентным синусоидальным мирам используется в диссертации при оценке эффективности алгоритмов обработки сигналов в тракте тепловизионных приборов.

Во второй главе проведено исследование влияния законов сканирования и развёртки изображения на качество ТВП. В частности, проведён анализ сигналов и аддитивных помех в ТВП с прогрессивным и чересстрочным законами сканирования и развёртки изображения, а также сравнительный анализ ТВП по оценке вероятности обнаружения тестовой миры.

Отмечено, что в ТВП с ФМ используется электронное сканирование, но изображение на ВКУ, формируется как и в ТВП с ОМС в процессе развёртки по определённому закону. Поэтому исследование и оптимизация закона сканирования и развёртки изображения важны как для тепловизоров с ОМС так и для тепловизоров с ФМ. В тепловизорах большое применение до сих пор нашёл чересстрочный закон. В тоже время, в современных мониторах специального назначения наметилась тенденция применения прогрессивного закона сканирования. В связи с этим сравнительный анализ ТВП с прогрессивным и чересстрочным законами сканирования и развёртки изображения представляет большой практический интерес. Целью такого сравнительного анализа является определение условий, при которых один из методов был бы предпочтительнее другого.

В работе использована методика преобразования сигналов в ТВП, позволяющая учесть пространственно-временную связь процессов сканирования и развёртки изображений. С принятием предположения об аддитивном свойстве полезных сигналов и помех их анализ проведён отдельно по общему подходу – нахождение выражений спектра сигналов (или помех) от переменных x , y , t , и затем вычисление трёхмерного Фурье-образа этих выражений. Выведено следующее выражение для пространственно-временного

спектра сигналов на выходе ТВП с прогрессивным законом сканирования и развёртки изображения

$$\tilde{L}_B(\nu_x, \nu_y, \nu) = \frac{\eta_c \eta_k S_B A_B}{T_y V_x T_k} \tilde{H}_B(\nu_x, \nu_y) \sum_{m,n=-\infty}^{\infty} \sum_{p,r=-\infty}^{\infty} \text{sinc}[\pi T_2 (\frac{p}{T_k} - \frac{m}{T_c})] \times \quad (2)$$

$$\times \text{sinc}(\pi r \frac{T_1}{T_k}) \tilde{U}_4(\nu_x + \frac{m}{V_x T_c}, \nu_y + \frac{r}{V_y T_k} - \frac{n}{T_y}, \nu - \frac{p+r}{T_k}),$$

где η_c – коэффициент использования сканирующего устройства по строке, η_k – коэффициент использования сканирующего устройства по кадру, $\tilde{H}_B(\nu_x, \nu_y)$ – ПФ ВКУ, S_B – коэффициентом передачи яркости видеоконтрольного устройства (ВКУ), A_B – эффективная площадь пятна рассеяния на мониторе ВКУ, T_k – время развёртывания одного полного кадра, T_y, T_c, T_1, T_2 – временные интервалы сканирования, $\tilde{U}_4(\nu_x, \nu_y, \nu)$ – пространственно-временной спектр сигнала, ограниченного в пределах поля сканирования.

Выражение для пространственно-временного спектра сигналов на выходе ТВП с чересстрочным законом сканирования и развёртки изображения имеет вид

$$\tilde{L}_B(\nu_x, \nu_y, \nu) = \frac{\eta_x^2 \eta_y^2 \eta_k^3 S_B A_B}{2 T_y V_x T_3} \tilde{H}_B(\nu_x, \nu_y) \sum_{m_1, n_1, p_1=-\infty}^{\infty} \sum_{m_2, n_2, p_2=-\infty}^{\infty} \sum_{m_3, n_3, p_3=-\infty}^{\infty} \text{sinc}[\pi T_4 (\frac{m_3}{T_k} - \frac{m_2}{T_3})] \times \quad (3)$$

$$\times \text{sinc}[\pi T_2 (\frac{m_2}{T_3} - \frac{m_1}{T_c})] \text{sinc}[\pi T_4 (\frac{n_3}{T_k} - \frac{n_2}{T_3})] \text{sinc}(\pi T_1 \frac{n_2}{T_3}) \times$$

