

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического приборостроения

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Сборник научных трудов

Под редакцией доктора технических наук
профессора *Б. С. Тимофеева*

Санкт-Петербург
2000

УДК 621. 37/39
ББК 32.84
Р15

Р15 Радиотехнические и телевизионные системы: Сб. науч. тр. / Под ред. Б. С. Тимофеева; СПбГУАП. СПб., 2000. 178 с.; ил. ISBN 5-8088-0045-5

В сборнике представлены статьи, посвященные решению проблем восприятия визуальной информации; обработки сигналов в телевизионных, видеотехнических и радиотехнических системах; оценки качества и повышения эффективности информационных систем. В части материалов рассматриваются вопросы, касающиеся разработки телевизионных устройств для системы мониторинга акватории.

Приведенные в статьях результаты исследований могут быть полезны широкому кругу специалистов, связанных с разработкой и эксплуатацией телевизионного оборудования, а также научным работникам и аспирантам.

Рецензенты:

кафедра телевидения и видеотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. Бонч-Бруевича; кандидат технических наук доцент *Н. В. Лысенко*

Редакционная коллегия

Б. С. Тимофеев (гл. редактор), Н. Н. Красильников, О. С. Астратов, Л. Д. Вилесов, В. Н. Филатов (отв. секретарь)

ISBN 5-8088-0045-5

© Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения,
2000

ВВЕДЕНИЕ

Последнее десятилетие века характеризуется огромными достижениями в области информатики: через глобальную сеть Internet и персональный компьютер информация, накопленная человечеством за тысячелетия, приходит в каждый дом. Необычайно актуальными стали исследования по обработке, преобразованию, передаче по различным каналам связи, эффективному хранению, отображению и восприятию изображений. Изображениями занимаются практически во всех областях человеческой деятельности. И это понятно, так как именно с помощью изображений человек получает преобладающее количество информации. В настоящем сборнике представлены результаты фундаментальных исследований человеческого зрения, вопросы теории и практики автоматического обнаружения и оценивания параметров объектов по совокупности признаков.

В связи с обострившимися в последнее время проблемами экологии больших городов, значительное внимание уделяется различным аспектам создания автоматизированных телевизионных информационных систем для панорамного обзора водной поверхности с целью обнаружения и оценки параметров загрязнений. Применение современных высокочувствительных цветных ТВ-камер в сочетании с компьютерами и разработанным специализированным программным продуктом, предназначенным для функционирования канала передачи и обработки изображения, позволит осуществить круглосуточный оперативный контроль водной поверхности и на основании полученных данных принять своевременные и адекватные меры по ликвидации аварийных разливов нефти и других поверхностно-активных веществ.

В сборнике также представлен ряд научных статей, объединенных тематикой исследования окружающей среды видео- и радиотехническими методами. Использование телевизионных систем в этом случае оправдано тем, что ТВ-изображения весьма информативны и позволяют оперативно принимать верные решения в сложных ситуациях. Широкое внедрение средств вычислительной техники предопределило содержание многих статей сборника, где наряду с техническими решениями приведены также алгоритмы программ, результаты обработки изображений и математического моделирования на ЭВМ.

Кроме того, в сборнике имеется ряд статей, посвященных традиционной радиотехнической и телевизионной тематике, в том числе оценке

разрешающей способности, сжатию видеоинформации, телевидению повышенной четкости, рир-проекции, качеству воспроизводимых изображений.

Предложенные работы отражают основные современные проблемы в сфере исследований, связанных с обработкой изображений, и будут полезны широкому кругу специалистов различных направлений и областей деятельности.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ЧЕЛОВЕКА ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В процессе изучения теории зрительного восприятия, играющей существенно важную роль при разработке и проектировании телевизионных систем различного назначения нами были проведены исследования закономерностей обнаружения и опознавания человеком-наблюдателем ахроматических изображений в присутствии аддитивного гауссова шума. Было показано, что зрительная система осуществляет их пространственную фильтрацию, которая при белом шуме и априорно известных параметрах изображений является согласованной [1–4]. Этими исследованиями было положено начало новому научному направлению, в рамках которого разработаны модели зрительной системы известные как модели согласованной фильтрации [5–10]. Эти модели широко используются в настоящее время как при проектировании информационных систем, так и при разработке медицинских диагностических методик. Однако упомянутые модели ориентированы на случай ахроматического зрения. Вместе с тем большинство реальных изображений являются цветными.

Целью данной работы является экспериментальная проверка возможности применения положений теории согласованной фильтрации к зрительной системе человека в пороговых условиях наблюдения цветных изображений. В описываемых экспериментах в качестве тестовых объектов использовались стилизованные кольца Ландольта, черно-белый вариант которых показан на рис. 1. Результаты, приводимые ниже, относятся к случаю, когда изменения цвета были в красно-зеленой области цветового пространства. Аналогичные результаты имеют место и при работе в желто-синей области цветового пространства.



Рис. 1

Экспериментатор при выполнении экспериментов мог задавать желаемые цветовой и яркостный контрасты этих колец по отношению к фону, на котором они наблюдались. Все параметры тестовых объектов при проведении опытов были наблюдателям априорно известны. В качестве помехи, накладываемой на изображения, применялся аддитивный квазибелый гауссов шум, который характеризовался среднеквадратичными значениями яркостной и хроматических компонент. Интенсивности этих компонент устанавливались экспериментатором при генерации зашумленных изображений. Зашумленные изображения генерировались компьютерной программой, а затем предъявлялись наблюдателям для опознавания на экране монитора. Нелинейность амплитудной характеристики монитора, использовавшегося в описываемых ниже опытах, была тщательно скорректирована. Эксперимент включал в себя пять серий опытов. Во всех опытах приняли участие двое испытуемых с нормальным цветовым зрением, и было использовано по 12 различных реализаций зашумленных изображений.

В первой серии опытов и тестовый объект, и наложенный на него аддитивный квазибелый гауссов шум создавали на изображении только яркостный контраст, но не изменяли его цвета, который был желто-зеленым. Во избежание амплитудных ограничений шума контраст тестового объекта выбирался малым. При динамическом диапазоне в 255 уровней квантования яркость фона определялась 117 уровнями квантования, а яркость тестового объекта 137 уровнями квантования. Среднеквадратичное значение шума σ также выражалось в единицах уровней квантования. Линейный разрыв в стилизованном кольце Ландольта составлял 4 условных пикселя. Здесь и далее под условным пикселем понимается квадратная площадка равная геометрическому размеру шумового пятна.

В результате проведенных измерений была получена зависимость вероятности правильного опознавания тестового объекта $p_{оп}$ от среднеквадратичного значения шума реальными наблюдателями, приведенная на рис. 2 и обозначенная цифрой 1 (изображение ахроматическое, шум ахроматический). Поскольку в принятых условиях проведения опыта зрительная система человека обеспечивает такую же вероятность правильного опознавания зашумленных изображений, что и оптимальный приемник Зигерта-Котельникова, осуществляющий их согласованную фильтрацию, то в нашем дальнейшем изложении зависимость 1

можно рассматривать как опорную, т.е. сравнивать с ней другие экспериментальные зависимости [1–4].

Вторая серия опытов отличалась от первой тем, что в ней и тестовый объект, и наложенный на изображение аддитивный квазибелый гауссов шум создавали на изображении только цветовой контраст при этом яркостные контрасты и изображения, и шума были равны нулю. Другими словами, изображения, предъявлявшиеся наблюдателям для опознавания в этой серии опытов, были чисто хроматическими. При этом в отсутствие шума фон, на котором наблюдались тестовые объекты, был желто-зеленым ($r = 137$, $g = 124$), а тестовые объекты – зелено-желтыми ($r = 117$, $g = 130$). Здесь через r и g обозначено число уровней квантования, определяющее интенсивность красного и зеленого в сигнале соответственно. Для создания чисто хроматического шума формирующие его красная и зеленая компоненты изменялись взаимно противоположно с коэффициентами 1 и 0,22/0,706 соответственно. Здесь и далее интенсивность шума выражается через среднеквадратичное значение его красной компоненты σ . Во избежание амплитудных ограничений, как и ранее, опыт проводился при небольших цветовых контрастах.

В этих опытах была измерена зависимость вероятности правильного опознавания тестовых объектов от среднеквадратичного значения шума для реальных наблюдателей, приведенная на рис. 2 и обозначенная цифрой 2 (изображение и шум чисто ахроматические). Обратим внимание на то, что зависимость 2 в пределах погрешности измерений совпадает с зависимостью 1, полученной для ахроматических, зашумленных изображений, а та, в свою очередь, совпадает с зависимостью вероятности правильного опознавания зашумленных ахроматических изображений оптимальным приемником. Из этого следует, что и при опознавании чисто хроматических изображений тестовых объектов, все параметры которых априорно известны, зашумленных чисто хроматическим аддитивным квазибелым гауссовым шумом, человек-наблюдатель осуществляет их согласованную фильтрацию.

В третьей серии опытов был исследован случай, когда тестовый объект создавал на изображении цветовой контраст, а шум – яркостный. Этот случай интересен тем, что дает возможность исследовать результат взаимодействия ахроматического и цветоразностных каналов (в данном случае канала $R-G$) зрительной системы человека при опознавании зашумленных изображений. При проведении опыта мы также работали с малыми цветовыми и яркостными контрастами.

В результате проведения этой серии опытов было найдено, что ахроматический шум, проявляющийся на изображении в виде флуктуаций яркости, но не изменяющий цвета тех пикселей, на которые попадают его выбросы, не влияет на вероятность опознавания $p_{\text{оп}}$ изображения чисто хроматического тестового объекта, которая остается равной единице даже при очень высоких уровнях шума. Полученная зависимость вероятности правильного опознавания зашумленных тестовых объектов $p_{\text{оп}}$ от среднеквадратичного значения шума σ для этого случая показана на рис. 2 и обозначена цифрой 3 (изображение чисто хроматическое, шум ахроматический).

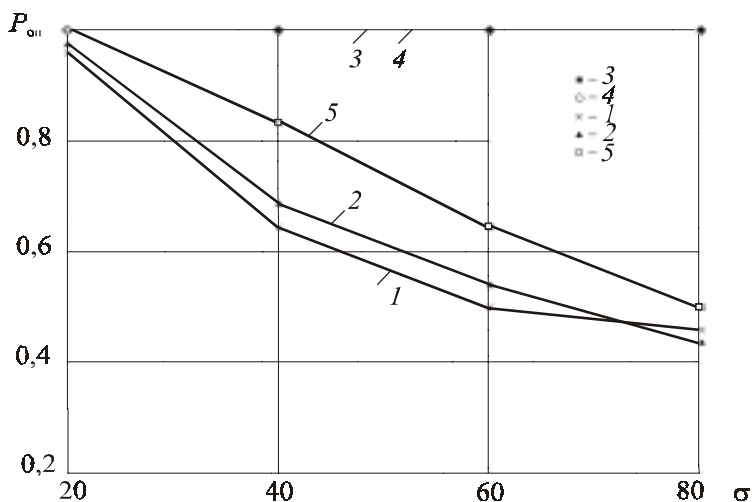


Рис. 2

Четвертая серия опытов отличалась от третьей тем, что в данном случае тестовые объекты создавали на изображениях яркостный контраст, в то время как аддитивный квазибелый гауссов шум создавал на изображениях цветовой контраст. В результате выполнения этой серии опытов было найдено, что шум, изменяющий цвет изображения, но не изменяющий его яркости, не уменьшает вероятности правильного опознавания тестовых объектов, даже если он велик. Найденная для этого случая зависимость вероятности правильного опознавания зашумленных тестовых объектов $p_{\text{оп}}$ от среднеквадратичного значения шума σ показана на рис. 2 и обозначена цифрой 4 (изображение ахроматичес-

кое, шум чисто хроматический). Поскольку в этом случае, как и в предыдущем, шум и тестовые объекты изменяют различные характеристики изображений, можно было бы заранее предположить отсутствие влияния шума на вероятность правильного опознавания тестовых объектов.

Однако такой результат получается только в том случае, если нелинейность световой характеристики кинескопа дисплея, на котором предъявляются изображения наблюдателям, тщательно скорректирована, а относительные яркости основных цветов правильно определены для используемого типа кинескопа. Наличие даже небольшой нелинейности, а также заметной погрешности в определении относительных яркостей основных цветов приводят к тому, что цветовой шум частично преобразуется в ахроматический шум и благодаря этому оказывает влияние на опознавание ахроматического изображения тестового объекта. Подобное явление встречалось на начальном этапе выполнении опытов.

Этот эффект проявился в известных опытах по маскированию тестовых синусоидальных решеток, создающих на изображениях яркостный контраст синусоидальными решетками, которые создавали на изображениях чисто хроматический контраст [11].

В пятой и заключительной серии опытов и тестовые объекты, и аддитивный квазибелый гауссов шум, накладываемый на изображения, создавали как яркостный, так и хроматический контрасты. Таким образом, в этой серии экспериментов в опознавании зашумленных цветных, а не чисто хроматических, изображений были задействованы как ахроматический канал, так и цветоразностный, в данном случае $R-G$, канал зрительной системы. При проведении этой серии опытов обе компоненты гауссова шума, вызывающие изменения яркости и цвета на изображении, поддерживались одинаковыми по величине, но были взаимно некоррелированными. В результате выполненных измерений была получена зависимость вероятности правильного опознавания тестовых объектов $p_{\text{оп}}$ от среднеквадратичного значения шума σ , которая показана на рис. 2 и обозначена цифрой 5 (изображение и шум содержат как яркостную, так и хроматическую компоненты).

Сопоставляя ранее найденные зависимости 1 и 2 с зависимостью 5, видим, что при опознавании цветных зашумленных изображений как ахроматический, так и цветоразностный каналы зрительной системы работают совместно, в результате чего вероятность правильного опоз-

навания возрастает. Предварительные оценочные расчеты показывают, что результирующее отношение сигнала к шуму Ψ_{Σ} , определяющее, в конечном счете, вероятность правильного опознавания тестового объекта человеком-наблюдателем на зашумленном цветном изображении, как следует из экспериментальных данных, оказывается равным

$$\Psi_{\Sigma} = \sqrt{\Psi_L^2 + \Psi_{R-G}^2 + \Psi_{B-Y}^2},$$

где Ψ_L – отношение сигнала к шуму после согласованной фильтрации в ахроматическом канале; Ψ_{R-G} – отношение сигнала к шуму после согласованной фильтрации в канале $R-G$; Ψ_{B-Y} – отношение сигнала к шуму после согласованной фильтрации в канале $B-Y$.

Написанное выражение справедливо для случая, когда шумы в зрительных каналах некоррелированы и согласуется с концепцией оптимального наблюдателя.

Библиографический список

1. Красильников Н. Н. Влияние шумов на контрастную чувствительность и разрешающую способность приемной телевизионной трубки // Техника телевидения. 1958. Вып. 25. С. 26–43.
2. Байдаков М. П., Красильников Н. Н. и др. К вопросу о различении наблюдателем зашумленных изображений // Автометрия. 1970. № 3. С. 20–25.
3. Байдаков М. П., Красильников Н. Н., Пастухов О. В. О различении человеком изображений в гауссовом шуме // Автометрия. 1973. № 1. С. 7–14.
4. Красильников Н. Н. Теория передачи и восприятия изображений. М.: Радио и связь, 1986. 247 с.
5. Hauske G., Wolf W., Lupp U. Matched filters in human vision // Biol. Cybernetics. 1976. № 22. P. 181–188.
6. Rovamo J., Franssila R., Nasanen R. Contrast sensitivity as a function of a spatial frequency, viewing distance and eccentricity with and without spatial noise // Vision Res. 1992. Vol.32. P. 631–640.
7. Nasanen R., Kukkonen H., Rovamo J. Spatial integration of band-pass filtered patterns in noise // Vision Res. 1993. Vol. 33. № 7. P. 903–911.
8. Rovamo J., Luntinen O., Nasanen R. Modeling the dependence of contrast sensitivity on grating area and spatial frequency // Vision Res. 1993. Vol. 33. № 18. P. 2773–2788.

9. Красильников Н. Н., Шелепин Ю. Е. Функциональная модель зрения // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 2. С. 72–82.

10. Красильников Н. Н., Шелепин Ю. Е., Красильникова О. И. Фильтрация в зрительной системе человека в условиях порогового наблюдения // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 1. С. 5–14.

11. De Valous K. K., Switkes E. Simultaneous masking interactions between chromatic and Luminance grating // J. Opt. Soc Am. 1983. Vol. 73. № 1. P. 11–18.

РОЛЬ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ О ПАРАМЕТРАХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИХ ОПОЗНАВАНИИ В ПОРОГОВЫХ УСЛОВИЯХ НАБЛЮДЕНИЯ

В настоящее время при разработке различных информационных систем, особенно предназначенных для передачи изображений, широко используют функциональные модели зрения. Большую роль они играют и в физиологии зрения, где позволяют создавать новые методики исследования зрительного восприятия и проектировать аппаратуру для клинического использования. Большинство таких моделей, особенно моделей применяемых в инженерной практике, основываются на концепции идеального наблюдателя. Такие модели создаются часто для пороговых условий наблюдения, при которых существенное влияние на вероятность правильного опознавания оказывает присутствие шумов различного происхождения. При этом пороговые условия наблюдения могут быть обусловлены как внутренним шумом зрительной системы, так и шумом в самом исходном изображении, что имеет место, например, при наблюдении радиолокационных изображений. При экспериментальных исследованиях зрительной системы человека было замечено, что в ряде случаев вероятность правильного опознавания (обнаружения) тестовых объектов реальными наблюдателями в пороговых условиях оказывается ниже, чем вероятность их опознавания (обнаружения) идеальным наблюдателем при таком же уровне шума. Для учета расхождения этих экспериментальных данных был введен так называемый коэффициент эффективности η (efficiency). Коэффициент эффективности реального наблюдателя определяют следующим образом:

$$\eta = \frac{\Psi_{\text{ид}}^2}{\Psi_{\text{набл}}^2},$$

где $\Psi_{\text{набл}}$ – отношение сигнала к шуму, при котором реальный наблюдатель опознает (обнаруживает) тестовый объект с той же вероятностью, что и идеальный наблюдатель при отношении сигнала к шуму $\Psi_{\text{ид}}$.

Коэффициент эффективности η по своему определению, если не говорить о погрешностях опыта, не может быть больше единицы ($\eta \leq 1$), причем в силу ряда причин в некоторых случаях его величина может быть существенно меньше единицы.

Первая группа причин, вызывающая уменьшение коэффициента эффективности, обусловлена несовершенством зрительной системы человека. Примером такого несовершенства является тот факт, что только около 10% квантов света, проходящего через зрачок глаза, поглощается рецепторами сетчатки, в то время как около 90% рассеивается в оптических средах глаза и поглощается в черном пигментном эпителии [1].

Причины другого рода, приводящие к значительному уменьшению η , обусловлены тем, что условия, в которых реальный наблюдатель производит наблюдения, как правило, существенно отличаются от условий, принятых для идеального наблюдателя. Так, по своему определению, идеальный наблюдатель, с которым сравнивается реальный наблюдатель, при вычислении коэффициента эффективности располагает полной априорной информацией о всех параметрах изображений наблюдаемых тестовых объектов, в то время как реальный наблюдатель такой информацией в большинстве случаев априорно не располагает. Отсутствие априорной информации о параметрах наблюдаемых тестовых объектов у реального наблюдателя приводит естественно к уменьшению вероятности их правильного опознавания $p_{\text{оп}}$, особенно при большом уровне шума, а следовательно, приводит и к уменьшению коэффициента эффективности, так как для увеличения $p_{\text{оп}}$ до того уровня, который обеспечивает идеальный наблюдатель, необходимо увеличить $\Psi_{\text{набл}}$.

Таким образом, введенный в научной литературе термин “коэффициент эффективности” представляется не вполне точным. Действительно, при слабых сигналах, где существенную роль играют причины первого рода, можно говорить о несовершенстве зрительной системы, а значит, о меньшей величине ее эффективности по сравнению с идеальным наблюдателем. Что касается причин второго рода, то они связаны уже не с несовершенством зрительной системы, а с отсутствием полной априорной информации о наблюдаемом объекте, а это неизбежно приводит к снижению вероятности опознавания.

Экспериментальные исследования показывают, что отсутствие у наблюдателя априорной информации о различных параметрах наблюдаемых объектов различно сказывается на коэффициенте эффективности. Отсутствие априорной информации о размерах тестового объекта мало влияет на величину η , в то время как отсутствие априорной информации о точных координатах, определяющих положение тестового объекта на плоскости изображения, оказывает сильное влияние на величину η . Это обстоятельство не всегда должным образом учитывается при оценке моделей зрительной системы, что иногда приводит к ошибочным оценкам [2–4].

Целью описываемых ниже экспериментов было исследование зависимости коэффициента эффективности от среднеквадратичного значения аддитивного квазизелого гауссова ахроматического шума, наложенного на ахроматические изображения тестовых объектов при условии, что координаты тестового объекта на плоскости изображения задавались с точностью до $\pm n$ условных пикселей. Здесь и далее под условным пикселем понимается квадратная площадка равная геометрическому размеру шумового пятна.

Исследования проводились как на модели зрительной системы, реализующей алгоритм Зигерта-Котельникова, который, как известно, достаточно точно моделирует работу зрительной системы в пороговых условиях, так и с использованием реальных наблюдателей [5–8]. Модель зрительной системы была реализована в виде компьютерной программы, написанной под Windows. Исследования проводились с использованием тестовых объектов в виде стилизованных колец Ландольта. Изображения этих тестовых объектов приведены в статье “Исследование пространственной фильтрации в зрительной системе человека при наблюдении цветных изображений”, помещенной в этом же сборнике. При выполнении экспериментов к изображениям тестовых объектов добавлялся аддитивный квазизелый гауссов шум, сгенерированный программным способом, после чего производилось их опознавание. Результаты измерений $p_{оп}$, выполненных на 12 различных реализациях зашумленных изображений для каждого уровня шума и каждой величины неопределенности относительно координат опознаваемого тестового объекта, записывались, а затем были использованы для расчета коэффициента эффективности. Величина отношения сигнала к шуму, определяющая в конеч-

ном итоге вероятность правильного опознавания тестового объекта на зашумленном изображении, рассчитывалась, исходя из следующих известных параметров: перепада сигнала между фоном и тестовым объектом; среднеквадратичного значения шума и размера разрыва в стилизованном кольце Ландольта, который составлял 4 условных пикселя.

