

УДК 004.932.2

## ОЦЕНИВАНИЕ СКОРОСТИ СКАНИРОВАНИЯ СЛУЧАЙНОЙ ТЕКСТУРЫ МНОГОРЯДНЫМ ФОТОПРИЁМНИКОМ\*

Г. И. Громилин<sup>1</sup>, В. П. Косых<sup>1,2</sup>, Б. Н. Дрожников<sup>3</sup>,  
К. В. Козлов<sup>3</sup>, В. Н. Васильев<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет,  
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

<sup>3</sup>АО «Научно-производственное объединение "Орион"»,  
111538, Москва, ул. Косинская, 9

<sup>4</sup>АО «НИИ оптико-электронных приборов»,  
188540, г. Сосновы Бор Ленинградской обл., ул. Ленинградская, 29  
E-mail: kosych@iae.nsk.su

Сканирующие приборы, использующие набор взаимно смещённых фотоприёмных линеек для повышения частоты отсчётов в направлении, ортогональном направлению сканирования, требуют высокой степени стабилизации скорости сканирования для обеспечения высокого качества формируемого изображения. Предлагается новый способ оценивания скорости сканирования, основанный на анализе смещений изображений произвольной случайной текстуры, создаваемых линейками в процессе сканирования. Посредством имитационного моделирования исследуется зависимость точности различных методов оценивания скорости от статистических характеристик текстуры. Показано, что даже при достаточно высоком уровне случайного шума ( $C/\Pi = 10$ ) на изображениях с текстурой, обеспечивающей выполнение критерия Найквиста для каждой линейки, ошибки оценивания скорости сканирования не превышают 0,1 % от номинального значения.

*Ключевые слова:* сканирующее устройство, матричный фотоприёмник, режим ВЗН, скорость сканирования, случайная текстура, спектр мощности.

DOI: 10.15372/AUT20180306

**Введение.** В отличие от приборов «смотрящего» типа в сканирующем приборе, использующем многорядные фотоприёмные линейки [1, 2] с режимом временной задержки и накопления (ВЗН), взаимно смещённые в направлении, ортогональном направлению сканирования, можно получать отсчёты с шагом, меньшим шага размещения фоточувствительных элементов (ФЧЭ) линейки. Такая топология приёмника позволяет ослабить хорошо известный эффект наложения спектров [3, гл. 4] и обеспечить более точное воспроизведение мелких деталей регистрируемой сцены, что, в частности, значительно улучшает подавление фона при межкадровой обработке изображений [4]. Но для этого, как показано в [5, 6], необходимо поддерживать номинальную скорость сканирования с высокой точностью.

В [7] скорость сканирования с высокой точностью оценивается по изображению тестового объекта (оптической щели), что вполне применимо в процессе настройки прибора, но не представляется возможным в режиме рабочей эксплуатации. В связи с этим возникает потребность в создании метода определения скорости по текущему изображению непосредственно в процессе сканирования.

**Топология фотоприёмника.** Кратко напомним, как выглядит размещение ФЧЭ в приёмнике [2]. На рис. 1 показано взаимное положение составляющих фотоприёмник

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства научных организаций (государственная регистрация № АААА-А17-117052410034-6).

