

УДК 621.397.6

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ МАСШТАБА ПРИ ВИДЕОКОНТРОЛЕ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМАХ ТЕЛЕВИДЕНИЯ

В. Н. Безруков, зав. кафедрой МТУСИ, д.т.н., профессор; cdtv@mail.ru

Ключевые слова: телевизионное изображение, видеоконтроль, масштабно-временные преобразования, частотные характеристики зрения.

Введение. Основные операторы, реализуемые в оптических системах камер при телевизионном (ТВ) контроле объектов, — это масштабно-пространственные, масштабно-временные и фазовременные преобразования; спектральное, спектрально-пространственное и спектрально-временное разделение видеоинформации на составляющие; пространственная, временная и пространственно-временная дискретизация и модуляция видеоинформации и др. Если координаты контролируемого объекта не совпадают с осью оптической системы, использование оператора масштабно-временных изменений приводит к смещению «центра тяжести» объекта, подвергнутого преобразованию, в радикальном по плоскости xOy направлении. При этом происходят радиальные и изотропно-радиальные смещения границ масштабируемого объекта и относительные изменения (обновление или деградация) во времени пространственной структуры отдельного масштабируемого объекта и всей внутрикадровой структуры телевизионных изображений.

Масштабирование одного из объектов сцены сопряжено с движением (вытеснением за ее пределы или появлением новых объектов) и изменением во времени параметров всех объектов во внутрикадровом пространстве. Масштабные преобразования исходной пространственной структуры изображений во времени значительно обогащают временной спектр сигнала ТВ-изображения и в цифровых системах со сжатием спектра могут отрицательно повлиять в локальных моментах на качество передаваемых изображений. С другой стороны, современные методы сжатия в определенной мере согласованы с характеристиками зрения человека и не вносят существенных искажений в изображения, которые хотя и изменяются во времени, но воспринимаются при видеоконтроле без заметных деградаций, например, их пространственной структуры по отношению к варианту видеоконтроля в статическом положении. В связи с этим в данной работе рассматриваются вопросы согласования параметров динамики процесса масштабирования объектов с характеристиками зрения наблюдателя.

Масштабно-временные преобразования. Оператор масштабно-временных преобразований в структуре сигналов ТВ-изображений в общем случае может быть упрощенно представлен в виде суммы двух операторов:

$$F = F_m + F_d,$$

где F_m — оператор изменения масштаба объекта; F_d — оператор смещения объекта.

Исследования [1, 2] случая $F_d = 0$ показали, что масштабно-временные преобразования отражаются суммированием (вычитанием) с исходным изображением объекта изменяющихся во времени его же дифференциальных в пространстве составляющих. При этом скорость изменения исходного изображения определяется не только функ-

циями зависимости масштаба воздействия вдоль осей x, y во времени, но и координатами точек контролируемого объекта во внутрикадровом пространстве. Кроме того, было выявлено [1, 2] значительное расширение многомерного спектра, соответствующего такому объекту, по направлению временных частот в случаях существенной степени преобразования масштаба изображений и высокой динамики его реализации во времени. При низкой же динамике преобразований изменения во времени затрагивают лишь участки пространственного спектра изображения объекта с относительно высокими по уровню значениями производных соответствующей объекту двумерной функции спектра. Таким образом, общая энергия изменений пространственного спектра воздействия при масштабно-временных преобразованиях определяется сложностью структуры пространственного спектра исходной сцены в плоскости аргументов P_x, P_y .

Выбор параметров. Рекомендации по выбору параметров динамических во времени вариаций масштаба при видеоконтроле объектов в системах телевидения могут быть конкретизированы лишь с учетом специфики зрительной системы человека. В [3] представлены временная и пространственная частотные характеристики зрительной системы человека, при построении которых учитывались результаты, полученные в нескольких работах. Временная частотная характеристика $K(f)$ дневного видеоконтроля (1) и видеоконтроля при фиксированной пространственной частоте $f_{x0} = 4$ пер/град (2) приведены на рис. 1, а пространственная частотная характеристика $K(f_x)$ дневного зрения (1) и контроля при периодических мельканиях изображения с частотой 6 Гц (2) — на рис. 2. Графики на рис. 1 и 2, по су-

