

УДК 621.397; 004.92

## АЛГОРИТМ УПРОЩЕННОЙ КОМПЕНСАЦИИ ДИСТОРСИИ ПРИ ПРОЕКЦИРОВАНИИ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯ НА АСФЕРИЧЕСКИЕ ОТРАЖАЮЩИЕ ПОВЕРХНОСТИ АПРИОРНО НЕИЗВЕСТНОЙ ФОРМЫ

*Холопов И.С., к.т.н., доцент кафедры радиотехнических систем Рязанского государственного радиотехнического университета, e-mail: kholopov.i.s@rsreu.ru.*

**Ключевые слова:** проекционные системы индикации, дисторсия, предискажения, билинейная интерполяция.

### Введение

Проекционные системы индикации (ПСИ) представляют собой комплексные оптические системы, позволяющие отображать в поле зрения оператора дополнительную информацию [1–4], и используются как в военной авиации [1, 2], так и в коммерческих приложениях «виртуальной реальности» [3]. ПСИ просветного типа, в которых видеоинформация накладывается на изображение внешнего пространства, в зарубежной литературе обозначают аббревиатурой HUD (от англ. «Head-Up-Display») [4]. Большинство выпускаемых и перспективных HUD основано на использовании селективного оптического покрытия, наносимого на поверхность оптического светоделительного элемента – комбинера (рис. 1) [1, 4, 5]. На рис. 1:

- 1) зрачковая зона – область расположения глаз наблюдателя;
- 2) комбинер;
- 3) плоскость промежуточного изображения;
- 4) проекционный объектив;
- 5) корректирующий клин;
- 6) генератор двумерных изображений – LCD-матрица (микродисплей).

Для получения минимальных габаритных размеров для ПСИ светоделительная (отражающая) поверхность комбинера должна иметь не плоскую, а вогнутую форму: сферическую или, что более предпочтительно, асферическую [5, 6].

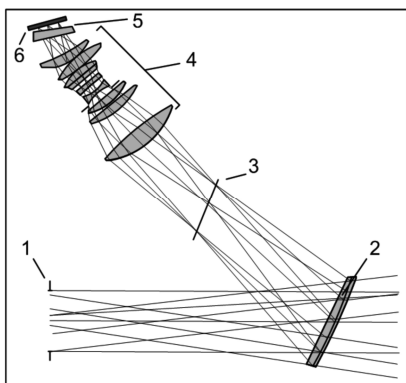


Рис. 1. Оптическая система HUD коллиматорного типа с трассировкой хода световых лучей

*Приведены аналитические выражения для упрощенного формирования предискажений кадра видеоизображения, проецируемого на асферическую отражающую поверхность априорно неизвестной формы.*

Поскольку поверхность комбинера развернута как по отношению к глазам наблюдателя, так и по отношению к проекционному объективу [4–6], то при относительно больших полях зрения, наблюдаемых двумя глазами, и большом выносе выходного зрачка (области размещения глаз наблюдателя), она вносит трансформацию световых пучков и строит их наклонное изображение с дисторсионными искажениями (ДИ), а также аберрациями (отклонениями от гомоцентричности) внеосевых световых пучков – комой и астигматизмом [6], вызывающими размытие и нерезкость изображения.

Практика разработки и расчетов HUD для ПСИ показывает [2, 5, 6], что осуществить компенсацию ДИ применением только оптических элементов не удастся, поэтому необходимо внесение предискажений (ПИ) в изображение, формируемое матрицей микродисплея. Аналитическое описание ДИ, вносимых проекционной системой HUD, затруднено, во-первых, нелинейными функциями описания асферических поверхностей (АП) [7]:

$$Z(S) = \frac{cS^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)c^2S^2}} + A_1S^4 + A_2S^6 + A_3S^8 + A_4S^{10},$$

где  $S = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $K$  – параметр, определяющий тип поверхности (табл. 1),  $c$  и  $A_1$ – $A_4$  – некоторые постоянные, а, во-вторых, изменяемым положением микродисплеев относительно оптических центров АП комбинера (например, в бинокулярных HUD расстояние между центрами микродисплеев регулируется в соответствии с базой глаз оператора [1–3, 5]).