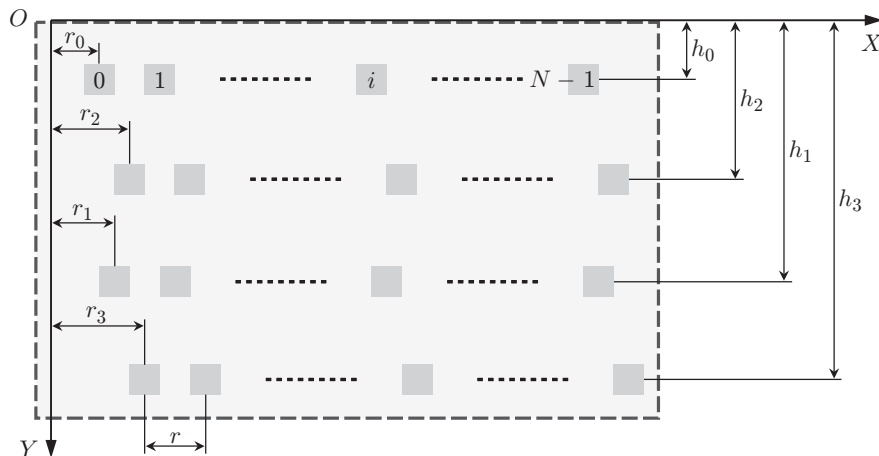


Рис. 1. Размещение фоточувствительных элементов в многорядном фотоприёмнике

линеек. Каждая линейка, по существу, является матрицей, поскольку содержит  $N$  вертикальных столбцов фоточувствительных элементов (на рисунке не показаны), которые работают в режиме ВЗН. Ось  $OY$  собственной прямоугольной системы координат фотоприёмника ориентирована вдоль ВЗН-каналов и при правильной юстировке совпадает с направлением сканирования. Частота отсчётов вдоль оси  $OX$  обеспечивается необходимым количеством ( $K$ ) соответствующим образом сдвинутых линеек (в данном случае  $K = 4$ ,  $k = \overline{0, K-1}$ ). На рисунке сдвиг  $k$ -й линейки в этом направлении обозначен как  $r_k$ , шаг между каналами — как  $r$ , причём  $r_{k-1} - r_k = r/K$ . Положение линеек в направлении  $OY$  задано сдвигами  $h_k$ . Из-за наличия в линейках ВЗН-каналов расстояние между линейками в направлении сканирования намного превышает горизонтальный шаг размещения ФЧЭ. Как показано в [5, 6], именно значительная разница между  $h_k$ , обусловленная наличием ВЗН-каналов, приводит к необходимости соблюдения более жёстких, чем для близко расположенных линеек, требований к скорости сканирования.

**Формирование изображения.** При сканировании с номинальной скоростью дискретные изображения-фрагменты  $I_k$ , формируемые каждой линейкой, объединяются в общее дискретное изображение

$$I(n, m) = I_k(\lfloor n/K \rfloor, m - m_k), \quad k = \text{mod}_K(n), \quad n = \overline{0, KN-1}, \quad m = \overline{0, M-1}, \quad (1)$$

где  $m_k = (h_k - h_0)/v_0\tau$  — компенсация взаимных сдвигов вдоль направления сканирования;  $\lfloor \cdot \rfloor$  — целая часть выражения  $(\cdot)$ ;  $\tau$  — время считывания строки изображения;  $v_0$  — номинальная скорость сканирования; первая координата изображений — номер столбца, вторая — номер строки;  $M$  — общее количество строк изображения. Отклонение скорости сканирования от номинала приводит к дополнительным взаимным сдвигам фрагментов вдоль направления сканирования. Относительно фрагмента, формируемого 0-й линейкой (назовём её опорной, а фрагмент соответственно опорным), сдвиги остальных фрагментов имеют вид

$$\delta m_k = \frac{h_k - h_0}{\tau} \frac{u}{v} \approx \frac{h_k - h_0}{\tau} \frac{u}{v_0} = m_k u.$$

Здесь  $v = v_0(1 + u)$  — реальная скорость сканирования, а  $u$  — относительное отклонение скорости от номинального значения  $v_0$ . Приближение справедливо при  $u \ll 1$ , что обычно соблюдается. Следовательно, оценив сдвиги вдоль направления сканирования фрагментов изображения, построенных отдельными линейками, можно получить оценку отклонения

скорости сканирования от номинала

$$\hat{u} = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^{K-1} \frac{\widehat{\delta m}_k}{m_k}.$$

**Оценивание взаимных сдвигов фрагментов изображения.** Поскольку интерес представляет обнаружение малых отклонений скорости сканирования от номинала, сдвиги  $\widehat{\delta m}_k$  необходимо оценивать с ошибками, значительно меньшими шага дискретизации. В [8] показано, что статистически несмещённые оценки взаимного сдвига пары изображений получаются решением нелинейной системы уравнений, требующим большого объёма вычислений. В данной работе используются три более простых способа оценивания: по взаимной корреляционной функции фрагментов (Cor), по сумме модулей их разности (Mod) и через фазы компонент их взаимного спектра мощности (PSP — Power Spectrum Phases).

