

УДК 621.384.32

## ВЛИЯНИЕ ВРАЩЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В АВИАЦИОННОМ ТЕПЛОВИЗИОННОМ КАНАЛЕ НА ДЕШИФРИРУЕМОСТЬ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2007 г. В. А. Овсянников, канд. техн. наук; В. Л. Филиппов, доктор физ.-мат. наук;  
С. Н. Шушарин

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

Рассмотрено влияние вращения изображения сцен, наблюдаемых в авиационном тепловизионном канале, который построен с применением субматричного фотоприемного устройства, работающего в режиме временной задержки и накопления и микросканирования по кадру. Показано, что при формировании изображения в телевизионном стандарте его дешифрируемость заметно не ухудшается, если угловая скорость вращения не превышает 30 град/с. При учете инерционности зрения дешифрируемость не ухудшится, если угловая скорость вращения не превысит 6 град/с.

Коды OCIS: 120.4640.

Поступила в редакцию 07.09.2006.

При фиксации центра поля зрения авиационного визира тепловизионного канала (ТВК) на обнаруженную цель в результате движения носителя этого ТВК возникает вращение изображения относительно точки фиксации. Наиболее неблагоприятная ситуация имеет место, когда фиксируется центр групповой (сложной) цели. При этом изображение периферийной цели на экране видеоконтрольного устройства канала будет двигаться по окружности с центром, соответствующим точке фиксации поля зрения ТВК, причем скорость этого движения пропорциональна радиусу данной окружности. Считаем далее, что в ТВК используется субматричное фотоприемное устройство (ФПУ), которое перекрывает поле зрения канала по кадру и работает в режиме временной задержки и накопления (ВЗН) и микросканирования по кадру. При этом возникает ухудшение дешифрируемости изображения ТВК, что является следствием двух основных причин:

смаза изображения из-за несовпадения фактического времени задержки для используемого в ФПУ ТВК режима ВЗН с расчетным,

искажения изображения на стыках смежных строк смежных полукадров, смещенных друг относительно друга на половину периода ФПУ.

Рассмотрим влияние этих причин детальнее. Очевидно, что при вращении изображения относительно его центра – точки фиксации групповой цели – изображение фрагмента периферийной цели, смещенного на расстояние  $R$  (в фокальной плоскости объектива) относительно центра, будет двигаться со скоростью

$$V = R\varphi = t a \varphi, \quad (1)$$

где  $a$  – размер элемента ФПУ,  $t$  – смещение фрагмента цели (в числе элементов),  $\varphi$  – угловая скорость вращения.

Тогда относительная (в числе элементов) величина смаза изображения

$$\alpha = V\Delta t/a = t\varphi\Delta t, \quad (2)$$

где  $\Delta t$  – время максимальной задержки режима ВЗН.

Если в ТВК используется фотоприемная субматрица форматом  $R_c \times R_k$  с квадратными элементами, расположенными в столбцах без зазоров (рис. 1), то величина  $\Delta t$  составляет

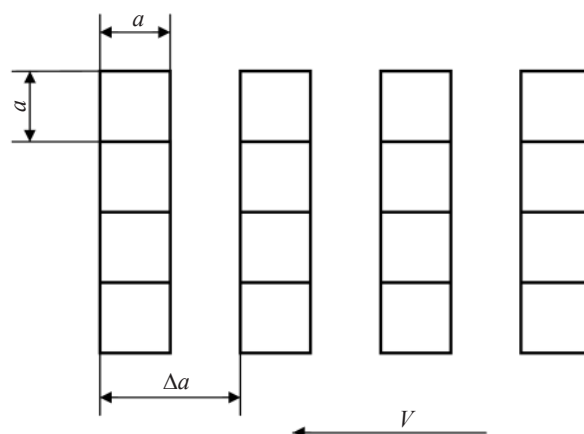


Рис. 1. Топология субматричного ФПУ.

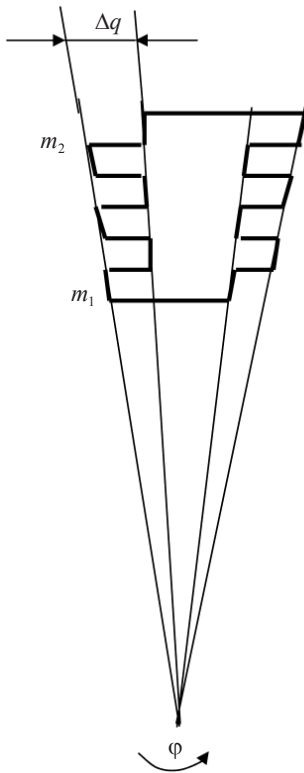


Рис. 2. Формирование искажений контуров изображения.

$$\Delta\tau = (R_c - 1)\Delta a\tau/a, \quad (3)$$

где  $\tau$  – время считывания,  $\Delta a$  – период (шаг) элементов по строке,  $a$  – размер элемента.