Таблица 1

$K$	Поверхность
$< -1$	гиперболоид
$-1$	параболоид
$-1 < K < 0$	эллипсоид вращения вокруг большей оси
$0$	сфера
$> 0$	эллипсоид вращения вокруг меньшей оси

В связи с этим, как отмечено в [6], необходимо аналитически описать ДИ, вносимые ПСИ, и внести ПИ таким образом, чтобы окончательная величина дисторсии в пространстве изображений соответствовала принятым

для HUD допускам. Это может быть выполнено, например, путем вычисления коэффициентов полиномиального разложения функций ДИ и ПИ.

**Цель работы:** разработка алгоритма упрощенного формирования ПИ для компенсации ДИ при априорно неизвестной форме АП, на которую проецируется видеоизображение.

### Алгоритмы полиномиальной компенсации ДИ

ДИ оптико-электронных устройств принято описывать комбинацией радиальной и тангенциальной дисторсий [7-9], для компенсации которых на практике используют формулы:

$$\begin{aligned} x_0 &= x'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2p_1 x' y' + p_2 (r^2 + 2x'^2) + x_c, \\ y_0 &= y'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_1 (r^2 + 2y'^2) + 2p_2 x' y' + y_c, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $r^2 = x'^2 + y'^2$ ,  $x' = x_d - x_c$ ,  $y' = y_d - y_c$ ,  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты компенсации радиальной дисторсии,  $p_1$  и  $p_2$  – коэффициенты компенсации тангенциальной дисторсии,  $(x_d, y_d)$  – координаты пикселя изображения с ДИ,  $(x_c, y_c)$  – координаты центра дисторсии.

Другим подходом является вычисление поправок  $(\Delta x_0, \Delta y_0)$  к координатам каждого пикселя с использованием полиномов вида [10]:

$$\begin{aligned} x_0 &= x_d + \Delta x_0, \\ y_0 &= y_d + \Delta y_0, \\ Dx_0 &= a_0 + a_1 x' + a_2 y' + a_3 x'^2 + a_4 x' y' + \\ &+ a_5 y'^2 + a_6 x'^3 + a_7 x'^2 y' + a_8 x' y'^2 + a_9 y'^3, \\ Dy_0 &= b_0 + b_1 y' + b_2 x' + b_3 y'^2 + b_4 y' x' + \\ &+ b_5 x'^2 + b_6 y'^3 + b_7 y'^2 x' + b_8 y' x'^2 + b_9 x'^3. \end{aligned} \quad (2)$$

Для определения параметров компенсации дисторсии  $k_1, k_2, p_1, p_2, x_c, y_c$  и коэффициентов М.М. Русинова [10, 11]  $a_i, b_i, i = \overline{0, 9}$ , в выражениях (1) и (2) соответственно используется эталонное тестовое изображение (например, приводимое в [9] или [11]) и изображение, полученное с диагностической камеры, установленной в зрачковой зоне 1 (рис. 1). Вычисление параметров основано на составлении переопределенной системы из  $M$  пар уравнений вида

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x_{0i} \\ y_{0i} \end{pmatrix} &= F \left( \begin{pmatrix} x_{di} \\ y_{di} \end{pmatrix} \right), \quad i = \overline{1, M}, \end{aligned} \quad (3)$$

из выражений (1) или (2) и ее решении численными методами Ньютона или Левенберга-Маквардта [8, 11]. В рассматриваемых формулах (1) и (2) число неизвестных параметров, определяющих ДИ, равно 6 и 20, поэтому для их нахождения требуется решение системы уравнений (3), составленной соответственно из  $M > 3$  и  $M > 10$  пар уравнений.

Недостатком методов (1) и (2) является сложность коррекции ДИ во внелабораторных условиях (при отсутствии диагностической камеры и стенда измерения параметров ДИ). Поскольку значения параметров компенсации дисторсии  $k_1, k_2, p_1, p_2, x_c, y_c$  в (1) и  $a_i, b_i, i = \overline{0, 9}$ , в (2), как показано в [5, 8, 11], отличаются друг от друга на порядки, это затрудняет подбор их значений методом перебора с фиксированным шагом.