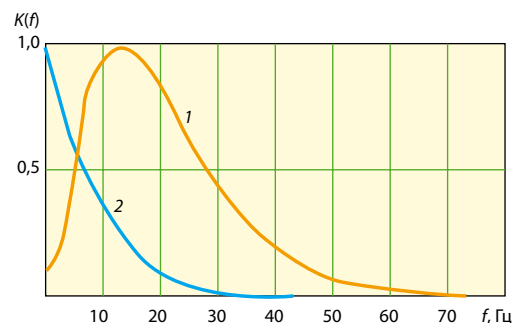


Рис. 1

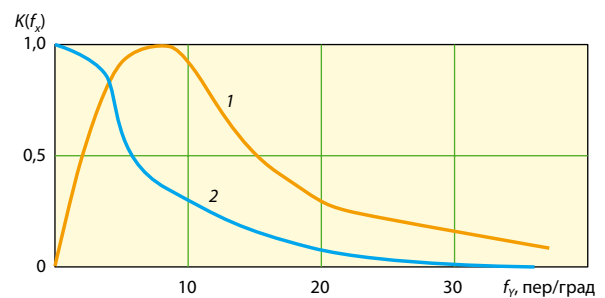


Рис. 2

шеству, представляют собой сечения общей многомерной частотной характеристики зрения $K(f_x, f_y, f)$ при фиксированных условиях видеоконтроля, где значения пространственных частот f_x, f_y , обычно определяют число периодов изменений яркости (освещенности) на один градус, например, угла поля зрения.

В частности, для оценки временной частотной характеристики зрительной системы необходимы значительные пространственные (по углу поля зрения) размеры контролируемого экрана с изменениями в фиксированных пределах яркости и с фиксированным спектральным составом (воздействие белого света и приблизительно постоянная спектральная плотность энергии). Соответственно при измерении временной частотной характеристики основная часть энергии пространственного спектра воздействия (экрана) локализована в диапазоне низких пространственных частот. С учетом этого при измерениях использовался экран с полем зрения 68° и яркостью 50 кд/м^2 , постоянной в центральной зоне поля зрения до 50° и убывающей до нуля к краям.

Аналогичным образом при контроле пространственной частотной характеристики выполнялись условия долговременной (низкие временные частоты) адаптации по отношению к фону экрана и была устранена возможность расширения временного спектра испытательного воздействия за счет, например, быстрых поворотов головы наблюдателем по отношению к экрану, на котором воспроизводилось изображение данной пространственной частоты.

Адаптационные механизмы зрительной системы. Спад временной характеристики в области низких временных частот был выявлен только при фиксации во времени режима работы глаза. Фиксация достигалась компенсацией адаптационного механизма работы глаза во времени [4]. Однако контроль изображений реализуется в обычном режиме работы, т. е. в условиях функционирования адаптационных механизмов зрительной системы. При этом в реальности временная частотная характеристика зрения человека имеет практически постоянный (максимальный) уровень — до 20 Гц, значения, отражающего (см. рис. 1) начало спада в области высоких частот. Аналогичным образом за счет действия адаптационных механизмов оптимизируется уровень и низких пространственных частот в режиме текущего функционирования зрения человека.

Особенностью функционирования систем телевидения при перестройке масштаба контролируемого объекта во времени является ограничение поля зрения, в пределах которого реализуют перестройку. Изменение масштаба объекта при этом может, например, визуальное восприниматься как увеличение самого объекта либо как вытеснение окружающего объект фона за пределы ограниченного поля зрения. При видеоконтроле составляющие временного спектра масштабирования не должны влиять на его визуальное качество, а потенциальное качество визуального восприятия пространственной структуры объектов не должно ограничиваться, например, временными параметрами характеристик зрения.

