

М. С. Ревунов

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КРОССКОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПУТЕМ ЭКВАЛИЗАЦИИ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ

M. S. Revunov

EQUALIZATION OF THE IMAGE TO IMPROVE CROSS-CORRELATION MEASUREMENT METHOD

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. На современных быстроходных бумагоделательных машинах остро стоит вопрос о необходимости измерения скорости напуска бумажной массы на сеточную часть. Применение контактных методов измерения и измерителей на базе лазеров ограничено рядом объективных причин, связанных с конструктивными особенностями машины. В связи с этим на первый план выходят оптические методы измерения скорости потока жидкости. Целью работы является повышение точности стандартного кросскорреляционного метода измерения скорости путем эквализации расчетной области. **Материалы и методы.** В работе использованы современные методы цифровой обработки изображений. **Результаты.** Обоснованы принципы совершенствования стандартного кросскорреляционного метода измерения скорости потока жидкости. **Выводы.** Исследования подтверждают применимость эквализации расчетных областей для совершенствования стандартного кросскорреляционного метода.

A b s t r a c t. Background. It is necessary to measure the speed of the paper pulp on paper machines. Optical measurement methods can be used to measure the paper flow rate. The aim of the work is to improve the accuracy of the cross-correlation method of speed measurement by equalizing the computational domain. **Materials and methods.** The article uses modern methods of digital image processing. **Results.** The principles of improving the standard cross-correlation method for measuring the velocity of fluid flows are substantiated. **Conclusions.** Studies confirm the applicability of these methods to improve the standard cross-correlation method.

К л ю ч е в ы е с л о в а: бумагоделательная машина, напорный ящик, кросскорреляционный алгоритм, расчетная область, эквализация.

К е у о р д s: paper machine, pressure device, cross-correlation algorithm, computational domain, equalization.

Введение

Для изучения потоков жидкости часто применяют методы трассерной визуализации. Суть методов трассерной визуализации заключается в том, что в жидкость добавляют частички-трассеры (или они уже имеются в исследуемом объекте) и наблюдают за их перемещением в потоках [1–3]. Движение частиц фиксируется с помощью современных фото- или видеокамер, а базовым алгоритмом обработки таких изображений принято считать кросскорреляционный алгоритм (ККА).

Стандартный ККА (рис. 1) состоит из следующих основных операций:

- кадрирование видео и формирование набора изображений потока жидкости;
- разбиение пары изображений на элементарные расчетные области равного размера;

- расчет кросскорреляционной функции и нахождение координат ее максимума с подпиксельной точностью;
- расчет скорости потока жидкости по данным перемещения максимума кросскорреляционной функции от кадра к кадру [4–6].