Также на практике для формирования ПИ удобно знать аналитическое выражение не для  $F(\cdot)$ , а для обратного функционала  $F^{-1}$ :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = F^{-1} \left( \begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix} \right),$$

чтобы задавая целочисленные значения координат пикселей  $(i, j)$  кадра видеоизображения с ПИ вычислять соответствующие им дробные координаты  $(x, y)$  пикселей в исходном кадре. Для нелинейных выражений (1) и (2) нельзя аналитически задать обратный функционал  $F^{-1}(\cdot)$ , реализующий однозначное отображение  $(i, j)$  в  $(x, y)$ .

### Алгоритм упрощенной компенсации ДИ

Идея упрощенного формирования ПИ основана на характерных для HUD типах ДИ [2, 6]. Схематично исходное полутоновое изображение показано на рис. 2, а; ДИ, вносимые комбинером – на рис. 2, б; изображение с ПИ – на рис. 2, в, где  $W$  и  $H$  – соответственно ширина и высота кадра видеоизображения в пикселях.

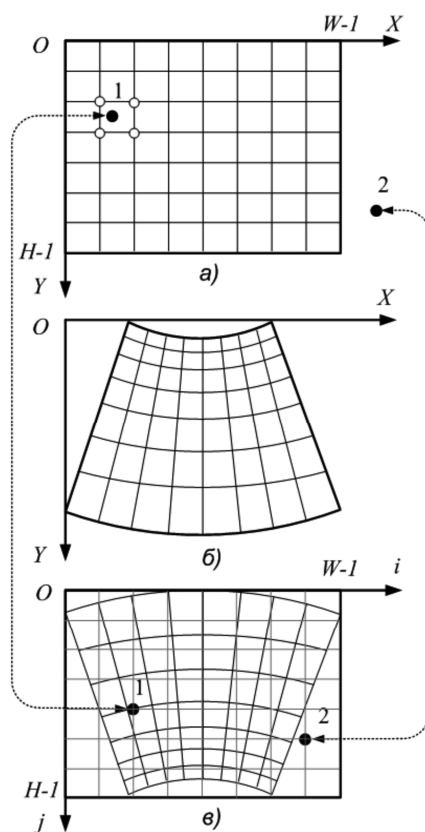


Рис. 2. Кадры видеоизображения: а) исходный кадр; б) отображение кадра на АП; в) кадр с ПИ

На рис. 2 можно выделить 3 типа характерных для HUD ДИ:

1) искажения типа «парабола» в направлении оси  $OY$ ; данный тип ДИ при  $p_1 = p_2 = 0$  может быть описан уравнениями (1), если для координат центра радиальной дисторсии справедливы условия:

$$\begin{cases} x_c = W / 2, \\ y_c > H; \end{cases}$$

2) искажения типа «трапеция» в направлении оси  $OX$ ;

3) неравномерность масштаба в направлении оси  $OY$ .

ДИ типа 2) являются результатом проективного преобразования координат, а ДИ типов 1) и 3) – полиномиального [12].

Следовательно, аналитической функции, описывающей ДИ, необходимо сформировать ПИ таким образом, чтобы изображение в поле зрения оператора имело прямоугольную форму с равномерным масштабом по оси  $OY$ .

Алгоритм упрощенной компенсации ДИ заключается в последовательном формировании ПИ, компенсирующих ДИ типов 1), 2) и 3) исходного изображения.

Для формирования ПИ по оси  $OY$  типа «парабола» выполняется преобразование:

$$x_i = i, \quad (4)$$

$$y_j = \begin{cases} \frac{j - \frac{4b_y H(i-W/2)^2}{W^2}}{1-b_y}, & b_y > 0, \\ \frac{j - b_y H \left[ \frac{4(i-W/2)^2}{W^2} - 1 \right]}{1+b_y}, & b_y < 0, \end{cases}$$

где  $(i, j)$  – целочисленные координаты пикселя изображения с предыскажениями, расположенного на пересечении  $i$ -го столбца и  $j$ -й строки;  $(x_i, y_j)$  – в общем случае дробные координаты пикселя в исходном изображении, соответствующие точке  $(i, j)$  после выполнения (4),  $i = 0, 1, \dots, W-1, j = 0, 1, \dots, H-1$ ;  $b_y$  – коэффициент, определяющий относительную кривизну в направлении оси  $OY$ ,  $b_y \in (-1, 1)$ .