$$\times \text{sinc}[\pi T_2 (\frac{p_3}{T_k} - \frac{p_2}{T_c})] \text{sinc}(\pi T_1 \frac{p_2}{T_c}) \text{sinc}[\pi V_{y2} T_4 (\frac{p_2}{V_{y2} T_c} + \frac{p_1}{T_y} - \frac{n_2}{V_{y1} T_3} - \frac{n_1}{2 T_y})] \times$$

$$\times \tilde{U}_4(\nu_x + \frac{m_1}{V_x T_c}, \nu_y + \frac{n_2}{V_{y1} T_3} - \frac{n_1}{2 T_y}, \nu - \frac{m_3 + n_3 + p_3}{T_k}).$$

В выражении (3) приняты такие же обозначения как было в выражении (2), кроме того, дополнительно обозначено: η_x – коэффициент использования сканирующего устройства по горизонтальному направлению x (по строке), η_y – коэффициент использования сканирующего устройства по вертикальному направлению y , T с индексами – временные интервалы сканирования.

В работе был проведён качественный анализ законов сканирования и развёртки изображения для стандарта чёрно-белого телевидения, принятого в России. Период следования кадров для прогрессивного и чересстрочного законов был одинаковый и равнялся $T_k = 0,04$ с. Для прогрессивного закона: $\eta_c = 0,813$, $\eta_k = 0,92$, а для чересстрочного закона: $\eta_x = 0,813$, $\eta_y = 0,92$,

$\eta_k = 0,96$. Постоянная времени зрения человека $\tau_{зр} = 0,1$ с. Пространственный период дискретизации изображения по вертикальному направлению $T_y = 50 \mu\text{м}$. Спектры сигналов на выходе рассматриваемых ТВП представлены на рис.1 и рис.2.

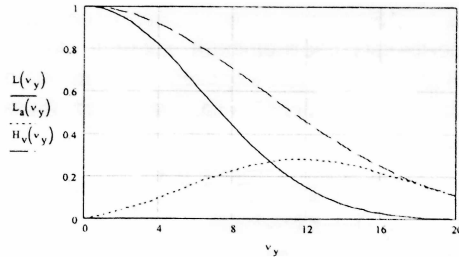


Рис. 1. График спектра сигналов на выходе ТВП, в котором реализуется прогрессивный закон сканирования и развертки изображения: $L(v_y)$ — основной спектр сигнала от обобщенного объекта, $L_a(v_y)$ побочный спектр сигнала от обобщенного объекта, смещенный на $1/T_y$, $H_v(v_y)$ - - - оптическая передаточная функция (ОПФ) ВКУ.

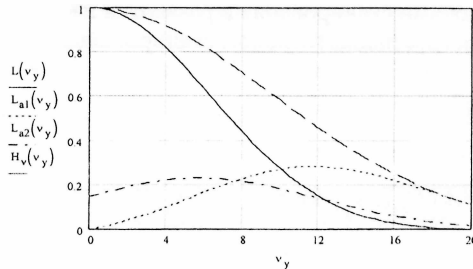


Рис. 2. График спектра сигналов на выходе ТВП, в котором реализуется чересстрочный закон сканирования и развертки изображения.

На рис. 2 приняты такие же обозначения как на рис 1, кроме того, обозначено: $L_{a2}(v_y)$ - - - побочный спектр сигнала от обобщенного объекта, смещенный на $1/2T_y$.

Отмечено, что принципиальное отличие ТВП с чересстрочным законом сканирования и развёртки изображения от ТВП с прогрессивным законом - наличие дополнительных составляющих спектра в направлении оси v_y , которые смещены относительно исходного спектра не только на значения $1/T_y$, но также на значения $1/2T_y$. Кроме того, показано, что в результате временной фильтрации зрительного восприятия и пространственной фильтрации,

осуществляемой в ВКУ, дополнительные составляющие спектра оказались соизмеримыми по амплитуде. Следовательно, в ТВП с чересстрочным законом сканирования и развёртки изображения возникают помехи пространственной дискретизации в более широком диапазоне пространственных частот, чем в ТВП с прогрессивным законом.

