

# НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТОПРИЕМНИКА КАК МУЛЬТИПЛИКАТИВНАЯ ПОМЕХА ПРИ МЕЖКАДРОВОЙ ОБРАБОТКЕ В ПРЕЦИЗИОННЫХ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМАХ

**В. А. Рогачев<sup>а</sup>**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

**А. А. Закутаев<sup>а</sup>**, старший научный сотрудник, начальник лаборатории

**В. Д. Лиференко<sup>а</sup>**, доктор техн. наук, профессор

**М. О. Колбанев<sup>б</sup>**, доктор техн. наук, профессор

<sup>а</sup>Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

<sup>б</sup>Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** в телевизионных системах визуализации достаточно широко используется компенсация неравномерности чувствительности фотоприемника. Однако, несмотря на видимые улучшения, компенсация неравномерности чувствительности фотоприемника не изменяет пороговой чувствительности. **Цель:** оценка влияния неравномерности чувствительности фотоприемника при межкадровой обработке в прецизионных телевизионных системах обнаружения. **Результаты:** получены выражения параметров распределений решающих статистик при влиянии неравномерности чувствительности фотоприемника. Показано, что компенсация неравномерности чувствительности фотоприемника приводит к перераспределению влияния и не обеспечивает полного устранения неравномерности чувствительности фотоприемника. **Практическая значимость:** полученные результаты позволяют оценить степень влияния неравномерности чувствительности фотоприемника для основных режимов работы прецизионной телевизионной системы обнаружения, а также показывают, что в режиме ограничения фоновыми шумами при малых фоновых шумах параметр распределения решающей статистики не зависит от неравномерности чувствительности фотоприемника.

**Ключевые слова** — межкадровая обработка, обнаружение сигналов, режимы работы фотоприемника, неравномерность чувствительности фотоприемника, компенсация неравномерности чувствительности фотоприемника.

## Введение

Прецизионные телевизионные системы (ПТС) характеризуются, помимо прочих особенностей, существенной неравномерностью выходного сигнала фотоприемника — «геометрическим шумом» [1].

Эта неравномерность определяется двумя параметрами: неравномерностью темнового тока, проявляющейся при отсутствии внешней освещенности, и неравномерностью чувствительности фотоприемника (НЧФ). Причиной этих неравномерностей, как правило, является разброс технологических параметров при изготовлении фотоприемника.

Неравномерность чувствительности фотоприемника представляет собой помеху, которая при равномерной засветке поля фотоприемника дает различные значения сигнала для различных элементов [1].

Относительная неравномерность выходного сигнала фотоприемника согласно ГОСТ 28953-91 [2] оценивается следующим образом:  $\Delta = (U_{\max} - U_{\min}) / (U_{\max} + U_{\min})$ , где  $U_{\max}$  и  $U_{\min}$  — максимальное и минимальное значения сигналов отдельных элементов фотоприемника.

Компенсация НЧФ как мультипликативной помехи производится умножением сигнала

каждого элемента фотоприемника на величину, обратную его чувствительности (в одной или нескольких точках), и является гораздо более сложной операцией, чем компенсация темнового тока, представляющего собой аддитивную помеху [3–7].

В телевизионных системах визуализации неравномерность выходного сигнала достаточно хорошо корректируется (компенсируется) [3–7]. Однако при обнаружении сигналов компенсация НЧФ не улучшает пороговой чувствительности [8].

Ранее [9, 10] были рассмотрены задачи обнаружения в ПТС без учета НЧФ. В данной работе рассмотрим особенности влияния НЧФ на характеристики обнаружения в различных режимах работы ПТС с компенсацией и без компенсации НЧФ.

Ограничимся случаем межкадровой обработки сигнала фотоприемника, когда производится поэлементное сравнение соседних кадров и можно сравнить элементы фотоприемника с одинаковой чувствительностью. Оценки влияния НЧФ на характеристики обнаружения ПТС уже рассматривались, но только для случая внутрикадровой обработки [11].

Анализ проведем на основе модели с двумя источниками шумов, применяемой в видеинформационных (телевизионных) системах [12].

Такая модель приводит к появлению многих режимов работы ПТС, обусловленных взаимным соотношением токов и шумов на выходе фотоприемника [13].

Световой отклик каждого элемента фотоприемника, как правило, различен, тем самым и образуется НЧФ. Введем относительный коэффициент чувствительности для  $i$ -го элемента фотоприемника, имеющий различные значения для различных элементов:  $\gamma_i = U_i / U_{\min}$ . Значение относительного коэффициента чувствительности будет лежать в диапазоне  $1 \leq \gamma_i \leq U_{\max} / U_{\min}$ .