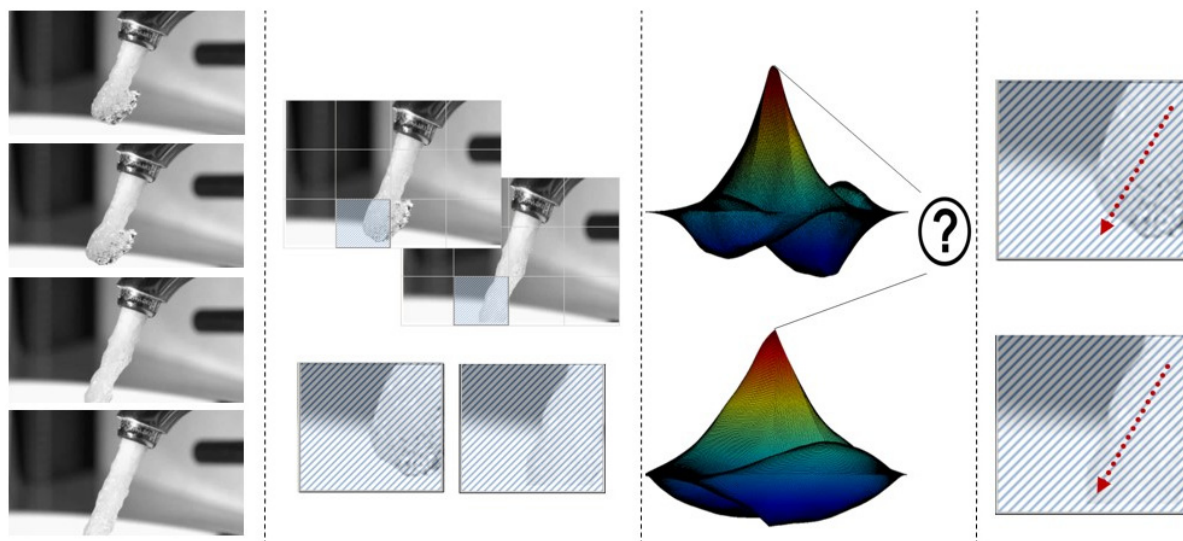


Рис. 1. Стандартный кросскорреляционный алгоритм

Постановка задачи

Актуальной проблемой для российских бумажных фабрик, не позволяющей отечественной продукции полноценно конкурировать с импортными товарами, является существенная дисперсия веса бумажного полотна. Стоит отметить, что на современных отечественных быстроходных бумагоделательных машинах (БДМ) отсутствуют какие-либо средства контроля и измерения скорости напуска бумажной массы из напорного устройства на сеточную часть машины. В то же время в работах [7–9] подтверждена экстремальная зависимость между скоростью сеточного стола v_c , скоростью напуска бумажной массы v_n и дисперсией веса бумаги. Однако изменение скорости постоянной части БДМ ведет к изменению технологических режимов и влияет на все элементы и подсистемы машины. Поэтому для минимизации неравномерности просвета необходимо постоянно измерять скорость напуска бумажной массы с помощью оптико-электронных приборов и изменять ее, регулируя напор в напускном устройстве [10, 11].

На рис. 2 и 3 приведены фотографии процесса напуска бумажной массы на сетку БДМ, а на рис. 4 – тренды скорости напуска бумажной массы на сетку, измеренной с помощью различных методов.



Рис. 2. Процесс напуска бумажной массы (вид сбоку)



Рис. 3. Процесс напуска бумажной массы (вид сверху)

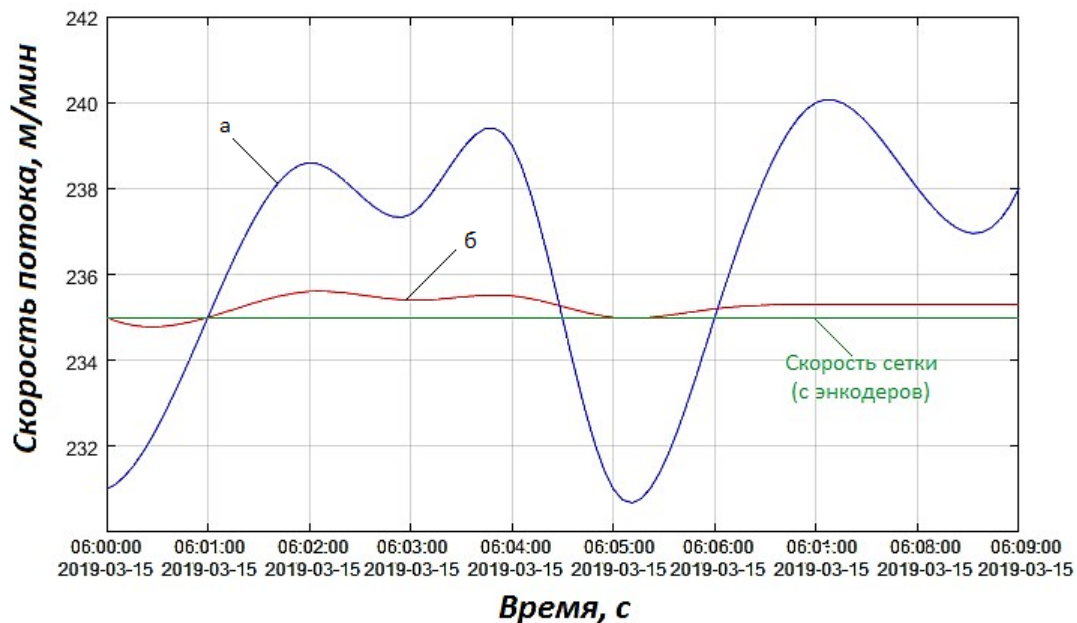


Рис. 4. Тренды скорости потока бумажной массы:

a – рассчитанной с помощью стандартного ККА; *б* – измеренной с помощью лазерного датчика