В этой главе проведён также анализ помех пространственной дискретизации с учётом временных соотношений законов сканирования и свойств зрительного восприятия, сравнение моделей ТВП по оценке вероятности обнаружения объектов. Для этих целей в качестве тест-объекта использовалась шпальная мира (см. рис.3).

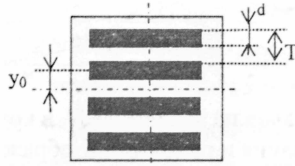


Рис. 3: Тестовая мира.

Получены выражения для определения дисперсии помех σ_{d0n}^2 , обусловленных пространственной дискретизацией для ТВП с прогрессивным и чересстрочным законами сканирования и развёртки изображения, а именно

- для ТВП с прогрессивным законом сканирования и развёртки изображения

$$\sigma_{d0n}^2 = \frac{B_{0n}^2}{2}, \quad (4)$$

$$B_{0n} = \frac{k_2}{l'_{xy}} A_1 \left\{ \tilde{H}_B(0, \nu_{y1}) \sin c[\pi l'_y (\nu_n - \nu_{y1})] + \right.$$

$$\begin{aligned} & + \frac{2}{\pi} \tilde{H}_B(0, \nu_{y1} - \nu_n) \tilde{H}_\Pi(0, \nu_n) \sin c[\pi l'_y (2\nu_n - \nu_{y1})] + \\ & \left. + \frac{2}{3\pi} \tilde{H}_B(0, \nu_{y1} - 3\nu_n) \tilde{H}_\Pi(0, 3\nu_n) \sin c[\pi l'_y (4\nu_n - \nu_{y1})] \right\}, \quad (5) \end{aligned}$$

причём

$A_1 = \sum_{l,p,r=-\infty}^{\infty} \sin c[\pi T_2(\frac{p}{T_k} - \frac{l}{T_c})] \sin c(\pi r \frac{T_1}{T_k}) \left| \tilde{H}_{3p}\left(\frac{p+r}{T_k}\right) \right|$ - коэффициент, характеризующий закон прогрессивного сканирования и развёртки изображения; $\tilde{H}_B(\cdot)$, $\tilde{H}_\Pi(\cdot)$, $\tilde{H}_{3p}(\cdot)$ - передаточная функция ВКУ, приёмной и зрительной системы соответственно; ν_n - пространственная частота мира; ν_{y1} - частота дискретизации изображения;

- для ТВП с чересстрочным законом сканирования и развёртки изображения дисперсия σ_{d0n}^2 определяется тоже по выражению (4), но амплитуда B_{0n} вычисляется по следующему выражению

$$B_{0n} = E_1 \left\{ \tilde{H}_B(0, \frac{\nu_{y1}}{2}) \sin c[\pi l_y'(\nu_n - \frac{\nu_{y1}}{2})] + \frac{2}{\pi} \tilde{H}_B(0, \frac{\nu_{y1}}{2} - \nu_n) \tilde{H}_\Pi(0, \nu_n) \sin c[\pi l_y'(2\nu_n - \frac{\nu_{y1}}{2})] + \right. \\ \left. + \frac{2}{3\pi} \tilde{H}_B(0, \frac{\nu_{y1}}{2} - 3\nu_n) \tilde{H}_\Pi(0, 3\nu_n) \sin c[\pi l_y'(4\nu_n - \frac{\nu_{y1}}{2})] \right\} + \\ + E_2 \left\{ \tilde{H}_B(0, \nu_{y1}) \sin c[\pi l_y'(\nu_n - \nu_{y1})] + \frac{2}{\pi} \tilde{H}_B(0, \nu_{y1} - \nu_n) \tilde{H}_\Pi(0, \nu_n) \sin c[\pi l_y'(2\nu_n - \nu_{y1})] + \right. \\ \left. + \frac{2}{3\pi} \tilde{H}_B(0, \nu_{y1} - 3\nu_n) \tilde{H}_\Pi(0, 3\nu_n) \sin c[\pi l_y'(4\nu_n - \nu_{y1})] \right\}, \quad (6)$$

причём E_1 , E_2 - коэффициенты, характеризующие закон чересстрочного сканирования и развёртки изображения для первой и второй побочной гармоники спектра изображения на выходе ТВП.

