

УДК 621.397

Обработка слабоконтрастных двухдиапазонных тепловизионных изображений

Л. И. Горелик, В. Н. Соляков, Д. Ю. Тренин

Предложен способ обработки слабоконтрастных двухдиапазонных тепловизионных изображений, позволяющий проводить синтез без потери полезной информации. Проведено математическое моделирование работы аппаратуры, функционирующей по описанному алгоритму. Приведены и описаны результаты экспериментальной проверки работы макета двухдиапазонного тепловизионного прибора.

PACS: 42.30.Va

Ключевые слова: тепловизор, изображение, контраст, математическое моделирование.

Введение

Инфракрасная область спектра интересна тем, что основная доля теплового излучения окружающих нас тел приходится на инфракрасный участок. Это обстоятельство толкало развитие инфракрасной техники на решение задач пассивного обнаружения и оптического измерения температуры объектов в промышленности, медицине, научных исследованиях и военном деле.

Тепловидение является одним из активно развивающихся направлений инфракрасной техники. Учитывая то, что различные природные и искусственные источники имеют не только разную температуру, но и коэффициенты излучения, наблюдаемая в инфракрасном диапазоне излучения сцена представляет собой массив объектов разной яркости. Хотя бы один раз в сутки наступает момент, когда сигналы от объектов и фонов сцены приближаются друг к другу. В этом случае тепловой контраст становится малым и очень часто изменяет свой знак по абсолютной величине. Такие явления могут происходить и при наблюдении различных промышленных процессов, в которых сигналы как от объектов, так и от фонов очень велики, но разница между ними мала.

Обычно тепловизионные изображения являются слабоконтрастными и для их анализа требуются определенные навыки оператора. Часто контраст между объектами в наблюдаемой сцене меняет свой знак на противоположный (при остывании или нагревании объектов), в процессе чего неизбежно определенное время радиационный контраст между объектами равен нулю и объекты становятся неразличимы между собой. Для преодоления эффекта нулевого радиационного контраста в тепловизионную аппаратуру необходимо вводить дополнительные модули обработки информации.

Для того чтобы повысить информационность тепловизионной системы, уже давно используется способ разбиения спектрального диапазона работы тепловизионного прибора на поддиапазоны. Очевидно, что в случае достаточной чувствительности прибора в поддиапазонах, контраст в определенных спектральных диапазонах повышается. По этой причине многодиапазонное тепловидение естественно более информативно, и основные характеристики тепловизионного прибора, такие как обнаружение и опознавание объектов существенно повышаются при работе в более узких спектральных диапазонах.

Для повышения эффективности таких многодиапазонных приборов представляет интерес разработка новых алгоритмов, которые позволят представить регистрируемую в поддиапазонах разницу в наиболее удобном виде.

Для этого в статье предлагается введение понятия *комбинированного контраста*. Такой критерий позволяет исключить уменьшение контраста за счет исключения отрицательных разностей сигналов, полученных в поддиапазонах. В этом случае суммирование проводится для разностей, взятых по абсолютной величине.

Горелик Леонид Иосифович, главный специалист¹.
Соляков Владимир Николаевич, начальник НТЦ¹.
Тренин Дмитрий Юрьевич, инженер 1-й категории^{1,2}.
¹ГНЦ РФ ФГУП «НПО "Орион"». Россия, 111402, Москва, ул. Косинская, 9. Тел. (499) 374-48-84. E-mail: opus48@yandex.ru
²Московский физико-технический институт. Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2010 г.

Основные положения комбинированного контраста

Рассмотрим наиболее простую модель оптико-электронной системы, описывающую связь выходного сигнала U со световым потоком, поступающим на ее вход.

Сигнал U на выходе тепловизионной системы, пропорциональный световому потоку от любого элемента пространства предметов, равен:

$$U = c \int_{\Delta\lambda} R(\lambda, T) \tau_a(\lambda) \varepsilon(\lambda) S(\lambda) d\lambda,$$

где $R(\lambda, T)$ — спектральная плотность мощности излучения АЧТ;

$\tau_a(\lambda)$ — спектральная прозрачность атмосферы;

$\varepsilon(\lambda)$ — спектральный коэффициент излучения;

$S(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность элемента приемного тракта тепловизионной системы;

c — константа, не зависящая от λ .