Рассмотрим влияние НЧФ отдельно для каждого режима, в котором может работать система. При этом полагаем, что размеры проекции обнаруживаемого объекта могут быть любыми в пределах матрицы фотоприемника. Для обработки имеется несколько кадров  $M$ , в которых нет полезного сигнала («опорных» кадров), и несколько кадров  $N$ , в которых сигнал присутствует. Полезный сигнал занимает некоторое количество элементов, его амплитуда может изменяться от элемента к элементу, ее значение неизвестно и стационарно от кадра к кадру. Характеристики НЧФ (среднее значение чувствительности и ее разброс) считаем стационарными по полю фотоприемника.

Для определения «контраста» между кадрами вычисляется некоторая функция (статистика), зависящая от режима, в котором работает ПТС [9, 11, 13].

### Режим ограничения внутренним шумом

В этом случае наличие НЧФ приводит к изменению параметров модели с нормальным распределением по сравнению со случаем отсутствия НЧФ.

Проверяемые гипотезы о наличии  $H_1$  или отсутствии  $H_0$  сигнала будут иметь вид:

$$H_0 : x \in N(d, \sigma^2), y \in N(d, \sigma^2);$$

$$H_1 : x \in N(d, \sigma^2), y \in N(d + \gamma s, \sigma^2),$$

где  $d$  — темновой ток;  $\sigma^2$  — дисперсия внутреннего шума;  $\gamma$  — относительный коэффициент чувствительности данного элемента фотоприемника;  $s$  — сигнал.

После вычитания темнового тока (полагаем, что дисперсия оценки темнового тока пренебрежимо мала) модель изменится и будет иметь следующий вид:

$$H_0 : x \in N(0, \sigma^2), y \in N(0, \sigma^2);$$

$$H_1 : x \in N(0, \sigma^2), y \in N(\gamma s, \sigma^2).$$

Для принятия решения о наличии или отсутствии сигнала для этого режима необходимо вычислить статистику Стьюдента [9, 11, 13]:

$$t = \left[ \frac{\bar{y}}{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (x_i)^2}} \right] / (M),$$

где в числителе вычисляется среднее по сигнальной области с числом элементов  $M$ , а в знаменателе — оценка дисперсии по фоновой области окна обработки с числом элементов  $N$ .

Данная статистика имеет нецентральное распределение Стьюдента с параметром нецентральности  $\phi_t = s/\sigma$  (при отсутствии неравномерности чувствительности) [9–13]. Этот параметр нецентральности пропорционален отношению сигнал/шум.

Определим, каким образом влияет НЧФ на параметр нецентральности распределения Стьюдента.

Вследствие наличия НЧФ числитель параметра нецентральности изменится и примет значение

$$\phi_t^\gamma(i) = (s\gamma_i) / \sqrt{\sigma^2} = (s/\gamma_i) / \sigma,$$

где  $i$  — номер элемента фотоприемника.

Таким образом, наличие НЧФ приводит к изменению параметра нецентральности и, следовательно, к изменению мощности (вероятности правильного обнаружения) алгоритма Стьюдента.

После компенсации НЧФ модель будет иметь следующий вид:

$$H_0 : x \in N(0, \sigma^2), y \in N(0, \sigma^2);$$

$$H_1 : x \in N(0, \sigma^2), y \in N(s, \sigma^2 / \gamma^2).$$

Параметр нецентральности распределения Стьюдента не изменится:

$$\phi_t^{1/\gamma}(i) = (s) / \sqrt{\sigma^2 / \gamma_i^2} = (s\gamma_i) / \sigma.$$

Таким образом, компенсация НЧФ не устраняет влияние неравномерности чувствительности в режиме ограничения внутренним шумом.

### Режим обнаружения случайного сигнала

Для этого случая НЧФ будет проявляться следующим образом:

$$H_0 : x \in N(d + \gamma b, \sigma^2 + \gamma ab), y \in N(d + \gamma b, \sigma^2 + \gamma ab);$$

$$H_1 : x \in N(d + \gamma b, \sigma^2 + \gamma ab),$$

$$y \in N(d + \gamma b, \sigma^2 + \gamma ab + \gamma as),$$

где  $ab$  — дисперсия фонового шума;  $b$  — фоновый ток.