Проведённый в диссертации анализ показывает, что при одинаковых параметрах сканирования и развёртки, дисперсия помех пространственной дискретизации изображения в ТВП с чересстрочным законом сканирования оказывается в несколько раз больше, чем дисперсия помех в ТВП с прогрессивным законом. В частности, при частоте дискретизации изображения $1/T_y$ равной 20мм^{-1} , габаритном размере изображения l_y' равном $8T_y$ соотношение дисперсии равно 5.

Сравнительный анализ моделей ТВП по вероятности правильного обнаружения шпальной миры проведён по формуле, которая учитывает особенности сигналов и помех пространственной дискретизации для двух рассматриваемых моделей ТВП. Эта особенность вложена в коэффициент k_σ , характеризующий отношение дисперсии помех, обусловленных дискретизацией сигнала, и аддитивным шумом.

$$P_{\text{обн}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi(1+k_\sigma)}} \int_{\zeta_1}^{\infty} \exp \left[-\frac{(\zeta - \mu_{mn})^2}{2(1+k_\sigma)} \right] d\zeta, \quad (7)$$

$$\text{где } \zeta_1 = -\frac{\mu_{mn}}{k_\sigma} + \frac{\mu_{mn}}{k_\sigma} \sqrt{1+k_\sigma \left[1 + \frac{2(1+k_\sigma)}{\mu_{mn}^2} \ln \left(\Lambda_\Pi \sqrt{1+k_\sigma} \right) \right]},$$

причём $\Lambda_\Pi = 80...150$ - эмпирическое значение порогового отношения правдоподобия без учета помех обусловленных дискретизацией изображения.

Получены следующие выражения для вычисления k_σ

- для ТВП с прогрессивным законом сканирования и развёртки изображения

$$k_{\sigma} = \frac{\eta_c^2 \eta_k^2 \cdot A_1^2 \cdot \mu_{\Pi}^2 A_0 \tau_{3p} \nu_k}{A_{\text{ш}} |\tilde{H}_B(0, \nu_n)|^2} \left\{ \tilde{H}_B(0, \nu_{y1}) \sin c[\pi l'_y (\nu_n - \nu_{y1})] + \right. \\ \left. \frac{2}{\pi} \tilde{H}_B(0, \nu_{y1} - \nu_n) \tilde{H}_{\Pi}(0, \nu_n) \sin c[\pi l'_y (2\nu_n - \nu_{y1})] + \right. \\ \left. + \frac{2}{3\pi} \tilde{H}_B(0, \nu_{y1} - 3\nu_n) \tilde{H}_{\Pi}(0, 3\nu_n) \sin c[\pi l'_y (4\nu_n - \nu_{y1})] \right\}^2, \quad (8)$$

где A_0 - площадь изображения с размерами l'_x, l'_y ; $A_{\text{ш}}$ - площадь корреляции аддитивного шума на мониторе ВКУ;

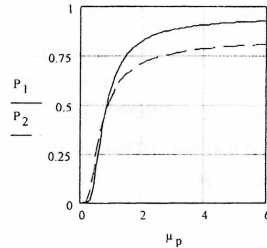
- для ТВП с чересстрочным законом сканирования и развёртки изображения

$$k_{\sigma} = \frac{\eta_x^4 \eta_y^4 \eta_k^6 A_0 \tau_{3p} \nu_k \mu_{\Pi}^2 E^2}{A_{\text{ш}} |\tilde{H}_B(0, \nu_n)|^2}, \quad (9)$$

причём E - коэффициент, характеризующий закон чересстрочного сканирования и развёртки изображения.

На основе этих выражений был проведён сравнительный анализ моделей ТВП по оценке вероятности правильного обнаружения. Зависимость вероятности правильного обнаружения шпальной миры от пикового значения отношения сигнала к шуму показана на рис.4.