Известно, что радиационный контраст между двумя элементами пространства предметов равен

$$K = \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2}.$$

В случае, когда разница в сигналах в заданном спектральном интервале приближается к нулю, радиационный контраст K также приближается к нулю. Естественно, что в других спектральных интервалах разница в сигналах может сильно отличаться от нуля.

Для более наглядного изложения предлагаемого метода обработки многоспектральных тепловизионных изображений представим следующую модель: пусть в наблюдаемой сцене существует всего один объект с температурой T_0 на абсолютно равномерном фоне с температурой T_f и с различными спектральными коэффициентами излучения ε_0 и ε_f , соответственно. Предположим также, что поглощением излучения атмосферой можно пренебречь. Дополнительно примем, что спектральная чувствительность всех элементов системы одинакова и не зависит от длины волны. Это позволит не учитывать на этом этапе функции поглощения и чувствительности. В этом случае световой поток на входе системы P_0 от объекта во всем спектральном диапазоне $\Delta\lambda$ будет пропорционален:

$$P_0 \cong \int_{\Delta\lambda} R(\lambda, T_0) \varepsilon_0(\lambda) d\lambda.$$

Световой поток P_f от фона во всем спектральном диапазоне работы системы $\Delta\lambda$ будет:

$$P_f \cong \int_{\Delta\lambda} R(\lambda, T_f) \varepsilon_f(\lambda) d\lambda.$$

В случае работы тепловизионной системы в области линейности сигналы на ее выходе пропорциональны падающим потокам, поэтому можно записать выражение для радиационного контраста K между объектами и фоном следующим образом:

$$K = \frac{\int_{\Delta\lambda} R(\lambda, T_0) \varepsilon_0 d\lambda - \int_{\Delta\lambda} R(\lambda, T_f) \varepsilon_f d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} R(\lambda, T_0) \varepsilon_0 d\lambda + \int_{\Delta\lambda} R(\lambda, T_f) \varepsilon_f d\lambda}.$$

Изменяя температуру объекта T_0 таким образом, чтобы разница сигналов от объекта и от фона уменьшалась, можно добиться полного исчезновения объекта на фоне в тепловизионном изображении.

Разделим спектральный диапазон $\Delta\lambda$ на два поддиапазона $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$, например с помощью интерференционных фильтров. Тогда потоки на входе системы в этих поддиапазонах от объекта и фона будут P_a^1, P_a^2, P_f^1 и P_f^2 , соответственно, согласно предположению о нулевой разности сигналов в широком спектральном диапазоне можно написать

$$(P_a^1 + P_a^2) - (P_f^1 + P_f^2) = 0.$$

Перегруппируем члены:

$$(P_a^1 - P_f^1) + (P_a^2 - P_f^2) = 0.$$

Это равенство возможно либо когда $(P_a^1 - P_f^1) = (P_a^2 - P_f^2) = 0$ (случай 1), либо когда $(P_a^1 - P_f^1) = -(P_a^2 - P_f^2)$ (случай 2). В первом случае это означает, что в поддиапазонах разницы сигналов так же, как и в широком диапазоне, отсутствуют, т. е. в данной тепловизионной системе объект и фон идентичны. Второй случай означает, что знаки контрастов в первом и во втором поддиапазонах противоположны, причем разности сигналов между объектом и фоном в поддиапазонах $(P_a^1 - P_f^1)$ и $(P_a^2 - P_f^2)$ могут принимать и не близкие к нулю значения.

Подобно тому, как при вычислении радиационного контраста в одном спектральном диапазоне происходит сравнение величин зарегистрированных сигналов (для этого они неявным образом располагаются на числовой прямой), так и для

сравнения пар чисел, характеризующих зарегистрированные сигналы в двух поддиапазонах от обоих элементов сцены (P_a^1, P_a^2) и (P_f^1, P_f^2) , естественно расположить их на числовой плоскости. Соответственно, для *комбинированного* контраста между этими величинами предлагается использовать следующее определение.