1. *Оценивание сдвига по взаимной корреляционной функции.* Оценка задаётся положением максимума взаимной корреляционной функции фрагментов, сформированных опорной и  $k$ -й линейками. Целочисленная часть сдвига определяется как

$$\hat{s}_k, \hat{t}_k = \underbrace{\operatorname{argmax}}_{s, t} \left( R_k(s, t) = \sum_{l, m} \check{I}_0(l, m) \check{I}_k(l + s, m - m_k + t) \right),$$

$$k = \overline{1, K-1}, \quad l = \overline{S, N-S}, \quad m = \overline{T, M-T},$$

где  $\check{I}_k(l, m)$ ,  $k = \overline{0, K-1}$ , — центрированное относительно среднего значения изображение  $I_k(l, m)$ ,  $s = \overline{-S, S}$ ,  $t = \overline{-T, T}$ , а дробная — положением  $(\hat{x}_k, \hat{y}_k)$  максимума аппроксимации  $R_k(s, t)$  двумерной параболой в окрестности  $\hat{s}_k, \hat{t}_k$ :

$$(\hat{x}_k, \hat{y}_k) = \underbrace{\operatorname{argmax}}_{x, y} \{ \hat{a}_0 x^2 + \hat{a}_1 y^2 + \hat{a}_2 xy + \hat{a}_3 x + \hat{a}_4 y + \hat{a}_5 \}.$$

Здесь параметры параболы  $\hat{\mathbf{a}} = (\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \hat{a}_4, \hat{a}_5)^T$  оцениваются как

$$\hat{\mathbf{a}} = \underbrace{\operatorname{argmin}}_{\mathbf{a}} \left\{ \sum_{s, t} [R_k(\hat{s} - s, \hat{s} - t) - (a_0 s^2 + a_1 t^2 + a_2 st + a_3 s + a_4 t + a_5)]^2 \right\},$$

$$s = \overline{-1, 1}, \quad t = \overline{-1, 1}, \quad \mathbf{a} = (a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)^T.$$

Полные оценки сдвига задаются выражениями

$$\widehat{\delta l}_k = \hat{s}_k + \hat{x}_k, \quad \widehat{\delta m}_k = \hat{t}_k + \hat{y}_k.$$

2. *Оценивание сдвига минимизацией суммы модулей разности.* Здесь в качестве функционала, экстремум которого определяет взаимный сдвиг фрагментов, используется сумма модулей их разности. Целочисленная часть сдвига находится как

$$\hat{s}_k, \hat{t}_k = \underbrace{\operatorname{argmin}}_{s, t} \left( Q_k(s, t) = \sum_{l, m} |\check{I}_0(l, m) - \check{I}_k(l + s, m - m_k + t)| \right),$$

$$l = \overline{S, N-S}, \quad m = \overline{T, M-T},$$

а дробная — аналогично первому случаю параболической аппроксимацией функционала  $Q_k(s, t)$  в окрестности  $(\hat{s}_k, \hat{t}_k)$ .

3. *Оценивание сдвига через фазы взаимного спектра мощности.* Пусть  $F_k(p, q)$ ,  $k = \overline{0, K-1}$ , — дискретный фурье-спектр изображения  $\check{I}_k(l, m)$ ;  $W_k(p, q) = F_0(p, q) \times F_k^*(p, q)$  — комплексный взаимный спектр мощности опорного и  $k$ -го фрагментов; символом «\*» обозначено комплексное сопряжение. При условии, что разделение полного изображения на фрагменты, формируемые каждой линейкой, не приводит к нарушению критерия Найквиста, фурье-спектры опорного и  $k$ -го фрагментов при отсутствии шума связаны соотношением

$$F_k(p, q) = F_0(p, q) \exp \left[ 2\pi i \left( \frac{p\delta l_k}{N} + \frac{q\delta m_k}{M} \right) \right].$$

Сдвиги  $\delta l_k$  и  $\delta m_k$  выражаются через  $(p, q)$ -ю фазу взаимного спектра мощности как

$$\left( \frac{p\delta l_k}{N} + \frac{q\delta m_k}{M} \right) = \frac{1}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(W_k(p, q))}{\operatorname{Re}(W_k(p, q))}.$$

На основании последнего выражения можно построить переопределённую систему линейных уравнений относительно сдвигов  $\delta l_k, \delta m_k$  и применить для её решения метод наименьших квадратов. Следует учитывать, что в реальном изображении, формируемом линейкой, часть спектральных компонент  $W_k(p, q)$  содержит в основном шумовую компоненту, и поэтому вес уравнений с их участием следует ослабить тем или иным способом. Например, уравнениям можно придавать вес, пропорциональный  $|W_k(p, q)|$ . Кроме того, при значениях  $\delta m_k > 1$  в высокочастотных компонентах фазы возникают разрывы с размахом  $2\pi$ , которые необходимо корректно «сшивать» при построении системы уравнений.