Стандартный кросскорреляционный алгоритм имеет ряд ограничений и не всегда применим для необработанных изображений. В связи с этим на первый план выходит задача повышения точности ККА измерения путем цифровой обработки исходных изображений, используемых для расчета скорости напуска бумажной массы на сеточный стол БДМ, поиска оптимального размера расчетной области и интервала корреляции, а также эквализации расчетной области.

Поиск «оптимального окна» и интервала корреляции

Быстродействие и точность алгоритма бесконтактного измерения скорости на базе кросскорреляционного метода достаточно сильно зависит от размера расчетной области. В теории [5, 6] размер расчетной области должен быть настолько большим, насколько это возможно технически. Однако на практике обработка слишком больших расчетных областей приводит к снижению быстродействия до недопустимых показателей. Выходом из сложившейся ситуации является минимизация размера расчетной области путем поэтапного равномерного усеживания кадра со всех сторон до размеров, при которых достигается требуемая точность измерения (рис. 5).

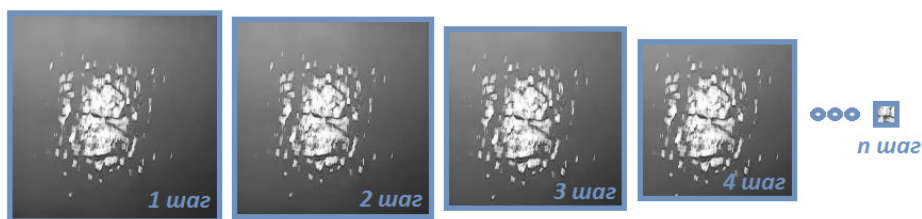


Рис. 5. Исходный и усеченные кадры на i -м шаге

Для поиска «оптимального окна» необходимо проанализировать форму кросскорреляционной функции (идеальный случай – четко выраженный одиночный пик), полученную при сравнении исходного и усеченного i -го кадра (рис. 6).

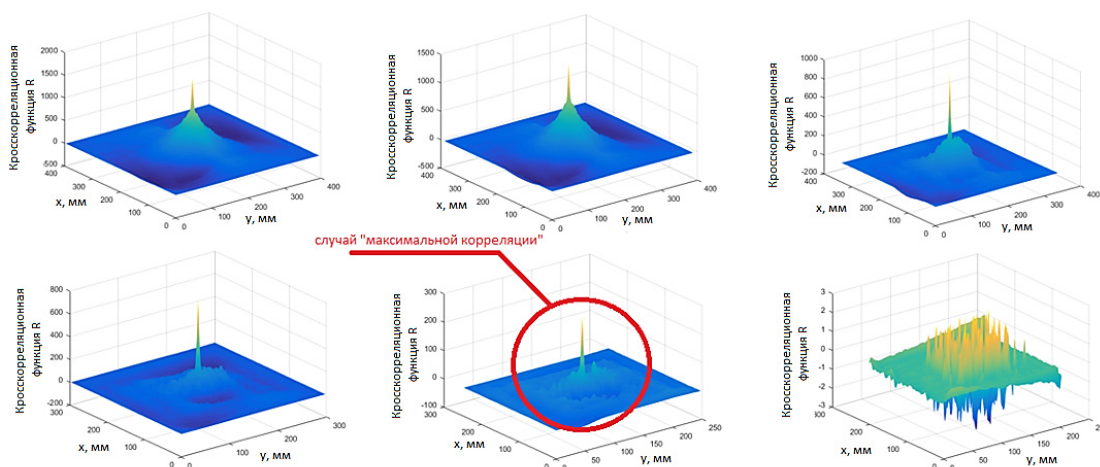


Рис. 6. Примеры кросскорреляционных функций для кадров с разной степенью усечения