При априорно неизвестной форме АП и,

Для формирования ПИ по оси  $OX$  типа «трапеция» выполняется преобразование:

$$u_i = \begin{cases} x_i / [1 + tr_x (y_{bi} - H) / 2H] + W/2, & tr_x > 0, \\ x_i / (1 + tr_x y_{bi} / 2H) + W/2, & tr_x < 0, \end{cases} \quad (5)$$

$$v_j = y_j,$$

где  $tr_x$  – коэффициент, определяющий в зависимости от его знака относительное сжатие верхней или нижней стороны изображения вдоль оси  $OX$ ,  $tr_x \in [-1, 1]$ ,  $(u_i, v_j)$  – координаты пикселя в исходном изображении, соответствующие точке  $(i, j)$  после выполнения (4) и (5).

Для компенсации неравномерности масштаба по оси  $OY$  используется выражение:

$$x_{0i} = u_i, \quad (6)$$

$$y_{0j} = v_j [2 - sc_y + 2(sc_y - 1) \cdot j / H] / sc_y,$$

где  $sc_y$  – коэффициент, показывающий относительное изменение масштаба вдоль оси  $OY$ ,  $sc_y \in (0, 2)$ .

Алгоритм упрощенного формирования ПИ изображений, проецируемых на АП, заключается в последовательном выполнении преобразований (4)-(6) и нахождения координат  $(x_{0i}, y_{0j})$  в исходном изображении, соответствующих точке  $(i, j)$ . Если для точки  $(x_{0i}, y_{0j})$  одновременно выполняются неравенства  $0 \leq x_{0i} \leq W-1$  и  $0 \leq y_{0i} \leq H-1$  (точка 1 на рис. 2, а и в), то для нахождения яркости пикселя  $I(i, j)$  применяется [12, 13] либо правило «ближайшего соседа», либо билинейная интерполяция по соседним точкам  $I(\lfloor x_{0i} \rfloor, \lfloor y_{0j} \rfloor)$ ,  $I(\lfloor x_{0i} \rfloor + 1, \lfloor y_{0j} \rfloor)$ ,  $I(\lfloor x_{0i} \rfloor, \lfloor y_{0j} \rfloor + 1)$  и  $I(\lfloor x_{0i} \rfloor + 1, \lfloor y_{0j} \rfloor + 1)$ , где оператор  $\lfloor \cdot \rfloor$  означает округление до ближайшего

меньшего целого. В противном случае принимается  $I(i, j) = 0$  (точка 2 на рис. 2, а и в).

При использовании правила «ближайшего соседа» яркость пикселя  $I(i, j)$  находится по формуле:

$$I(i, j) = \begin{cases} I(\lfloor x_{0i} \rfloor, \lfloor y_{0j} \rfloor), & (x_{0i} - \lfloor x_{0i} \rfloor < 0,5) \& (y_{0j} - \lfloor y_{0j} \rfloor < 0,5), \\ I(\lfloor x_{0i} \rfloor + 1, \lfloor y_{0j} \rfloor), & (x_{0i} - \lfloor x_{0i} \rfloor \geq 0,5) \& (y_{0j} - \lfloor y_{0j} \rfloor < 0,5), \\ I(\lfloor x_{0i} \rfloor, \lfloor y_{0j} \rfloor + 1), & (x_{0i} - \lfloor x_{0i} \rfloor < 0,5) \& (y_{0j} - \lfloor y_{0j} \rfloor \geq 0,5), \\ I(\lfloor x_{0i} \rfloor + 1, \lfloor y_{0j} \rfloor + 1), & (x_{0i} - \lfloor x_{0i} \rfloor \geq 0,5) \& (y_{0j} - \lfloor y_{0j} \rfloor \geq 0,5). \end{cases}$$

При использовании билинейной интерполяции яркость пикселя  $I(i, j)$  находится по формуле:

$$I(i, j) = \lfloor I_j + (I_{j+1} - I_j)(y_{0j} - \lfloor y_{0j} \rfloor) \rfloor,$$