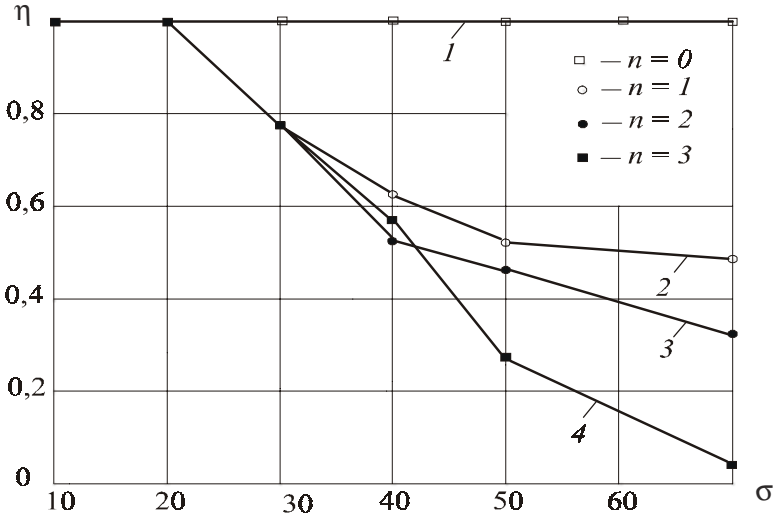


Рис. 1

Перепад сигнала и среднеквадратичное значение шума выражались в числе уровней квантования. В описываемых опытах перепад сигнала, обусловленный тестовым объектом, составлял 21 уровень квантования при динамическом диапазоне 255 уровней квантования.

На рис. 1 приведены зависимости коэффициентов эффективности от среднеквадратичного значения аддитивного квазибелого гауссова шума, полученные в результате обработки экспериментальных данных в опытах с моделью для ряда значений априорной неопределенности в отношении координат, определяющих положение тестовых объектов на плоскости изображения. Из рис. 1 следует, что коэффициент эффективности η в случае, когда $n > 0$, сильно зависит от среднеквадратичного значения шума, наложенного на изображения, а также от величины неопределенности положения тестового объек-

та на плоскости изображения n , при этом величина η изменяется в очень широких пределах.

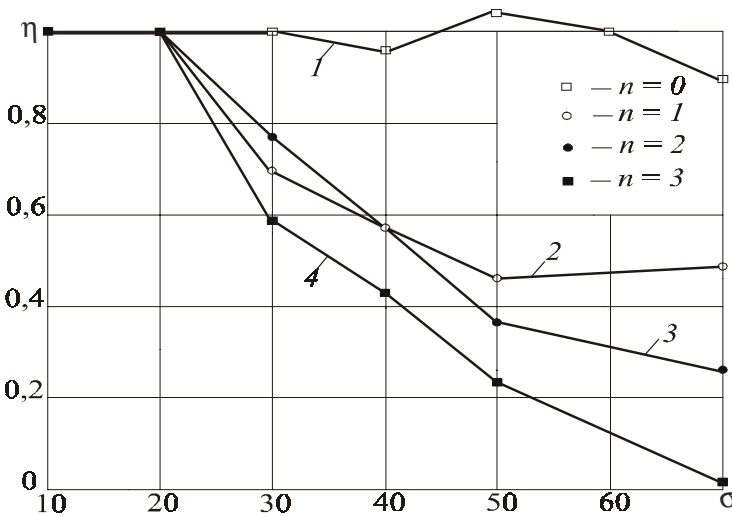


Рис. 2

Аналогичные зависимости были получены и в экспериментах с двумя реальными наблюдателями (рис. 2). Нетрудно видеть, они очень близки к результатам, полученным на модели.

Библиографический список

1. Физиология сенсорных систем. Ч. 1. Физиология зрения /Под ред. Г. В. Гершуни. Л.: Наука, 1971. 416 с.
2. Nasanen R., Kukkonen H., Rovamo J. Spatial integration of band-pass filtered patterns in noise //Vision Res. 1993. Vol. 33, № 7. P. 903–911.
3. Воронин Ю. М., Павлов Н. И. Вероятность обнаружения объектов на экране монитора оптико-электронной системы наблюдения //Оптический журнал. 1994. № 7. С. 3–7.
4. Воронин Ю. М., Павлов Н. И. Вероятность распознавания объектов на экране монитора оптико-электронной системы наблюдения //Оптический журнал. 1994. № 7. С. 7–11.
5. Красильников Н. Н. Влияние шумов на контрастную чувствительность и разрешающую способность приемной телевизионной трубки //Техника телевидения. 1958. Вып. 25. С. 26–43.

6. Байдаков М. П., Красильников Н. Н. и др. К вопросу о различении наблюдателем зашумленных изображений // Автометрия. 1970. № 3. С. 20–25.

7. Байдаков М. П., Красильников Н. Н., Пастухов О. В. О различении человеком изображений в гауссовом шуме // Автометрия. 1973. № 1. С. 7–14.

8. Красильников Н. Н. Теория передачи и восприятия изображений. М.: Радио и связь, 1986. 247 с.

АЛГОРИТМЫ СЕГМЕНТАЦИИ ТВ-ИЗОБРАЖЕНИЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для обнаружения на водных поверхностях разливов нефти и других загрязнений широко используют телевизионные методы. Компьютерная обработка ТВ-изображений позволяет классифицировать аномалии, определять их координаты и оценивать масштабы. ТВ-системы, установленные на борту летательных аппаратов, на мостах, плотинах и т. д., обеспечивают обследование обширных площадей в масштабе реального времени. Использование современных средств связи дает возможность объединить датчики, в том числе построенные по различным принципам, в единую систему дистанционного мониторинга окружающей среды. Анализ литературных данных, а также опыт построения подобных систем показывают, что для успеха обследования нужно выполнить ряд последовательных процедур [1]:

переход из пространства наблюдаемых изображений в пространство признаков, позволяющий резко сократить объем обрабатываемых данных;

селекция обнаруженных фрагментов и принятие решения об их принадлежности к тому или иному классу;

вычисление геометрических характеристик фрагментов, оценка других параметров (толщины пленки, объема разлитой нефти и пр.);

формирование информационного сообщения для пользователя системы;

преобразование (сжатие) сообщения и его передача по линии связи;

документирование полученных сообщений.

Нефтяная пленка на поверхности воды образует интерференционный фильтр, по-разному отражающий и поглощающий электромагнитные колебания с различными длинами волн. Поэтому применяют алгоритмы анализа цветных ТВ-изображений, базирующиеся на спектрональных признаках. В качестве одного из признаков используют *цветность* $\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_\Lambda)^T$, где

$$c_i = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varphi(\lambda) S_i(\lambda) d\lambda}{\sum_{i=1}^{\Lambda} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varphi(\lambda) S_i(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

здесь $\varphi(\lambda)$ – спектральная плотность отраженного от водной поверхности электромагнитного излучения; $S_i(\lambda)$ – спектральная чувствительность i -го канала детектора излучения; Λ – число каналов (для ТВ-камер $\Lambda = 3$); λ_{\min} , λ_{\max} – минимальная и максимальная длины волн, регистрируемые детектором излучения.

Использование в качестве признака цветности позволяет получить алгоритм обработки изображений, адаптивный к изменениям яркости передаваемых объектов в широких пределах. Знаменатель в выражении (1) имеет физический смысл интенсивности излучения. Поэтому координаты цветности c_i – безразмерные величины, не зависящие от яркости объектов. Из выражения (1) следует, что сумма коэффициентов $c_1 + c_2 + c_3 = 1$. Это дает возможность понизить размерность вектора цветности до двух, так как третий элемент всегда может быть вычислен из двух остальных: $c_3 = 1 - c_1 - c_2$.

В цветном телевидении вводят понятие *основных цветов* ТВ-камеры и монитора [1]. В качестве таковых в ТВ-мониторе могут быть приняты только *реальные цвета* R , G и B , которые на практике воспроизводят в виде цветностей соответствующих им люминофоров в кинескопе. В стандартных ТВ-приемниках используют основные цвета *NTSC* (США, Япония, Канада) и *EC* (европейский стандарт). В цветных мониторах и компьютерных дисплеях применяют менее насыщенные, но зато более яркие цвета $P22$, ASP и т. д. В совокупности с опорным белым цветом (обычно типа C или D_{65}) выбранные основные цвета образуют новую колориметрическую систему $R_{\Pi} G_{\Pi} B_{\Pi}$.

Данные о цветовых координатах основных цветов и опорного белого цвета в колориметрической системе XYZ позволяют рассчитать матрицы пересчета координат цветов из системы XYZ в систему $R_{\Pi} G_{\Pi} B_{\Pi}$ и наоборот, а также кривые *удельных компонент*. Если эти кривые точно воспроизведены в виде характеристик спектральной чувствительности цветоделенных каналов камеры ЦТ $c_R(\lambda)$, $c_G(\lambda)$ и $c_B(\lambda)$, то такая камера колориметрически верно определяет координаты цветов

$$R = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varphi(\lambda) s_R(\lambda) d\lambda ; G = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varphi(\lambda) s_G(\lambda) d\lambda ; B = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varphi(\lambda) s_B(\lambda) d\lambda .$$

В соответствии с выражением (1) координаты цветности

$$r = \frac{R}{R+G+B} ; \quad g = \frac{G}{R+G+B} ,$$

а цветность можно представить в виде точки на цветовом графике RGB (рис. 1).

На первом этапе анализа реализуют переход из пространства исходных изображений в пространство признаков. С этой целью на цветовом графике вводят зону допуска на цветность, ограниченную окружностью, прямоугольником или иной другой замкнутой фигурой. На изображении выделяют область с цветностями, попадающими вовнутрь зоны допуска.

В работе [2] предложено формировать собственную область класса в соответствии с правилом

$$\Theta(\mathbf{c}) = \bigcap_{j=1}^4 \left[a_1^j u_R + a_2^j u_G + a_3^j T \right] = 1, \quad (2)$$

где $[P]$ – предикат, принимающий значение $\Theta(\mathbf{c}) = 1$ в случае выполнения условий P или $\Theta(\mathbf{c}) = 0$ в случае их невыполнения; u_R , u_G и u_B – сигналы, соответствующие трем цветоделенным изображениям; $T = u_R + u_G + u_B$; a_i – коэффициенты, определяющие четыре прямые на треугольнике цветов (см. рис. 1) и ограничивающие прямоугольную зону допуска на цветность.

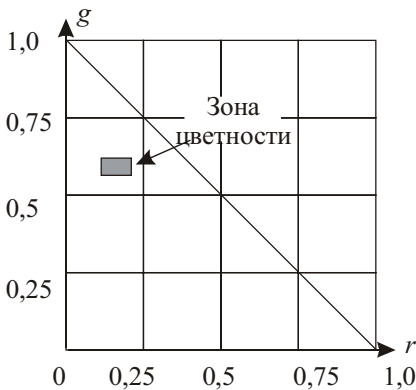


Рис. 1

Общим недостатком колориметрических систем XYZ и RGB является то, что расстояние между цветами, как векторами в этих пространствах, в общем случае не соответствует воспринимаемому человеком различию между указанными цветами. С целью преодоления

этого недостатка международной комиссией по освещенности (МКО) введены так называемые *равноконтрастные* цветовые пространства Luv и Lab [3]. Уравнения связи координат равноконтрастного пространства Lab с координатами стандартной колориметрической системы XYZ выглядят следующим образом:

$$L = 25(Y/Y_W)^{1/3} - 16;$$

$$a = 500[(X/X_W)^{1/3} - (Y/Y_W)^{1/3}];$$

$$b = 200[(Y/Y_W)^{1/3} - (Z/Z_W)^{1/3}],$$

где координаты цвета X_W , Y_W и Z_W определяют цвет опорного белого цвета (C или D_{65}), заданного спектральным распределением лучистой энергии.

Цветовые различия находят по формуле

$$\Delta E(L, a, b) = [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2],$$

которая реализована во многих программных пакетах цифровой обработки цветных изображений (например, *Corel Draw*, *Adobe PhotoShop* и др.).

Приведем теперь практический пример реализации алгоритма сегментации изображения водной поверхности с нефтяным пятном (рис. 2) по признаку цветности. Рассмотрим гистограммы распределения уровней сигнала в цветовой системе Lab для чистой водной поверхности и нефтяной пленки (рис. 3). Видно, что изображения нефтяной пленки и чистой воды существенно отличаются по распределениям уровней яркости (координаты L), и цветностей (каналы a и b).

В канале яркости происходит смещение среднего уровня с 39,1 до 58,08. Тем самым еще раз подтверждается известный факт значительно большего коэффициента отражения нефтяной пленки по сравнению с чистой водой. Волнение водной поверхности и зависимость коэффициента отражения от угловых положений источника ос-

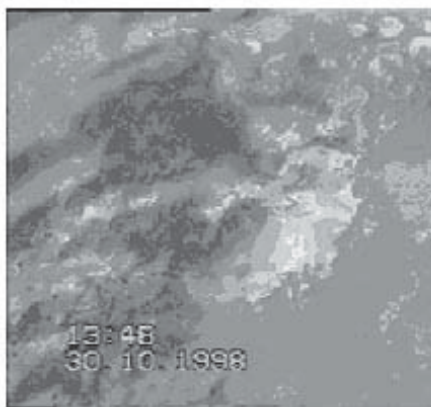


Рис. 2

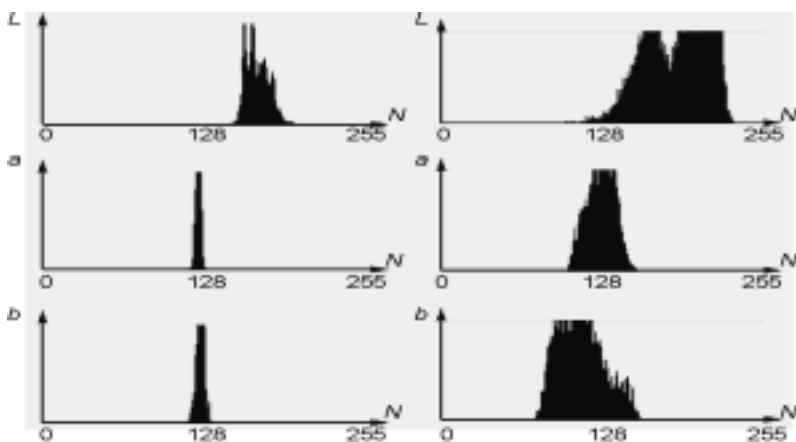


Рис. 3

вещения и регистратора излучений приводит к существенному росту среднеквадратического отклонения уровней от средних значений (с 9,31 до 23,71). Расширение гистограммы распределения уровней яркости может служить дополнительным признаком, позволяющим провести сегментацию изображений водной поверхности.

Еще более существенны отличия в каналах цветности (рис. 3). В канале a среднее значение сигнала смещается с 0,81 до 1,89, а стандартное отклонение уровней сигнала увеличивается с 2,23 до 10,38. Аналогично в канале b : с $-2,36$ до $-13,00$ и с 3,01 до 17,22.

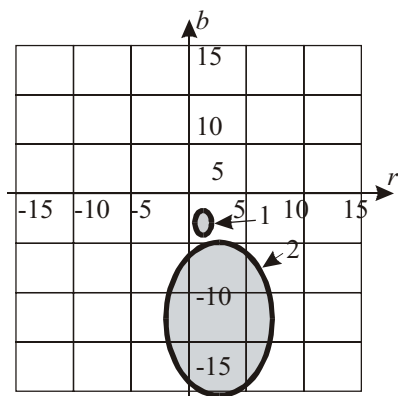


Рис. 4

Представим зоны распределения сигналов цветности в виде эллипсов с длинами полуосей равными соответствующим значениям максимальных отклонений уровней сигналов (рис. 4). Видно, что эти зоны не пересекаются, что позволяет выделить нефтяное пятно на фоне воды с вероятностью единица.

Приведем теперь результаты сегментации изображения поверхности воды с нефтяным пятном (см. рис. 2). Видно (рис. 5), что нефтяные пятна достаточно уверенно выделены.

Это позволяет провести измерение геометрических характеристик: площади селектированных областей, их линейных размеров (длины, ширины). При обработке последовательности ТВ-кадров, полученных через известные промежутки времени, можно измерить скорость перемещения пятен.



Рис. 5

Ширина гистограммы распределений уровней сигналов цветности отражает тот факт, что из-за волнения водной поверхности участки пленки располагаются под разными углами по отношению к источнику освещения и регистратору излучения. В результате создается широкий спектр цветностей (цвета побежалости), который является дополнительным признаком наличия загрязнений. Трудно представить другой предмет на водной поверхности, создающий сравнимый с нефтяной пленкой спектр цветностей. Поэтому этот признак даже более надежен, чем координаты центра зоны цветности (см. рис. 3).

При перемещении нефтяного пятна его цветовая гамма заметно меняется. Например, для ТВ-кадра, снятого за некоторое время до показанного на рис. 2, распределение уровней сигнала в каналах цветности будет несколько иным. Среднее значение сигнала в каналах a и b составляет, соответственно 3 и -12 , а разбросы уровней сигнала 6,42 и 10,64.

Цвет нефтяной пленки зависит от ее толщины, погодных условий, времени дня и ракурса съемки. Поэтому в ряде случаев предпочитают распознавать нефтяные пятна в условиях априорной неопределенности с формированием *эталонной области цветностей* в ходе обучения с участием наблюдателя [2]. В результате обучения находят коэффициенты a_i в выражении (2), которые в совокупности задают эталонную область цветностей (см. рис. 2). Участие наблюдателя повышает достоверность результатов измерений, но не всегда оправдано. Поэтому для решения этой задачи лучше дублировать системы обнаружения аномалий, построенные по разным принципам.

Важной проблемой, которую нужно решать при проектировании сканирующего регистратора излучений, является *верность цветовоспроизведения*. Дело в том, что реальные характеристики спектральной чувствительности цветоделенных каналов ТВ-камеры (рис. 6) заметно отличаются от требуемых. Форма кривых только в первом приближении повторяет главные ветви кривых удельных компонент. Отсутствуют нужные вторичные отрицательные и положительные выбросы, а положительные выбросы в кривых зеленого и синего каналов только вредны. Результатом несоответствия кривых являются весьма значительные ошибки в воспроизведении цветов.

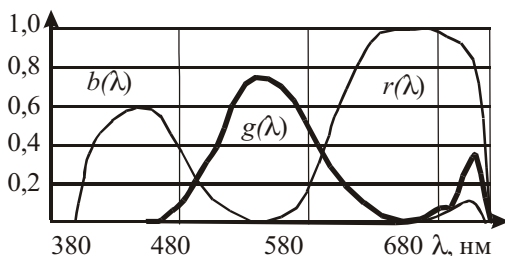


Рис. 6

Для снижения ошибок цветопередачи в состав ТВ-системы включают *матричный цветокорректор*, формирующий выходные сигналы цветоделенных каналов u_R , u_G и u_B из взвешенных сумм входных e_R , e_G и e_B в соответствии с системой линейных уравнений

$$\begin{bmatrix} u_R \\ u_G \\ u_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{R1} & \alpha_{R2} & \alpha_{R3} \\ \alpha_{G1} & \alpha_{G2} & \alpha_{G3} \\ \alpha_{B1} & \alpha_{B2} & \alpha_{B3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e_R \\ e_G \\ e_B \end{bmatrix},$$

где α_{ij} — коэффициенты.

Г. Нейгебаур [3] предложил оценивать отклонения ΔS_i выбираемых кривых спектральной чувствительности анализирующего устройства $s_i(\lambda)$ от кривых удельных компонент $\eta_i(\lambda)$ значением интеграла от квадрата разности этих функций

$$\Delta S_i = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [\eta_{\text{шт}}(\lambda) - s_i(\lambda)]^2 d\lambda.$$

Л.Ф.Артюшин показал, что с помощью такой методики можно оценить кривые спектральной чувствительности лишь с точки зрения идентичности реакций на метамерные цвета [4]. Значение ΔS_i показывает только отклонение спектральных характеристик от требуемых, но не оценивает количественно возникающие при этом искажения цветов. Поэтому чаще параметры матричного (линейного) цветокорректора рассчитывают: а) путем минимизации ошибок цветковых координат воспроизводимых цветов; б) путем минимизации ошибок в величине видеосигналов, получаемых при передаче тест-таблицы, содержащей набор эталонных цветов. Второй метод, предложенный впервые А. Джонсом [5], отличается наглядностью и простотой в сравнении с методами, в которых минимизируют ошибки координат воспроизводимых цветов [6, 7, 8].