После вычитания темнового тока модель изменится и будет иметь следующий вид:

$$H_0: x \in N(\gamma b, \sigma^2 + \gamma ab), y \in N(\gamma b, \sigma^2 + \gamma ab);$$

$$H_1: x \in N(\gamma b, \sigma^2 + \gamma ab), y \in N(\gamma b, \sigma^2 + \gamma ab + \gamma as).$$

Для принятия решения о наличии или отсутствии полезного сигнала необходимо вычислить статистику Фишера [9–13]:

$$z = \left[ \sum_{j=1}^N (y_j - \bar{y})^2 / (N-1) \right] / \left[ \sum_{i=1}^M (x_i - \bar{x})^2 / (M-1) \right].$$

В этой статистике используются оценки средних и дисперсии в «опорных» и «сигнальных» кадрах.

Данная статистика имеет центральное распределение Фишера с параметром, пропорциональным отношению сигнал/шум  $\phi_i = (\sigma^2 + ab + as) / (\sigma^2 + ab)$  (при отсутствии неравномерности чувствительности) [9–13].

С учетом влияния НЧФ данный параметр будет равен

$$\phi_z^\gamma(i) = \left[ \sigma^2 + \gamma_i ab + \gamma_i as \right] / \left[ \sigma^2 + \gamma_i ab \right].$$

Таким образом, наличие НЧФ приводит к изменению мощности алгоритма Фишера.

После компенсации НЧФ модель будет иметь следующий вид:

$$H_0: x \in N(b, \sigma^2 / \gamma^2 + ab / \gamma),$$

$$y \in N(b, \sigma^2 / \gamma^2 + ab / \gamma);$$

$$H_1: x \in N(b, \sigma^2 / \gamma^2 + ab / \gamma),$$

$$y \in N(b, \sigma^2 / \gamma^2 + ab / \gamma + as / \gamma),$$

поэтому параметр нецентральности распределения Фишера также изменится:

$$\phi_z^{1/\gamma}(i) = \left[ \sigma^2 / \gamma_i + ab + as \right] / \left[ \sigma^2 / \gamma_i + ab \right].$$

Таким образом, компенсация НЧФ не устраняет влияние неравномерности чувствительности в режиме обнаружения случайного сигнала.

Необходимо отметить, что если внутренние шумы малы, т. е.  $\sigma^2 \ll ab + as$ , то параметр нецентральности не зависит от НЧФ.

### Режим ограничения фоновым шумом

Для этого случая НЧФ будет проявляться следующим образом:

$$H_0: x \in N(\gamma b, \gamma ab), y \in N(\gamma b, \gamma ab);$$

$$H_1: x \in N(\gamma b, \gamma ab), y \in N(\gamma b + \gamma s, \gamma ab + \gamma as),$$

где  $ab$  — дисперсия фонового шума;  $as$  — дисперсия сигнального шума.

Для принятия решения о наличии или отсутствии полезного сигнала необходимо вычислить статистику [8, 10]:

$$q = \left[ \sum_{j=1}^N (y_j)^2 / N \right] / \left[ \sum_{i=1}^M (x_i)^2 / M \right].$$

Данная статистика имеет дважды нецентральное распределение Фишера с параметром распределения  $\phi_q = [(b + s)^2 + a(b + s)] / (b^2 + s)$  (при отсутствии неравномерности чувствительности) [9, 10].

В случае наличия НЧФ параметр распределения, пропорциональный отношению сигнал/шум, изменится:

$$\phi_q^\gamma(i) = \left[ \gamma_i^2 (b + s)^2 + \gamma_i ab + \gamma_i as \right] / \left[ \gamma_i^2 b^2 + \gamma_i ab \right].$$

Таким образом, НЧФ приводит к изменению мощности алгоритма.

После компенсации НЧФ модель будет иметь следующий вид:

$$H_0: x \in N(b, ab / \gamma), y \in N(b, ab / \gamma);$$

$$H_1: x \in N(b, ab / \gamma), y \in N(b + s, ab / \gamma + as / \gamma),$$

поэтому параметр нецентральности дважды нецентральное распределения Фишера примет следующую форму:

$$\phi_q^{1/\gamma}(i) = \left[ (b + s)^2 + ab / \gamma_i + as / \gamma_i \right] / \left[ b^2 + ab / \gamma_i \right].$$

Таким образом, компенсация НЧФ не устраняет влияние неравномерности чувствительности в режиме ограничения фоновым шумом.