Данные об оптимальном размере расчетной области кадра дают нам возможность полноценно определить интервал корреляции. Интервал корреляции также будет оцениваться по форме кросскорреляционной функции (ККФ), полученной, однако, при сравнении первого кадра (или его области, если для получения «оптимального окна» необходимо усечение исходного кадра) с последующими (рис. 7). Интервал корреляции является очень важным параметром, так как позволяет сформулировать минимальные требования к видеоаппаратуре (например, разрешение и частота кадров в секунду) для съемки потока бумажной массы.

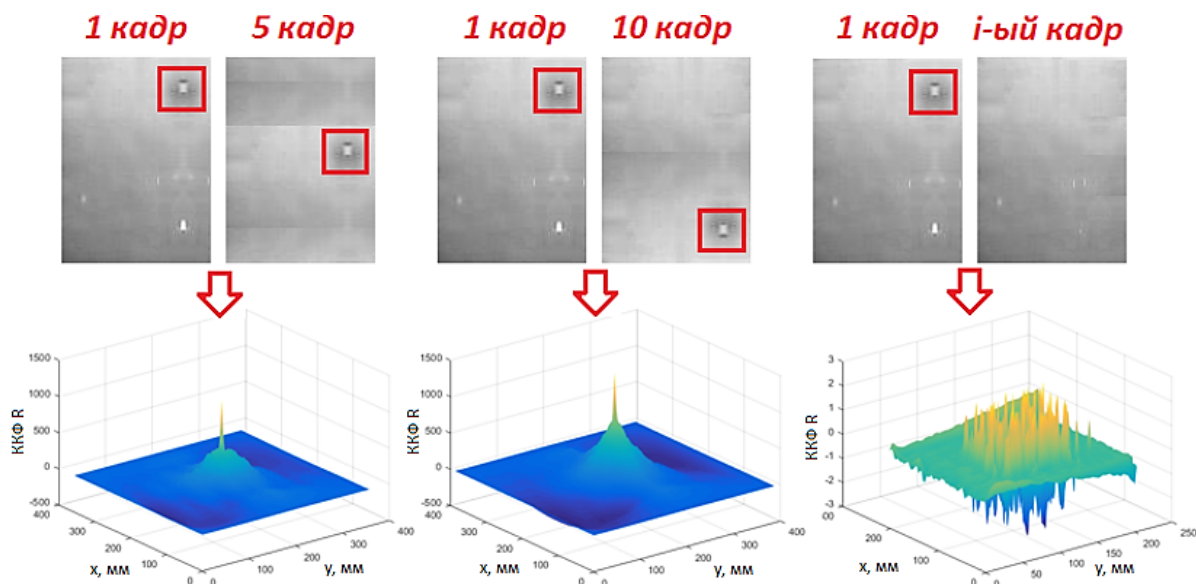


Рис. 7. Примеры ККФ для оценки интервала корреляции

Эквализация расчетной области кадра

Довольно часто необработанным изображениям свойственны яркостные искажения. Причины могут быть самые разные, но в большинстве случаев это объясняется несовершенством видеоаппаратуры. В результате на таких изображениях детали различаются плохо или вообще не различаются (рис. 8). Таким образом, для корректной работы алгоритма бесконтактного измерения скорости напуска бумажной массы на сетку БДМ на основе методов кросскорреляции необходима дополнительная цифровая обработка изображений – эквализация [12].