**Численный эксперимент по оцениванию отклонения скорости сканирования от номинала.** Как показано в [5], в сканере на базе подобного фотоприёмника при правильно согласованных размерах функции рассеяния точки объектива и ФЧЭ отклонение скорости сканирования в 0,1 % не вызывает заметных искажений в формируемом изображении. Задача эксперимента состоит в проверке возможности получения изложенными выше способами оценок отклонения с ошибками, не превышающими этой величины, без специально подготовленных тестовых изображений. Входными изображениями, проектируемыми оптической системой сканера в плоскость фотоприёмника, должны быть изображения случайных текстур, подобных типичным фонам, для работы с которыми он создан. Эксперимент выполнен с применением модели [5, 6] сканирующего устройства на основе многорядного фотоприёмника с режимом ВЗН. Модель устройства формирует выходные изображения, внося искажения, обусловленные частотной характеристикой оптико-электронного тракта, отклонением скорости сканирования от номинального значения, шумом фотоприёмника. Построенное сканирующим устройством изображение разбивается с учётом (1) на четыре фрагмента, каждый из которых сформирован соответствующей линейкой (точнее, субматрицей, обеспечивающей режим ВЗН). Фрагменты совместно анализируются описанными выше способами в целях выявления взаимных сдвигов и оценивания отклонения скорости сканирования от номинального значения.

На рис. 2 приведены шесть изображений, использованных в эксперименте и отличающихся видом амплитудных распределений, ориентацией и характерными размерами текстуры. Изображения на рис. 2, *a, b* — фрагменты реальных снимков, полученных космическим аппаратом «Электро-Л» в видимом и ИК-диапазонах [9]. Остальные изображения содержат синтезированные текстуры: рис. 2, *c* — анизотропную пространственно-стационарную с малым интервалом корреляции в одном направлении, рис. 2, *d* — пространственно-нестационарную с унимодальным распределением амплитуд, рис. 2, *e, f* — двухкомпонентные, каждая компонента пространственно-стационарная со своими статис-

тическими первыми и вторыми моментами, существенно различными интервалами корреляции и резкими яркостными переходами. На выходе сканирующего устройства каждое из них преобразуется в изображение размером  $512 \times 512$  пикселей. В трёх сериях экспериментов шум, вносимый в выходные изображения, удовлетворяет отношению  $\sigma_t/\sigma_n = 20, 10$  и  $5$ , где  $\sigma_t$  и  $\sigma_n$  — среднеквадратичные значения амплитуд текстурной и шумовой составляющих соответственно. Таким набором текстур и отношений сигнал/шум представляется достаточно широкий спектр реальных условий эксплуатации прибора.