Следует отметить, что если шумы, вызываемые фоном, малы, т. е.  $b^2 \gg ab$ , то параметр нецентральности не зависит от НЧФ в этом режиме.

### Режим общий

Для этого случая НЧФ будет проявляться следующим образом:

$$H_0: x \in N(d + \gamma b, \sigma^2 + \gamma ab), y \in N(d + \gamma b, \sigma^2 + \gamma ab);$$

$$H_1: x \in N(d + \gamma b, \sigma^2 + \gamma ab),$$

$$y \in N(d + \gamma b + \gamma s, \sigma^2 + \gamma ab + \gamma as).$$

После вычитания темнового тока модель изменится и будет иметь следующий вид:

$$H_0: x \in N(\gamma b, \sigma^2 + \gamma ab), y \in N(\gamma b, \sigma^2 + \gamma ab);$$

$$H_1: x \in N(\gamma b, \sigma^2 + \gamma ab),$$

$$y \in N(\gamma b + \gamma s, \sigma^2 + \gamma ab + \gamma as).$$

Для принятия решения о наличии или отсутствии полезного сигнала необходимо вычислить модифицированную статистику Фишера [9, 10]:

$$r = \left[ \sum_{j=1}^N (y_j - \bar{x})^2 / N \right] / \left[ \sum_{i=1}^M (x_i - \bar{x})^2 / (M - 1) \right].$$

Данная статистика имеет нецентральное распределение Фишера с параметром  $\phi_r = s^2 / (\sigma^2 + ab + as)$  (при отсутствии НЧФ) [9, 10].

Для этого режима при наличии НЧФ параметр распределения, пропорциональный отношению сигнал/шум, будет равен

$$\phi_r^\gamma(i) = \left[ \gamma_i^2 s^2 \right] / \left[ \sigma^2 + \gamma_i ab + \gamma_i as \right].$$

Таким образом, НЧФ приводит к изменению мощности алгоритма.

После компенсации НЧФ модель будет иметь следующий вид:

$$H_0: x \in N(b, \sigma^2 / \gamma^2 + ab / \gamma),$$

$$y \in N(b, \sigma^2 / \gamma^2 + ab / \gamma);$$

$$H_1: x \in N(b, \sigma^2 / \gamma^2 + ab / \gamma),$$

$$y \in N(b + s, \sigma^2 / \gamma^2 + ab / \gamma + as / \gamma).$$

Параметр нецентральности дважды нецентрального распределения Фишера будет иметь вид

$$\phi_r^{1/\gamma}(i) = \left[ s^2 \right] / \left[ \sigma^2 / \gamma_i^2 + ab / \gamma_i + as / \gamma_i \right].$$

Таким образом, компенсация НЧФ не устраняет влияние неравномерности чувствительности в общем режиме.

Для каждого из режимов работы ПТС получены выражения параметров распределений решающих статистик при отсутствии НЧФ, учитывающие влияние НЧФ, а также при компенсации НЧФ (таблица). Параметры для каждого из рассмотренных режимов пропорциональны отношению сигнал/шум и зависят от НЧФ.

Наличие НЧФ изменяет постоянную и случайную составляющие как сигнала, так и фона и не затрагивает внутренние шумы. Компенсация НЧФ перераспределяет (переносит) влияние НЧФ и не приводит к полному устранению влияния НЧФ.

Таким образом, наличие НЧФ вызывает изменение параметров распределений решающих статистик, что в свою очередь приводит к изменению вероятностей правильного обнаружения.

■ Влияние неравномерности чувствительности на параметры функций вероятностей правильного обнаружения