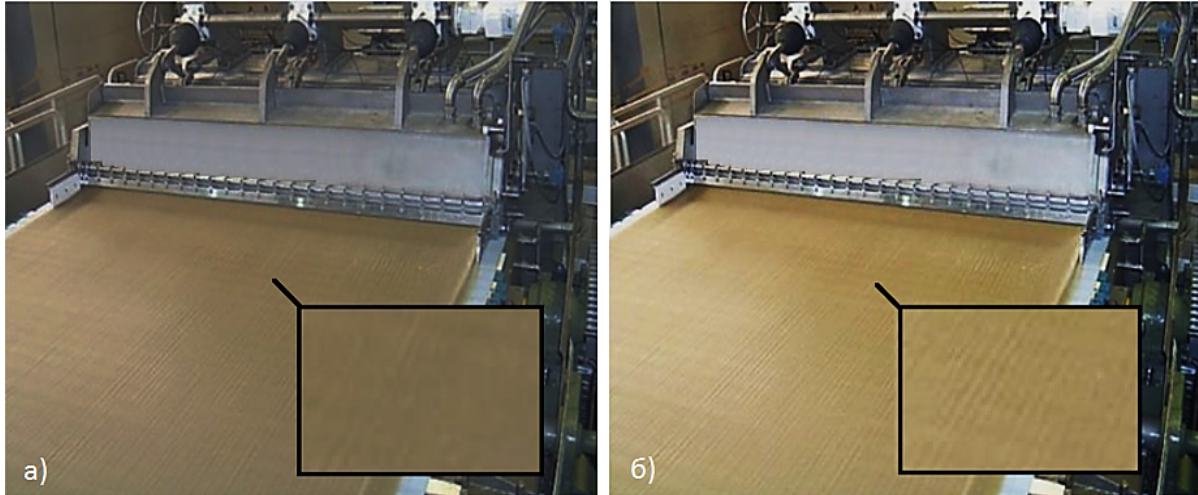


Рис. 8. Примеры фотографий (видеокадров) сеточного стола, сделанных при одинаковых условиях на разную видеоаппаратуру: *а* – Nikon Coolpix P500; *б* – Nikon D3100

Для повышения контрастности изображений (рис. 9) были использованы методы выравнивания гистограмм значений яркостей элементов [13, 14]. Результирующие графики перемещения кросскорреляционного максимума представлены на рис. 10. Стоит отметить, что, если пренебречь обработкой изображения, – это будет приводить к вырожденным всплескам расчетной скорости, что (в нашем случае) не соответствует действительности.