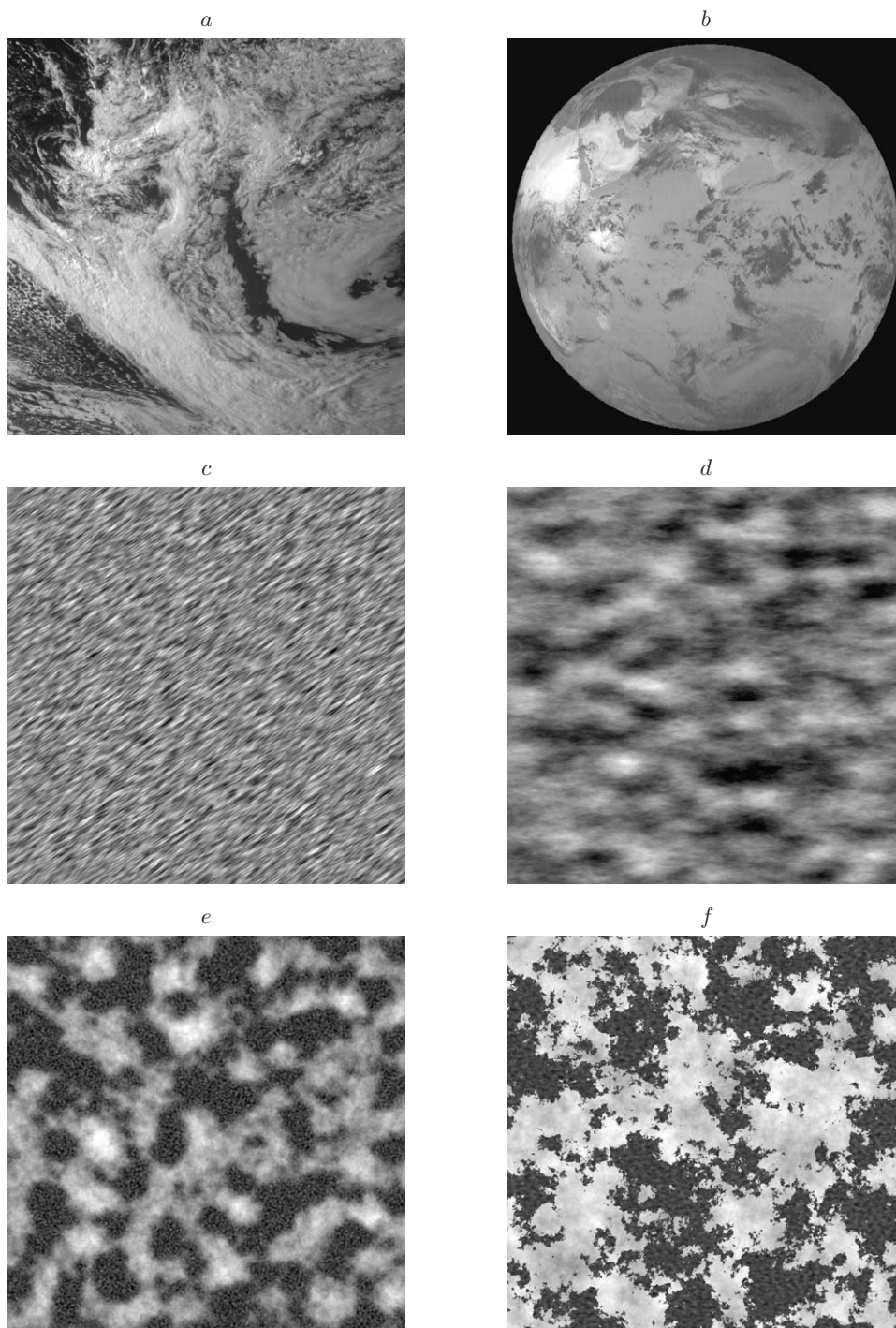


Рис. 2. Изображения случайных текстур на входе сканирующего устройства

Таблица 1

Способы оценивания	a		b		c		d		e		f	
	$\sigma_u$	$\Delta u$	$\sigma_u$	$\Delta u$	$\sigma_u$	$\Delta u$	$\sigma_u$	$\Delta u$	$\sigma_u$	$\Delta u$	$\sigma_u$	$\Delta u$
Cor	0,01	<b>0,40</b>	0,01	<b>0,12</b>	0,08	<b>1,85</b>	0,01	0,04	0,01	0,11	0,01	<b>0,15</b>
Mod	0,01	<b>0,46</b>	0,02	<b>0,15</b>	0,01	<b>1,44</b>	0,01	0,05	0,02	0,13	0,01	<b>0,14</b>
PSP	0,04	0,10	0,03	0,03	0,02	0,05	0,03	0,06	0,04	0,16	0,04	0,09

Таблица 2

Способы оценивания	a		b		c		d		e		f	
	$\sigma_u$	$\Delta u$	$\sigma_u$	$\Delta u$	$\sigma_u$	$\Delta u$	$\sigma_u$	$\Delta u$	$\sigma_u$	$\Delta u$	$\sigma_u$	$\Delta u$
Cor	0,01	<b>0,23</b>	<0,01	0,01	0,07	<b>1,58</b>	0,01	0,01	0,01	0,03	<0,01	0,04
Mod	0,17	0,05	0,02	0,02	0,02	<b>0,62</b>	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,03
PSP	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,04	0,03	0,01	0,04	0,10	0,03	0,06

В таблицах приведены характеристики качества оценивания отклонения скорости сканирования, полученные для каждого изображения (верхняя строка таблиц) каждым из алгоритмов (левая колонка) при двух заданных моделью сканера значениях относительного отклонения  $u$ : 3,3 % (табл. 1) и 0,2 % (табл. 2). Здесь  $\Delta u = (u - \hat{u}) \cdot 100$  % — величина, характеризующая смещение оценки отклонения скорости;  $\sigma_u = \left( \frac{1}{R-1} \sum_{r=1}^R (\hat{u}_r - \hat{u})^2 \right) \cdot 100$  % —

среднеквадратичная ошибка оценивания;  $\hat{u} = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \hat{u}_r$  — среднее значение оценки. Оценки вычислены для каждой текстуры по серии из  $R = 100$  изображений, отличающихся реализациями шума, при отношении  $\sigma_t/\sigma_n = 10$ . Жирным шрифтом выделены оценки, смещение  $\Delta u$  которых превышает 0,5 % от номинального значения, жирным курсивом — со смещением  $0,1$  % <  $\Delta u$  < 0,5 %.