| Режим                          | Параметр статистики при условии   |  |  |
|--------------------------------|---|--|--|
|                                | отсутствия НЧФ  | наличия НЧФ  | компенсации НЧФ  |
| Ограничения внутренним шумом   | $\phi_t^1 = (s) / \sqrt{(\sigma^2)}$  | $\phi_t^\gamma(i) = (s\gamma_i) / \sqrt{(\sigma^2)}$   | $\phi_t^{1/\gamma}(i) = (s) / \sqrt{\sigma^2 / \gamma_i}$  |
| Обнаружения случайного сигнала | $\phi_z^1 = \left[ \sigma^2 + ab + as \right] / \left[ \sigma^2 + ab \right]$ | $\phi_z^\gamma(i) = \left[ \sigma^2 + \gamma_i ab + \gamma_i as \right] / \left[ \sigma^2 + \gamma_i ab \right]$                   | $\phi_z^{1/\gamma}(i) = \left[ \sigma^2 / \gamma_i + ab + as \right] / \left[ \sigma^2 / \gamma_i + ab \right]$        |
| Ограничения фоновым шумом      | $\phi_q^1 = \left[ (b + s)^2 + a(b + s) \right] / \left[ b^2 + ab \right]$    | $\phi_q^\gamma(i) = \left[ \gamma_i^2 (b + s)^2 + \gamma_i ab + \gamma_i as \right] / \left[ \gamma_i^2 b^2 + \gamma_i ab \right]$ | $\phi_q^{1/\gamma}(i) = \left[ (b + s)^2 + ab / \gamma_i + as / \gamma_i \right] / \left[ b^2 + ab / \gamma_i \right]$ |
| Общий                          | $\phi_r^1 = s^2 / (\sigma^2 + ab + as)$                                       | $\phi_r^\gamma(i) = \left[ \gamma_i^2 s^2 \right] / \left[ \sigma^2 + \gamma_i ab + \gamma_i as \right]$                           | $\phi_r^{1/\gamma}(i) = \left[ s^2 \right] / \left[ \sigma^2 / \gamma_i^2 + ab / \gamma_i + as / \gamma_i \right]$     |

Следует отметить, что в режиме ограничения фоновыми шумами при малых фоновых шумах параметр распределения решающей статистики не зависит от НЧФ. Аналогичная ситуация складывается и в режиме обнаружения случайного сигнала при малых внутренних шумах.

### Заключение

В работе получены выражения параметров распределений решающих статистик при влиянии неравномерности чувствительности фотоприемника.

### Литература

1. Solid State Imaging/Ed. by P. Jespers, F. Van de Wiele, M. White. — Noordhoff-Leyden, 1976. — 752 p.
2. ГОСТ 28953-91. Приборы фоточувствительные с переносом заряда. Методы измерения параметров. — М.: Изд-во стандартов, 2004. — 31 с.
3. Брондз Д. С., Харитоновна Е. Н. Коррекция геометрического шума МФПУ с помощью аппроксимации методом наименьших квадратов передаточных характеристик матрицы полиномом Т-порядка // Журнал радиоэлектроники. 2008. № 11. С. 1–29.
4. Сергунов А. А. Методы коррекции неравномерности чувствительности инфракрасных матричных фотоприемников // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Вып. 8. С. 38–42.
5. Scribner D. A., Kruer M. R., and Griedly C. J. Physical Limitations to Nonuniformity Correction in Focal Plane Arrays//Proc. SPIE. 1987. Vol. 865. P. 185–201.
6. Wang R., Chen P., and Tsien P. An Improved Nonuniformity Correction Algorithm for Infrared Focal Plane Arrays which is Easy to Implement// Infrared Physics and Technology. 1998. Vol. 39. P. 15–21.
7. Emerson G. P., Little S. J. Flat-Fielding for CCDs in AAVSO Observations//AAVSO. 1999. Vol. 27. P. 49–54.
8. Рогачев В. А., Фантиков О. И. Влияние неравномерности чувствительности фотоприемника на пороговую чувствительность ТВ-систем // Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. 1987. № 2. С. 48–55.
9. Колбанев М. О., Рогачев В. А. Оптимизация выделения полезного сигнала в многорежимных информационных системах // Вопросы радиоэлектроники. Сер. РЛТ. 2010. Вып. 1. С. 92–101.
10. Колбанев М. О., Рогачев В. А. Анализ проблемы обнаружения в инфракрасных системах // Информационно-управляющие системы. 2010. № 5. С. 51–54.
11. Колбанев М. О., Рогачев В. А., Закутаев А. А. Неравномерность чувствительности фотоприемника и ее компенсация при обнаружении в инфракрасных системах // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2015. Вып. 5. С. 79–88.
12. Цыцулин А. К., Адамов Д. Ю., Манцетов А. А., Зубакин И. А. Твердотельные телекамеры: Накопление качества информации. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. — 272 с.
13. Рогачев В. А. Особенности обработки сигнала в прецизионных телевизионных системах // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2011. Вып. 2. С. 18–26.
14. Lehmann E. L., Romano J. P. Testing Statistical Hypotheses. — Springer, 2005. — 800 p.