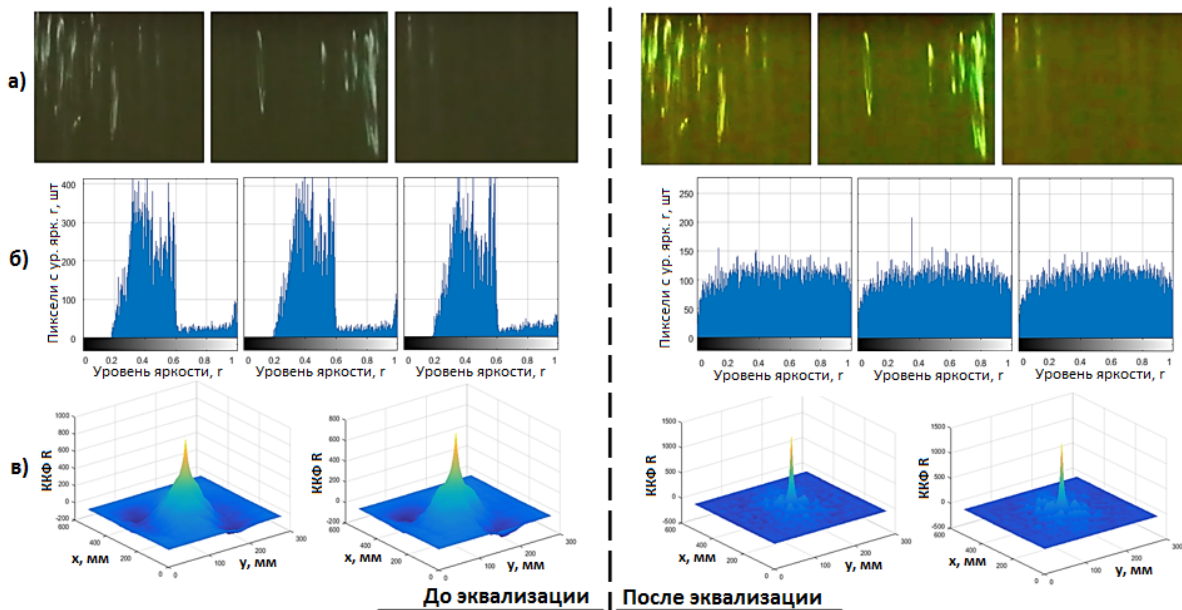


Рис. 9. Примеры: *а* – изображений; *б* – гистограмм значений яркостей; *в* – кросскорреляционных максимумов до и после эквализации

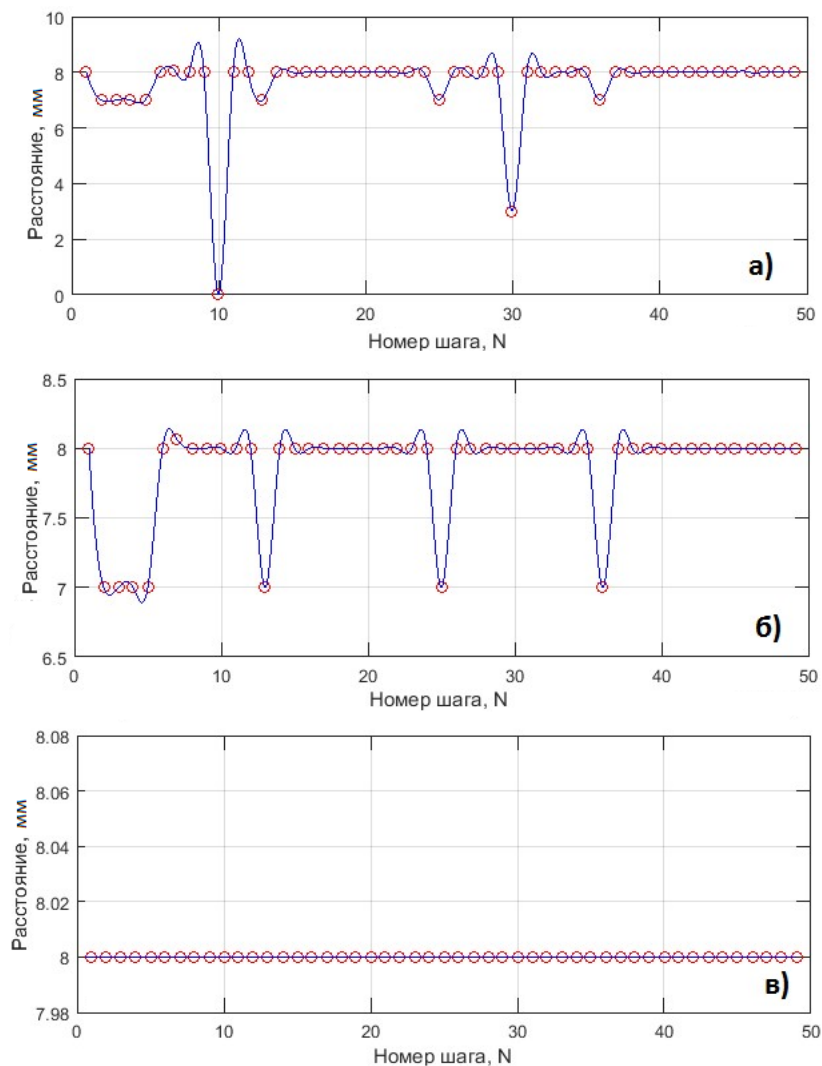


Рис. 10. Графики перемещения кросскорреляционного максимума:
a – до эквализации и до фильтрации; *б* – до эквализации и после фильтрации;
в – после эквализации и фильтрации (медианный фильтр)

Таким образом, в результате эквализации гистограммы исходных кадров существенно расширяется динамический диапазон изображения, что позволяет отобразить ранее не замеченные детали. Это является критически важным фактором для ККА. Особенно сильно этот эффект проявляется на темных изображениях (рис. 9,*a*) или изображениях с недостаточной освещенностью (рис. 8,*a*). Кроме того, в отличие от большинства фильтров и градационных преобразований, требующих настройки параметров (апертуры и констант градационных преобразований), эквализация гистограммы может выполняться в полностью автоматическом режиме [13].