где

$$I_j = I(\lfloor x_{0i} \rfloor, \lfloor y_{0j} \rfloor) + (I(\lfloor x_{0i} \rfloor + 1, \lfloor y_{0j} \rfloor) - I(\lfloor x_{0i} \rfloor, \lfloor y_{0j} \rfloor))(x_{0i} - \lfloor x_{0i} \rfloor),$$

$$I_{j+1} = I(\lfloor x_{0i} \rfloor, \lfloor y_{0j} \rfloor + 1) + (I(\lfloor x_{0i} \rfloor + 1, \lfloor y_{0j} \rfloor + 1) - I(\lfloor x_{0i} \rfloor, \lfloor y_{0j} \rfloor + 1))(x_{0i} - \lfloor x_{0i} \rfloor).$$

Для компенсации ДИ, схематично показанных на рис. 2, б, можно ограничиться формулами (4)-(6).

Процедура подбора значений параметров  $tr_x$ ,  $b_y$  и  $sc_y$  является эмпирической и заключается в поочередном (сначала подбирается значение  $tr_x$ , затем –  $b_y$ , затем –  $sc_y$ ) переборе данных параметров с фиксированным шагом 0,005 или 0,01, начиная со значения 1: для компенсации ДИ, приведенных на рис. 2, б,  $tr_x$  декрементируется, а  $b_y$  и  $sc_y$  – инкрементируются. Перебор прекращается либо при достижении максимального визуального комфорта оператора (линии сетки тестового изображения на АП воспринимаются прямыми, параллельными и эквидистантными), либо при максимальной близости тестового изображения и изображения диагностической камеры (мера близости минимизируется по методу наименьших квадратов [12, 13]). В последнем случае при подборе параметра  $tr_x$  минимизируется квадрат ошибки относительно вертикальных линий тестового изображения, при подборе  $b_y$  – относительно горизонтальных линий и при подборе  $sc_y$  – относительно как вертикальных, так и горизонтальных линий.

Недостатками всех рассмотренных алгоритмов формирования ПИ для компенсации ДИ (1), (2) и (4)-(6) являются потеря части полезной информации из кадра видеоизображения (при невыполнении условий  $0 \leq x_{0i} \leq W-1$  и  $0 \leq y_{0i} \leq H-1$ ) и снижение разрешающей способности.

#### Оценка вычислительных затрат

Количество элементарных вычислительных операций (ЭВО) на реализацию преобразований (4)-(6) и определение яркости пикселей в изображении с ПИ размером  $W \times H$  пикселей приведено в табл. 2.

Таблица 2

Операция	«+»	«*»	«/»	ЭВО
Алгоритм «ближайшего соседа»	9WH	9WH	WH	19WH
Алгоритм билинейной интерполяции	18WH	12WH	WH	31WH

В табл. 3 приведена скорость обработки (кадров/с) видеопоследовательности с размером кадра  $W \times H$  пикселей в реальном масштабе времени с использованием разных ПЭВМ и алгоритма билинейной интерполяции.

Таблица 3

Размер кадра, пикс. x пикс.	800x600	1024x768	1280x1024
Pentium Dual CPU E2200, 2,2 ГГц, ОЗУ 1 Гб	14,5	8,7	5,3
Intel Core i5, 2,4 ГГц, ОЗУ 4 Гб	45,9	27,5	16,8

Из табл. 3 видно, что для формирования ПИ в реальном масштабе времени рациональнее вычислять координаты  $(x_{0i}, y_{0j})$  только один раз и затем хранить их в памяти ПЗУ: например, в ячейку с адресом  $2(jW + i)$  записывать координату  $x_{0i}$ , вычисленную в соответствии с (4)-(6), а в ячейку с адресом  $2(jW + i) + 1$  – координату  $y_{0j}$ . Исходя из предположения, что для хранения координат используется ПЗУ с ячейкой памяти 16 бит, минимальный объем ПЗУ, требуемый для разных размеров кадра, приведен в табл. 4.

Таблица 4

Размер кадра, пикс.	800x600	1024x768	1280x1024
Объем ПЗУ, Мбит	7,68	12,58	20,97

### Результаты моделирования

Имитационное моделирование, связанное с формированием на ПЭВМ изображений размером 1024 x 768 пикселей (телевизионная испытательная таблица ТИТ-0249 и таблица ISO 12233) с ПИ, показало, что по сравнению с исходным изображением (рис. 3) при

$$|b_y| < 0,2, |tr_x| < 0,8 \text{ и } |sc_y - 1| < 0,15 \quad (7)$$

разрешающая способность по горизонтали и вертикали ухудшается не более чем на 20 % (рис. 4 и 5).