Контраст между двумя элементами сцены, зарегистрированные сигналы от которых в двух поддиапазонах представляются векторами $\vec{P}_a(P_a^1, P_a^2)$ и $\vec{P}_f(P_f^1, P_f^2)$, равен отношению длины вектора разности $\vec{P}_a - \vec{P}_f$ к длине вектора суммы $\vec{P}_a + \vec{P}_f$:

$$K = \frac{\|\vec{P}_a - \vec{P}_f\|}{\|\vec{P}_a + \vec{P}_f\|}.$$

Эта формула по существу является основой предлагаемого подхода обработки сигналов в тепловизионной системе. Подбирая различные виды вычисления длины вектора в пространстве сигналов (определяя для этого пространства метрику), можно построить различные способы синтеза изображений.

Такой подход позволяет "увидеть" наличие объектов в наблюдаемой сцене за счет суммирования разностей сигналов в поддиапазонах, и представление этой разности *только в виде положительных величин*. При условии, конечно, что эти разности являются измеримыми. Здесь стоит отметить, что подразумевается под понятием "измеримые разности". Дело в том, что в любой тепловизионной системе происходят процессы, вызывающие флуктуации (шумы) в величинах регистрируемых сигналов. Если разность сигналов не превышает величины шума, то эти сигналы считаются идентичными. Таким образом, предлагаемый подход тем более ценен, чем ближе тепловизионная система приближается к теоретическому пределу (системы, работающие в режиме ограничения фоном).

Допустим, что тепловизионная система работает в n спектральных поддиапазонах. В этом случае, принимая во внимание описанный выше подход, функция контраста принимает тот же вид

$$K = \frac{\|\vec{P}_a - \vec{P}_f\|}{\|\vec{P}_a + \vec{P}_f\|},$$

но величины \vec{P}_a и \vec{P}_f являются векторами в n -мерном пространстве сигналов.

Структура полученной функции контраста такова, что информация от любого дополнительного

поддиапозона его только повышает, а сам контраст всегда остается положительным, так как все разности в поддиапазонах берутся по абсолютной величине.

Математическая проверка алгоритмов

Для демонстрации применимости предлагаемого подхода к обработке изображений, была смоделирована работа гипотетической тепловизионной системы. В качестве исходных данных было взято известное изображение (рис. 1).

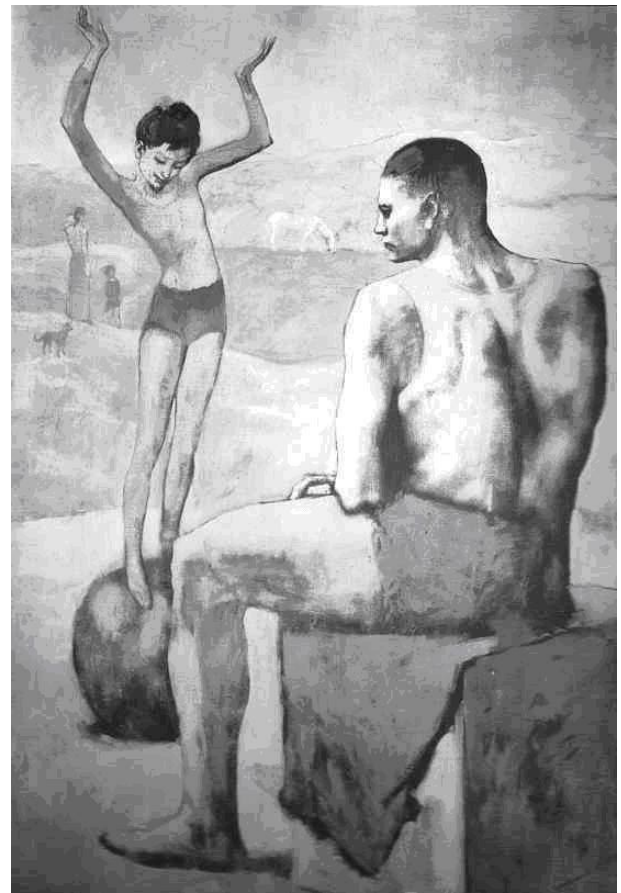


Рис. 1. Исходное изображение сцены

В качестве необходимых для моделирования параметров были выбраны следующие характеристики:

спектральный диапазон чувствительности системы 3—5 мкм;

возможность разбиения на четыре более узких поддиапозона (3—3,5; 3,5—4; 4—4,5 и 4,5—5 мкм);

относительная спектральная чувствительность приемного устройства постоянна и равна единице для всех длин волн в диапазоне 3—5 мкм;

пропускание атмосферы в расчетах не учитывалось;

на выходе системы сигналы представлялись в цифровом виде с разрядностью 8 бит (диапазон значений лежит в пределах 0—255);

при регистрации изображений в поддиапазонах настройки системы изменялись для выбора оптимального диапазона регистрируемых сигналов (производилось усиление выходного сигнала).