Для оценки качества цветопередачи международной комиссией по освещенности (МКО) предложена совокупность цветов: малой насыщенности $Y1, Y2, G1, C1, C2, C3, PT1, PT2$; средней насыщенности YM, RM, GM, BM ; максимальной насыщенности $RS, GS, BS, PS1, PS2, OS$, координаты которых на графике XYZ известны [9]. ТВ-камере предъявляют тест-таблицу, составленную из эталонных цветов, и сравнивают сигналы на ее выходах с расчетными значениями. Коэффициенты цветокорректора α_{ij} подбирают такими, чтобы минимизировать абсолютные значения разности этих сигналов. Результаты цветокоррекции (рис. 7) показывают, что в среднем ошибки цветопроизведения

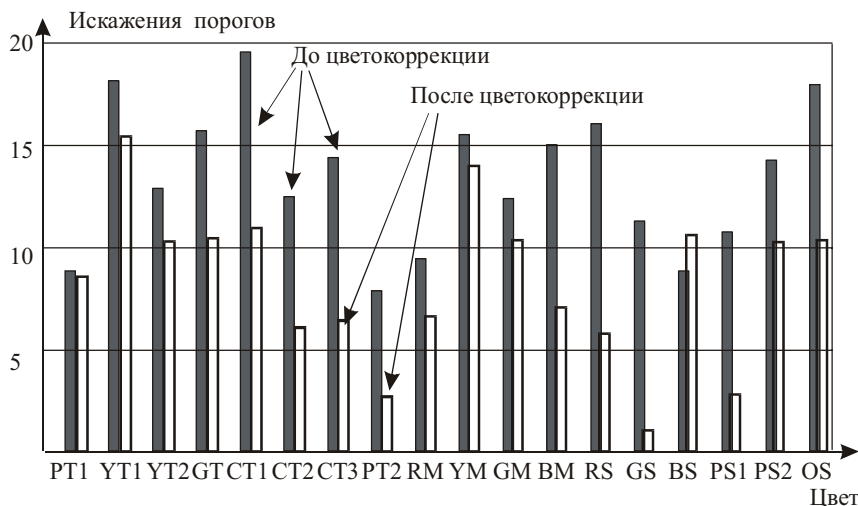


Рис. 7

Таблица 1

Знак сигнала	$R-Y$	$B-Y$
Квадрант 1	+	+
Квадрант 2	+	-
Квадрант 3	-	-
Квадрант 4	-	+

снизились, однако на некоторых цветах (см. цвет BS) ошибка даже возросла. Сравнительно большие остаточные ошибки, полученные в результате реализации линейного цветокорректора, объясняются существенными отличиями кривых спектральной чувствительности цветоделенных каналов ТВ-камеры от требуемых кривых. Для повышения эффективности цветокоррекции можно

предложить использовать 4-квадрантный цветокорректор [10]. Плоскость цветностей (линейных цветоразностных сигналов $R-Y$, $B-Y$) разбивают на четыре квадранта в соответствии с данными табл. 1.

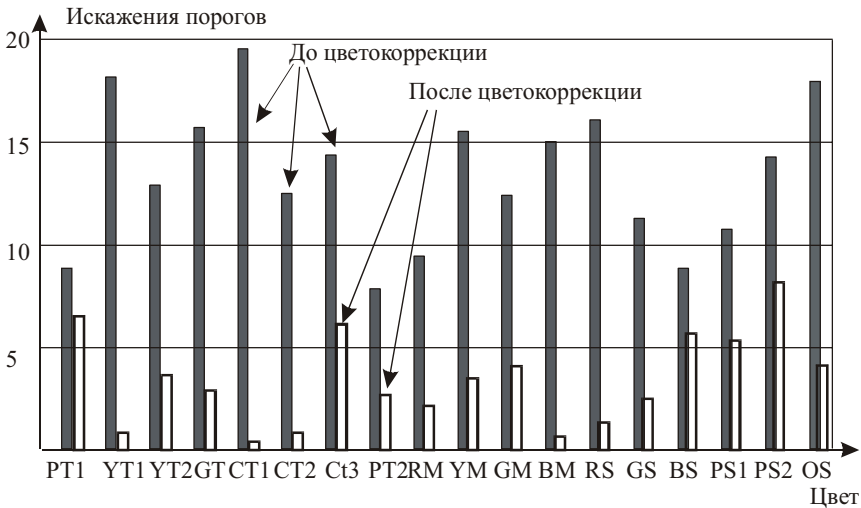


Рис. 8

Из совокупности 19 эталонных цветов в квадрант 1 попадают цвета BS , $PS1$, $CT3$, $PT2$, $PS2$; в квадрант 2 – $PT1$, RM , RS , OS , $YT1$, YM ; в квадрант 3 – GM , GT , GS , $YT2$; в квадрант 4 – $CT2$, $CT1$, BM . Для каждого квадранта рассчитывают оптимальные значения коэффициентов цветокорректоров по методике, принятой для расчета линейного цветокорректора. В результате получают четыре матрицы коэффициентов цветокорректора, которые переключают в зависимости от передаваемого в данный момент цвета. Результаты 4-квадрантной цветокоррек-

ции (рис. 8) показывают существенное снижение ошибок цветопередачи. Поэтому целесообразно дополнить стандартную ТВ-камеру указанным цветокорректором для решения задачи сегментации изображения водной поверхности по цветовым признакам. Следует отметить, что цветокоррекция может быть осуществлена программно в ходе обработки цветного изображения.

Библиографический список

1. *Новаковский С. В.* Цвет в цветном телевидении. М.: Радио и связь, 1988. 370 с.
2. *Быков Р. Е., Бочко В. А.* Многоспектральная интерактивная система обнаружения и измерения параметров объектов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 1998. Вып. 1. С. 50–54.
3. *Джадд Д., Вышецки Г.* Цвет в науке и технике: Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 16 с.
4. *Артюшин Л. Ф.* Основы воспроизведения цвета в фотографии, кино и полиграфии. М.: Искусство, 1970. 210 с.
5. *Тимофеев Б. С.* Автоматическая оптимизация параметров цветокорректора камеры ЦТ // Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. 1991. Вып. 3. С. 20–32.
6. *Полосин Л. Л.* Качественные показатели цветного изображения/ ЛИКИ. Л., 1984. 65 с.
7. *Кустарев А. К., Погарский Е. С.* Матричная цветокоррекция в ТВ-камерах//Техника кино и телевидения. 1978. № 1. С. 51–57.
8. *Вербицкая И. Б.* Коррекция цветопередачи репортажных камер с помощью изменения цветоразностных сигналов // Техника кино и телевидения. 1981. № 10. С. 26–30.
9. *Распутин В.Г.* Матричный цветокорректор для ТВ-камеры//Техника кино и телевидения. 1979. № 12. С. 31–34.
10. *Кондратьев А.Г., Никифоров С.В.* Выбор испытательных цветов для коррекции цветовых искажений // Техника кино и телевидения. 1980. № 6. С. 49–51.

АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АКВАТОРИИ

В современных условиях, когда гигантское развитие промышленности и высокий уровень урбанизации приводят к чрезвычайно активному и грубому вмешательству человека в природу, особенно актуальным становится решение задач экологического контроля. Обеспечение оперативного и широкого (по охвату территории) контроля требует разработки соответствующих технических средств и систем.

Составной частью экологического контроля является контроль чистоты водных поверхностей. В рамках решения этой задачи предлагается программно-аппаратная система оперативного обнаружения нефтяных и масляных пятен, а также других видов загрязнения акватории.

Система включает в себя видеокамеру, установленную на борту летательного аппарата, и компьютер с соответствующим программным обеспечением.

Система осуществляет контроль чистоты акватории; проводит съемку участка загрязнения; передает полученное изображение в компьютер для последующей обработки; формирует информационный кадр, который затем может быть передан на главный контрольный пункт.

Информационный кадр (рис. 1) представляет собой файл, включающий в себя текстовые и графические данные, характеризующие загрязнение. Он содержит дату, время и место проведения наблюдения, фотографию пятна загрязнения, величину его площади и при необходимости текстовый комментарий, вводимый оператором системы в интерактивном режиме.

Площадь пятна загрязнения может быть найдена тремя способами; в зависимости от них информационный кадр формируется в интерактивном, автоматизированном или автоматическом режиме.

Определение площади пятна загрязнения в интерактивном режиме. Формируемый информационный кадр с изображением пятна выводится на экран монитора. Для определения площади пятна на его изображение накладывается сгенерированная с помощью специального программного обеспечения измерительная сетка. Оператор помечает мышью ячейки сетки частично или полностью занятые пятном загрязнения. Размер ячейки сетки известен, и задача приближенной оценки площади пятна, как объекта наблюдения, легко решается.

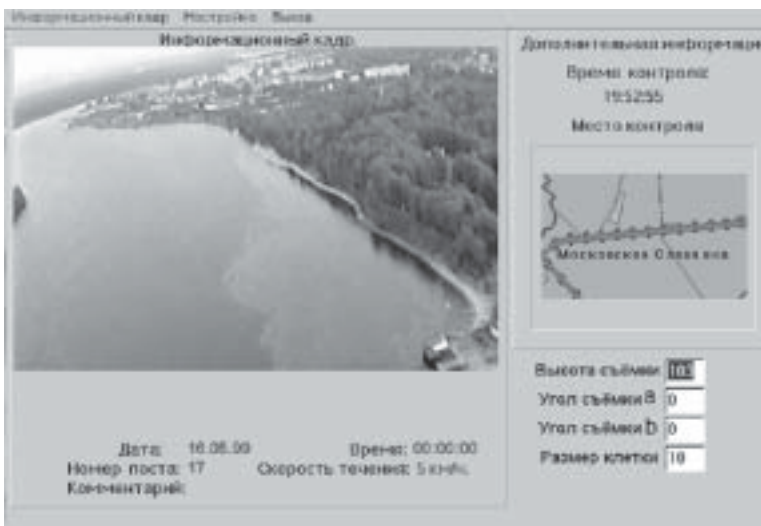


Рис. 1

Размер ячейки и вид измерительной сетки определяются высотой, с которой производилась съёмка, и ориентацией камеры относительно поверхности воды. Следовательно, при формировании измерительной сетки необходимо обеспечить масштабирование сетки в зависимости от высоты съёмки и соответствие системы координат камеры системе координат объекта наблюдения. Обе эти задачи удобно решать, используя метод однородных координат [1,2], который позволяет выразить все виды преобразований (необходимые для пересчета координат из одной системы в другую) и проецирований с помощью единой матрицы M размерностью 4×4 .

Задача масштабирования сетки от высоты решается через проецирование сетки на плоскость водной поверхности. Используется центральная проекция. Центр проекции удален от картинной плоскости (водной поверхности) на расстояние d , равное высоте съёмки. Матрица проецирования имеет вид

$$[M_{\text{шпр}}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

где d – высота съёмки.

Алгоритм формирования масштабной сетки состоит из следующих шагов. Зная размер кадра, содержащего пятно загрязнения, и задавшись шагом h (базовым размером ячейки), определяют однородные координаты узлов сетки

$$[x, y, z, w]_{i,j}, i = 1..N_z + 1, j = 1..N_\phi + 1, W = 1,$$

где N_z, N_ϕ – число ячеек по горизонтали и вертикали; W – однородная координата.

К узлам применяют центральное проецирование и приводят координаты к однородным с $W = 1$

$$\begin{aligned} [x, y, z, 1] \times [M_{\text{цпр}}] &= [x, y, o, -z/d + 1] \\ \Rightarrow [x/(-z/d + 1), y/(-z/d + 1), 0, 1]. \end{aligned}$$

Используя каноническое уравнение прямой, определяют координаты точек сетки между узлами.

Изложенное справедливо, если съемка была произведена при ориентации камеры строго перпендикулярно водной поверхности.

На практике ориентация камеры относительно водной поверхности отлична от строго перпендикулярной и определяется тремя углами : α, ϕ, γ – азимутом, тангажом и креном летательного аппарата.

Имеем две системы координат: объекта наблюдения и камеры. Изображение пятна формируется в системе координат камеры. Для корректности измерений масштабная сетка перед наложением на изображение должна быть трансформирована: необходимо пересчитать координаты сетки, заданные в системе координат объекта, в систему координат камеры.

Система координат объекта: центр координат находится на объекте наблюдения, ось Z перпендикулярна к плоскости водной поверхности, ось Y совпадает с направлением движения летательного аппарата, ось X выбирается из условия формирования правосторонней системы координат. Система координат камеры: центр координат находится на мишени камеры, ось Z совмещена с осью визирования, оси X и Y соответствуют левосторонней системе координат. Положение камеры в системе координат объекта определяются координатами летательного аппарата X_0, Y_0, Z_0 и углами α, ϕ, γ (рис. 2).

Ось Y системы координат объекта совпадает с направлением движения летательного аппарата, поэтому угол α и координата X_0 равны 0, Z_0 равно высоте съемке d ; $Y_0 = d \operatorname{tg} \phi$.

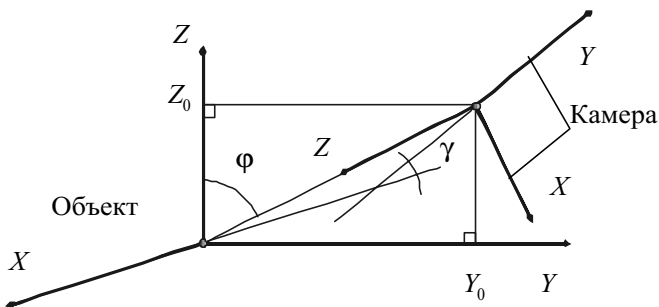


Рис. 2

Матрица преобразования, связывающая систему координат камеры и объекта, будет представлять собой произведение четырех матриц

$$[M_{\text{преоб}}] = [T] \times [R\varphi] \times [R\pi] \times [R\gamma], \text{ где}$$

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -Y_0 & -Z_0 & 0 \end{bmatrix} \text{ — совмещение центра системы координат камеры с центром системы координат объекта;}$$

$$[R\varphi] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ — совмещение оси } z \text{ системы координат камеры с осью } Z \text{ системы координат объекта поворотом на угол } \varphi \text{ относительно оси } X;$$

$$[R\pi] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ — переход из левосторонней в правостороннюю систему координат;}$$

$$[R\gamma] = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ — совмещение оси } x \text{ системы координат камеры с осью } X \text{ системы координат объекта поворотом на угол } \gamma \text{ относительно оси } Y.$$

Таким образом, при формировании масштабной сетки необходимо пересчитать координаты узлов сетки и выполнить их центральное проецирование. Суммарное преобразование будет иметь вид

$$[\Sigma] = [M_{\text{преоб}}] \times [M_{\text{шпр}}].$$

Для уменьшения количества ошибок, вносимых оператором, ячейки сетки на изображении должны быть хорошо видны. Необходимо, чтобы цвет сетки был контрастен к цвету изображения, на которое сетка накладывается. Цвет поверхности с пятном загрязнения меняется в широких пределах, поэтому вывод сетки одним постоянным цветом, не зависящим от цвета изображения, является малоэффективным. Какие-то участки сетки будут сливаться с изображением и теряться на нем. Целесообразно менять цвет сетки в зависимости от изображения. Для этого по координатам узлов рассчитывают координаты всех промежуточных точек, образующих сетку. Перед выводом каждой точки сетки определяют цвет точки изображения, на которую накладывается сетка. По этой информации задают цвет точки сетки, как дополнительный к цвету точки изображения.

Полученные таким образом оценки площади пятна загрязнения имеют большую погрешность. Существенным источником погрешности является наличие частично занятых пятном загрязнения ячеек масштабной сетки, которые при определении площади учитываются как полностью заполненные. Для преодоления этого недостатка целесообразно изменить дискретность сетки: разбить ячейки на подячейки меньшего размера. При этом дискретность должна быть увеличена только в пограничных ячейках – ячейках частично наложенных на пятно загрязнения и частично на чистую воду.

Определение площади пятна загрязнения в автоматизированном и автоматическом режимах. При автоматическом и автоматизированном способе определения площади пятна главной является задача обнаружения и выделения пятна загрязнения в полученном растровом изображении. Исходное изображение представляет собой битовую карту: совокупность пикселей без данных об их принадлежности какому-либо объекту изображения. Единственной информацией является цвет каждого пикселя, представленный его *RGB*-координатами (при формировании изображения в режиме непосредственной цветопередачи – true color – на каждую координату отводится 8

бит) [3]. Следовательно, критерием, по которому пятно может быть найдено, является его цвет.

Алгоритмически задача решается следующим образом. Проводят попиксельное считывание изображения и определяют цвет каждого пикселя. Для исключения яркостной составляющей используют трехцветные (нормированные) координаты цвета

$$r = R / (R + G + B),$$

$$g = G / (R + G + B),$$

$$b = B / (R + G + B).$$

Затем проверяют попадание координат цвета каждого пикселя в цветовой интервал, соответствующий пятну загрязнения. Суммируют число пикселей, цветовые координаты которых попали в цветовой интервал. Зная разрешение (число пикселей на единицу длины) и размер кадра, определяют площадь пятна загрязнения.

Надежность и эффективность работы алгоритма в значительной степени зависит от корректности определения цветового интервала, соответствующего пятну загрязнения. В автоматизированном режиме эта функция возлагается на оператора. Оператор мышью помечает пятно, происходит считывание цвета пикселя, заведомо принадлежащего пятну загрязнения, и формирование на его основе цветового интервала.

Для упрощения алгоритма, увеличения его точности и надежности целесообразно ограничить зону поиска. Оператор должен дополнительно к пометке пятна задать мышью анализируемую область. Это удалит из зоны рассматривания участки суши и неба, попавшие в изображение: исключит пиксели, попадающие в заданный цветовой интервал, но не принадлежащие водной поверхности. Соответственно, уменьшится время работы и повысится точность определения площади.

Для выделения пятна загрязнения и определения его площади в автоматическом режиме необходимо иметь обширную базу данных цветковых интервалов, соответствующих пятнам загрязнения, в зависимости от характеристик пятен (нефтяное, масляное и др.), толщины пленки, освещенности и погодных условий. Алгоритм в этом случае представляется следующим. Перед началом контроля указываются его параметры: время суток, погодные условия и др. Во время работы производится описанный выше попиксельный анализ изображения с учетом имеющихся в базе данных моделей и заданных параметров контроля.

Создание базы данных может быть выполнено на основе автоматизированного метода. Для этого он должен быть дополнен возможностью самообучения системы: непосредственно после выбора оператором пятна загрязнения и формирования критерия последний со всеми необходимыми атрибутами заносится в базу данных.

Библиографический список

1. *Иванов В. П., Батраков А. С.* Трехмерная компьютерная графика. М.: Радио и связь, 1995. 224 с.
2. *Фоли Дж., вэн Дэм А.* Основы интерактивной машинной графики. М.: Мир, 1985. Т. 1. 367 с., Т. 2. 368 с.
3. *Климов А. С.* Форматы графических файлов. Киев: НИПФ “Диа-Софт Лтд.”, 1995. 480 с.

ОБЗОР МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Основным загрязнителем водных бассейнов являются продукты нефти, которые, будучи легче воды, образуют на ее поверхности пленки различной интенсивности. Нефтяные загрязнения быстро распространяются на обширные водные акватории. Установлено [1], что 1 г нефтепродуктов образует на поверхности воды пятно, диаметр которого может достигать в зависимости от вида нефтепродукта от 1 до 2 м. Интенсивному их распространению способствует то, что продукты нефти и вода имеют малые коэффициенты трения, благодаря чему пятна нефтепродуктов особенно легко и быстро распространяются по водной поверхности, образуя тонкие пленки. Последние, находясь между двумя весьма подвижными средами вода–воздух, сами приобретают большую динамичность, дрейфуя по поверхности воды под воздействием ветра и течения.

Одним из важных этапов борьбы с загрязнением водной поверхности является создание дистанционных методов обнаружения нефти и нефтепродуктов на поверхности акватории. В настоящее время создан ряд физических методов для таких определений, основанных на имеющемся месте различии в оптических и тепловых свойствах воды, загрязненной нефтепродуктами, и чистой водой. При анализе пятен нефти и нефтепродуктов [2,3] необходимо определить:

- границы зоны их распространения;
- формы и размеры пятен нефтепродуктов;
- густоту пятен (степень покрытия пятнами водной поверхности);
- интенсивность пятен;
- границы зон с различной густотой пятен;
- границы зон с различной интенсивностью пятен;
- скорость распространения пятен;
- направление распространения пятен.

Под влиянием непостоянных во времени и пространстве турбулентных потоков, присущих пограничным средам вода–воздух, пленка нефтепродуктов разрывается, образуя отдельные пятна различных размеров, формы, интенсивности и густоты. Чем больше динамичность этих сред, тем меньше размеры пятна. Наибольшая площадь пятен при про-

чих равных условиях наблюдается при штилях и спокойном состоянии водной поверхности.

Дистанционные методы обнаружения нефтепродуктов можно разделить на пассивные и активные. Активные методы контроля используют датчики отраженного лазерного излучения. Они обладают достаточной чувствительностью, но не могут дать панораму, требуемую для принятия решения о площади загрязнения. Поэтому их дополняют пассивными методами контроля. Пассивные методы основаны на регистрации теплового излучения (тепловизоры) или яркостного контраста (телевизионные методы).

Пленка нефтепродуктов четко выделяется на фоне чистой воды своим сравнительно ярким белесоватым тоном, особенно в ясную маловетреную погоду, если смотреть на пятно под углом зрения 30–70°.

Пленки нефтепродуктов изменяют оптические свойства поверхности воды – цвет и яркость. В них содержатся вещества органического происхождения, которые под действием ультрафиолетовых лучей начинают флюоресцировать.

Исследования, проведенные рядом авторов [2–5], показали, что с увеличением толщины пленки увеличивается количество флюоресцирующих веществ, т. е. увеличивается излучение. Из приведенного на рис. 1 графика [3] видно, что в области видимого излучения наименьшая яркость у низкокипящих фракций нефти (керосин, газолейные масла, кривая 3). Более яркое свечение имеют керосин и соляровые масла (кривая 1), промежуточное значение занимают керосин и бензин (кривая 2). От толщины пленки меняется и цвет от темно фиолетового (бензин) к яркому светло-фиолетовому (керосин).