Заключение

Измерительное устройство на базе кросскорреляционного алгоритма в совокупности с качественной современной видеоаппаратурой является универсальным способом бесконтактного измерения скорости потока жидкости. В отличие от лазерных доплеровских устройств измеритель на базе кросскорреляционного алгоритма не зависит от номинальных расстояний от оптики датчика до поверхности объекта наблюдения, что существенно облегчает его интеграцию в действующие АСУТП (например, позволяет вынести устройство измерения из агрессивной среды, в которой может находиться объект исследования).

Безусловно, по сравнению с лазерными датчиками скорости измерители на базе стандартного кросскорреляционного алгоритма обладают более низкой точностью и более скром-

ным диапазоном измеряемых скоростей. Однако грамотное применение методов цифровой обработки исходных изображений, способов поиска оптимального размера расчетной области и ее эквализация позволяют приблизиться кросскорреляционным измерителям скорости к лазерным по следующим основным показателям:

- погрешность измерения 0,05 %;
- диапазон измерений 0,02 – 30 м/с;
- расстояние до объекта 0,1 – 10 м.

Таким образом, исследования подтверждают применимость методов эквализации расчетных областей для совершенствования стандартного кросскорреляционного алгоритма.

Библиографический список

1. *Алексеевко, С. В.* Применение метода цифровой трассерной визуализации для анализа турбулентных потоков с периодической составляющей / С. В. Алексеевко, А. В. Бильский, Д. М. Маркович. – Москва : Приборы и техника эксперимента, 2004.
2. *Франсон, М. А.* Оптика спеклов / М. А. Франсон. – Москва : Мир, 1990.
3. *Ринкевичюс, Б. С.* Лазерная диагностика потоков / Б. С. Ринкевичюс. – Москва : Знание, 1996.
4. *Прэтт, У. Н.* Цифровая обработка изображений / У. Н. Прэтт. – Москва : Мир, 2000.
5. *Ахметбеков, Е. К.* Корреляционная коррекция в методе слежения за частицами в потоках / Е. К. Ахметбеков, Д. М. Маркович, М. П. Токарев. – Москва : Вычислительные технологии, 2010.
6. *Ревунов, М. С.* Минимизация дисперсии веса бумажного полотна с использованием кросскорреляционного метода / М. С. Ревунов, А. Д. Семенов, С. В. Волков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015.
7. *Иванов С. Н.* Технология бумаги / С. Н. Иванов. – Москва : Лесная промышленность, 1985.
8. *Кугушев, И. Д.* Теория процессов отлива и обезвоживания бумажной массы / И. Д. Кугушев. – Москва : Мир, 2007.
9. *Никулин, С. В.* Экстремальное управление инерционным объектом с запаздыванием в условиях сильных помех / О. В. Авдеева, Д. В. Артамонов, С. В. Никулин, А. Д. Семенов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 3. – С. 54–64.
10. *Фляте, Д. М.* Технология бумаги / Д. М. Фляте. – Москва : Лесная промышленность, 1988.
11. *Ревунов, М. С.* Совершенствование систем стабилизации параметров потока бумажной массы с использованием кросскорреляционного алгоритма / М. С. Ревунов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2018.
12. *Хрящев, Д. А.* Повышение качества изображений, полученных в условиях недостаточной освещенности / Д. А. Хрящев. – Ростов-на-Дону : Северо-Кавказский научный центр высшей школы ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет», 2013.
13. *Цифровая обработка изображений в информационных системах / И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых, Г. И. Перетягин, А. А. Спектор.* – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2000.
14. *Федотов, А. А.* Методы компьютерной обработки биомедицинских изображений в среде MATLAB : учеб. пособие / А. А. Федотов, С. А. Акулов, А. С. Акулова. – Самара : Изд-во СГАУ, 2015.