Для представления исходного изображения в виде тепловизионного оно было "перекрашено". Для этого соответствующие основные светотехнические признаки в инфракрасном диапазоне были приписаны следующим объектам сцены: девочке, юноше, шару, кубу, элементам одежды и фону-песку. Такими признаками являются: спектральный коэффициент излучения и температура объектов сцены.

Спектральные коэффициенты излучения объектов сцены представлены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость спектральных коэффициентов от длины волны

| λ, мкм | Спектральный коэффициент излучения | | | | |
|--------|------------------------------------|------|------|------|--------|
| | Песок | Куб | Шар | Кожа | Одежда |
| 3,0 | 0,70 | 0,85 | 0,75 | 1,00 | 0,60 |
| 3,2 | 0,81 | 0,83 | 0,73 | 0,92 | 0,54 |
| 3,4 | 0,78 | 0,81 | 0,71 | 0,84 | 0,72 |
| 3,6 | 0,65 | 0,79 | 0,69 | 0,76 | 0,39 |
| 3,8 | 0,77 | 0,77 | 0,67 | 0,68 | 0,35 |
| 4,0 | 0,78 | 0,75 | 0,65 | 0,6 | 0,31 |
| 4,2 | 0,81 | 0,73 | 0,64 | 0,68 | 0,27 |
| 4,4 | 0,78 | 0,71 | 0,65 | 0,76 | 0,24 |
| 4,6 | 0,71 | 0,69 | 0,65 | 0,84 | 0,25 |
| 4,8 | 0,67 | 0,67 | 0,63 | 0,86 | 0,25 |
| 5,0 | 0,63 | 0,65 | 0,63 | 0,88 | 0,25 |

Эти же коэффициенты представлены в графическом виде на рис. 2.

Температура кожи людей была выбрана равной 305 К (32 °С).

Цель первой части моделирования — построение изображения сцены, зарегистрированного в диапазоне 3—5 мкм с нулевым контрастом между любой парой объектов сцены. В этом случае считается, что сигнал на выходе системы максимален и в сделанных выше предположениях имеет значение 255.

Для этого подобраны такие температуры объектов, чтобы регистрируемые сигналы в диапазоне 3—5 мкм были одинаковыми:

$$\int_3^5 R(\lambda, T_1) \varepsilon_1(\lambda) d\lambda = \int_3^5 R(\lambda, T_0) \varepsilon_0(\lambda) d\lambda,$$

где T_1 — температура объекта сцены;

$\varepsilon_1(\lambda)$ — его спектральный коэффициент излучения;

T_0 — температура кожи человека;

$\varepsilon_0(\lambda)$ — спектральный коэффициент излучения кожи.

Расчеты при заданных выше параметрах и температуре кожи человека 305 К дали следующие результаты:

- температура песка 307,5 К;
- температура куба 308,5 К;
- температура шара 311 К;
- температура одежды 335,5 К.