Поскольку в ТВК реализуется лишь строчное сканирование, то

$$\tau = \eta/2Fn_c, \quad (4)$$

где  $\eta$  – коэффициент полезного действия сканирования,  $F$  – частота кадров,  $n_c$  – число элементов разложения в поле зрения по строке.

Подставляя (3),(4) в (2), получаем

$$\alpha = (R_c - 1)m\phi\Delta a\eta/2aFn_c, \quad (5)$$

что для типовых значений  $R_c = 4$ ,  $\Delta a/a = 1,7$ ,  $\eta = 0,7$ ,  $F = 25$  Гц и  $n_c = R_k = 288$  дает  $\alpha = 0,25 \times 10^{-3}m\phi$ .

Придадим  $m$  и  $\phi$  максимальные значения:  $m = R_k/2 = 144$ ,  $\phi = 90$  град/с =  $1,57$  рад/с, и тогда относительная величина смаза составит  $\alpha = 0,06$ . Такой незначительный смаз, разумеется, не ухудшает качество изображения.

При движении изображения периферийного объекта как вдоль, так и поперек направления сканирования его изображения в смежных полукадрах не совпадают, что приводит к искажению (на величину  $\Delta q$ ) контуров результирующего изображения в каждом кадре (рис. 2).

Величина этого искажения (в долях элемента) для фрагмента, отстоящего на  $m$  элементов от центра фиксации (вращения изображения), составляет, аналогично (2),

$$\alpha = V\Delta T/a = m\phi\Delta T = m\phi/2F = 0,02m\phi, \quad (6)$$

где  $\Delta T = 0,02$  с – период полукадра.

Следовательно, в наихудшем случае, когда  $m = 144$  (центр вращения совпадает с центром экрана) и  $\phi = 1,57$  рад/с, искажение достигает  $\alpha = 4,5$  элементов, что уже существенно. Поэтому рассмотрим его влияние более подробно.

Представляется очевидным, что искажения контуров изображения объекта ухудшают качество изображения не в большей степени, чем его смаз такой же величины. Поэтому оценка влияния равновеликого смаза будет верхней оценкой влияния рассматриваемого вида искажений изображения на его дешифрируемость.

Как известно [1], функция передачи модуляции (ФПМ) смаза, например, по строке описывается формулой

$$K(v) = \sin(\pi\alpha v\delta_0)/\pi\alpha v\delta_0, \quad (7)$$

где  $v$  – угловая частота,  $\delta_0$  – элементарное поле зрения ТВК, и, значит, согласно результатам [1], этот смаз увеличивает разрешение на местности в этом направлении в  $\theta$  раз, где

$$\theta = \sqrt{1 + 0,28\alpha^2}, \quad (8)$$

причем, с учетом (6), коэффициент  $\theta$  оказывается функцией смещения  $m$  рассматриваемого фрагмента изображения относительно центра вращения:

$$\theta = \sqrt{1 + \rho^2 m^2}, \quad \rho = 0,01\phi. \quad (9)$$

Поэтому вместо отношения  $N^2 = S/A^2$  ( $S$  – площадь объекта,  $A$  – разрешение на местности), определяющего вероятность вскрытия объекта, в данном случае для всего объекта имеет место отношение

$$N_{\Sigma}^2 = \frac{S}{A^2\theta_{\Sigma}^2}; \quad v_{\Sigma} = \left[ \frac{1}{m_2 - m_1} \int_{m_1}^{m_2} \frac{dm}{\sqrt{1 + \rho^2 m^2}} \right]^{-1} = (m_2 - m_1) / \ln \left( \frac{\rho m_2 + \sqrt{1 + \rho^2 m_2^2}}{\rho m_1 + \sqrt{1 + \rho^2 m_1^2}} \right), \quad (10)$$

где  $\theta_{\Sigma}$  – эффективный средний коэффициент  $\theta$ , одинаковый для всего объекта;  $m_1, m_2$  – отклонения границ изображения объекта от центра вращения (в числе элементов) (см. рис. 2).

Следовательно, для оценки влияния вращения изображения на температурно-частотную характеристику или ФПМ прибора, например, по строке

достаточно в формулы или графики, определяющие эти характеристики, подставить вместо  $v$  произведение  $v\theta_\Sigma$ , что эквивалентно увеличению элементарного поля зрения канала в  $\theta_\Sigma$  раз.

Значение  $\theta_\Sigma$  определяет по (8) и эффективный относительный смаз

$$\alpha_\Sigma = 1,9\sqrt{\theta_\Sigma^2 - 1}. \quad (11)$$

Как показывает анализ формулы (10), если размеры объекта не превышают  $\Delta m = m_2 - m_1 = 20$  элементов (наиболее актуальный случай), то эффективное значение  $\theta_\Sigma$  можно с достаточной точностью вычислить по формуле вида (9), т. е.

$$\theta_\Sigma = \sqrt{1 + \rho^2 m_0^2}, \quad m_0 = (m_2 + m_1)/2, \quad (12)$$

где  $m_0$  – смещение центра объекта относительно центра экрана (центра вращения).