References

1. *Alekseenko S. V., Bil'skiy A. V., Markovich D. M.* *Primenenie metoda tsifrovoy trasserной vizualizatsii dlya analiza turbulentnykh potokov s periodicheskoy sostavlyayushchey* [Application of the digital tracer imaging method for the analysis of turbulent flows with periodic component]. Moscow: Pribory i tekhnika eksperimenta, 2004. [In Russian]
2. *Franson M. A.* *Optika speklov* [Speckle optics]. Moscow: Mir, 1990. [In Russian]
3. *Rinkevichyus B. S.* *Lazernaya diagnostika potokov* [Laser flow diagnostics]. Moscow: Znanie, 1996. [In Russian]
4. *Prett U. N.* *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital image processing]. Moscow: Mir, 2000. [In Russian]
5. *Akhmetbekov E. K., Markovich D. M., Tokarev M. P.* *Korrelyatsionnaya korrektsiya v metode slezheniya za chastitsami v potokakh* [Correlation correction in the method of tracking particles in the flow]. Moscow: Vychislitel'nye tekhnologii, 2010. [In Russian]

6. Revunov M. S., Semenov A. D., Volkov S. V. *Minimizatsiya dispersii vesa bumazhnogo polotna s ispol'zovaniem krosskorrelyatsionnogo metoda* [Minimization of the variance of the weight of the paper using the cross-correlation method]. Penza: Izd-vo PGU, 2015. [In Russian]
7. Ivanov S. N. *Tekhnologiya bumagi* [Paper technology]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1985. [In Russian]
8. Kugushev I. D. *Teoriya protsessov otлива i obezvozhivaniya bumazhnoy massy* [Process theory of the ebb and dewatering of paper pulp]. Moscow: Mir, 2007. [In Russian]
9. Nikulin S. V., Avdeeva O. V., Artamonov D. V., Semenov A. D. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2014, no. 3, pp. 54–64. [In Russian]
10. Flyate D. M. *Tekhnologiya bumagi* [Paper technology]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1988. [In Russian]
11. Revunov M. S. *Sovershenstvovanie sistem stabilizatsii parametrov potoka bumazhnoy massy s ispol'zovaniem krosskorrelyatsionnogo algoritma* [Improvement of systems of stabilization of parameters of the flow of paper pulp using a cross-correlation algorithm]. Penza: Izd-vo PGU, 2018. [In Russian]
12. Khryashchev D. A. *Povyshenie kachestva izobrazheniy, poluchennykh v usloviyakh nedostatochnoy osveshchennosti* [Improving the quality of images obtained in low-light conditions]. Rostov-on-Don: Severo-Kavkazskiy nauchnyy tsentr vysshey shkoly FGAOU VPO «Yuzhnyy federal'nyy universitet», 2013. [In Russian]
13. Gruzman I. S., Kirichuk V. S., Kosykh V. P., Peretyagin G. I., Spektor A. A. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v informatsionnykh sistemakh* [Digital image processing in information systems]. Novosibirsk: Novosibirskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2000. [In Russian]
14. Fedotov A. A., Akulov S. A., Akulova A. S. *Metody komp'yuternoy obrabotki biomedical'skikh izobrazheniy v srede MATLAB: ucheb. posobie* [Methods of computer processing of biomedical images in MATLAB : tutorial]. Samara: Izd-vo SGAU, 2015. [In Russian]

Ревунов Максим Сергеевич

инженер отдела автоматизированных систем
управления технологическими процессами,
Маяктрансэнерго
(Россия, г. Пенза, ул. Бумажников, 13а);
аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: Revunov_rabota@mail.ru

Revunov Maksim Sergeevich

engineer of department of automated systems
technological process control,
Mayaktransenergo
(13A Bumazhnikov street Penza, Russia);
postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Ревунов, М. С. Повышение точности кросскорреляционного метода измерения скорости путем эквализации расчетной области / М. С. Ревунов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 30–37. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-4.