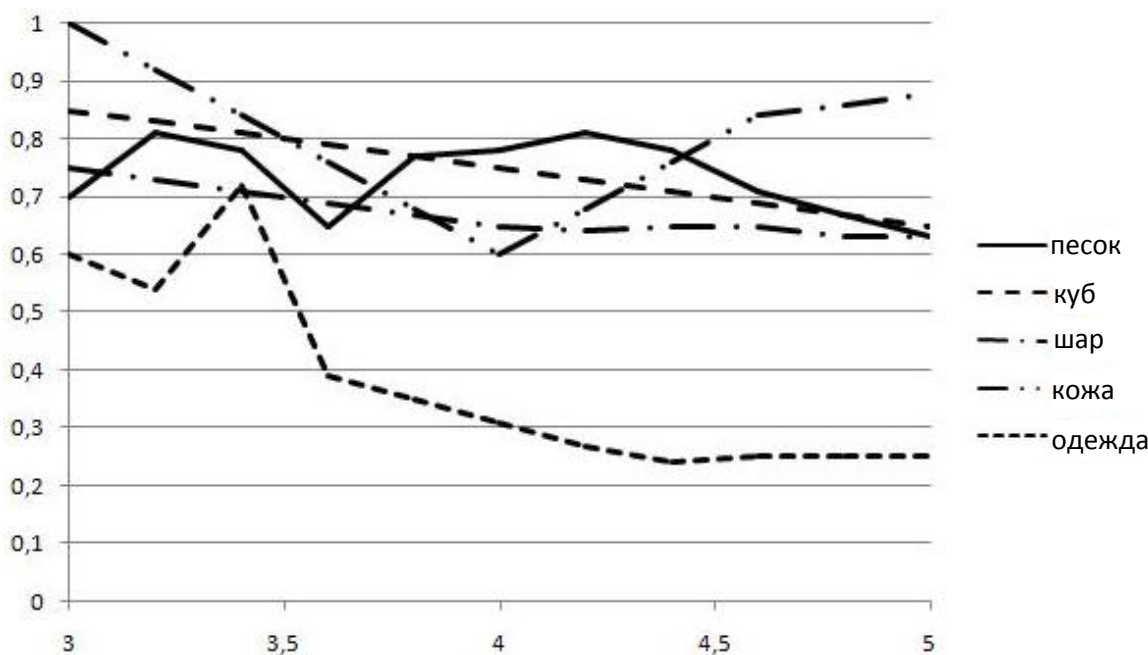


Рис. 2. Спектральные коэффициенты излучения объектов сцены

При таких значениях температур объектов изображение сцены в диапазоне 3—5 мкм при сделанных выше предположениях имеет вид равномерно засвеченного прямоугольника.

Изображения той же сцены в более узких спектральных диапазонах указанных выше не обладают недостатком нулевого контраста между всеми объектами. Для моделирования этих изображений были вычислены значения величин падающих потоков от объектов во всех спектральных поддиапазонах. В табл. 2 представлены значения отношения сигналов в поддиапазонах к полному сигналу, зарегистрированному во всем рабочем диапазоне.

Видно, что в поддиапазонах объекты отличаются друг от друга. Важной информацией из этой таблицы является то, что контраст между объектами в поддиапазонах может быть положительным (например, песок и кожа в поддиапазоне 3,5—4 мкм) или отрицательным (песок и кожа в поддиапазоне 4,5—5 мкм), но может быть и нулевым (песок и кожа в поддиапазоне 3—3,5 мкм).

Используя информацию из табл. 2, можно получить изображения сцены, полученные в поддиапазонах. В табл. 3 приведен результат расчета сигналов на выходе системы для объектов сцены в поддиапазонах.

Такие изображения представлены на рис. 3.

Таблица 2

Значения долей сигналов в поддиапазонах

| Поддиапазон, мкм | Доля сигналов в поддиапазоне | | | | |
|------------------|------------------------------|-------|-------|-------|--------|
| | Песок | Куб | Шар | Кожа | Одежда |
| 3—3,5 | 0,043 | 0,047 | 0,046 | 0,043 | 0,060 |
| 3,5—4 | 0,133 | 0,142 | 0,136 | 0,109 | 0,129 |
| 4—4,5 | 0,323 | 0,302 | 0,296 | 0,264 | 0,270 |
| 4,5—5 | 0,501 | 0,509 | 0,522 | 0,584 | 0,541 |

Таблица 3

Значения сигналов на выходе системы в поддиапазонах

| Поддиапазон, мкм | Сигналы в поддиапазоне | | | | |
|------------------|------------------------|-----|-----|------|--------|
| | Песок | Куб | Шар | Кожа | Одежда |
| 3—3,5 | 0 | 60 | 45 | 0 | 255 |
| 3,5—4 | 185 | 255 | 209 | 0 | 154 |
| 4—4,5 | 255 | 164 | 138 | 0 | 26 |
| 4,5—5 | 0 | 24 | 64 | 255 | 123 |