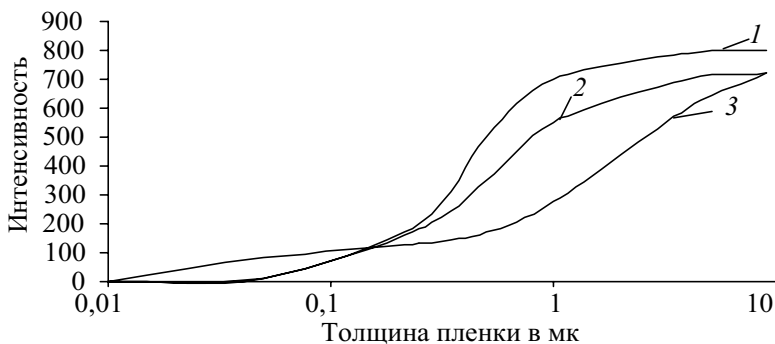


Рис. 1

Экспериментально установлено, что нефтепродукты наиболее интенсивно поглощают ультрафиолетовые лучи 363–365 нм, которые возбуждают их свечение в коротковолновой части спектра. Максимум спектра приходится на фиолетово-синий участок 400–450 нм.

Яркость пленок нефтепродуктов определяется не только собственным излучением, но и отражательной способностью их поверхности. Эта способность характеризуется показателем преломления 1,37–1,44 для легких фракций и 1,44–1,53 для масел. Измерение интенсивности света, прошедшего через пленку нефтепродуктов показали, что она пропускает от 1 до 10% падающего на ее поверхность света в зависимости от толщины. Следовательно, большая часть падающего света рассеивается и поглощается пленкой.

Таким образом, как собственное излучение, так и отражательная способность пленок нефтепродуктов определяется, главным образом, их толщиной и составом, т. е. интенсивностью пленок. Поэтому величина яркости может быть использована в качестве показателя интенсивности пленок.

Не менее отчетливо пленка контрастирует с участками чистой воды при наличии на них ряби. Последняя при слабых ветрах в местах распространения пленки не образуется. При сильном ветре рябь появляется на участках водной поверхности, покрытой пленкой, однако в этом случае наблюдается заметное сглаживание волн ряби. Белесоватый оттенок нефтяных пленок слабой интенсивности объясняется тем, что сглаженная поверхность воды в местах распространения пленки отражает окраску небосвода в значительно большей степени, чем участки чистой воды. Благодаря большей крутизне волн ряби, образующейся на участках чистой воды, прямые солнечные лучи отражаются от нее под значительно большим углом к линии горизонта, чем на соседних участках, покрытых нефтяной пленкой. Поэтому в ясную погоду при достаточно большой высоте солнца отраженные от ряби солнечные лучи видны только на небольшом удалении в виде искрящихся, переливающихся точек. Вдали же участки ряби представляются относительно темными пятнами. Наоборот участки сглаженной поверхности воды, покрытые пленкой, отражают солнечные лучи под меньшим углом к линии горизонта и попадают к наблюдателю только на значительном удалении от них. Поэтому пятна пленки нефтепродуктов вблизи кажутся более темными, чем окружающая их чистая вода.

Поскольку максимум люминесцентного излучения лежит в коротковолновой области видимой части спектра, а основная масса пятен нефтепродуктов имеет цвет в области синего, т. е. тоже в коротковолновой части спектра, то и спектральная характеристика телевизионной камеры должна иметь максимум в этой же области спектра, в отличие от камер, применяемых для вещательного телевидения. Спектральная характеристика [5] сурьмяно-цезиевого фотокатода приведена на рис. 2.

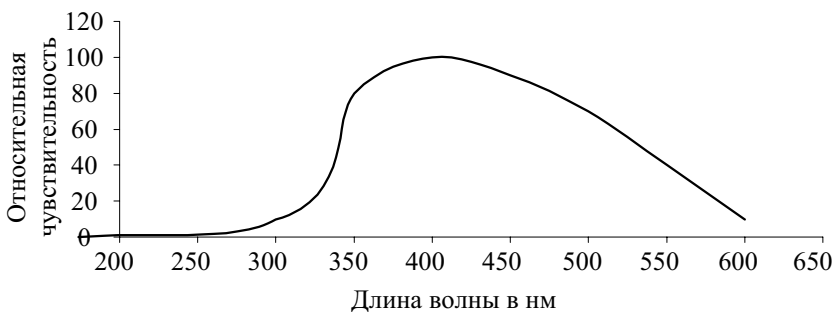


Рис. 2

Для выявления пятен нефтепродуктов можно использовать тепловизионные камеры, работающие в диапазоне 8–13 мк, при этом вода является абсолютно черным телом (коэффициент теплового излучения близок к 1).

При наличии на поверхности пленки нефтепродуктов излучательная способность воды нарушается. Это связано с тем, что нефтяной слой изменяет условия термодинамического равновесия и приводит к образованию температурной аномалии – температурному контрасту между чистой водой и водой, загрязненной нефтепродуктом. Аномалия обусловлена:

- уменьшением скорости испарения с поверхности воды из-за подавления нефтяной пленкой высокочастотных водяных волн;

- снижением излучательной способности из-за более высокого коэффициента отражения нефтепродуктов;

- более низкой теплопроводностью нефти и нефтепродуктов (в 3–5 раз) и теплоемкостью (в 1,5–2,5 раза) по сравнению с чистой водой.

В результате, как показывают расчеты, наиболее вероятны следующие отличия в радиационных температурах нефти и чистой воды: в солнечный день 1–2 °С, ночью 0,5–1 °С.

Из всего сказанного видно, что яркость пленок нефтепродуктов может служить характеристикой загрязнения. Однако при этом следует иметь в виду, что сама яркость сильно изменяется в зависимости от степени освещенности пленок, поэтому непосредственно использовать яркость в качестве индикатора интенсивности пленок возможно только при условии, если будут исключены колебания яркости, обусловленные изменением освещенности. Этого можно добиться, если использовать метод яркостного контраста [6].

Наблюдение любого объекта на воде связано с определением разницы яркости самого объекта и его окружающей среды [6].

$$K = \frac{R_{\Pi} - R_{\Phi}}{R_{\Phi}} = \frac{R_{\Pi}}{R_{\Phi}} - 1,$$

где R_{Π} и R_{Φ} – соответственно яркости пленки и фона, измеренные одновременно при одной и той же освещенности, а K – фотометрический контраст. При расчете контраста составляющая освещенности практически исключается (так как в формулу входит отношение яркостей) и контраст будет определяться только собственным излучением пленки нефтепродуктов.

Отношение $r_{\Pi} = \frac{R_{\Pi}}{R_{\Phi}}$ носит название относительного коэффициента яркости, собственно он и определяет контраст.

Так как водная поверхность всегда покрыта какой-либо пленкой, то найти чистую воду, относительно которой измеряют контраст, трудно. Поэтому в качестве эталона используют баритовую бумагу, обладающую сравнительно постоянными отражательными свойствами (коэффициент отражения 0,8 – 0,85).

Яркость этого эталона всегда выше яркости воды и пятен, и в качестве относительного коэффициента яркости используют отношение

$$r_{\Pi} = \frac{R_{\Pi}}{R_{\text{ЭТ}}}.$$

Снятые экспериментальные зависимости, показывают связь относительного коэффициента яркости с интенсивностью пятен в баллах (рис. 3).

Одним из недостатков является сравнительно малая чувствительность к мощным разливам яркой красно-бурой сырой нефти, поскольку,

как уже выяснилось, аппаратура работает в диапазоне фиолетово-синих волн.

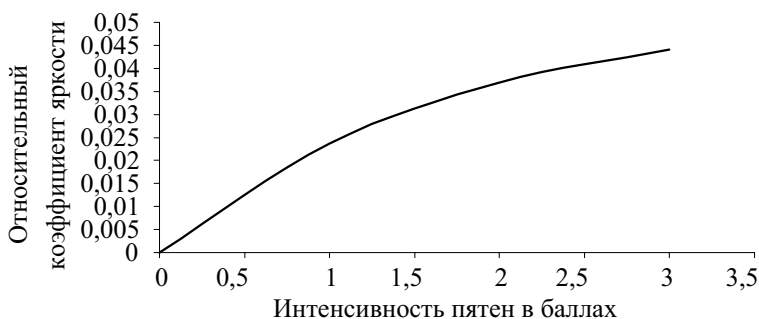


Рис. 3

Аналогичные зависимости получены и при использовании тепловизионной аппаратуры. В этой аппаратуре параметром, определяющим интенсивность пятен является скачок температуры (рис. 4).

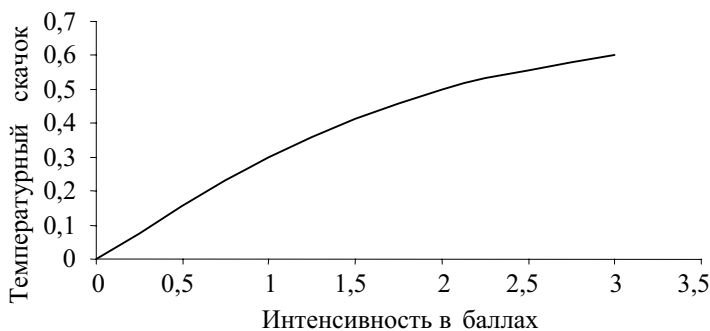


Рис. 4

После того, как был получен информационный кадр, т. е. видеосигнал и соответствующее ему изображение загрязненного участка акватории, независимо от вида датчика (телевизионная или тепловизионная камера), основная задача дальнейшей обработки состоит в выделении контура пятна нефтепродукта. Этап выделения контуров является ключевым в решении задачи анализа информационного кадра. Методов выделения контуров достаточно много. Широко используемое понятие “контур” обычно отождествляется с совокупностью точек изображения с быстро изменяющейся яркостью. Многие авторы называют контурами “линии высокого градиента яркости на изображении”, другие

относят к контурам “точки изображения, которые образуют линии и в которых происходят значительные перепады яркости или цвета”. Причем, если в двухградационном изображении яркостный перепад определит положение контура однозначно, то понятие контур полутонового изображения, каким является полученный информационный кадр, сохраняет свой качественный характер [7,8].

Поэтому для многоградационного изображения множество точек может быть значительно ограничено, если для их определения использовать соотношения

$$|\text{grad } B(X_k, Y_k)| > \delta_1$$

или

$$\Delta B(X_k, Y_k) > \delta_2.$$

Изменяя величину δ , возможно получение контуров изображения с различной яркостью. Величину δ целесообразно выбирать в соответствии со шкалой, отражающей интенсивность яркостей загрязнения нефтепродуктами. В дальнейшем обработка может вестись по каждому выделенному контуру в отдельности, а также по контуру, характеризующему максимальную площадь пятна нефтепродуктов.

Площадь S можно определить, например, суммированием длительностей видеоимпульсов, возникающих от пересечения изображения пятна сканирующим лучом передающей телевизионной трубки

$$S = \frac{S_o}{ZT} \left(\frac{D}{F} \right)^2 \sum_{i=1}^n t_i,$$

где S_o – площадь кадра на фотокатоде передающей трубки; Z – число активных строк разложения; T – длительность прямого хода строчной развертки; D – расстояние объекта от телекамеры; F – фокусное расстояние объектива; t_i – длительность видеоимпульсов.

В статье рассмотрены только некоторые возможности получения контуров пятен нефтепродуктов и вычисление остальных характеристик загрязнения аппаратными средствами. Основная задача состоит в получении информационного кадра. Все остальные вычисления, имея в наличии информационный кадр, можно выполнить автоматически с помощью ЭВМ.

Библиографический список

1. *Нельсон-Смит А.* Загрязнение моря нефтью. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 50 с.
2. *Митник Л. М.* Дистанционное зондирование нефтяных загрязнений акваторий // Сб. ВНИИ гидрометеорологической информации. Обнинск. 1997. 185 с.
3. *Авиационные наблюдения и контроль над загрязненностью вод, суши и морей. Методические указания.* Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 192 с.
4. *Васильев А. П.* и др. Оценка контроля нефтяных пятен на поверхности океана, наблюдаемых с космических носителей в видимом диапазоне спектра // Исследование Земли из космоса. 1995. № 3. С. 64–72.
5. *Назаров Н. М., Николаев А. Н., Фридман Ш. Д.* Дистанционные и экспрессивные методы определения загрязнения окружающей среды. М.: Гидрометеоиздат, 1977. 190 с.
6. *Кондратьев К. Я, Бузников А. А., Поздняков Д. В.* Дистанционное обнаружение загрязнений водных бассейнов и фитопланктона оптическими методами // Водные ресурсы. 1972. № 8. С. 65–75.
7. *Касперович Л. В., Колесник М. И., Ушков Д. А.* Быстрый алгоритм оконтуривания объектов на изображениях // Автометрия. 1990. № 1. С. 11–16.
8. *Шифрин Л. А.* Контурные полутоновых изображений // Вопросы теории и проектирования телевизионных систем передачи, приема, обработки и отображения информации: Межвуз. сб. / ЛИАП. Л., 1977. С. 52–56.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ВИЗИРОВАНИЯ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Попавшие в воду нефтепродукты (НП) и другие загрязняющие вещества с течением времени претерпевают ряд последовательных превращений под воздействием турбулентности, солнечной радиации, ветра и других гидрометеорологических и биохимических факторов. Около 50% их количества испаряется в виде легких фракций, 23–28% образует тяжелые оседающие агрегаты, 1–5% растворяется в воде и только 15–17% остается в пленочной фазе [1]. Пленочное состояние – одна из первоначальных форм существования загрязнений в водной среде и наиболее яркий компонент нефтяного загрязнения. Форма и интенсивность пятен пленок НП, которые являются самым распространенным видом загрязнений водной поверхности, их пространственное положение значительно изменяются под воздействием гидрометеорологических факторов.

Под влиянием непостоянных во времени и пространстве турбулентных потоков, присущих пограничным средам вода–воздух, пленка НП разрывается, образуя отдельные пятна различных размеров, формы, интенсивности и густоты. Чем больше динамичность этих сред, тем меньше размеры пятен. С появлением даже слабого ветра и течения пленка НП разрывается на отдельные пятна, которые быстро вытягиваются, приобретая продолговатые формы. По мере усиления ветра или течения длина этих полос увеличивается, а ширина уменьшается.

В зависимости от условий освещения и направления визирования пленка НП может достаточно четко выделяться на фоне чистой воды своим сравнительно ярким белесоватым тоном, особенно в маловетреную погоду. Не менее отчетливо пленка может контрастировать с участками чистой воды и при наличии на них ряби.

Из-за большого количества разнообразных факторов, влияющих на качество ТВ-контроля и на возможность автоматической обработки ТВ-изображений, необходимым условием повышения точности интерпретации результатов измерений является наличие экспериментальных данных об угловом распределении коэффициента спектральной яркости

(КСЯ) и зависимости КСЯ от характера поверхностного волнения. Для выявления наилучших условий ТВ-контроля и измерения параметров загрязнения водной поверхности, для выработки рекомендаций по использованию ТВ-аппаратуры на конкретном пункте наблюдения воспользуемся результатами проведенных исследований [2–6].

В литературе [2] приведены данные большого количества самолетных наблюдений пленок НП, черно-белых фотографий, полученных при различных условиях съемки, классификация пятен НП по интенсивности, методика проведения авиационного инспектирования акватории и оценки степени и динамики загрязнения водной поверхности. С целью исключения зависимости яркости пленки от освещенности измерялся яркостный контраст пленки относительно чистой воды

$$K = \frac{R_{\text{п}} - R_{\text{ф}}}{R_{\text{ф}}} = \frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{ф}}} - 1,$$

где $R_{\text{п}}$ – яркость пятна НП и $R_{\text{ф}}$ – яркость фона (чистой воды), измеренные при одной и той же освещенности и под углом 90° к поверхности воды. В классификации, в которой выделены три основные группы пятен, большое значение имеет указание признаков, демаскирующих пятна НП. К этим признакам отнесены вид и структура пятна; тон и цвет; отсутствие ряби и сглаживание волн.

Пятна малой интенсивности, яркостный контраст которых равен 4–12%, имеющие белесоватый или белесовато-серый оттенок иногда со слабым маслянистым отблеском, наиболее четко просматриваются со стороны Солнца и против ветра под углом 45° – 70° от вертикали.

Пятна средней интенсивности с яркостным контрастом 20–30% имеют синеватые или серовато-стальные пленки и приобретают в ясную погоду вид яркой зеркальной поверхности при достаточно больших углах зрения от вертикали.

Пятна большой интенсивности, яркостный контраст которых более 45%, а цветовые характеристики могут меняться от лилово-фиолетовых до темно-зеленых (в случае нефтяного загрязнения) с характерными радужными (переливающимися) тонами, четко видны при углах зрения меньших 45° от вертикали. При больших углах такие пятна в ясную погоду могут иметь вид яркой зеркальной поверхности. Отметим, что сравнительно яркий светло-фиолетовый цвет пленки свидетельствует о наличии в ней компонентов керосинов, а темно-фиолетовый – бензинов.

Максимум излучения почти всех компонентов, входящих в пленки НП приходится на фиолетово-синий участок видимого спектра с длинами волн примерно 400–450 нм [2]. Яркость пленок НП определяется не только собственным излучением, но и отражательной способностью их поверхности. Эта способность характеризуется показателем преломления, который зависит от состава и концентрации НП.

В ближней УФ и видимой областях спектра нефтяные пленки обладают отличающимися от чистой воды спектрами рассеяния (из-за влияния собственных полос поглощения нефти) и отражения [5]. Кроме того, нефть может флуоресцировать. В ИК-области коэффициент преломления нефти больше, чем чистой воды, что приводит к более высоким коэффициентам отражения от нефтяных пленок.

В видимом диапазоне спектра и в широком диапазоне углов визирования значения коэффициентов отражения водной поверхности как в отсутствие, так и при наличии пленок НП не превышает нескольких процентов [3]. Нефть имеет больший коэффициент отражения, чем чистая вода (для надир: ~ 4% в случае нефти, 2% в случае чистой воды). Кроме того, выходящее из-под воды излучение приводит к увеличению яркости чистой воды [6].

Для сравнения условий наблюдения в качестве критерия выбрана величина контраста нефтяной пленки на фоне чистой воды, рассчитываемого по формуле [3]

$$K = \frac{|I_{\text{н}} - I_{\text{в}}|}{\max\{I_{\text{н}}, I_{\text{в}}\}},$$

где $I_{\text{н}}$ – интенсивность излучения от нефтяной пленки, а $I_{\text{в}}$ – от чистой воды. Были получены зависимости контраста K от вертикального угла визирования Θ для различных зенитных углов Солнца Θ_0 , азимутальных углов визирования φ и спектральных диапазонов (445, 490, 565, 670, 765 нм). Анализ приведенных графиков показывает:

в видимом спектральном диапазоне максимальный контраст (вода ярче нефти) распределялся в промежутке углов $\Theta = 30^\circ - 60^\circ$, причем в большинстве вариаций максимум K приходился на $\Theta \approx 45^\circ$;

в ИК-диапазоне (вблизи 800 нм) нефть ярче воды, и максимальное значение K сдвигается к $\Theta = 0^\circ$ (направление визирования перпендикулярно поверхности воды).

Положение ТВ-камеры относительно воды с изображением указанных в тексте углов визирования (наблюдения) и направления солнечного освещения приведено на рис. 1, где Θ – вертикальный угол визирования; Θ_0 – зенитный угол Солнца; φ – азимутальный угол визирования, отсчитываемый от плоскости солнечного вертикала ($\varphi = 0$ – против Солнца, $\varphi = 180^\circ$ – по Солнцу).

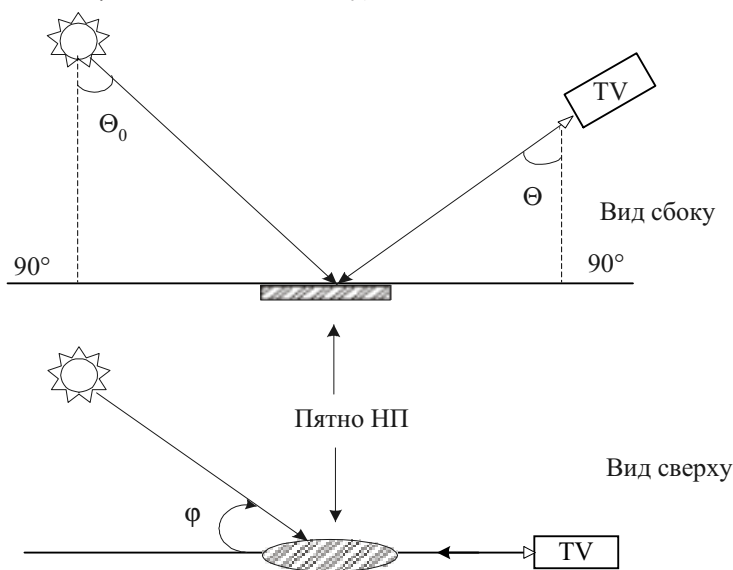


Рис. 1

Экспериментальные данные, относящиеся к угловому распределению величины наблюдаемого контраста, приведены в литературе [4]. Азимутальная зависимость контраста для различных вертикальных углов визирования показала, что наибольший контраст достигается при φ близких к 45° . Зависимость величины контраста от угла визирования в плоскости солнечного вертикала показала относительное постоянство наблюдаемого контраста на интервале углов $\Theta = 0 - 40^\circ$ и последующее его уменьшение при $\Theta > 40^\circ$.

Сравнивая и анализируя результаты экспериментальных исследований, выполненных как с помощью натуральных наблюдений, так и с помощью машинного моделирования, можно прийти к следующим выводам по выбору наиболее эффективного размещения ТВ-камер для круглосуточного контроля за состоянием поверхности воды в реке:

1. В видимом диапазоне спектра в дневное время ТВ-камеру целесообразно направлять на водную поверхность под углом $\Theta = 45^\circ$.

2. Вести наблюдение с помощью ТВ-камеры желательнее с той стороны, которая большую часть дня является затененной и наветренной.

3. В темное время суток необходимо использовать ИК-диапазон, а ТВ-камеру располагать вертикально с $\Theta = 0^\circ$.