Зрительное восприятие человека можно представить в виде системы, охваченной отрицательной обратной связью в диапазоне низких временных и пространственных частот. Адаптационные механизмы функционирования в общем случае исключают влияние обратной связи на текущий процесс визуального восприятия [4]. К таким процессам следует отнести фоновую адаптацию, скачкообразные движения глаз, тремор, мигание, слежение. Назначение

функциональных элементов процесса адаптации — преобразование многомерного спектра контролируемых объектов, обеспечивающее эффективное согласование его параметров с реальными характеристиками глаза. Практически адаптационной перестройкой характеристик зрения определяется степень дифференциальной обработки видеoinформации в области низких частот (спад многомерной частотной характеристики зрения в низкочастотных участках диапазона).

С увеличением средней освещенности (уровень адаптации зрения) контролируемой сцены глубина спада возрастает с соответствующим относительным падением коэффициентов усиления низкочастотных составляющих — видеoinформационного воздействия. При видеоконтроле в этом случае относительный вес низкочастотных составляющих многомерной информации падает, разрешающая способность растет. При изменении же условий видеоконтроля объектов зрительная система может работать и как многомерный интегратор видеoinформации (см. рис. 1, график 2). Подавление чувствительности зрения за счет действия отрицательной обратной связи в области низких частот при этом снижается, а относительный вес воспринимаемых низкочастотных временных составляющих контролируемого воздействия возрастает. Соответствующая разрешающая способность падает.

Аналогичным образом меняется и специфика пространственной частотной характеристики зрения, интегральный характер которой проявляется также при периодическом воспроизведении объектов. На рис. 2 (график 2) показана, в частности, пространственная частотная характеристика зрительной системы, экспериментально измеренная для воздействия в виде периодически мелькающего изображения временной частоты $f = f_0 = 6 \text{ Гц}$. Представленная здесь характеристика практически соответствует варианту параметрического сечения общей многомерной частотной характеристики зрения при фиксации значения временной частоты $\omega = 2\pi f_0$ и отражает ее изменения, обусловленные указанными условиями наблюдения объектов.

В связи с адаптацией глаза к характеристикам (например, движению) контролируемого объекта попутно наблюдается рассогласование характеристик глаза со структурой спектра неконтролируемых объектов. Степень воздействия таких объектов на наблюдателя автоматически снижается. Из-за смещения составляющих спектра неконтролируемых объектов в области спада частотных характеристик зрения их заметность падает.

Перед наблюдателем масштабируемого во времени объекта стоит задача текущего контроля его высокочастотной пространственной структуры. Однако, как было показано выше, при масштабировании во времени имеет место суммирование (вычитание) с исходным объектом изменяющихся во времени его же дифференциальных в пространстве составляющих спектра. Другими словами, носителями высокочастотной пространственной структуры объекта в данном случае являются составляющие временного спектра процесса масштабирования. Поэтому задача эффективного визуального восприятия высокочастотной пространственной структуры масштабируемых объектов вырождается в задачу локализации составляющих временного спектра самого процесса масштабирования в области низких временных частот, по крайней мере в пределах максимального уровня временной частотной характеристики глаза в низкочастотной области. При этом устраняется возможность подавления при видеоконтроле интенсивности составляющих времен-

ного спектра процесса масштабирования, а следовательно, обеспечивается сохранение высокочастотных составляющих пространственного спектра масштабируемых объектов.

С другой стороны, необходимо не только предотвратить падение амплитуды составляющих временного спектра, но и воспрепятствовать повышению «эффекта заметности» последних. Эта задача может быть решена при условии, что составляющие временного спектра процесса масштабирования будут совмещены с участком спада временной частотной характеристики зрения в низкочастотной области. Граничные частоты этого участка, согласно рис. 1, находятся в пределах от 0 до ≈ 8 Гц. При этом процесс адаптации зрения не отстает от процесса масштабирования и последний не сопровождается заметными пульсациями в пределах границ масштабируемого объекта.