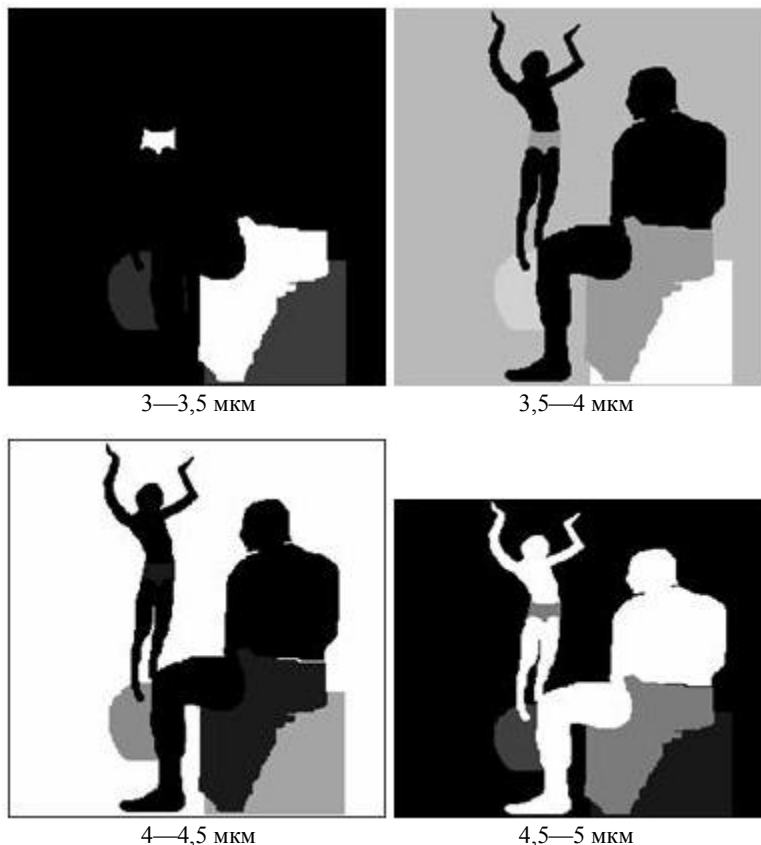


Рис. 3. Тепловизионные изображения в поддиапазонах

Вычисление комбинированного контраста дает следующие результаты:

- контраст между кубом и песком 0,216;
- контраст между кубом и шаром 0,119;
- контраст между кубом и кожей 0,927;
- контраст между кубом и одеждой 0,488.

Принимая сигнал от куба на выходе системы равным 255, вычисляем сигналы для всех остальных объектов сцены:

$$U = 255 \frac{1 - K}{1 + K}.$$

Итоговое изображение представлено на рис. 4.



Рис. 4. Изображение сцены с положительным контрастом

Экспериментальная проверка алгоритма

В качестве экспериментальной проверки применимости предложенного метода и разработанных на его основе алгоритмов была проведена работа по сбору базы данных двухдиапазонных тепловизионных изображений. В качестве объектов интереса были выбраны следующие объекты:

- городская площадь с автотранспортом;
- резцы для обработки металлов и бутылка воды;
- городской пейзаж с присутствующими трубами ТЭЦ и домами.

ТЭЦ и домами.

Для макетирования двухдиапазонной тепловизионной системы были выбраны тепловизионные камеры, чувствительные в диапазонах 3—5 мкм и 8—12 мкм с форматом матриц 256×256 мкм, разработанные ФГУП «НПО "Орион"».

Первый эксперимент состоял в фотографировании городской площади (рис. 5 слева). Исходные изображения в диапазонах 3—5 и 8—12 мкм представлены на рис. 5 в центре и справа, соответственно. Для обработки по предложенному методу в качестве опорного вектора для вычисления комбинированного контраста была выбрана область, содержащая участки земли. Итоговое изображение было инвертировано так, чтобы яркость земли была минимальна (рис. 6).



Рис. 5. Городская площадь



Рис. 6. Итоговое изображение площади

На итоговом изображении отчетливо видны все области, соответствующие участкам земли. Все остальные объекты сцены имеют значительный контраст относительно земли.

Следующий пример, иллюстрирующий работу метода, включает в себя в качестве объектов резец по металлу, металлическую трубку и бутылку с водой. В качестве сигнала сравнения была выбрана точка на трубке. Исходные тепловизионные изображения и итоговое изображение сцены представлены на рис. 7.