4. Использование поляризационных фильтров для увеличения контраста пленки НП на поверхности воды не приводит к значительному эффекту [7,8], зато требует постоянного присутствия человека-оператора.

Библиографический список

1. *Фащук Д. Я., Крылов В. Н., Иероклис М. К.* Загрязнение Черного и Азовского морей пленками нефтепродуктов // Водные ресурсы. 1996. Т. 23. № 3. С. 361–375.

2. Авиационные наблюдения и контроль над загрязненностью вод, суши и морей. Методические указания. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 192 с.

3. *Васильков А. П.* и др. Оценка контрастов нефтяных пятен на поверхности океана, наблюдаемых с космических носителей в видимом диапазоне спектра // Исследование Земли из космоса. 1995. № 3. С. 64–72.

4. *Карасев А. Б., Понтюхов С. В., Слащев В. Г.* Выбор условий дистанционного зондирования океанических образований в видимой области спектра с учетом эффекта береговой зоны // Исследование Земли из космоса. 1987. № 5. С. 56–65.

5. *Назаров И. М., Николаев А. Н., Фридман Ш. Д.* Дистанционные и экспрессивные методы определения загрязнения окружающей среды. М.: Гидрометеиздат, 1977. 190 с.

6. *Z. Otzamba.* A thin oil film covering the sea surface as a modifier of the downward transmission of light // Oceanologia. 39(4). 1997. P. 397–411.

7. *Бузников А. А.* и др. Дистанционная индикация загрязнений на поверхности моря поляризационным методом // Водные ресурсы. 1975. № 3. С. 128–132.

8. *Васильков А. П., Кондрашин Т. В., Кротков Н. А.* Об эффективности поляризационных измерений при пассивном дистанционном зондировании океана в видимой области спектра // Исследование Земли из космоса. 1987. № 5. С. 66–74.

ОБНАРУЖЕНИЕ СЛИКОВ ТЕЛЕВИЗИОННЫМИ СРЕДСТВАМИ

Две основные причины позволяют дистанционно обнаруживать пленку нефти, нефтепродуктов или поверхностно активных веществ (ПАВ) на поверхности воды. Первая – изменение оптических характеристик поверхности, приводящее к изменению отражательных свойств ее в различных областях светового спектра. Вторая – изменение физического состояния поверхности вследствие изменения волнения, пенообразования, испарения и т. д. под влиянием пленки [1].

Рассмотрим подробнее вторую причину. Выплеснутая на чистую поверхность воды нефть быстро растекается под воздействием поверхностного натяжения в пятно, часто имеющее вид слика. Нефтяная пленка изменяет сам режим волнения на поверхности воды. Отмечают несколько механизмов этого явления:

1. Гашение волны связано с необратимыми упруго-вязкими процессами, происходящими в самой пленке.
2. Гашение вызывается вязкой диссипацией в толще самой воды.

Теория объясняет гашение волнения прилипанием молекул ПАВ к поверхности воды. Прилипание препятствует развитию в воде волновых процессов, тормозит их. Первый механизм приводит к выделению в тонкой пленке большого количества вязкой энергии. Второй распространен на слой воды, в которой развиваются волновые процессы.

В действительности, вероятно, работают оба механизма, но основное значение, несомненно, имеет второй. Вязкая энергия гашения слишком велика, чтобы быть локализованной только в тонкой пленке, при этом пленка просто бы испарилась. Когда пленка нефти диспергируется на отдельные частицы, происходит изменение стратификации верхнего слоя моря. Соответственно изменяются дисперсионные соотношения для воды, и это также может приводить к гашению волнения.

Таким образом, вторая причина видения нефти, нефтепродуктов и вообще ПАВ дистанционными оптическими методами связана с формированием гидродинамического контраста на водной поверхности, покрытой пленкой ПАВ. Действительно, наблюдения показывают, что

основное их действие состоит в гашении капиллярных волн. В итоге на поверхности происходит формирование сликов – участков с относительно малой интенсивностью поверхностного волнения [2].

Результаты наблюдений образования сликов можно свести к следующему:

механизм образования сликов, связан с гашением гравитационно-капиллярной ряби пленкой ПАВ;

сликовые полосы обычно наблюдаются при скорости ветра до 5–8 м/с, причем ширина полос с усилением ветра уменьшается;

выглаживание поверхности воды характеризуется уменьшением в слике среднеквадратичного наклона ветровых волн, в основном проявляющееся в высокочастотной части спектра.

Параметрами пленок, характеризующих гашение гравитационно-капиллярной ряби, являются : концентрация ПАВ– Γ , поверхностное натяжение воды – $\sigma(\Gamma)$ и коэффициент упругости – $P = -\Gamma \frac{d\sigma}{d\Gamma}$, который может меняться от нуля до достаточно больших значений. Рассматривая пленку ПАВ как пассивную примесь, изменение Γ можно выразить, исходя из хорошо известного одномерного уравнения сохранения вещества

$$\frac{\partial \Gamma_1}{\partial t} + \Gamma_0 \frac{\partial U}{\partial x} = D \frac{\partial^2 \Gamma_1}{\partial x^2}.$$

Здесь: Γ_0 – равновесное значение концентрации; $\Gamma_1 = \Gamma - \Gamma_0$ – отклонение от равновесного значения, обусловленное прохождением волны; U – горизонтальная скорость частиц в волне; D – коэффициент турбулентности или молекулярной диффузии.

Как показывает анализ, заметного выглаживания поверхности воды не происходит, если параметр p не превышает значения около 0,05 при всех изменениях концентрации Γ . Выглаживание начинается с ряби длиной 1–1,5 см. Полученные в экспериментах данные показывают [2], что в слике действительно происходит относительное ослабление всех спектральных составляющих поверхностного волнения в широком диапазоне частот. На рис. 1 изображена функция $Q(f) = S_B(f)/S_p(f)$, характеризующая относительное изменение спектра в области слика (кривая 1) по сравнению с окружающей фоновой рябью (кривая 2) $P(f) = S_p(f)/S_r(f)$. Из кривой $Q(f)$ видно, что во всей полосе частот 2–30 Гц спектральная плотность в слике меньше, чем в окружающей фоновой ряби.

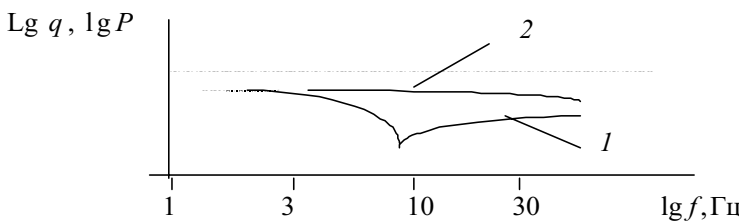


Рис. 1

Причинами пространственной модуляции яркости поверхности воды при этом являются, во-первых, неоднородность по углу яркости зеркально отраженного фасеточной поверхностью света, а во-вторых, зависимость коэффициента Френеля от угла падения света на отражающую фасетку.

В конечном счете, именно наклон отражающей площадки определяет ее яркость. Поэтому анализ изображения поверхности воды дает прежде всего пространственный спектр $Y_S(k, q)$ (в полярных координатах) наклонов элементов поверхности (точнее спектр модуля градиента поверхности). Однако этим информация не ограничивается: если спектр наклонов поделить на квадрат волнового числа k , то получится оценка спектра возвышений поверхности

$$\Psi(k, \theta) = k^2 \Psi_S(k, \theta).$$

Для получения информации о спектре в возможно большем интервале значений волновых чисел необходимо получить изображение поверхности с высоким разрешением по пространству.

Капиллярные волны на поверхности воды, несмотря на свою миниатюрность, играют важную роль в ряде существенных явлений. Они во многом определяют отражательную способность поверхности воды в видимом свете и поэтому их наличие или отсутствие (а последнее служит индикатором явлений выглаживания) может быть зафиксировано в том числе и дистанционно с самолетов или ИСЗ.

Таким образом, признаком наличия пятен ПАВ может служить отсутствие высокочастотных составляющих в спектре волн от капиллярной ряби при наличии последних на чистой воде. В то же время известно, что яркость склонов волн зависит от их рельефа и что фотографическое изображение или телевизионный сигнал, являющиеся адекватным отображением исходного светового распределения, несут в себе информацию о структуре светового пространственного распределения. Естественным требованием, предъявляемым к ТВ-системе, является

в этом случае то, что ее разрешающей способности должно быть достаточно для воспроизведения наличия светового излучения от капиллярной ряби.

Задача обнаружения пятна ПАВ в этом случае может быть решена путем получения текущего пространственного спектра Фурье видеозображения [3] и определения отсутствия в нем высокочастотных составляющих от капиллярной ряби. Учитывая тот факт, что для выявления капиллярных колебаний требуется возможно большее разрешение ТВ-системы, для анализа наиболее подходит яркостная составляющая ТВ-сигнала, несущая информацию о мелкоструктурных деталях передаваемого изображения.

В общем случае черно-белое изображение, меняющееся во времени, есть распределение световой энергии в плоскости (x, y) в момент времени $t - O(x, y, t)$. Его можно выразить через тройной интеграл Фурье

$$O(x, y, t) = \frac{1}{2\pi} \iiint S(\omega_x, \omega_y, \omega) \times \\ \times \exp[j(\omega_x x + \omega_y y + \omega t)] d\omega_x d\omega_y d\omega,$$

где ω_x, ω_y – пространственные круговые частоты, связанные с длиной волны λ_x, λ_y и с числом периодов u, y на единицу длины в направлении осей (x, y) соотношениями $\omega_x = 2\pi u = 2\pi/\lambda_x$, $\omega_y = 2\pi y = 2\pi/\lambda_y$; ω – круговая частота (временная); $S(\omega_x, \omega_y, t)$ – непрерывный пространственно-временной спектр изображения $O(x, y, t)$:

$$S(\omega_x, \omega_y, \omega) = \\ = \iiint O(x, y, t) \exp[-j(\omega_x x + \omega_y y + \omega t)] dx dy dt.$$

В случае сечения потока изображений по оси времени в любой момент t , оно становится неподвижным и является только функцией координат в плоскости (x, y)

$$O(x, y) = \frac{1}{2\pi} \iint S(\omega_x, \omega_y) \exp[j(\omega_x x + \omega_y y)] d\omega_x d\omega_y,$$

$$S(\omega_x, \omega_y) = \iint O(x, y) \exp[-j(\omega_x x + \omega_y y)] dx dy.$$

Представляя изображение для обработки в ЭВМ в цифровой форме в некоторый зафиксированный момент времени, его можно записать в виде массива отсчетов $f(n,m)$ в некоторой прямоугольной области. Более удобно – в виде прямоугольной матрицы $\mathbf{F}=[F(n,m)]$, где n принимает значения в области $0, 1, \dots, N-1$, а m – в области $0, 1, \dots, M-1$. В этом случае прямое двумерное дискретное преобразование Фурье (ДПФ) записывается формулой

$$C_{lk} = \frac{1}{NM} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} f(n,m) W_1^{ln} W_2^{km},$$

где комплексное ядро преобразования.

$$W(l,k,n,m) = W_1^{ln} W_2^{km},$$

$$W_1 = \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} l n\right), l \in \{0, 1, \dots, N-1\},$$

$$W_2 = \exp\left(-j \frac{2\pi}{M} k m\right), k \in \{0, 1, \dots, M-1\}.$$

разделимо и удовлетворяет условию ортогональности.

Если ядро двумерного ДПФ разделимо, то прямое преобразование можно записать в матричной форме

$$[c_{l,k}] = [\mathbf{A}] [f(n,m)] [\mathbf{A}]_R,$$

$[c_{l,k}]$ – матрица спектральных коэффициентов (трансформант) ДПФ, $[f(n,m)]$ – матрица значений (отсчетов) сигнала, $[\mathbf{A}]$ – квадратная матрица преобразования размером $(N \times N)$ для $N = 2^n, n = 1, 2, \dots$

$$[\mathbf{A}] = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} w_1^0 & w_1^0 & \dots & w_1^0 \\ w_1^0 & w_1^1 & \dots & w_1^{N-1} \\ w_1^0 & w_1^2 & \dots & w_1^{2(N-1)} \\ w_1^0 & w_1^{N-1} & \dots & w_1^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix},$$

$[\mathbf{A}]_R$ – аналогичная квадратная матрица преобразования размером $(M \times M)$ для $M = 2^m, m = 1, 2, \dots$

Интерпретируя полученные выражения, получаем спектральные коэффициенты (трансформанты) двумерного ДПФ как результат последовательного выполнения двух одномерных преобразований двумерного сигнала по строкам и по столбцам (кадрам). Первое одномерное преобразование (умножение на матрицу $[A]$ слева) соответствует ДПФ столбцов сигнальной матрицы $[f(n,m)]$. Второе одномерное преобразование (умножение матрицы спектральных коэффициентов $[c_{l,m}] = [A][f(n,m)]$ справа на матрицу $[A]_R$) соответствует преобразованию по строкам, в процессе которого определяются спектральные коэффициенты (трансформанты) $[c_{l,k}]$ ДПФ.

Так как матрица ядра ДПФ симметрична по отношению к ее главной диагонали, матрицы $[A]$ и $[A]_R$ являются унитарными и по определению

$$[A]^{-1} = [A^*]^T = [A],$$

$$[A]^{-1}_R = [A^*]^T_R = [A]_R,$$

где $[A^*]$, $[A^*]_R$ – комплексно-сопряженные, а $[A]^T$, $[A]^T_R$ – транспонированные матрицы $[A]$, $[A]_R$. На основе этого обратное двумерное ДПФ в матричной форме записи имеет вид

$$[f(n,m)] = [A][c_{l,k}][A]_R.$$

Используя вышесказанное, для нахождения через Фурье-преобразование спектральной плотности ТВ-сигнала и его корреляционных функций можно построить алгоритм определения наличия слика в телевизионном сигнале водной поверхности.

Как известно, амплитудный спектр $[c_{l,k}]$ не может служить достоверной характеристикой исследуемого процесса, поскольку он зависит от момента измерения. Чтобы подойти к задаче обнаружения слика, необходимо, во-первых, решить задачу получения достоверной оценки спектра, во-вторых, выделить его наиболее характерную область и, в-третьих, обеспечить нормализацию полученной оценки, исключая влияние мешающих факторов – освещенности, интенсивности волнения и т.п.

Достоверную оценку пространственного спектра дает осреднение квадрата $[c_{l,k}]$ на достаточно длительном временном интервале, не превышающим однако половины временного интервала наблюдения слика. Если этот интервал недостаточен возможно употребление и комбинированного алгоритма: вначале производится осреднение выбранных из $[c_{l,k}]$ коэффициентов по группе соседних пространственных частот, а затем осреднение по времени.

Используя полученную оценку, взвешиванием спектральных коэффициентов можно выделить наиболее информативную часть, по которой возможно принятие решения о наличии слика. Для исключения влияния мешающих факторов необходимо провести нормировку полученного ранее признака либо на дисперсию сигнала, либо на аналогично сформированный признак по наиболее устойчивой части спектра.

Обнаружение наличия слика возможно путем сравнения интервалов автокорреляции текущего изображения контролируемой поверхности и с заведомо чистой водной поверхностью (эталонного). Достоинство такой оценки в универсальности и робастности, однако чувствительность уступает спектральному методу.

Работа корреляционного алгоритма (рис. 2) начинается с анализа ТВ-сигнала по строкам и по кадрам (соответственно верхняя и нижняя ветви структурной схемы). В блоках 1С и 1К вычисляются автокорреляционные функции по строкам и кадрам, в блоках 2С и 2К определяются соответствующие коэффициенты корреляции. Далее в блоках 3С и 3К вычисляются интервалы корреляции. В запоминающих устройствах хранятся значения интервалов корреляции эталонных выборок, полученные предварительно. В блоках сравнения 4С и 4К реализуется сравнение текущих интервалов корреляции с эталонными и результат сравнения пересылается в решающий блок, в котором и принимается решение о наличии сигнала от слика.

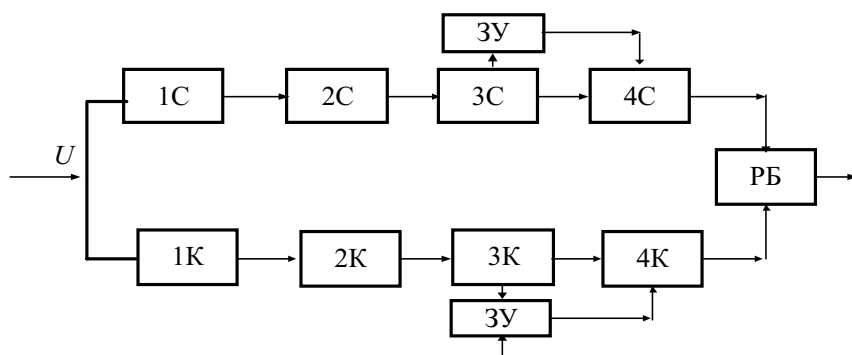


Рис. 2

Моделирование рассмотренного алгоритма можно реализовать в хорошо известных моделирующих программных пакетах MatCad или MatLab.

Библиографический список

1. Оптика океана / Под ред. *Монина А. С.* М.: Наука, 1983. 312 с.
2. *Нелено Б. А.* и др. Оптические методы спутниковой гидрофизики (Исследование окружающей среды с автоматических искусственных спутников Земли). Киев: Наукова думка, 1986. 287 с.
3. *Драган Я. П., Яворский И. Н.* Ритмика морского волнения и подводные акустические сигналы. Киев: Наукова думка, 1982. 248 с.

ИНВАРИАНТНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ НЕФТЯНЫХ ПЛЕНОК НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ПРИЗНАКАМ В СИСТЕМЕ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ

Любая система видеонаблюдения предназначена для анализа окружающей обстановки и принятия соответствующего решения. Ниже рассматривается подход к синтезу обнаружителя в системе видеонаблюдения, предназначенной для экологического контроля за нефтяными загрязнениями водной поверхности. Изображение водной поверхности получено с помощью цветного ТВ-датчика.

Одним из основных признаков, который позволяет отличить изображение нефтяной пленки от окружающей водной поверхности, является наличие цвета на изображении нефтяной пленки и его незначительное проявление на водной поверхности. Как известно, цветное изображение является векторным и состоит из трех компонентов: R , G , B – красный, зеленый и синий соответственно.

Задача сегментации изображений нефтяных пятен решалась в ряде работ. Отмечено [1], что цветоразностные сигналы $(R - Y)$ и $(B - Y)$, где Y – сигнал яркости, максимально информативны относительно признаков, отличающих нефтяную пленку от водной поверхности. Для водной поверхности $R - Y \approx B - Y$, а для нефтяного пятна $R - Y \neq B - Y$. В некоторых работах [1, 2] сегментация нефтяного пятна решена с участием оператора, который после обнаружения пятна вводит в устройство обработки измеренные его цветовые характеристики.

Задача автоматического обнаружения не менее актуальна. Ниже она решается в пространстве признаков $(R - Y)$ и $(B - Y)$.

Цветоразностные изображения $x_{R-Y} = x_1(\mathbf{r})$ и $x_{B-Y} = x_2(\mathbf{r})$, заданные на R , представим в виде

$$\mathbf{x}(\mathbf{r}) = [x_1(\mathbf{r}), x_2(\mathbf{r})] = \mathbf{S}(\mathbf{r}) + \mathbf{n}(\mathbf{r}) + \mathbf{n}_0(\mathbf{r}); \quad \mathbf{r} \in R \supset R^2, \quad (1)$$

где $\mathbf{S}(\mathbf{r}) = (S_1(\mathbf{r}), S_2(\mathbf{r}))$ – сигналы от нефтяной пленки, рассматриваемые как приращения контраста относительно фона водной поверхности $\mathbf{n}(\mathbf{r}) = (n_1(\mathbf{r}), n_2(\mathbf{r}))$ в цветоразностных каналах $(R - Y)$ и $(B - Y)$; $\mathbf{n}_0(\mathbf{r}) = (n_{01}(\mathbf{r}), n_{02}(\mathbf{r}))$ – шум, отображающий незначительные цветовые

флуктуации фона водной поверхности, ниже рассматриваемый как белый.

Учитывая статистическую независимость цветоразностных спектральных компонентов изображения, запишем функционал правдоподобия двухкомпонентного изображения

$$p(\mathbf{x}_R / \bar{\Theta}) = \prod_{i=1}^2 p(x_i)_R = \\ = k^2 \exp\left\{-\frac{2}{N_0} \left[\sum_{i=1}^2 \int_R (x_i(\mathbf{r}) - S_i(\mathbf{r}) - n_i(\mathbf{r}))^2 d\mathbf{r} \right]\right\}, \quad (2)$$

где N_0 – спектральная плотность цветовых флуктуаций фона в цветоразностных каналах; k^2 – постоянный коэффициент; $\bar{\Theta}$ – вектор неизвестных параметров, который включает в себя неизвестный фон водной поверхности $\mathbf{n}(\mathbf{r}) = (n_1(\mathbf{r}), n_2(\mathbf{r}))$ и неизвестный сигнал $\mathbf{S}(\mathbf{r}) = (S_1(\mathbf{r}), S_2(\mathbf{r}))$; $\bar{\Theta} = \mathbf{m}(\mathbf{r}) = \mathbf{n}(\mathbf{r}) + \mathbf{S}(\mathbf{r})$.