Рис. 4. Зависимость вероятности правильного обнаружения шпальной миры от пикового ОСШ: P_1 (—) для ТВП с прогрессивным законом сканирования и развёртки изображения; P_2 (- - -) для ТВП с чересстрочным законом.



Из полученных зависимостей следует, что при одинаковых условиях и малых значениях ОСШ ($\mu_{\Pi} < 1$), вероятность правильного обнаружения двух моделей ТВП почти одинакова. По мере увеличения ОСШ модель ТВП с прогрессивным законом сканирования и развёртки изображения имеет более высокую вероятность правильного обнаружения, чем модель ТВП с чересстрочным законом сканирования. На пример, при ОСШ = 3 эта разница составляет 15%.

В третьей главе рассмотрены методы цифровой обработки изображений в ТВП и их практическая реализация на современных цифровых сигнальных процессорах.

Предложена методика анализа эффективности алгоритмов выравнивания параметров отдельных каналов ПИ. Отмечено, что в случае не выравнивания параметров, спектр геометрического шума состоит из двух следующих составляющих:

- составляющей, обусловленной разбросом СКО аддитивного шума, которая определяется по выражению

$$\bar{R}_{\text{ВШ}}(\nu_x, \nu_y, \nu) = k_B^2 \left| \tilde{H}_B(\nu_x, \nu_y) \right|^2 \frac{\sigma_{\text{ш}}^2 (1 + \rho_{\sigma 0})}{\nu_k \nu_{y1}} \left| \tilde{H}_3(\nu_x, \nu_y) \right|^2 \bar{\rho}_{\text{ш}}(\nu_x), \quad (10)$$

где $k_B = \frac{S_B A_B}{T_y V_x T_k}$; $\rho_{\sigma 0} = \frac{\sigma_{\sigma}^2}{m_{\sigma}^2}$ - нормированная на величину m_{σ}^2 выборочная

оценка дисперсии флуктуаций СКО шума МПИ, которая определяет разброс значений параметра $\frac{S_u}{D^*}$, центрированных относительно m_{σ} , причём S_u ,

D^* - интегральная чувствительность и удельная обнаружительная способность для каждого из N каналов ПИ соответственно; $\bar{\rho}_{\text{ш}}(\nu_x)$ - спектр мощности пространственного шума, который может быть получен при развертке изображения со скоростью V_x ; $\sigma_{\text{ш}}^2$ - дисперсия шума чувствительных элементов приёмника излучения (ПИ);

- составляющей, обусловленной неравномерностью чувствительности, которая определяется по выражению

$$\bar{R}_{BS}(\nu_x, \nu_y, \nu) = \frac{k_B^2 \left| \tilde{H}_B(\nu_x, \nu_y) \right|^2}{l_x l_y} \delta(\nu) \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left| \tilde{U}_3(\nu_x, \nu_y - \frac{m}{T_y}) \right|^2 \otimes \frac{\sigma_S^2}{m_S^2} \bar{\rho}_{\Delta}(\nu_y - \frac{m}{T_y}), \quad (11)$$

где $l_x \times l_y$ - размеры объектов наблюдения; $\delta(\nu)$ - дельта функция; σ_S - СКО

флуктуаций чувствительности элементов МПИ; $\left| \tilde{U}_3(\nu_x, \nu_y) \right|$ - модуль спектра полезного сигнала на выходе ПИ; $\bar{\rho}_{\Delta}(\nu_y)$ - спектр нормированной корреляционной функции помех, обусловленных флуктуациями значений чувствительности.