Тогда по (6) имеем для эффективной величины смаза выражение

$$\alpha_\Sigma = 0,02m_0\varphi. \quad (13)$$

Влияние смаза на дешифрируемость оптоэлектронного изображения экспериментально исследовалось авторами [2], которые показали, что ухудшение  $\Delta n$  этой дешифрируемости в баллах шкалы NIIRS [1] связано с относительным смазом  $\alpha_\Sigma$  эмпирическим соотношением

$$\Delta n = 0,063\alpha_\Sigma + 0,0059\alpha_\Sigma^2, \quad (14)$$

причем снижение  $\Delta n$ , не превышающее 0,1, еще никак не ощущается наблюдателем.

Снижению  $\Delta n$  соответствует эквивалентное увеличение (ухудшение) разрешения на местности по обеим координатам в  $\gamma$  раз, где [1]

$$\gamma = 10^{\Delta n/3,2}. \quad (15)$$

Соотношение (14) с учетом (13) определяет соответствующее ухудшение дешифрируемости изображения. Зависимость  $\Delta n = f(m_0\varphi)$  дана ниже:

$m_0\varphi$ , рад/с	75	100	150	200	220
$\Delta n$ , балл	0,1	0,15	0,25	0,35	0,4

Следовательно, если смещение  $m_0 < 48$  элементов, то даже при максимальной угловой скорости вращения  $\varphi = 1,57$  рад/с снижение  $\Delta n$  уровня дешифрируемости составляет не более 0,1 и, значит, оно еще не будет замечено оператором. Для малоразмерного объекта, находящегося на краю поля зрения ( $m_0 = 144$ ), при той же угловой скорости значение  $\Delta n = 0,4$ , что согласно (15) эквивалентно увеличению разрешения на местности (среднего по обеим координатам) в 1,33 раза. Это, в свою очередь, вызывает по [1] снижение вероятности вскрытия объекта, например, с 0,8 до 0,59 или с 0,9 до 0,72, что уже существенно. Для сохранения каче-

ства изображения этого объекта необходимо, чтобы угловая скорость вращения изображения не превышала 0,5 рад/с = 30 град/с.

Аналогично можно показать, что если центр вращения находится в площади изображения объекта, то при относительном размере объекта  $\Delta m \leq 100$  элементов и  $\varphi \leq 1,57$  рад/с ухудшения дешифрируемости изображения еще не произойдет ( $\Delta n \leq 0,1$ ).

Нетрудно убедиться, что данные результаты практически не зависят от ориентации объекта относительно центра вращения.

Отметим, что в вышеприведенных расчетах не учтена инерционность зрительного анализатора, определяемая его постоянной времени  $T_e = 0,1$  с. Поэтому полученные результаты применимы для режима “стоп-кадра” или при анализе записанного изображения. Для учета этой инерционности при дешифрировании изображения ТВК в реальном масштабе времени в формулу (6) следует вместо  $\Delta T$  подставить  $T_e$  и тогда величина  $\rho$  в (10) будет равна  $0,05\varphi$ . При этом все результаты расчетов сохраняются для значений угловой скорости вращения в  $T_e/\Delta T = 5$  раз меньшей. Это означает, что, например, при смещении центра изображения  $m_0 < 48$  снижения уровня дешифрируемости изображения (при его анализе в реальном масштабе времени) не произойдет, если угловая скорость вращения не превысит  $\sim 20$  град/с.

## Выводы

1. Основной причиной ухудшения качества изображения при его вращении в процессе фиксации полем зрения ТВК той или иной точки местности является искажение изображения, возникающее при сдвиге относительно друг друга смежных полукадров канала.

2. При центре фиксации поля зрения (центра вращения) канала в площади объекта дешифрируемость его изображения в режиме “стоп-кадра” практически не ухудшается независимо от угловой скорости вращения  $\varphi < 90$  град/с.

3. Для малоразмерного объекта (с габаритным размером до 20 элементов разложения) при смещении его центра относительно центра вращения, не превышающем 48 элементов разложения, заметно ухудшения дешифрируемости его изображения в режиме “стоп-кадра” из-за вращения этого изображения еще не произойдет. В случае локализации его на краю поля зрения ТВК максимально возможное снижение его дешифрируемости составит 0,4 балла по шкале NIIRS, однако если угловая скорость вращения при этом не превысит 30 град/с, то это снижение также еще не будет замечено оператором (в режиме “стоп-кадра”).

4. При дешифрировании изображений в реальном масштабе времени основной причиной ухудшения их дешифрируемости является смаз воспринимаемых изображений, возникающий из-за инерционности зрения оператора. Влияние этого смаза эквивалентно влиянию рассмотренных выше искажений изображения при угловой скорости вращения изображения в 5 раз меньшей.

---

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Алеев Р.М., Иванов В.П., Овсянников В.А.* Несканирующие тепловизионные приборы. Казань: Изд. КГУ, 2004.
2. *Smith S.L. et al.* Understanding image quality losses due to smear in high-resolution remote sensing imaging systems // *Opt. Engin.* 1991. V. 38. № 5.