Семейство распределений векторного изображения обозначим как

$$\{p(\mathbf{x}_R / \bar{\Theta}) : \bar{\Theta} \in \Omega\}. \quad (3)$$

Параметрическое пространство Ω состоит из пространства ограниченных на R функций $m_1(\mathbf{r})$ и $m_2(\mathbf{r})$:

$$\Omega = \{m_1(\mathbf{r}), m_2(\mathbf{r}) \in L_m\}. \quad (4)$$

Задачу обнаружения нефтяной пленки сформулируем как проверку сложных гипотез H_0 и H_1 :

$$H_0 : \bar{\Theta} \in \{m_1(\mathbf{r}) = m_2(\mathbf{r}) \in L_m\} = \Omega_0; \\ H_1 : \bar{\Theta} \in \{m_1(\mathbf{r}) \neq m_2(\mathbf{r}) \in L_m\} = \Omega_1. \quad (5)$$

Для решения задачи используется принцип инвариантности [3], который основан на представлении априорной неопределенности в виде некоторого преобразования g из группы G над входными данными.

Под воздействием преобразований g происходит изменение параметров исходного семейства распределений, т. е. преобразование g индуцирует в параметрическое пространство Ω некоторое преобразование g_* . Если совокупность g составляет группу: $\{g\} = G$, то $\{g_*\} = G_*$ есть также группа [3].

Для применения принципа инвариантности к задаче обнаружения необходимо выполнение следующих условий [3, 4]:

1. Семейство распределений $\{p(\mathbf{x}_R / \bar{\Theta}) : \bar{\Theta} \in \Omega\}$ обладает свойством симметрии относительно группы G , т.е. каждому элементу $g \in G$ в G_* найдется такой элемент g_* , что $g_* \bar{\Theta} \in \Omega$ и

$$p(g \mathbf{x}_R / g_* \bar{\Theta}) \times \left| \frac{\partial g \mathbf{x}_R}{\partial \mathbf{x}_R} \right| = p(\mathbf{x}_R / \bar{\Theta}), \quad (6)$$

где $\frac{\partial g \mathbf{x}_R}{\partial \mathbf{x}_R}$ – матрица Якоби.

2. Индуцированная группа G_* преобразований g_* пространства Ω сохраняет гипотезы H_0 и H_1 : $g_* \bar{\Theta} \in \Omega_i$; $i = 0, 1$ для всех $\bar{\Theta} \in \Omega_i$ и $g_* \in G_*$.

Переходя к решению поставленной задачи, отметим, что преобразования сдвига

$$g\mathbf{x}(\mathbf{r}) = \mathbf{x}(\mathbf{r}) - \bar{\Delta}(\mathbf{r}); \quad \bar{\Delta}(\mathbf{r}) = \Delta(\mathbf{r}) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad \Delta(\mathbf{r}) \in L_\Delta; \quad \mathbf{r} \in R, \quad (7)$$

где L_Δ – пространство ограниченных на R функций со значениями на $(-\infty, \infty)$, описывающее исходную априорную неопределенность относительно фона. Нетрудно показать, что их совокупность удовлетворяет условиям группы. Эта группа индуцирует в параметрическое пространство Ω группу G_* преобразований

$$g_* \bar{\Theta}(\mathbf{r}) = \begin{bmatrix} m_1(\mathbf{r}) \\ m_2(\mathbf{r}) \end{bmatrix} + \Delta(\mathbf{r}) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

При этом нетрудно проверить выполнение условия симметрии (6) семейства распределений (3), (4) относительно группы G , а индуцированная группа сохраняет гипотезы H_0 и H_1 , определяемые из (5) для всех $\bar{\Theta} \in \Omega_i$ и $g_* \in G_*$. Таким образом, выполнены необходимые условия, которые позволяют к данной задаче применить принцип инвариантности.

Следующим шагом решения задачи является определение максимальных инвариантов (МИ) групп G и G_* [4].

В рассматриваемом примере статистика

$$z[\mathbf{x}(\mathbf{r})] = x_1(\mathbf{r}) - x_2(\mathbf{r}) \quad (9)$$

является МИ группы G преобразований сдвига (7).

МИ индуцированной группы G_* равен

$$\Theta_z = \Delta m(\mathbf{r}) = m_1(\mathbf{r}) - m_2(\mathbf{r}). \quad (10)$$

Затем, следуя инвариантному методу, задачу обнаружения сформулируем как проверку гипотез относительно МИ группы G_*

$$H_0 : \{\Delta m(\mathbf{r}) = 0\} = \Omega_0^z ; \quad H_1 : \{\Delta m(\mathbf{r}) \neq 0\} = \Omega_1^z .$$

Его функционал правдоподобия равен

$$p(z_R / \Theta_z) = k \exp \left[-\frac{2}{N_o} \int_R [z(\mathbf{r}) - \Delta m(\mathbf{r})]^2 d\mathbf{r} \right]. \quad (11)$$

Алгоритм принятия решения находим из сравнения логарифма отношения правдоподобия для МИ с порогом. Учитывая, что гипотеза H_1 относительно Θ_z является двусторонней, сравнение в соответствии с критерием Неймана-Пирсона осуществляется с двумя порогами c_1 и c_2

$$c_2(\alpha) < \ln l_{\Theta_z} = \ln \frac{p(z_R / \Theta_z \neq 0)}{p(z_R / \Theta_z = 0)} < c_1(\alpha), \quad (12)$$

где α – вероятность ложной тревоги.

Подставляя (9), (10), (11) в (12) получим правило принятия решения

$$\left| \int_R [x_1(\mathbf{r}) - x_2(\mathbf{r})] \Delta m(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \right| > c_1. \quad (13)$$

Полученное решающее правило является инвариантным, равномерно наиболее мощным и несмещенным [4], т. е. оптимальным в классе инвариантных решающих правил. Так как информация о весовой функции $\Delta m(\mathbf{r})$ отсутствует, то ее целесообразно заменить на равновесную, т.е. принять равной $\Delta m = const$.

На рис. 1 и 2 показана обработка на ЭВМ реального изображения водной поверхности, содержащего нефтяную пленку, в соответствии с алгоритмом (13). Рис. 1 содержит цветоразностные изображения ($R - Y$) (слева) и ($B - Y$) (справа). На рис. 2 показано исходное цветное изображение с двумя нефтяными пятнами (слева) и результат его обработки (справа), но не интегральный, как в алгоритме (13), а для каждого элемента изображения.

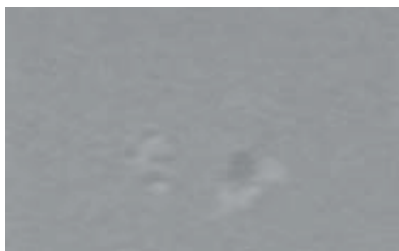


Рис. 1



Рис. 2

Результаты эксперимента подтверждают возможность использования цветового признака $R - Y \neq B - Y$ для автоматического обнаружения нефтяных пятен на водной поверхности.

Библиографический список

1. Тимофеев Б. С. Автоматизированные ТВ-системы оперативного контроля водных поверхностей // Отчет по НИР, ИК 02990003839 / СПбГУАП. СПб., 1998. С. 62–70.
2. Быков Р. Е., Бочко В. А. Многоспектральная интерактивная система обнаружения и измерения параметров объектов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 1998. Вып.1. С. 50–54.
3. Леман Э. Проверка статистических гипотез. М.: Мир, 1979. 341 с.
4. Кокс Д., Хинкли Д. Теоретическая статистика. М.: Мир, 1978. 560 с.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ С ПОМОЩЬЮ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМ

Рост интенсивности движения в городе приводит к необходимости повышения технической оснащенности контролирующих служб. Радиолокационные измерители скорости, реагирующие лишь на наиболее быстро движущееся транспортное средство в потоке, могут быть легко обнаружены «антирадарными» и не позволяют документировать результаты измерений. Поскольку телевизионная система (ТВС) является пассивной, то ее сложно обнаружить. Для ее установки не требуется вскрывать дорожное покрытие (в отличие от детекторов с индуктивной рамкой и феррозондом). Кроме этого, достоинством ТВС является высокая информативность, которая позволяет фиксировать общую дорожную обстановку, номерной знак и лицо водителя-нарушителя, идентифицировать транспортные средства, получать и изучать статистику дорожных потоков. Задача состоит лишь в том, чтобы извлечь эти данные с помощью цифровой обработки телевизионного сигнала. Как средство измерения ТВС обладают высокой разрешающей способностью и большой оперативностью.

При проектировании систем контроля дорожного движения нужно обеспечить высокую достоверность полученной информации, оперативность и возможность их развития за счет роста числа локальных систем и совершенствования программного обеспечения. В статье обсуждаются телевизионные методы контроля транспортных потоков и прецизионных измерений параметров движения транспортных средств, а также их классификации и документирования. Результаты исследований могут быть применены на железнодорожном и водном транспорте, для контроля воздушной обстановки в зоне аэропортов.

Телевизионные системы автоматизированного контроля транспортных потоков (ТВ АКТП) включают в себя одну или несколько телекамер, сопряженных с вычислительной системой, и могут решать следующие задачи:

измерения скорости движения транспортных средств, в том числе в потоке, с фиксацией нарушителей скоростного режима;

документирования изображений нарушителей правил дорожного движения (запись в сжатом виде изображения транспортного средства, номерного знака и лица водителя);

статистики дорожного движения с классификацией транспортных средств по признакам (габаритам, типам, цвету и др.);

фиксация изображений внешнего вида и номерных знаков проезжающего через контрольный пост транспорта и архивация в сжатом виде в памяти компьютера или на видеомagneтофон.

Видеосигналы с телекамер обрабатывают в вычислителе с целью *обнаружения* объектов при наличии фона и собственных шумов; для *различения* полезных и мешающих объектов используют совокупность признаков. В ходе эксплуатации системы ТВ АКТП пропуск объекта недопустим, а частые ложные тревоги крайне нежелательны, так как снижают достоверность принятых решений. Улучшение соотношения между вероятностями правильного обнаружения объекта и ложной тревоги достигается за счет учета априорной информации о совокупности признаков, отличающих полезный и мешающие объекты. Можно отметить следующие характерные признаки:

амплитудный признак A , отличающий объект от окружающего фона;
размерный признак P , характеризующий геометрические размеры объектов разных классов;

координатный признак K , позволяющий отличить объекты разных классов по расположению на земной поверхности;

траекторный признак T , позволяющий подразделить объекты по принадлежности к траектории движения;

скоростной признак C .

Трудность реализации алгоритмов распознавания связана с ограничением на информационную производительность вычислительных средств, использованных в каналах измерителей признаков. Эта особенность приводит к тому, что число обрабатываемых сигналов и помех в каналах различения должно быть ограничено. При этом в амплитудном канале (обнаружителе) необходимо анализировать всю информацию, поступающую с выходов ТВ-датчиков. В измерители признаков следует подавать уже прореженную информацию, прошедшую через амплитудный канал. Начиная от размерного канала до траекторного,

число вычислительных операций возрастает, поэтому для дальнейшего прореживания обрабатываемой информации желательно включать их последовательно. Информация в координатном и траекторном каналах в значительной степени уже прорежена и может быть обработана как последовательно, так и параллельно [1].

После обнаружения движущегося объекта в поле зрения телекамер решаются задачи измерения его координат и скорости. Если измеренная скорость V превышает пороговое значение $V_{\text{пор}}$, принимается решение о фиксации изображения транспортного средства. Чтобы было возможно идентифицировать номерной знак и личность водителя, изображение следует укрупнить без потери разрешающей способности и точно центрировать.

Вычисленные координаты $\{x, y, z\}$ объекта в пространстве позволяют точно навести камеру, а укрупнение изображения достигается изменением фокусного расстояния объектива фронтальной телекамеры или путем использования дополнительной камеры. Каждый снимок снабжают служебной информацией, содержащей дату и точное время съемки, значение скорости и, при необходимости, комментарии оператора.

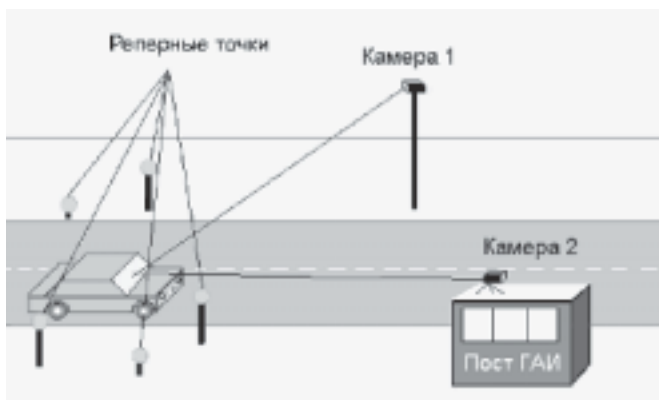


Рис. 1

Как сказано выше, дорожную обстановку анализируют с помощью двух или большего числа камер (рис. 1) [2]. Объектная координатная система $\{X Y Z\}$ привязана к *точке прицеливания*, а координата Z направлена вверх. Начала экранных координат $\{x_1 y_1 z_1, x_2 y_2 z_2, \dots, x_N y_N z_N\}$ устанавливают в центрах кадров камер, а оси координат ориенти-

руют в объектном пространстве при наведении камер. Координаты $\{x, y, z\}$ некоторой точки в экранной системе могут быть пересчитаны в объектную $\{X, Y, Z\}$ через матрицу аффинных преобразований. Наибольшее распространение для задач машинной графики получил *метод однородных координат*, который позволяет выразить все виды преобразований (сдвиги, повороты и проекции) с помощью матрицы \mathbf{M} размерностью 4×4 , полученной путем произведения матриц частных преобразований [3]

$$(x, y, z, 1) = (X, Y, Z, 1) \times \mathbf{M}; \quad (X, Y, Z, 1) = (x, y, z, 1) \times \mathbf{M}^{-1}.$$

Задачу обнаружения объекта решают методом трассировки [4] на перекрестии линий (рис. 1), проходящих через точки фокусов камер $\{f_{01}, f_{02}\}$ и отметки объекта на обеих фотомишенях $\{X_{11}, Y_{11}, X_{21}, Y_{21}\}$. Число зон, на которые разбивают телекадр, обычно намного меньше, чем элементов разложения. После первичного обнаружения объектов становятся известными только соответствующие им номера зон ij на обеих камерах. В результате минимальное расстояние между линиями практически никогда не будет равно нулю, и ответить на вопрос пересекаются ли эти линии в пространстве можно лишь приближенно. Нельзя также непосредственно найти координаты точки пересечения линий. Предложено решать эти задачи итерационным методом, путем варьирования координат точек $\{X, Y, Z\}$, принадлежащих множеству точек первой линии, и расчета для каждой такой точки ее расстояния до второй линии [5]. По окончании поиска становятся известными минимальное расстояние между линиями d_{\min} и координаты цели в объектном пространстве $\{X_{\text{ц}}, Y_{\text{ц}}, Z_{\text{ц}}\}$. Решение об обнаружении цели принимают при условии выполнения неравенства $d_{\min} < \epsilon$. Значение ϵ выбирают исходя из

априорно известных минимальных размеров транспортного средства и углового разрешения канала обнаружения.

При таком подходе вероятность правильного обнаружения объекта равна произведению аналогичных вероятностей для обеих телекамер. Для повышения чувствительности системы устанавливают низкие пороги обнаружения, после чего на каждой из камер достаточно часто возникают ложные

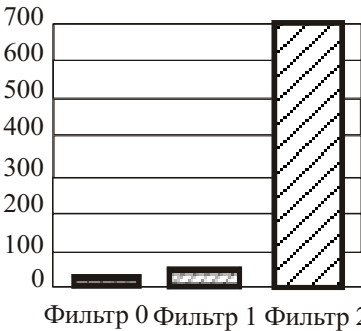


Рис. 2

отметки объектов. По предложенному алгоритму проверяют все возможные сочетания координат этих отметок на обеих камерах и принимают решение об обнаружении цели только в случае выполнения указанного выше неравенства. В результате резко снижается вероятность ложной тревоги, так как отметки целей учитывают только в согласованных зонах [6].

Моделирование показало, что отношение вероятностей правильного обнаружения цели и ложной тревоги улучшается в среднем в 33 раза по сравнению со случаем отсутствия фильтров (рис. 2, фильтр № 0). Знание координат обнаруженной цели дает возможность не учитывать объекты, находящиеся за пределами дорожного полотна, и «подземные», для которых координата $z < 0$. Следует учитывать также ограничение по высоте: транспортное средство не может быть выше (4,5–5) метров. В результате дополнительно снижается вероятность ложной тревоги и выигрыш составляет 52 раза (см. рис. 2, фильтр № 1). Обработка координат объекта в последовательности кадров дает возможность построить траекторию его перемещения. Учет того факта, что траектория движения объекта непрерывна, позволяет увеличить это отношение до 696 раз (см. рис. 2, фильтр № 2). В результате применения указанных фильтров цель уверенно обнаруживают при контрасте изображения объекта до (1–2)%, что обеспечивает возможность эксплуатации системы при плохих погодных условиях и низких освещенностях.

Требуемая точность измерения скорости составляет $\leq \pm 5$ км/час в диапазоне изменения скоростей (40–130) км/час. Выполнение этого требования зависит от таких параметров системы, как взаимное расположение камер на местности, углы обзора, числа зон, на которые разбит кадр. Для оптимизации этих параметров было предпринято машинное моделирование системы. В результате моделирования было найдено, что максимальные ошибки при измерении скорости не превышают ± 2 км/час и минимальны в диапазоне скоростей от 70 до 100 км/час (рис. 3); средние ошибки не выше ± 1 км/час, что вполне удовлетворяет поставленным требованиям.

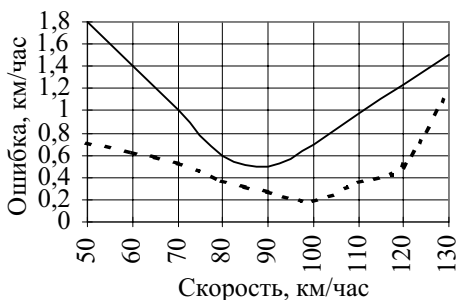


Рис. 3

ям. Оптимальные углы зрения камер составляют $\approx 30^0$ для камеры бокового обзора 1 и $\approx 20^0$ для «фронтальной» камеры 2 (см. рис. 1).

Одной из основных задач, возникающих при развертывании многокамерной ТВ-системы, является точная привязка камер к местности [7]. Чтобы исключить трудоемкие точные измерения координат центров экранных систем (точек расположения камер), их находят в итоге эксперимента по определению экранных координат совокупности M независимых реперов, размещенных на местности в соответствии с оптимальным планом. Реперы нельзя располагать в одной плоскости; их объектные координаты $\{X_1, Y_1, Z_1, \dots, X_M, Y_M, Z_M\}$ должны быть точно известны и обеспечивать хорошую обусловленность решаемой задачи; число реперов больше или равно числу неизвестных параметров ($M \geq 6$). Входящие в матрицы $\mathbf{M}_1 \dots \mathbf{M}_N$ неизвестные параметры определяют совместно для N камер. При юстировке системы операторы определяют экранные координаты реперов $\{x_{1k}, y_{1k}, z_{1k}, \dots, x_{Mk}, y_{Mk}, z_{Mk}\}$ на всех камерах, в поле зрения которых они находятся. Затем производят расчет по изложенной выше методике координат, соответствующих реперам целей в объектном пространстве. Местоположения центров экранных систем камер находят в ходе минимизации по параметрам X_{0k}, Y_{0k}, Z_{0k} целевой функции

$$\sqrt{\sum_{i=1}^M \langle \mathbf{r}_i - \mathbf{c}_i, \mathbf{r}_i - \mathbf{c}_i \rangle} = \min, \quad (1)$$

где $\mathbf{r}_i = (x_{pi}, y_{pi}, z_{pi})^T$ – вектор объектных координат реперных точек; $\mathbf{c}_i = (x_{ci}, y_{ci}, z_{ci})^T$ – найденных координат соответствующих им целей; угловые скобки $\langle \rangle$ означают скалярное произведение.

На точность привязки камер к местности влияет разрешающая способность камер, выраженная, например, в числе дискретных элементов (пикселей) в кадре. Зависимость ошибки от числа отсчетов в ТВ-камере показана на рис. 4. Из полученной в результате машинного моделирования гистограммы видно, что при легко достижимой разрешающей способности камер, соответствующей разложению на 256×287 элементов, получают вполне приемлемую точность: ошибка не превышает 0,15 м. При стандартных для систем цифрового телевидения 704 элементах по строке и чересстрочном разложении на 576 активных строк ошибка снижается до 0,05 м.

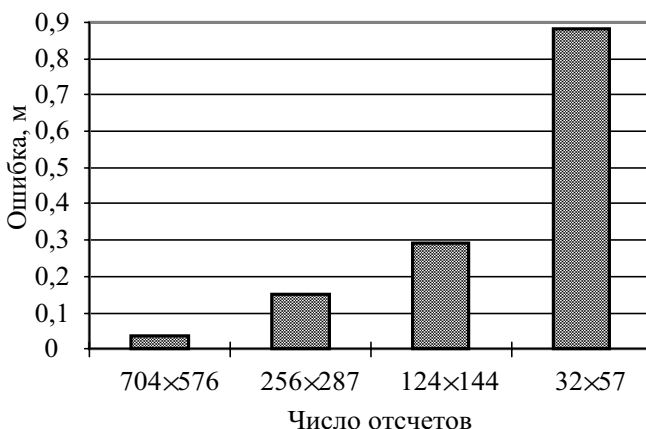


Рис. 4

Желательно снизить число измерений на местности до минимума. Если не требовать априорного знания координат реперов и ограничиться лишь совместным измерением координат их отметок на фотомишенях обеих камер, задача теряет определенность. Минимизация целевой функции

$$\sqrt{\sum_{k=1}^M \sum_{k=1}^N d_{ki}^2} = \min, \quad (2)$$

составленной из суммы расстояний между расчетными и полученными из опытов отметками реперов на фотомишенях камер не приносит успеха, так как рельеф целевой функции изобилует локальными экстремумами, и поиск глобального минимума крайне затруднен[8].