При выравнивании чувствительности каналов МПИ спектр геометрического шума состоит только из составляющей, обусловленной разбросом СКО аддитивного шума, и определяется по следующему выражению

$$\tilde{R}_{\text{вн}}(\nu_x, \nu_y, \nu) = k_{\text{в}}^2 \left| \tilde{H}_{\text{в}}(\nu_x, \nu_y) \right|^2 \frac{\sigma_{\text{ш}}^2 (1 + \rho_{\sigma 1})}{\nu_k \nu_{y1}} \left| \tilde{H}_3(\nu_x \nu_{y_x}) \right|^2 \tilde{\rho}_{\text{ш}}(\nu_x), \quad (12)$$

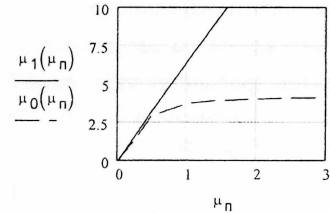
где $\rho_{\sigma 1} = \frac{\sigma_{\sigma 1}^2}{m_{\sigma 1}^2}$ – разброс значений выборочных оценок СКО параметра $\frac{\bar{S}_{\mu}}{D^*}$,

центрированных относительно $m_{\sigma 1}$, многоканального ПИ, причём $\bar{S}_{\mu}$ – среднее значение чувствительности многоэлементного ПИ.

Получена формула для вычисления значения ОСШ на выходе ТВП в случаях не выравнивания параметров каналов МПИ и при их выравнивании.

По предложенной методике был проведён анализ для конкретного образца ПИ типа ФК-12Р1, представляющий собой двухсот элементные линейки фоторезисторов на основе полупроводникового материала Ge:Hg и имеющий максимум чувствительности на длине волны $\lambda_M = 11$ мкм. Чувствительные элементы ПИ имели размеры $ab = 0,1 \times 0,1$ мм² при пространственном периоде $T_y = 0,2$ мм. Было определено ОСШ при наблюдении тепловизором изображения прямоугольной формы размером пяти пикселей. Зависимость ОСШ на выходе ТВП от пикового значения при и без выравнивания чувствительности элементов ПИ изображена на рис.5.

Рис. 5. Зависимость ОСШ на выходе ТВП от пикового значения: $\mu_1(\mu_n)$ – при выравнивании чувствительности элементов ПИ; $\mu_0(\mu_n)$ – для случая не выравнивания чувствительности элементов ПИ.



Из рис. 5 следует, что при значении пикового ОСШ $\geq 0,5$ ТВП с обработкой выравнивания чувствительности элементов ПИ имеет явное преимущество.

Рассмотрены также методы первичной обработки ТВИ, главная цель которой – исключение шумов и восстановление изображений для улучшения визуального восприятия. В частности, рассмотрена двухмерная медианная фильтрация (МФ) и её модификация. Отмечено, что по сравнению с методом линейной фильтрации медианный фильтр полезен при подавлении аддитивного шума, он особенно эффективен при удалении высокочастотных шумов, пиков, битовых сбоев, сбойных строк, царапин, пыли и других аномалий в изображении. Рассмотрен в частности, медианный вычитаемый фильтр (ВМФ), алгоритм осуществления которого имеет вид

$$\text{ВМФ} = f(m, n) - [f(m, n) - \text{МФ}\{f(m, n)\}] \quad (13)$$

Отмечено, что ВМФ может быть использован для обнаружения характерных точечных объектов на нестационарном инфракрасном (ИК) фоне.

Исходя из того, что задача повышения резкости изображения заключается в усилении его высокочастотных составляющих пространственного спектра, была предложена следующая модификация МФ для повышения резкости изображения

$$g(m,n) = f(m,n) + [f(m,n) - M\Phi\{f(m,n)\}], \quad (14)$$

где: $f(m,n)$ - исходное изображение;

$g(m,n)$ - изображение с повышенной резкостью.

Другой вариант повышения резкости изображения – использование экстремального фильтра вида

$$g(m,n) = \begin{cases} f_1 & \text{при } f_0 - f_1 < f_N - f_0, \\ f_N & \text{при } f_0 - f_1 > f_N - f_0, \end{cases} \quad (15)$$

где обозначено значение центрального отсчета входного сигнала $f(m,n)$ через f_0 , т.е. $f_1 \leq \dots \leq f_0 \leq \dots \leq f_N$.

Рассмотрена также возможность сглаживания ТВИ пространственно-частотной фильтрацией. Отмечен наиболее простой и эффективный метод - метод применения «скользящего окна».