Сравнение с алгоритмом компенсации дисторсии (2), в котором коэффициенты Русинова вычислялись с использованием метода Левенберга-Маквардта по переопределенной системе из 48 уравнений, проводилось на тестовом изображении размером 1280 x 1024 пикселей типа «сетчатое поле». Результаты эксперимента с диагностической камерой показали, что среднеквадратическое отклонение (СКО) пикселей изображения на АП при формировании ПИ по (4)-(6) и выполнении условий (7) относительно тестового изображения составляет не более 1 пикселя, а при формировании ПИ по (2) – не более 0,4...0,5 пикселя. Несмотря на проигрыш по СКО в 2...2,5 раза ал-

горитм упрощенного формирования ПИ обеспечивает в 2-3 раза меньшие абсолютные искажения на краях проецируемого на комбинер изображения, а также позволяет оперативно (в течение 1-2 минут) изменять параметры компенсации ДИ (например, при изменении базы глаза оператора) без использования диагностической камеры, что важно для практических приложений.

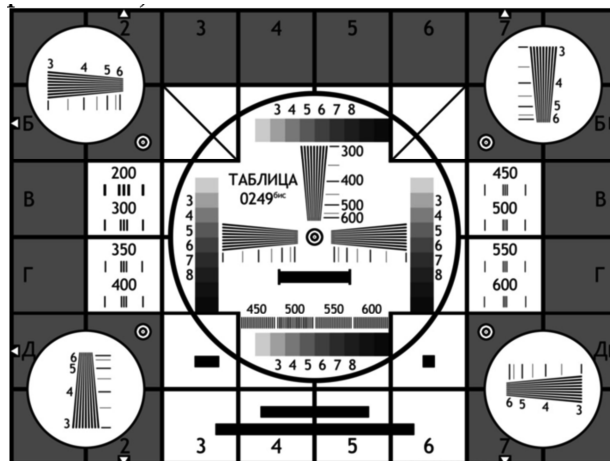


Рис. 3. Тестовая ТВ таблица ТИТ-0249

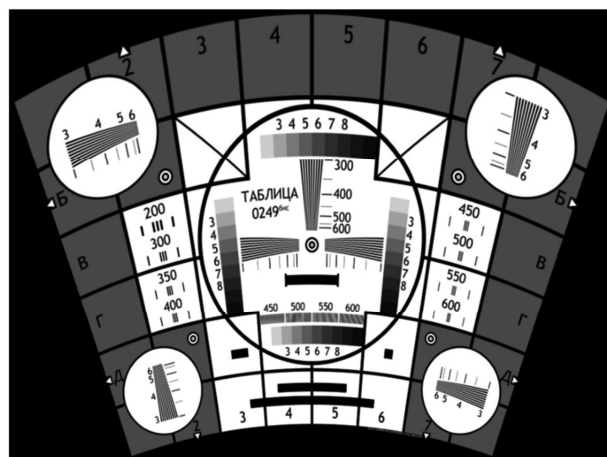
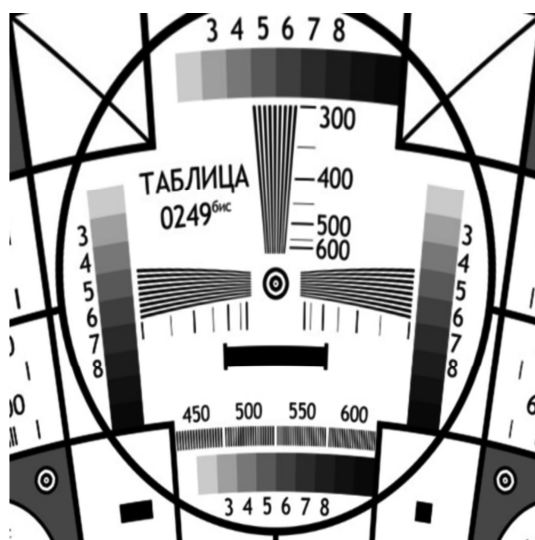
Рис. 4. Кадр видеозображения с ПИ при  $b_y = 0,2$ ,  $tr_x = -0,8$  и  $sc_y = 1,15$ 

Рис. 5. Центральный фрагмент кадра с рис. 4

## Заключение

Таким образом, рассмотренный алгоритм упрощенного формирования предсказаний позволяет изменением всего трех параметров скорректировать характерные для HUD с асферическими отражающими поверхностями дисторсионные искажения и может быть реализован в реальном масштабе времени.