Чтобы повысить определенность задачи и уменьшить число локальных минимумов, предложено дополнительно учитывать объектные координаты двух-трех реперных точек и минимизировать целевую функцию, составленную из комбинации выражений (1) и (2). Сходимость процесса минимизации такой целевой функции в значительной степени зависят от выбранной точки начального приближения в пространстве параметров, поэтому рекомендуется следующий алгоритм расчетов: 1) предварительно проводят хотя бы грубые измерения на местности или определяют по карте объектные координаты камер и устанавливают на каких высотах они расположены; 2) устанавливают на местности реперы вокруг точки прицеливания по намеченному плану,

причем измеряют и вводят в ЭВМ объектные координаты хотя бы двух реперов; 3) ориентируют камеры на точку прицеливания; 4) измеряют экранные координаты отметок всех реперов на обеих камерах; 5) уточняют объектные координаты камер в ходе минимизации комбинированной целевой функции. В результате моделирования получено, что глобальный минимум может быть найден после спусков из ≥ 20 начальных точек, координаты которых распределены по случайному закону относительно точки начального приближения.

В результате проведенных исследований получены все необходимые данные, позволяющие строить оптимальные телевизионные измерительные системы для повышения безопасности движения транспортных средств.

Библиографический список

1. Вилесов Л. Д., Вейс В. Н., Кириллов В. А. Использование избыточности в задаче обнаружения сигнала при наличии фона с замороженными неоднородностями // Сб. тр. 9-го симпозиума по проблеме избыточности в информационных системах. Л.: Изд-во АН СССР, 1986. С. 128–130.

2. Тимофеев Б. С. Многокамерные телевизионные охранные системы // Техника кино и телевидения. 1997. № 8. С. 30–33.

3. Батраков А. С., Иванов В. П. Трехмерная компьютерная графика. М.: Радио и связь, 1995. 224 с.

4. Тимофеев Б. С. Телевизионные системы автоматизированного контроля транспортных потоков // Тез. докл. на 6-ой междунар. “Санкт-Петербургской видеоярмарке”. СПб., 1997. С. 34.

5. Тимофеев Б. С. Телевизионные методы обработки результатов испытаний летательных аппаратов // Телевидение, видеотехника: Сб. науч. тр. / СПбГААП. СПб., 1996. С. 12–17.

6. Астратов О. С., Ликарпенков В. Г., Руковчук В. П. Некоторые аспекты выделения движущихся объектов телевизионными методами // Радиопередающие и телевизионные устройства / ЛИАП. Л., 1975. С. 19–23.

7. Figue J., Refregier P. Angle determination of airplanes by multicorrelation technique with optimal trade-off synthetic discriminant filters // Optical Engineering. June. 1994. Vol. 33, № 6/1821. P. 34–41.

8. Тимофеев Б. С. Автоматическая настройка телевизионных систем с помощью микроЭВМ. М.: Радио и связь, 1988. 160 с.

РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Разрешающая способность преобразователей изображений определяет, в конечном счете, способность телевизионной системы передавать и воспроизводить с заданным контрастом мелкие детали изображения. В связи с тем, что проблема разрешающей способности телевизионной системы относится к числу важнейших, определяющих одну из главных компонент качества телевизионного изображения, проведены фундаментальные исследования и многочисленные прикладные работы в этой области [1]. Вместе с этим, основное внимание исследователей сосредоточено на характеристиках передачи статических (неподвижных) изображений. Работы, посвященные особенностям передачи динамических (подвижных) изображений, связаны в основном с анализом явлений инерционности, искажений геометрии фрагментов изображения, искажениями цветопередачи на резких границах подвижных объектов и др. Повышение требований к качеству формируемых изображений в цифровых телевизионных системах [2], а также внедрение дискретных преобразователей изображений типа матриц ПЗС, фотодиодных матриц [3] и т. д. привело к необходимости проведения анализа факторов, определяющих разрешающую способность преобразователей изображений при передаче не только статических, но и динамических объектов.

Измерение разрешающей способности статических изображений чаще всего проводят по штриховым таблицам, содержащим вертикальные и горизонтальные штрихи, имеющие различный шаг с прямоугольным или синусоидальным оптическим профилем; в ряде случаев используют таблицы, включающие зоны Френеля [3]. Для оценки разрешающей способности преобразователей изображений при передаче динамических объектов нами была использована модель изображения, содержащая фрагменты таблицы с вертикальными штрихами синусоидального профиля. При проецировании неподвижного изображения такой таблицы распределение освещенности $E(x)$ вдоль строки раstra (оси x) можно представить как

$$E(x) = E_0 (1 + \sin 2\pi f_l x), \quad (1)$$

где E_0 – среднее значение освещенности изображения; $f_l = n_l/l$, n_l – число “черно-белых” штрихов на ширину изображения l .

Для выявления основных закономерностей и исключения влияния апертурных искажений нами рассматривались достаточно «низкочастотные» штрихи, которые приводят к практически 100-процентной модуляции сигнала при неподвижном изображении.

В качестве преобразователей изображения в настоящее время, как было отмечено выше, используют твердотельные матрицы ПЗС или фотодиодные матрицы с линейной характеристикой преобразования [3]. Сформированные в таких матрицах дискретные зарядовые пакеты переносятся к выходному устройству и считываются, формируя на выходе последовательность импульсов сигнала изображения, пропорциональных отсчетам функции (1) в соответствии с координатной сеткой матрицы. В качестве примера на рис. 1 в относительных единицах

$h_1(x) = i_s(x) / i_{s \max}$ показан фрагмент сигнала, соответствующий отрезку строки $x = 0-20$ элементов изображения, при передаче статической штриховой таблицы с частотой штрихов $f_l = 0,350$ (~ 400 твл).

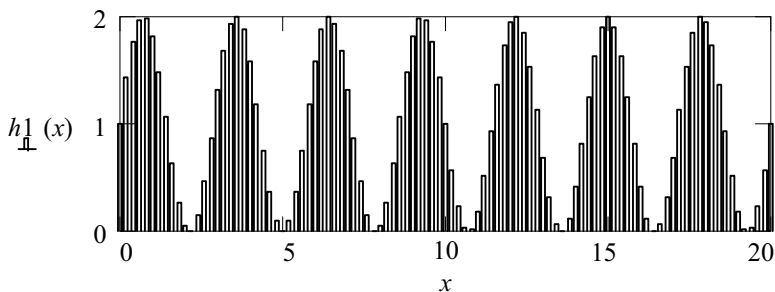


Рис. 1

Рассмотрим механизм формирования сигнала изображения линейным преобразователем при непрерывном перемещении штриховой таблицы относительно раstra матрицы со скоростью v в направлении x . При таком движении таблицы распределение освещенности $E(x,t)$ в любой момент времени t будет иметь вид $E(x,t) = E_0 [1 + \sin 2\pi f_l (x + vt)]$, а

формируемый сигнал изображения i_s может быть представлен следующим образом [1]:

$$i_s(x, t_c) = I_0 \left\{ 1 + (2\pi f_l v t_c)^{-1} \left[\cos 2\pi f_l x - \cos 2\pi f_l (x + v t_c) \right] \right\}, \quad (2)$$

где t_c – время накопления (в стандартных преобразователях на матрицах ПЗС может изменяться в пределах 0–0,04 с).

Соотношение (2) удобнее выразить в относительных единицах

$$h(x, t_c) = \left\{ 1 + (2\pi f_l v t_c)^{-1} \left[\cos 2\pi f_l x - \cos 2\pi f_l (x + v t_c) \right] \right\}. \quad (3)$$

Светочувствительным элементам матриц ПЗС, выполненных на основе фотодиодов свойственна инерционность (обусловлена остаточными зарядами в накопительных элементах после завершения процесса переноса). Инерционность преобразователя изображения, как показывает анализ, может также внести заметный вклад в снижение детальности изображения. Относительная величина сигнала, формируемого преобразователем, в рассматриваемом случае передачи штриховой таблицы может быть определена, как

$$h(x, t_c) = \left[1 + \xi_0'' \sin 2\pi f_l x + \xi_0' \sin 2\pi f_l (x + v t_c) + (1 - \xi_0' - \xi_0'') \sin 2\pi f_l (x + 2v t_c) \right].$$

где ξ_0', ξ_0'' – инерционность преобразователя в первом и втором кадре соответственно (в матрицах ПЗС может составлять до 1,0%).

Были рассмотрены процедуры формирования сигнала в различных режимах преобразователя. В силу малости величин ξ_0', ξ_0'' инерционность преобразователя в приведенных ниже расчетах не учитывалась. На рис. 2 показаны огибающие сигналов $h(x)$ для $f_l = 0,350$ (~ 400 твл), $t_c = 0,04$ с при различных скоростях движения испытательной таблицы: $h1(x) - v = 10$ эл/с (скорость, соответствующая смещению фрагмента таблицы на всю ширину растра l за время $\Delta t_l = 76$ с); $h2(x) - v = 75$ эл/с ($\Delta t_l = 10$ с); $h3(x) - v = 150$ эл/с ($\Delta t_l = 5$ с). Из графиков видно, что вследствие непрерывности процесса накопления при увеличении скорости движения таблицы происходит существенное уменьшению глубины модуляции сигнала.

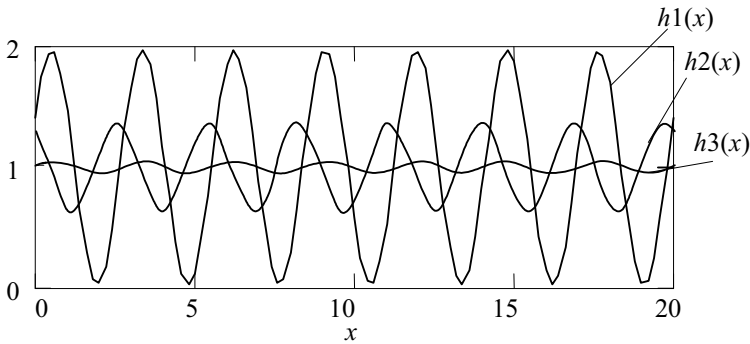


Рис. 2

Степень влияния движения на форму сигнала изображения при скорости $v=75$ эл/с на различных частотах штриховой таблицы иллюстрирует рис. 3, где $h2(x)$ соответствует частоте $f_i = 0,350$ (~ 400 твл); $h4(x) - f_i = 0,175$ (200 твл); $h5(x) - f_i = 0,087$ (100 твл).

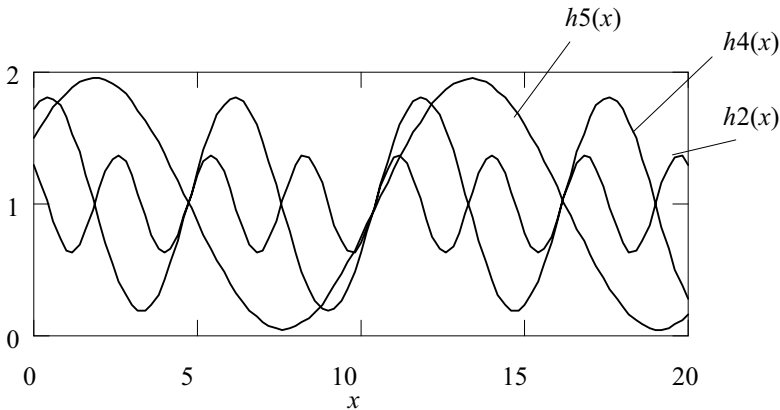


Рис. 3

Сокращение времени накопления, как следует из выражения (3), должно привести к повышению глубины модуляции в мелких деталях движущихся фрагментов изображения. Влияние времени накопления на глубину модуляции сигнала изображения при $f_i = 0,350$ (~ 400 твл), $v = 75$ эл/с иллюстрируют графики рис. 4, где показаны огибающие сигналов, соответствующих 400 твл. На рисунке обозначено: $h2(x) - t_c = 0,04$ с, $h2(x) - t_c = 0,02$ с, $h7(x) - t_c = 0,004$ с. Из графиков видно, что десятикратное умень-

шение времени накопления по отношению к стандартному приводит в рассматриваемых условиях практически к 100-процентной глубине модуляции. Указанные свойства накопителей сигналов изображения широко используются в профессиональной и любительской аппаратуре. Естественно следует считаться с существенным уменьшением чувствительности видеокамеры в этих условиях съемки.

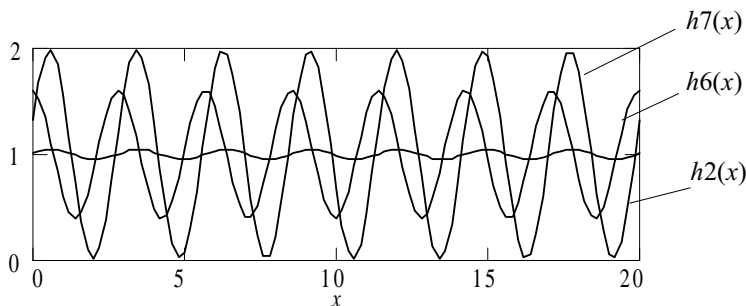


Рис. 4

Более полное представление о характеристиках преобразователя дают зависимости глубины модуляции A_j сигналов изображения штриховой таблицы от скорости ее перемещения v , времени накопления t_c , частоты штрихов f_j

$$A_j(v, t_c, f_j) = 0,5 [\max h(v, t_c, f_j) - \min h(v, t_c, f_j)].$$

На рис. 5 приведены зависимости глубины модуляции A_j от скорости ($v = 10$ i эл/с) для различной частоты штрихов таблицы: $A1_j - f = 0,350$ (~ 400 твл), $A2_j - f = 0,175$ (200 твл), $A3_j - f = 0087$ (100 твл).

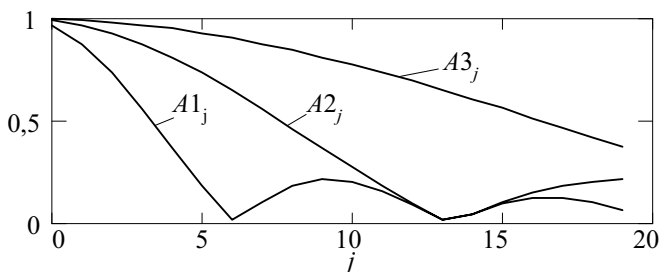


Рис. 5

Зависимости глубины модуляции A_j сигнала изображения штриховой таблицы с $f = 0,350$ (~ 400 твл) от скорости ($v = 10$ i эл/с) для различно-

го времени накопления $A4_j - t_c = 0,04$ с, $A5_j - t_c = 0,02$ с, $A6_j - t_c = 0,004$ с приведены на рис. 6.

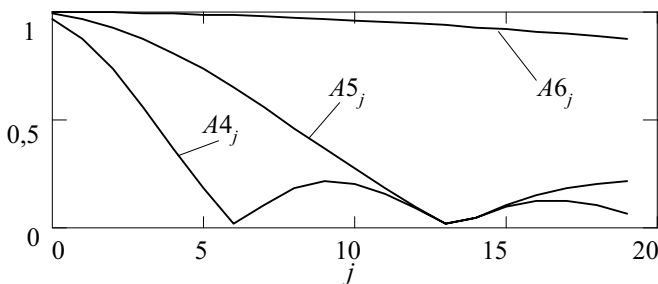


Рис. 6

Видно, что при передаче штрихов с частотой $f = 0,350$ (~ 400 твл) происходит полное исчезновение полезной модуляции сигнала при скорости движения v таблицы около 51 эл/с. Следствием дальнейшего увеличения скорости, как видно из графика, является появление в сигнале изображения ложных компонент. Сокращение времени накопления (путем управления матрицей ПЗС) существенно улучшает характеристики четкости движущихся фрагментов изображения.

Полученные результаты дают количественную оценку наблюдаемым явлениям. Большое внимание, которое уделяется в настоящее время качеству передачи динамических изображений в цифровых телевизионных системах, привело к разработке динамических телевизионных испытательных таблиц и специальных методик измерений, например, *Test Card "M"* фирмы *Snell@Wilcox* [4].

В заключение необходимо сделать следующие выводы:

1. В результате проведенных исследований механизмов формирования сигналов преобразователями изображений на базе ПЗС в режиме передачи движущихся фрагментов установлена количественная связь разрешающей способности преобразователя с его оптическим и электрическим режимами (соотношения 2, 3).

2. Исследования зависимости глубины модуляции сигнала изображения от скорости движущихся фрагментов и времени накопления преобразователя позволяют обоснованно выбрать режим его работы (графики рис. 5,6).

Библиографический список

1. *Быков Р. Е.* Теоретические основы телевидения. СПб.: Изд-во “Лань”, 1998. 228 с.
2. *Тимофеев Б. С.* Цифровое телевидение / СПбГУАП. СПб., 1998. 49 с.
3. Преобразователи изображения на ПЗС / *Р. Е. Быков, А. А. Манцевтов, Н. Н. Степанов, Г. А. Эйсенгардт.* М.: Радио и связь, 1992. 184 с.
4. *Walland P.* Practical Techniques for Maintaining the Quality of Digital Transmission Systems // The First Conf. Advances and Future Development of Cable and Satellite TV. М. 24–27 Febr., 1999. P. 61–62.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МУЛЬТИПЛИКАТИВНОГО АЛГОРИТМА В ЗАДАЧАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО КАЧЕСТВА ВИДЕОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Анализ возможностей мультипликативного алгоритма [1], проведенный в соответствии с известными методиками [2], показал, что данный сверточный алгоритм не удовлетворяет требованиям, выдвигаемым теорией качества не только перспективных, но и имеющихся на данный момент видеотехнических систем (ВТС). Так, например, максимальная погрешность алгоритма в области высокого интегрального качества изображения может достигать 30% всей шкалы оценок.

Попытки повысить точность мультипликативного алгоритма привели к его модификациям [3], однако заметных эффектов при этом не получено.

Целью настоящей работы является повышение точности мультипликативного алгоритма в задачах определения точечного интегрального качества видеотехнических систем. Необходимость решения этой проблемы связана с ужесточением требований к методическому обеспечению теории качества и эффективности ВТС в связи с возрастающими потребностями науки и практики, обусловленными стремительным развитием техники и технологий.

Одним из возможных способов преодоления указанного недостатка является модернизация мультипликативного алгоритма.

Идеи модернизации вытекают из того, что зависимость погрешности метода от опорного интегрального качества $P_{\text{инт}}$ имеет вид кривой, наклоненной к оси $P_{\text{инт}}$ и пересекающей эту ось в некоторой точке [1].

Целью модернизации мультипликативного алгоритма является возможность управлять вышеуказанной зависимостью, а именно: перемещать по оси $P_{\text{инт}}$ нулевую точку в диапазоне $0 \leq P_{\text{инт}} \leq 1$.

Сделать это можно следующим образом:

1. Внести в формулу мультипликативного алгоритма постоянную составляющую $0 \leq c \leq 1$.

2. Умножить исходную свертку на величину $(1-c)$, чтобы оценка $P_{\text{инт}}$ не выходила за пределы максимально допустимого.

3. Возвести в степень ν частные показатели качества P_i , чтобы можно было управлять наклоном зависимости погрешности метода от интегрального качества $P_{\text{инт}}$ и влиять на положение нулевой точки графика.

При предлагаемом методе усовершенствования формула модернизированного мультипликативного алгоритма выглядит следующим образом:

$$P_{\text{инт}} = c + (1-c) \prod_{i=1}^m P_i^{\nu},$$

где $P_{\text{инт}}$ – нормированный интегральный показатель качества изображения на выходе видеотехнической системы; P_i – нормированный частный показатель качества; i – номер частного показателя; m – число частных показателей; c – корректирующая добавка; ν – корректирующий показатель степени.

В качестве опорной математической модели интегрального показателя качества ВТС, выбран двухфакторный полином второго порядка, полученный многомерной аппроксимацией результатов многомерных экспертиз качества изображения на выходе видеотехнической системы, проведенных по ансамблю аргументов, что позволяет исследовать показатели качества мультипликативного алгоритма во всем диапазоне интегральных оценок качества и в любой точке этого диапазона. Проведенные исследования показали, что результаты анализа мультипликативного алгоритма незначительно зависят от типа полинома и вида аргументов интегрального качества. Несколько меньшая стабильность результатов исследований наблюдаемая при изменении числа факторов опорной математической модели интегрального показателя качества может быть устранена путем попарного иерархического объединения частных оценок.

Степенная модернизация мультипликативного алгоритма. Зависимости средних погрешностей модернизированных мультипликативных алгоритмов ($c = 0, \nu = \text{var}$) $\Delta P_{\text{cp}}(P_{\text{инт}})$, рассчитанные в соответствии с известной методикой [2], для различных значений показателя степени ν , представлены на рис. 1.

В табл. 1 приведены значения средних погрешностей ΔP_{cp} модернизаций метода в крайних точках диапазона исследования.

Таблица 1

ϵ	$P_{\text{инт}}$		ΔP_{cp}	
	0,1	0,9		
0	0,1	0,9	0,025	0,24
0,2	0,1	0,9	-0,16	0,17
0,4	0,1	0,9	-0,34	0,1
0,5	0,1	0,9	-0,44	0,07
0,6	0,1	0,9	-0,53	0,04
0,7	0,1	0,9	-0,63	0
0,8	0,1	0,9	-0,72	-0,04
0,9			-0,81	-0,06

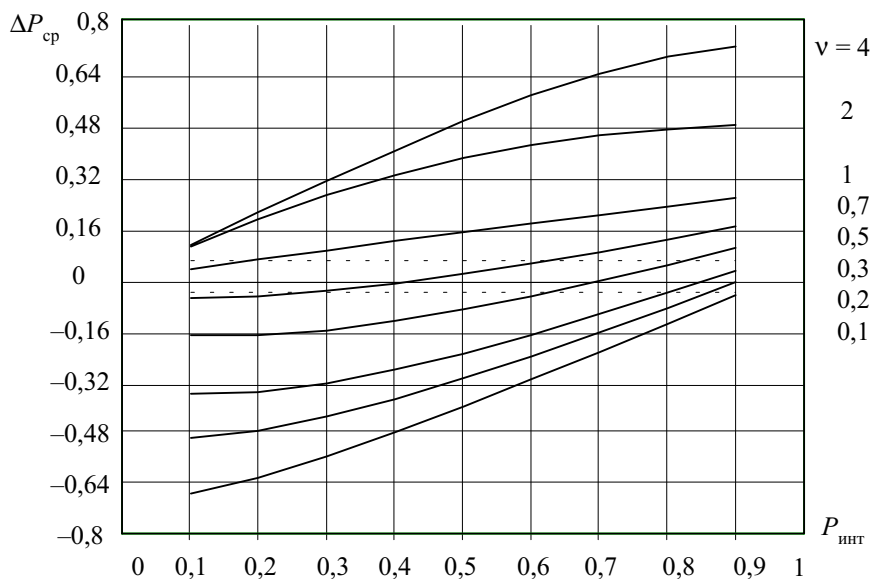


Рис. 1

Зададимся критерием возможности использования мультипликативного алгоритма в задачах оценки интегрального качества изображения ВТС $|\Delta P_{cp}| \leq 0,05$.