В работе обсуждены вопросы практической реализации цифровых методов обработки ТВИ на цифровых сигнальных процессорах. Разработана структурная схема обобщенной системы цифровой обработки ТВИ. Эта схема приведена на рис. 6, где обозначено: Блок ФП – блок фотоприемников, АЭФ – антиэлайзинговый фильтр, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ЦСП – цифровой сигнальный процессор, ОЗУ – оперативное запоминающее устройство, СИНХР - синхронизатор, КМ – контроллер монитора, СИ – синхрипульсы.

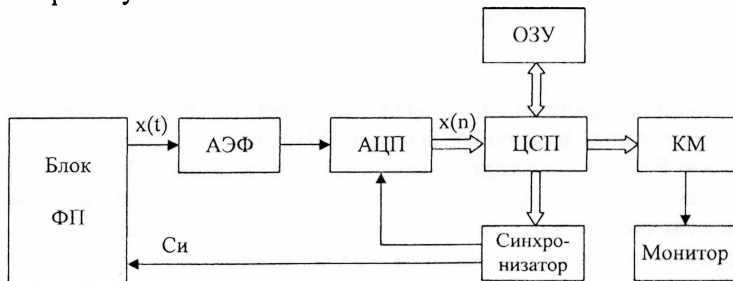


Рис. 6. Структурная схема обобщенной системы цифровой обработки тепловизионных изображений.

Анализ современных цифровых сигнальных процессоров показал, что одними из самых быстродействующих ЦСП на сегодняшний день являются процессоры фирмы Texas Instruments типа TMS320C6414 (TMS320C6415, TMS320C6416), которые вполне подходят для реализации рассмотренных выше алгоритмов цифровой обработки ТВИ в реальном масштабе времени.

Технические характеристики реализуемой предложенной системы ЦОИ на базе ЦСП типа TMS320C6416 (Texas Instruments) и АЦП типа AD9244 (Analog Devices):

- Пиковая производительность ЦСП, MIPS,.....3,6
- Тактовая частота ЦСП, МГц,.....600
- Объем внутренней памяти ЦСП, Мбит,.....8
- Разрядность АЦП, бит,.....14
- Максимальная частота дискретизация АЦП, МГц,.....65
- Объем внешнего ОЗУ, Мбит,.....32
- Потребляемая мощность, Вт, не более.....10
- Объем системы, литров, не более.....0,2

На основании изложенного можно констатировать, что современный уровень развития цифровой техники позволяет реализовывать сложные алгоритмы обработки сигналов в тепловизионных приборах в реальном масштабе времени.

В четвертой главе изложена методика проведения экспериментальных исследований качества изображения в ТВП с различными законами сканирования и развёртки.

Целью экспериментальных исследований является проверка методики сравнительного анализа законов сканирования, позволяющей учесть пространственно-временные соотношения при преобразовании сигналов в тракте тепловизоров, а также свойства зрительного восприятия изображений человеком-оператором.

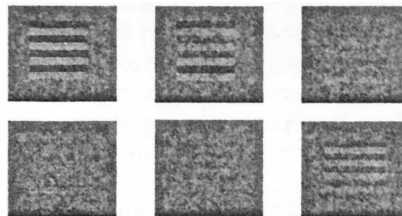
Была разработана программа, которая позволила моделировать изображения тест-объекта на экране персонального компьютера (ПК) с учётом прогрессивного и чересстрочного законов развёртки и случайной фазы пространственной дискретизации изображения. Программа была разработана в системе инженерных и научных расчётов Matlab-6.x и использовался ПК с процессором Pentium 4 и операционной системой Windows XP.

Программа моделирования изображения включает следующие модули:

- модуль создания исходного изображения штриховой миры;
- модуль набора изображений разных по отношению к началу отсчетов;
- модуль генерации случайных аддитивных помех;
- модуль создания видео файлов с прогрессивным и чересстрочным законами сканирования изображения;
- модуль создания видео файлов зашумленных изображений фона;
- модуль создания очередности предъявления видео файлов.