## Литература

1. Li H. Review and analysis of avionic helmet-mounted displays / H. Li, X. Zhang, G. Shi, H. Qu, Y. Wu, J. Zhang // *Optical Engineering*. – 2013, Vol. 52 (11). – P. 110901-1-110901-14.
2. Козлов А.В. Нашлемная система индикации / А.В. Козлов, И.Г. Денисов, Д.Н. Шарифуллина [Электронный ресурс] // *Будущее машиностроения России: материалы VI Всерос. конф. молодых ученых и специалистов*. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
3. Hua H. Design of an ultra-light head-mounted projective display (HMPD) and its applications in augmented collaborative environments / H. Hua, C. Gao, L. Brown, F. Biocca, J.P. Rolland // *Stereoscopic displays and virtual reality systems. Proceedings of SPIE*. – 2002. – Vol. 4660. – P. 492-497.
4. Бахолдин А.В. Оптические устройства виртуальных дисплеев / А.В. Бахолдин, В.Н. Васильев, В.А. Гримм, Г.Э. Романова, С.А. Смирнов // *Оптический журнал*. – 2013. – № 5. – С. 17-24.
5. Melzer J.E. Head-mounted displays: designing for the user / J.E. Melzer, K.W. Moffitt. – McGraw-Hill, 1997. – 352 p.
6. <http://www.media-phazotron.ru/?p=333>. Проекционные системы отображения вторичной информации авиа- и автобазирования. Дата обращения – 30.06.14.
7. Malacara D. Handbook of optical design, 2nd edition/ D. Malacara, Z Malacara. – New York: Marcel Decker, 2004. – 522 p.
8. Hartley R. Multiple view geometry in computer vision/ R. Hartley, A. Zisserman: 2nd edition. – Cambridge: Cambridge University Press, 2003. – 656 p.
9. Tsai R.Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses / R.Y. Tsai // *IEEE Journal on Robotics and Automation*. – 1987. – RA-3(4). – P. 323-344.
10. Лобанов А.Н. Фотограмметрия / А.Н. Лобанов: 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 552 с.
11. Коваленко В.П. Методика оценки дисторсии современных инфракрасных систем / В.П. Коваленко, Ю.Г. Веселов, И.В. Карпиков // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение»*. – 2011. – № 1. – С. 98-107.
12. Грузман И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах / И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых, Г.И. Перетягин, А.А. Спектор. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 168 с.
13. Визильтер Ю.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: курс лекций и практических занятий / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов, А.В. Бондаренко, М.В. Ососков, А.В. Моржин. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.

### SIMPLIFIED DISTORTION COMPENSATION ALGORITHM FOR PROJECTING VIDEO ON PRIORI UNKNOWN FORM ASPHERICAL REFLECTIVE SURFACES

*Kholopov I.S.*

Analytical expressions for simplified forming the predistortion of video frame that projected on priori unknown form aspherical reflecting surfaces is considered.

## НОВЫЕ КНИГИ

**Солонина А.И.**

**ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И MATLAB / А.И. Солонина, Д.М. Клинский, Т.В. Меркучева, С.Н. Перов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013. – 512 с. (Учебная литература для вузов)**

**Москва: Техносфера, 2013. – 528 с.**

Описываются базовые методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов и средств их компьютерного моделирования в системе MATLAB. Даны основы алгоритмического языка MATLAB. Рассматриваются дискретные сигналы, линейные дискретные системы, дискретное преобразование Фурье с использованием алгоритмов БПФ, синтез и анализ КИХ- и БИХ-фильтров, в том числе с фиксированной точкой, спектральный анализ сигналов, многоскоростная обработка сигналов и адаптивная цифровая фильтрация.