Анализ протяженности процесса масштабирования. Максимальная протяженность временного спектра процесса масштабирования соответствует случаю скачкообразного во времени изменения масштаба объекта — $\sigma(t)$, т. е. определяется единичной функцией. Спектр единичной функции имеет вид

$$S(\omega)_\sigma = \left[\pi \delta(\omega) + \frac{1}{i\omega} \right].$$

Увеличение протяженности процесса масштабирования во времени при этом отражается сверткой функции — единичной и преобразования масштаба [2]. Простейший вариант — линейное изменение масштаба во времени. При этом функция преобразования масштаба имеет форму прямоугольного импульса: $f_{x,y}(t, \tau)$, где τ — протяженность функции $f_{x,y}(t, \tau)$. Тогда процесс масштабирования во времени описывается сверткой функции $\sigma(t)$ и $f_{x,y}(t, \tau)$: $P_{x,y}(t) = s(t) \otimes f_{x,y}(t, \tau)$. Соответственно временной спектр функции масштабирования $P_{x,y}(t)$ определяется уравнением $S_p(\omega) = S_\sigma(\omega) \cdot S_f(\omega)$, где $S_f(\omega)$ — спектр функции преобразования $f_{x,y}(t, \tau)$.

Заметность составляющих временного спектра процесса преобразования масштаба во времени $S_p(\omega)$ зависит от относительных (по отношению к фону, размеру экрана) интенсивности, пространственных размеров, степени и протяженности изменения во времени исходного масштаба объекта. Влияние пространственных размеров объекта на качество отображения процесса масштабирования можно не учитывать, если исходный угловой размер $\varphi_x(\varphi_y)$ масштабируемого объекта более 2° (по горизонтали и вертикали), а контрастность составляет не менее 0,7 максимальной. Угловой размер $\varphi_x(\varphi_y) > 2^\circ$ обеспечивает эффективное использование характеристики пространственной чувствительности глаза, благодаря чему диапазон (коэффициент) изменения масштаба по осям x и y чаще всего находится в пределах от 2 до 3. Это связано с наложением «эффекта вытеснения фона». Как показано в [1, 2], пропорционально (с некоторым приближением) произведению коэффициентов, отражающих степень изменения по осям x, y масштаба, меняется протяженность временного спектра самого процесса преобразования масштаба по отношению к временному спектру функции преобразования.

Влиянием составляющей $S_\sigma(\omega)$ на спектр $S_p(\omega)$ процесса масштабирования можно пренебречь из-за выбора чрезвычайно малой протяженности временного спектра процесса преобразования по отношению к протяженности спектра $S_\sigma(\omega)$. Соответственно в худшем случае временной спектр процесса масштабирования определяется увеличенной примерно в 8 раз протяженностью спектра $S_p(\omega)$. В свою

очередь, оценим протяженность спектра $S_p(\omega)$, например, для случая

$$f_{x,y}(t, \tau) = \frac{1}{\tau} \text{rect} \left(\frac{t}{\tau/2} \right).$$

При этом

$$S_f(\omega) = \frac{\sin \frac{\omega\tau}{2}}{\frac{\omega\tau}{2}}.$$

С учетом пороговой чувствительности глаза предельную протяженность спектра $S_f(\omega)$ целесообразно оценить как результат выполнения соотношения

$$x = \frac{\left| \int_0^\infty S_f(\omega) d\omega - \int_0^\omega S_f(\omega) d\omega \right|}{\int_0^\infty S_f(\omega) d\omega} \leq 1\%. \quad (1)$$

Подставляя $S_f(\omega)$ в (1), получим

$$x = \left[\frac{\pi}{2} - S_i \left(\frac{\omega\tau}{2} \right) \right] / \frac{\pi}{2}.$$

Отсюда $\frac{\omega\tau}{2} \geq 3\pi$. Следовательно, значение частоты $\omega \geq \frac{2\pi}{\tau/3}$, т. е. определяется третьей гармоникой. Для результирующей протяженности временного спектра самого процесса преобразования масштаба получим соответственно

$$\omega_p = 3 \cdot 8 \cdot \omega_0 = 24 \cdot \frac{2\pi}{\tau}.$$

Как показано выше, верхняя граничная частота временного спектра f_1 при этом не должна превышать 8 Гц. Тогда находим длительность процесса масштабирования:

$$\tau = 24 \cdot \frac{2\pi}{\omega_p} = 3.$$

Таким образом, если длительность цикла изменения масштаба на телевизионном экране составляет более трех секунд, наблюдатель при линейном изменении масштаба не воспринимает (психологически не учитывает) временную динамику процесса масштабирования. Изменением формы функции преобразования можно достичь сокращения длительности процесса масштабирования. Более эффективным в этом отношении можно, например, считать вариант, когда форма функции $f_{x,y}(t, \tau)$ отражает свертку двух эквивалентных прямоугольных функций длительности $\tau/2$. При этом сохраняется результирующая протяженность процесса масштабирования, а

$$S_f(\omega) = \frac{\sin^2 \frac{\omega\tau}{4}}{\left(\frac{\omega\tau}{4} \right)^2}.$$

Подставляя $S_f(\omega)$ в (1), получим

$$x = \frac{\left[\frac{\pi}{2} - \left[\frac{\cos \frac{\omega\tau}{2}}{\frac{\omega\tau}{2}} + S_i \left(\frac{\omega\tau}{2} \right) - \frac{1}{\frac{\omega\tau}{2}} \right] \right]}{\frac{\pi}{2}} \leq 1\%. \quad (2)$$

Решение этого неравенства дает меньшее значение частоты, чем вариант с линейной функцией преобразования масштаба.

Дальнейший анализ возможных вариаций формы функции $f_{x,y}(t, \tau)$ показывает, что предельный выигрыш здесь не позволяет достичь значения, равного первой гармонике. Следовательно, минимально возможная протяженность процесса масштабирования, обеспечивающая в последовательности воспроизводимых кадров ТВ-изображения реализацию «эффекта незаметности» временной динамики процесса масштабирования, составляет более одной секунды.

Заключение. Таким образом, для контроля телевизионных изображений с относительно большим коэффициентом масштабно-временного преобразования объектов характерно резкое расширение соответствующего многомерного спектра по временной оси частотного пространства, что приводит к подавлению пространственных высокочастотных составляющих в структуре масштабируемых изображений. При этом результирующая протяженность временного спектра зависит от параметров структуры пространственного спектра контролируемого объекта, относительной величины масштабирования и параметров функции, отражающей специфику изменения масштаба во времени, а ее отношение к протяженности спектра последней чаще более 1 (несколько единиц).

Эффективный визуальный контроль масштабируемых во времени объектов обеспечивается за счет совмещения составляющих временного спектра процесса масштабирования с диапазоном на оси временных частот от 0 до 8 Гц. При этом за счет действия отрицательной обратной связи исключается визуальное восприятие текущей временной динамики процесса масштабирования и, соответственно, устраняется возможность подавления пространственно-временных составляющих, отражающих высокочастотную структуру пространственного спектра контролируе-

мого в интервале времени масштабирования объекта. Если длительность цикла изменения масштаба на телевизионном экране превышает три секунды, наблюдатель при линейном законе изменения масштаба во времени не замечает динамику процесса масштабирования, а следовательно, эффективно воспринимает всю пространственную структуру изображения объекта. Анализ возможных вариаций формы функции масштабирования во времени показал, что минимально возможная протяженность процесса масштабирования должна составлять не менее одной секунды.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Безруков В. Н., Коженев А. П., Шауро А. В., Алешкин В. Н.** Особенности пространственно-временного спектра подвижных объектов в условиях оптического контроля//Математические методы обработки геофизической информации: Сб. статей АН СССР, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта. — М.: Наука, 1986. — С. 114—136.
2. **Безруков В. Н.** Разработка и применение элементов теории преобразования сигналов изображений в системах прикладного телевидения: Автореферат диссертации на соискание ученой степени д-ра техн. наук. — М.: МТУСИ, 1996. — С. 18—21.
3. **Безруков В. Н., Королев А. В., Ляпунов В. Н., Новаковская О. С.** Выбор параметров систем телевидения высокой визуальной четкости и качества//Техника кино и телевидения. — 1986. — № 10. — С. 3—9.
4. **Безруков В. Н.** Специфика видеоконтроля изображений вещательного телевидения//Прогресс технологий телерадиовещания/Материалы международного конгресса НАТ. — М., 2001. — С. 115—116.

Получено 15.11.10