Эксперимент был проведён на кафедре РЛ-2 МГТУ им. Э.Н. Баумана. В качестве исходного изображения шпальной миры была использована мира с размерами 8 x 8 пикселей. Изображения миры при различных ее положениях относительно сетки дискретизации показаны на рис. 7.

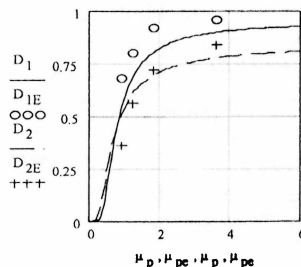
Рис. 7. Изображения миры при различных ее положениях относительно сетки дискретизации.



Частота исходов обнаружения шпальной миры, полученная при эксперименте для прогрессивного и чересстрочного законов развёртки изображения относительно ОСШ приведена в ниже таблице, а её зависимость относительно ОСШ μ_D показана на рис. 8.

СКО	μ_D	ПРОГРЕССИВНЫЙ ЗАКОН		ЧЕРЕССТРОЧНЫЙ ЗАКОН	
		Число ПО/НО	Частота	Число ПО/НО	Частота
5	3.6	48/2	0.96 (± 0.003)	42/8	0.84 (± 0.022)
10	1.8	45/5	0.90 (± 0.096)	35/15	0.70 (± 0.053)
15	1.2	41/9	0.82 (± 0.026)	28/22	0.56 (± 0.084)
20	0.9	33/17	0.66 (± 0.062)	17/33	0.34 (± 0.062)

Рис. 8. Результаты обнаружения шпальной миры: D_1 (—), D_2 (---) – расчётная зависимость вероятности обнаружения для прогрессивного и чересстрочного законов сканирования, D_{1E} (o o o), D_{2E} (+ + +) – их экспериментальные зависимости.



Из анализа кривых, представленных на рис.8 следует, что характер полученных экспериментальных зависимостей вероятности правильного обнаружения при чересстрочном и прогрессивном законах сканирования и развёртки согласуется с теоретическими зависимостями. Отличие между ними не превышает 7%.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1). На основе развитой в диссертации математической модели ТВП, учитывающей эффекты пространственной и временной дискретизации изображения, проведён сравнительный анализ прогрессивного и чересстрочного законов сканирования и развёртки изображения.

Получены математические выражения, позволяющие производить оптимизацию параметров тракта обработки сигналов в ТВП. Показано, что в ТВП с прогрессивным законом сканирования и развёртки изображения обеспечивается более высокое качество, чем в ТВП с чересстрочным законом.

2). Разработана методика анализа качественной оценки эффективности метода улучшения качества изображения путём выравнивания чувствительности каналов МПИ.

3). Предложена практическая реализация цифровых методов обработки телевизионного изображения на цифровых сигнальных процессорах в реальном масштабе времени.

4). Результаты выполненных экспериментальных исследований подтвердили правильность методики сравнительного анализа ТВП с различными законами сканирования и развёртки изображения, а также справедливость теории помех пространственной дискретизации изображений, развитой в диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих научных работах:

1. Колочкин В.Я., Мосягин Г.М., Ван Н.Х. Математическая модель информационных оптико-электронных приборов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. – 2005. – №1. – С. 3 – 18.
2. Колочкин В.Я., Мосягин Г.М., Ван Н.Х. Метод математического моделирования оптико-электронных приборов наблюдения // Прикладная оптика: Сборник трудов 5-ой Международной конференции. Оптическое приборостроение. – СПб., 2004. – Т.3. – С. 94.
3. Колочкин В.Я., Мосягин Г.М., Ван Н.Х. Анализ оптико-электронных приборов наблюдения с различными законами сканирования и развёртки // Тезисы докладов Международного научно-технического симпозиума 175 лет МГТУ им. Н.Э. Баумана. Образование через науку. – Москва, 2005. – С. 323

У1732160 Нгуен Хунг Ван Исследование и разработка методов улучшения качества изображения в тепловизионных приборах 2005	0-00
--	-------------

У1732160

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

Подписано к печати *18.../ 25.../ 2005*. Тир. 50 экз. Заказ. № *149*.

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Адрес: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5