Для отношения  $\sigma_t/\sigma_n = 5$  и 20 характер поведения ошибок аналогичен приведённым в таблицах. Отметим только, что если случайная составляющая ошибок  $\sigma_u$  изменяется пропорционально  $\sigma_n$ , то систематическая  $\Delta u$  остаётся практически неизменной.

**Заключение.** Из результатов эксперимента следует, во-первых, что даже при достаточно высоком уровне шума (отношение С/Ш = 10) отклонение скорости сканирования от номинального значения можно оценить по изображениям случайных текстур с высокой точностью (в таблицах СКО оценивания  $\sigma_u$  в большинстве случаев не превышает 0,1 %). При больших отклонениях смещённость оценок выше, чем при малых (сравните колонки  $\Delta u$  в табл. 1 и 2), поэтому в таких случаях коррекцию скорости сканирования целесообразно выполнять в два этапа: на первом оценивается и корректируется большое отклонение и, если оно велико (предположим, более 1 %), оценка и коррекция выполняются повторно.

Во-вторых, на текстурах, содержащих существенную долю высокочастотных составляющих (см. рис. 2, c), оценки сильно смещены даже при малых отклонениях скорости, что, по-видимому, объясняется нарушением критерия Найквиста при разделении изображения на фрагменты, формируемые отдельными линейками.

В-третьих, из рассмотренных способов оценивания взаимного сдвига изображений особый интерес представляет оценивание через фазы взаимного спектра мощности (строка PSP в табл. 1, 2). При несколько большей случайной ошибке оценивания (колонки  $\sigma_u$ ) этот способ даёт оценки с меньшей смещённостью даже на высокочастотной текстуре (колонка  $\Delta u$  для текстуры на рис. 2, c). Поэтому несмотря на более сложный алгоритм (и соответ-

ственно реализацию) с учётом разнообразия реально встречающихся текстур применение этого способа предпочтительно.

Наконец, важно отметить, что рассмотренная в данной работе методика не требует специальных тестовых объектов и может применяться для контроля скорости сканирования непосредственно в процессе рабочей эксплуатации прибора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бочков В. Д., Дрожников Б. Н., Кузнецов П. А. и др.** Особенности ФПУ с режимом ВЗН формата  $1024 \times 10$  на основе КРТ // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 58–61.
2. **Кузнецов П. А., Моцев И. С., Сало В. В., Коцанцев Н. Ф.** Фотоприёмные модули с режимом ВЗН для мониторинга земной поверхности в ИК-диапазоне // Успехи прикладной физики. 2014. 2, № 6. С. 635–638.
3. **Прэйтт У.** Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. Т. 1. 310 с.
4. **Иванов В. А., Киричук В. С., Синельщиков В. В.** Особенности выделения малоразмерных динамических объектов в последовательностях дискретных изображений с пространственно-нестационарным фоном // Сб. тр. Всерос. конф. «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов». Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2015. С. 84–89. URL: <http://conf.nsc.ru/files/conferences/SDM-2015/294652/SDM-2015%20Thesis.pdf> (дата обращения: 13.09.2017).
5. **Громилин Г. И., Иванов В. А., Косых В. П., Попов С. А.** Особенности процесса сканирования с использованием матричного фотоприёмника в режиме ВЗН // Вычислительные технологии. 2016. 21, № 1. С. 60–69.
6. **Громилин Г. И., Дрожников Б. Н., Козлов К. В. и др.** Моделирование процесса сканирования изображений с использованием матричных фотоприёмников // Тр. XXVI Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М.: ГИЦ РФ АО «Орион», 2016. С. 200–205.
7. **Громилин Г. И., Косых В. П., Козлов К. В., Васильев В. Н.** Оценивание параметров юстировки сканирующего устройства на основе многорядного фотоприёмника с режимом ВЗН // Автометрия. 2017. 53, № 6. С. 42–46.
8. **Иванов В. А., Киричук В. С., Косых В. П.** Оценивание субпиксельного сдвига дискретных изображений // Автометрия. 2007. 43, № 3. С. 15–30.
9. **Электро-Л.** Планета Земля за последние сутки. URL: <http://electro.ntsomz.ru/> (дата обращения: 13.09.2017).

*Поступила в редакцию 13 сентября 2017 г.*