Диапазоны интегральных оценок, в которых модернизированный мультипликативный алгоритм ($c = 0, v = \text{var}$) может использоваться согласно выбранному критерию, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значение v	4	2	1	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1
Диапазон применения	0–0,04	0–0,05	0–0,19	0,2–0,61	0,6–0,82	0,8–0,93	0,86–0,95	0,9–1,0

Пропорциональная модернизация мультипликативного алгоритма. Анализ c -модернизаций ($c = \text{var}, v = 1$) алгоритма осуществляется аналогично вышеприведенному анализу v -модернизаций.

Зависимости средних погрешностей модернизированного мультипликативного алгоритма ($c = \text{var}, v = 1$) $\Delta P_{cp}(P_{\text{инт}})$ для различных значений показателя c , представлены на рис. 2. В табл.3 приведены значения средних погрешностей ΔP_{cp} модернизированного метода в крайних точках диапазона исследования.

Таблица 3

v	$P_{\text{инт}}$		ΔP_{cp}	
	0,1	0,9	0,1	0,9
4	0,1	0,9	0,1	0,715
2	0,1	0,9	0,0937	0,47
1	0,1	0,9	0,025	0,24
0,7	0,1	0,9	-0,069	0,1556
0,5	0,1	0,9	-0,180	0,09
0,3	0,1	0,9	-0,366	0,0188
0,2	0,1	0,9	-0,501	-0,019
0,1	0,1	0,9	-0,675	-0,0587

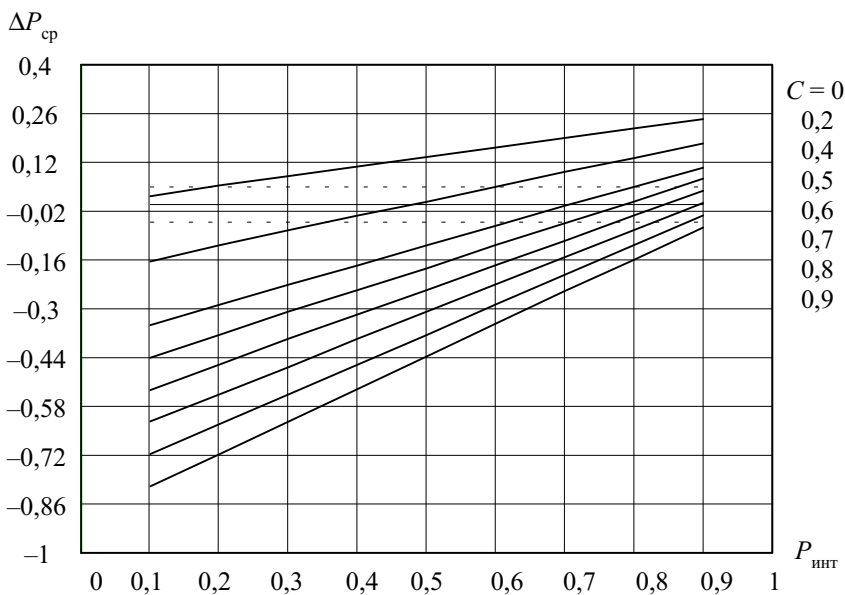


Рис. 2

Диапазоны интегральных оценок, в которых модернизированный метод ($c = \text{var}, v = 1$) может использоваться в задачах оценки точечного интегрального качества согласно выбранному критерию ($|\Delta P_{\text{ср}}| \leq 0,05$), приведены в табл.4.

Таблица 4

Значение c	0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Диапазон применения	0–0,19	0,35– 0,6	0,62– 0,8	0,7– 0,87	0,77– 0,92	0,84– 0,95	0,87– 0,98	0,93–1

Анализ точности модернизированных мультипликативных алгоритмов показал, что предложенный метод коррекции достаточно эффективен.

Модernизированные алгоритмы ($c = 0, v = \text{var}$) в задачах определения точечного интегрального качества могут использоваться:

- при $4 \geq v \geq 1$ – в области низких оценок;
- при $1 > v \geq 0,5$ – в области средних оценок;
- при $v < 0,5$ – в области высоких оценок.

Модернизированные алгоритмы ($v = 1$, $c = \text{var}$) в задачах определения точечного качества могут использоваться:

при $c = 0-0,1$ — в области низких интегральных оценок;

при $c = 0,1-0,4$ — в области средних интегральных оценок;

при $c > 0,4$ — в области высоких оценок.

Каждая из модернизаций мультипликативного алгоритма при $c = \text{var}$ и $v = \text{var}$ обеспечивает эффективное повышение точности метода лишь в части диапазона интегральных оценок качества. Поэтому для использования алгоритма в той или иной области интегрального качества изображения необходимо определять оптимальные для этой области показатели модернизации c и v и рассчитывать истинную интегральную оценку качества изображения ВТС в соответствии с формулой (1).

Дальнейшая работа в данном направлении должна быть нацелена на исследование комбинированной модернизации мультипликативного алгоритма и разработку методики ее практического применения в задачах определения интегрального качества современных и перспективных видеотехнических систем.

Библиографический список

1. *Белицкий В. И., Иванов И. А.* Анализ методов интегральной оценки качества воспроизводящих свойств видеотехнических систем / СПбГУКиТ. 1999. Деп. в ОНТИ НИКФИ. № 150-КТ-98. 106 с.

2. *Белицкий В. И., Иванов И. А.* Методики исследования методов интегральной оценки качества воспроизводящих свойств аудиовизуальных систем / СПбГУКиТ. 1999. Деп. в ОНТИ НИКФИ. № 149-КТ-98. 50 с.

3. *Певзнер Б. М.* Качество цветных телевизионных изображений. М.: Радио и связь, 1988. 224 с.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ИСКАЖАЮЩИХ СИГНАЛОВ ТВ-ПРИЕМНИКА ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРЕДИКТОРОВ

Качество ТВ-изображения в значительной мере определяется настройкой конечных звеньев ТВ-системы – ТВ-приемников. Для повышения качества настройки ТВ-приемника необходимо решить задачу объективной оценки его качественных показателей. Это позволит:

реализовать сплошной контроль и сертификацию каждого выпускаемого изделия в условиях конвейерного производства;

создать замкнутую автоматическую систему “настройка – измерение” для ТВ-приемников шестого поколения с системной шиной, доступной ЭВМ.

В рамках решения поставленных задач предложен метод автоматического оценивания растровых параметров ТВ-приемника, основанный на обобщенном критерии верности воспроизведения в виде угла между векторами эталонного и фактического изображения [1]. Критерий верности воспроизведения формализован в виде оператора пространственной свертки оптических пучков

$$k = \int_{-h/2}^{h/2} \int_{-b/2}^{b/2} U(x, y)U_0(x, y)dx dy, \quad (1)$$

где h – высота экрана, b – ширина экрана.

Аппаратной реализацией критерия является оптический блок с фотоэлектрическим преобразователем. Источник сигнала U – изображение на экране ТВ-приемника, источник сигнала U_0 – эталонное изображение на негативе. Световой поток, образованный тестовым изображением на экране ТВ-приемника, фокусируется объективом на негативе. Результирующий световой поток за негативом представляет собой результат перемножения реального и эталонного изображений.

Для проведения измерений применен компенсационный метод с настраиваемой моделью [2]. Физической моделью является управляемый генератор эталонного сигнала (УГЭС), позволяющий вводить нормированные искажающие сигналы в эталонный сигнал. Вследствие отсутствия возможности изменять эталонное изображение, выполненное

в виде слайда, измерения проводят по следующей схеме. Эталонный сигнал, с введенным в него искажающим сигналом, подается на ТВ-приемник, и определяется степень совпадения изображения на экране ТВ-приемника и тестового изображения на негативе согласно формуле (1). Параметры вводимого в эталонный сигнал искажающего сигнала подбираются так, чтобы добиться максимального совпадения изображения на экране ТВ-приемника и тестового изображения на негативе. В момент их максимального совпадения параметры вводимых искажающих сигналов являются оценками параметров искажающих сигналов ТВ-приемника.

Структурная схема системы измерения растровых искажений приведена на рис. 1.

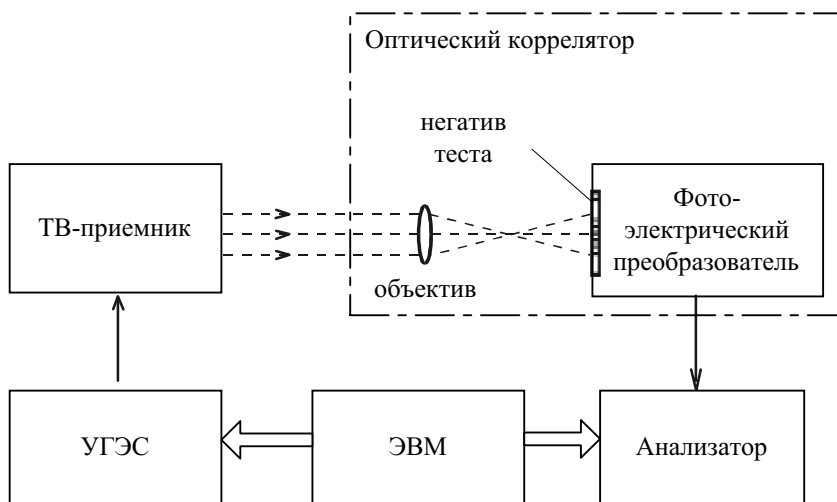


Рис. 1

Вследствие ограниченности и непрерывности искажающих сигналов в пределах растра модель искажающего сигнала может быть представлена в виде разложения в ряд по системе базисных функций

$$I_j(x, y, \alpha_j) = \sum_{i=0}^k \alpha_{ij} \Phi_i(x, y), j = z, в,$$

здесь k – размерность базиса; $\Phi_i(x, y)$ – базисные функции; α_{ij} – параметры модели.

Адекватность модели и простота ее дальнейшего использования обеспечивается применением полиномиального базиса, простота аппаратной реализации измерений – использованием импульсного базиса. Для согласования этих положений измерения проводят в импульсном базисе, а затем определяют параметры моделей искажающих сигналов в полиномиальном базисе.

$$I_j(x, y, \alpha_j) = \alpha_{0j} + \alpha_{1j}x + \alpha_{2j}x^2 + \alpha_{3j}x^3 + \alpha_{4j}y + \alpha_{5j}y^2 + \alpha_{6j}y^3 + \alpha_{7j}xy + \alpha_{8j}xy^2 + \alpha_{9j}x^2y, j = z, v.$$

Результатом измерений, проведенных в импульсном базисе, являются вектора $\Delta x, \Delta y$ значений искажающих сигналов $I_z(x, y, \alpha_z), I_v(x, y, \alpha_v)$ в N точках раstra.

Таким образом, известны: координаты $(x_i, y_i), i = 1-16$ точек раstra, в которых проводились измерения; $\Delta x, \Delta y$ – значения искажающего сигнала в этих точках, являющиеся случайными величинами; вид зависимости искажающего сигнала от координат точки раstra (2). Необходимо оценить параметры этой зависимости. Поставленная задача представляет собой задачу регрессионного анализа, сформулированную следующим образом: провести через N подверженных случайным ошибкам отсчетов k -параметрическую поверхность (k – число коэффициентов в полиномиальной модели искажающих сигналов) так, чтобы сумма квадратов отклонений в экспериментальных точках была минимальной. В терминах регрессионного анализа координаты точек раstra – предикторы, величины координатных искажений – отклики, полиномиальная модель искажающего сигнала – уравнение регрессии. Задача, которую необходимо решить – оценка коэффициентов регрессии.

В качестве метода оценивания коэффициентов регрессии обычно используют метод наименьших квадратов (МНК) [3], позволяющий получить оценки коэффициентов регрессии, при которых реализуется условие

$$\sum_{i=1}^N \xi_i^2 = \min ,$$

где ξ_i – разность между экспериментальным и вычисленным по уравнению регрессии значением в i -й экспериментальной точке.

В матричной форме процедура получения оценок коэффициентов регрессии согласно МНК имеет вид

$$\alpha^0 = (\mathbf{X}^t \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^t \Delta \mathbf{x}, \quad (3)$$

где \mathbf{X} – матрица коэффициентов или независимых переменных, т. е. матрица с элементами $X_{l,j} = \Phi_l(x_j, y_j)$ $j=1..N, l=1..k$; α^0 – вектор оценок коэффициентов регрессии (параметров модели); Δx – вектор значений откликов (величин искажающего сигнала).

Описанный метод гарантирует получение состоятельных, несмещенных и эффективных оценок коэффициентов регрессии в случае, если предикторы являются детерминированными величинами или если неопределенность предиктора невелика. В противном случае значения оценок параметров могут заметно отличаться от действительных величин.

Решаемая регрессионная задача имеет существенную особенность: предикторы являются случайными величинами. Это объясняется следующими особенностями технической реализации измерений в точке раstra.

Эталонная и реальная зависимость местоположения луча кинескопа от времени показана на рис. 2.

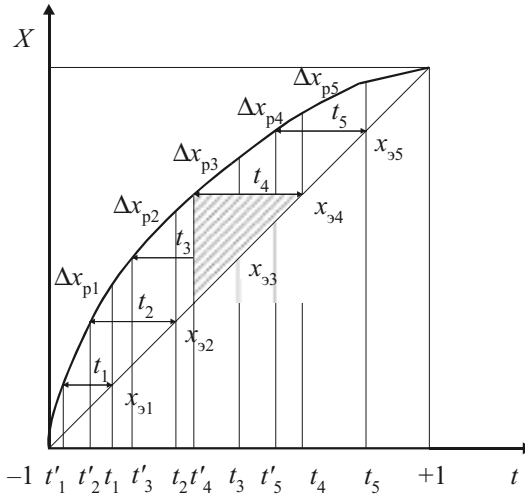


Рис. 2

Пусть t_1, t_2, \dots, t_N – точки, в которых планируется проводить измерения, им соответствуют значения координат $x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pN}$. Согласно методу измерений искажающего сигнала, координаты $x_{э1}, x_{э2}, \dots, x_{эN}$ со-

вмещают с координатами $x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pN}$ путем введения временных задержек в эталонный сигнал. Например, для точки t_4 значения x_{p4} и $x_{э4}$ совпадут при введении задержки Δt_4 , которая при $V = \text{const}$ будет соответствовать величине искажающего сигнала координатного искажения Δx_4 ($\Delta x = V_x \Delta t$, где V_x – номинальная скорость развертки). Измеренное таким образом значение будет соответствовать не точке t_4 , а точке $t_4' = t_4 - \Delta t_4$.

Следовательно, точки, в которых проводятся измерения, сместятся относительно первоначального положения, причем величины смещений будут равны величинам измеренных координатных искажений. Величины измеренных координатных искажений являются случайными величинами, следовательно, координаты точек, в которых проводятся измерения, являются случайными величинами.

В случае значительной неопределенности при фиксации предиктора используется итерационный метод [4,5] оценки параметров регрессии α . Итерационный процесс строят следующим образом (при описании построения итераций рассматривается только случай оценки параметров искажающего сигнала по горизонтали $I_e(x, y, \alpha_e)$).

1. Составляют сумму

$$S_0 = \sum_{i=1}^N [\Delta x_i - I_e(x_i, y_i, \alpha_{0e}) - (1/2) * (\nabla_{2i} \mathbf{d}_{2i})]^2 \varpi_i^0,$$

где $I_e(x, y, \alpha_e)$ – уравнение регрессии (модель искажающего сигнала); Δx_i – отклик в i -й точке; x_i, y_i – значения предикторов в i -ой точке; $\varpi_i^0 = \sigma_i^{-2}$, где σ_i^2 – дисперсия величины отклика в точке (x_i, y_i) ; \mathbf{d}_{2i} – вектор вторых центральных моментов случайного вектора (x_i, y_i) ; ∇_{2i} – вектор вторых производных уравнения регрессии.

2. Определяют значения α_{0e} , при которых достигается минимум S_0 .

3. Подсчитывают величины $\nabla_{1i}^2(\alpha_{0e})$ (∇_{1i} – вектор первых производных уравнения регрессии, при расчетах в качестве параметров регрессии берутся значения α_{0e}) и \mathbf{d}_{2i} .

4. Составляют сумму

$$S_1 = \sum_{i=1}^N [\Delta x_i - I_e(x_i, y_i, \alpha_{1e}) - (1/2) * (\nabla_{2i} \mathbf{d}_{2i})]^2 \varpi_i^1,$$

где $\varpi_i^1 = [\sigma_1^2 + (\nabla_{1i}^2(\alpha_0) * \mathbf{d}_{2i})]^{-1}$.

5. Определяют значения α_{1e} , при которых достигается минимум S_1 .
 Операции 3,4,5 повторяют соответственно при α_{1e} , α_{2e} и т.д.
 Вычисления прекращают, если

$$\max \left| (\alpha_{js} - \alpha_{j(s-1)}) / \alpha_{j(s-1)} \right| \leq \gamma, j = 1..k,$$

где s – номер итерации, γ – заданное малое положительное число.

Значения α_{se} , для которого выполняется это условие, принимают за оценку неизвестных параметров α_e^0 .

Существует критерий, позволяющий определить какой метод оценивания параметров (МНК или итерационный МНК) следует использовать в зависимости от величины неопределенности при фиксации предиктора. Если для всех точек выполняется условие

$$\max_i [(\nabla_{li}^2 * \mathbf{d}_{2i}) / \sigma_i^2] \ll 1$$

$$\max_i |(\nabla_{2i} * \mathbf{d}_{2i}) / (2 * I_e(x_i, y_i, \alpha_{0e}))| \ll 1$$

или более грубо

$$\sum_{j=1}^L \left(\frac{dI_e(x_i, y_i, \alpha_{0e})}{dx_j} \right)^2 * d_{2jj} \sigma_i^{-2} \ll 1 \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^L \left(\frac{d^2 I_e(x_i, y_i, \alpha_{0e})}{dx_j^2} \right) * d_{2jj} I_e(x_i, y_i, \alpha_{0e})^{-1} \ll 1, \quad (5)$$

где L – число предикторов; x_i, y_i – значения предикторов в i -й точке; d_{2jj} – дисперсия j -го предиктора, то применять итерационный метод нет необходимости.

Для корректного выбора процедуры оценивания параметров регрессии был проведен анализ случайной ошибки предикторов и откликов и найдены критерии (4), (5).

Случайная ошибка откликов (предикторов) образуется в результате наложения достаточно большого числа независимых друг от друга факторов и имеет нормальное распределение, согласно центральной предельной теореме.

Для каждого отклика были найдены оценки математического ожидания и дисперсии по выборкам, полученным в результате 21 экспери-

мента по совмещению эталонного и реального изображений в 16 точках растра (при средних растровых искажениях 10%).

Затем были получены выборки для предикторов. Величины предикторов определены согласно формулам

$$x_i^j = x_{0i} - \Delta x_i^j, y_i^j = y_{0i} - \Delta y_i^j \quad i=1-16, j=1-21,$$

где x_{0i}, y_{0i} – координаты опорной сетки в i -й точке; $\Delta x_i^j, \Delta y_i^j$ – величины откликов (координатные искажения по X и Y) в i -й точке растра, полученные в результате j -го измерения; x_i^j, y_i^j – величины предикторов.

По полученным данным найдены оценки математического ожидания и дисперсии для каждого предиктора, и для всех точек были рассчитаны критерии (4) и (5). Максимальное значение критерия (4) составило: для $I_2(x, y, \alpha_2) - 0,00242$; $I_6(x, y, \alpha_6) - 0,0045$. Максимальное значение критерия (5) в обоих случаях не более e^{-6} .

На основании полученных данных был сделан вывод, что при имеющемся в нашей задаче соотношении между дисперсиями предикторов и величинами первых и вторых производных применимы методы обычного регрессионного анализа (3).

Согласно предложенному методу, при определении растровых искажений по полиномиальной модели искажающих сигналов обеспечивается следующая точность: для несимметрии изображения – 0,01%, для нелинейности – 0,6%, для остальных видов искажений – 0,1% от размеров растра.

Библиографический список

1. Тимофеев Б. С. Автоматическая настройка телевизионных систем с помощью микроЭВМ. М.: Радио и связь, 1988. 160 с.
2. Эйкхофф П. Моделирование и идентификация систем. М.: Наука, 1971. 264 с.
3. Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин А. Д. Прикладная статистика. Исследование зависимостей. М.: Финансы и статистика, 1985. 487 с.
4. Федоров В. В. Теория оптимального эксперимента (планирование регрессионных экспериментов). М.: Гл. ред. физ. мат. лит., 1971. 312 с.
5. Жилинская Е. И., Товмаченко Н. Н., Федоров В. В. Методы регрессионного анализа при наличии ошибок в предикторных переменных. М.: Наука, 1979. 34 с.