UDC 519.248, 621.384.3

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.13

### Photodetector Sensitivity Non-Uniformity as a Multiple Interference in High-Precision Television Systems with Interframe Processing

Rogachev V. A.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, rogachevv50@gmail.com

Zakutaev A. A.<sup>a</sup>, Senior Researcher, Head of a Research Laboratory, zakutaev.a@mail.ru

Liferenko V. D.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, li.viktor2013@yandex.ru

Kolbanev M. O.<sup>b</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, mokolbanev@mail.ru

<sup>a</sup>A. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>b</sup>State University of Economics, 21, Sadovaya St., 191023, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Television visualization systems often compensate the non-uniformity of photodetector sensitivity. However, in spite of the apparent improvement, this compensation does not alter the threshold sensitivity. **Purpose:** The goal of this research is assessing the influence of non-uniform photodetector sensitivity over inter-frame processing in high-precision TV detection systems. **Results:** We

have obtained the distribution parameters for decisive statistics when the photodetector sensitivity is non-uniform. The compensation of this non-uniformity redistributes its influence and does not provide its complete elimination. **Practical relevance:** The obtained results allow you to assess the degree of influence of photodetector sensitivity non-uniformity for the main operation modes of a high-precision TV detection system. In the background limitation mode, when the background noise is low, the distribution parameter of the decisive statistics does not depend on the non-uniformity.

**Keywords** — Interframe Processing, Signal Detection, Photodetector Operation Modes, Photodetector Sensitivity Non-Uniformity, Photodetector Sensitivity Non-Uniformity Compensation.

### References

1. *Solid State Imaging*. Ed. by P. Jespers, F. Van de Wiele, M. White. Noordhoff-Leyden, 1976. 752 p.
2. State Standard 28953-91. Methods of Parameters Measurement. Photosensitive Devices with Charge Transfer. Moscow, Standartov Publ., 2004. 31 p. (In Russian).
3. Brondz D. S., Haritonova E. N. Nonuniformity Correction of Matrix Photodetector with Least Squares Approximation of the Transfer Characteristics of the Matrix using T-order Polynom. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2008, no. 11, pp. 1–29 (In Russian).
4. Sergunov A. A. Methods of Nonuniformity Sensitivity Correction of Matrix Infrared Photodetectors. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2009, no. 8, pp. 38–42 (In Russian).
5. Scribner D. A., Krueer M. R., and Griedly C. J. Physical Limitations to Nonuniformity Correction in Focal Plane Arrays. *Proc. SPIE*, 1987, vol. 865, pp. 185–201.
6. Wang R., Chen P., and Tsien P. An Improved Nonuniformity Correction Algorithm for Infrared Focal Plane Arrays which is Easy to Implement. *Infrared Physics and Technology*, 1998, vol. 39, pp. 15–21.
7. Emerson G. P., Little S. J. Flat-Fielding for CCDs in AAVSO Observations. *AAVSO*, 1999, vol. 27, pp. 49–54.
8. Rogachev V. A., Fantikov O. I. The Influence of Nonuniformity Sensitivity of the Photodetector on the Threshold Sensitivity of TV Systems. *Tekhnika sredstv svyazi. Ser. Tekhnika teledeniia* [Communications Equipment Technology. Ser. Television Technology], 1987, no. 2, pp. 48–55 (In Russian).
9. Kolbanev M. O., Rogachev V. A. Useful Signal Detection Optimization at the Multimode Information Systems. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Radiolokatsionnaia tekhnika* [Questions of Radio-electronics. Ser. Radio Locating Technique], 2010, iss. 1, pp. 92–101 (In Russian).
10. Kolbanev M. O., Rogachev V. A. An Analysis of the Detection Problem in Infrared Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2010, no. 5, pp. 51–54 (In Russian).
11. Kolbanev M. O., Rogachev V. A., Zakutaev A. A. Nonuniformity Sensitivity of the Photodetector and his Compensation at the Infrared Detection Systems. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Tekhnika teledeniia* [Questions of Radio-electronics. Ser. Television Technology], 2015, iss. 5, pp. 79–88 (In Russian).
12. Tsitsulin A. K., Adamov D. U., Mantsvetov A. A., Zubakin I. A. *Tverdotel'nye telekamery: Nakoplenie kachestva informatsii* [Solid State TV Cameras: the Accumulation of Information]. Saint-Petersburg, LETI Publ., 2014, 272 p. (In Russian).
13. Rogachev V. A. Signal Processing Features in Precision Television Systems. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Tekhnika teledeniia* [Questions of Radio-electronics. Ser. Television Technology], 2011, iss. 2, pp. 18–26 (In Russian).
14. Lehmann E. L., Romano J. P. *Testing Statistical Hypotheses*. Springer, 2005. 800 p.