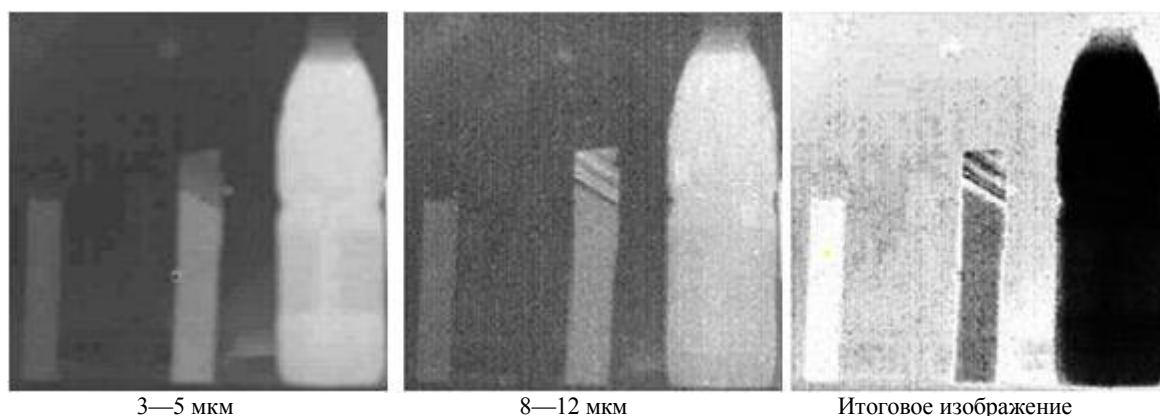


Рис. 7. Исходные и синтезированное изображения

На итоговом изображении контраст между всеми исследуемыми объектами значительно больше, чем на исходных.

Заключение

Предложенный критерий комбинированного контраста и разработанный алгоритм многоспектральной обработки сигнала показали положительные результаты формирования двухдиапазонного тепловизионного изображения в случае, когда один из диапазонов не дает удовлетворительного изображения сцены. Эффективность алгоритма проверена на реальных тепловизионных изображениях, полученных с помощью тепловизионных приборов и математического моделирования работы многодиапазонного прибора.

В ходе проведения исследований по обработке тепловизионных изображений с малым радиационным контрастом было показано, что вид синтезированного изображения зависит от выбора сигнала сравнения.

Качественные оценки, полученные при сравнении исходных и синтезированных изображений, показали, что многоспектральная обработка повышает вероятность опознавания объекта в случае, если хотя бы в двух спектральных поддиапазонах существует измеряемая разность в сигналах между объектом и фоном.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ №10-07-00253).

Литература

1. Горелик Л. И., Полесский А. В., Сорокин А. Н., Тренин Д. Ю. Экспериментальная апробация алгоритма обработки слабоконтрастных тепловизионных изображений в двухдиапазонной системе // Тр. 51-й науч. конф. МФТИ. — г. Долгопрудный, 2008. С. 224.
2. Blair Barbour, Michael W. Jones. Enhanced Infrared Sensor/Imaging // SPIE. V. 3061.
3. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. — М.: Мир, 1988.
4. Волф У., Цисис Г. Справочник по инфракрасной технике. Т. 1. — М.: Мир, 1995.
5. Ллойд Дж. Системы тепловидения. — М.: Мир, 1978.
6. Хадсон Р. Инфракрасные системы. — М.: Мир, 1972.

Low contrast dual-band infrared image processing

L. I. Gorelik¹, V. N. Solyakov¹, D. Yu. Trenin^{1,2}

¹Orion Research-and-Production Association, 9 Kosinskaya str., Moscow, 111402, Russia

E-mail: opus48@yandex.ru

²Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

A new method of processing of dual-band thermal images with low contrast is described. This method allows synthesizing thermal images without information losses. Mathematical simulation of

operation of a devise with such principle of synthesizing was performed. Description and results of experimental operating of a dual-band thermal imaging system prototype are given.

PACS: 42.30.Va

Keywords: thermal imager, image, contrast, mathematical modeling.

Bibliography — 6 references.

Received November 22, 2010