

АДАПТИВНАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА

УДК 535.12, 519.6, 004.94

Корреляционный алгоритм для адаптивной оптической системы солнечного телескопа

П.А. Коняев✉*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 09.07.2024;
после доработки 31.07.2024;
принята к печати 08.08.2024

В адаптивных оптических системах (АОС), применяемых в астрофизике, широко используются разновидности корреляционного алгоритма НСС (Normalized Cross Correlation), как правило, в блоках слежения и стабилизации, а также для измерения оптических параметров АОС, например локальных наклонов в датчиках волнового фронта (ДВФ). Ввиду тенденции увеличения апертур современных телескопов и роста разрешения цифровых видеокамер не теряет актуальности задача повышения быстродействия алгоритма НСС для вычислений в реальном масштабе времени. В настоящей работе предложена модификация НСС для измерения смещения изображений протяженных объектов статичной сцены в приложениях адаптивной атмосферной оптики. Эта разновидность алгоритма может использоваться в следящих системах для устранения дрожания всего изображения, а также для измерений фазы волнового фронта в ДВФ. Благодаря упрощению процедуры нормировки опорного кадра скорость алгоритма увеличивается и появляется возможность его применения в АОС крупноапертурных солнечных телескопов.

Ключевые слова: корреляционный алгоритм, адаптивная оптика, атмосферная турбулентность, солнечный телескоп, волновой фронт; correlation algorithm, adaptive optics, atmospheric turbulence, solar telescope, wave front.

Введение

В адаптивных оптических системах (АОС), предназначенных для работы в атмосфере, для измерения волнового фронта используются датчики Шэка–Гартмана (ДВФ Ш–Г), которые уже много лет показывают высокую точность и эффективность при решении самых разнообразных задач астрофизики [1–3]. Прогресс в создании крупногабаритных телескопов и расширение сферы применения адаптивной оптики для коррекции атмосферных турбулентных искажений способствуют постоянному повышению требований к характеристикам ДВФ, таким как чувствительность, надежность, скорость работы. Последнее требование является особенно актуальным при проектировании АОС для крупноапертурных солнечных телескопов (КСТ), требующих трудоемких вычислений в реальном времени управления АОС [4, 5].

Реконструкция волнового фронта в КСТ традиционно осуществляется с помощью ДВФ Ш–Г корреляционного типа [6–11], в котором проводятся измерения в субапертурах текущего и опорного кадров взаимных смещений изображений протяженных объектов в виде солнечных пятен, пор, грануляции. Точность и скорость оценки смещений максимумов двумерных взаимных ковариационных

функций (ВКФ) в этих измерениях в конечном счете определяют качество измерения волнового фронта на входной апертуре КСТ. Следовательно, возрастает роль точности и быстродействия алгоритма, реализующего вычисления ВКФ, который даже получил специальное название – «корреляционный трекер» [4]. До сих пор продолжается поиск усовершенствований корреляционного трекера (КТ) путем его усложнения, в том числе с привлечением методов голографии и нейронных сетей [12].

Цель настоящего исследования – разработка модификации существующего корреляционного алгоритма НСС [7] для измерения фазы волнового фронта в ДВФ крупноапертурных систем, а также компенсации дрожания и стабилизации изображения в телескопе. Предложена модификация процедуры нормировки опорного кадра, позволяющая повысить скорость вычислений и применить алгоритм НСС в реальном масштабе времени на АОС КСТ при обработке изображений протяженных объектов статичной сцены [10].

Нормированный кросс-корреляционный алгоритм НСС

Задача вычисления ВКФ смещения координат изображений в субапертурах ДВФ опорного и текущего кадров сводится к задаче идентификации координат объектов методом корреляционного

* Петр Алексеевич Коняев (peter@iao.ru).

поиска [7]. Стандартной формулой для вычисления ненормированной взаимной ковариационной матрицы $\mathbf{C}$ для двух матриц — образца (template) $\mathbf{J}$ и окна поиска (search window) $\mathbf{I}$ — является выражение

$$\mathbf{C}(l, m) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \mathbf{J}(i, j) \mathbf{I}(i+l, j+m);$$

$$0 \leq l, m \leq M - N, \quad (1)$$

где $\mathbf{C}(l, m)$ — матрица кросс-корреляции; $\mathbf{J}(i, j)$ — матрица значений яркости пикселей изображения образца поиска; $\mathbf{I}(i, j)$ — матрица значений яркости пикселей изображения окна поиска; N и M — размеры окон образца и поиска (в пикселях) соответственно.

В работе [6] показано, что вычисления по классической формуле (1), без какой-либо нормировки, дискредитируют корреляционный метод, так как не гарантируют результат — идентификацию координат образца — даже в идеальном случае полного совпадения матриц в окне поиска $\mathbf{J} = \mathbf{I}$. Поэтому на практике, как правило, применяется алгоритм NCC [6–8] с нормировкой матрицы кросс-корреляции $\mathbf{C}(l, m)$ на матрицу нормировки $\mathbf{C}_{\text{norm}}$ согласно следующим выражениям:

$$\mathbf{C}_{\text{NCC}}(l, m) = \mathbf{C}(l, m) / \mathbf{C}_{\text{norm}}(l, m), \quad (2)$$

$$\mathbf{C}_{\text{norm}}^2(l, m) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} \mathbf{J}^2(i, j) \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \mathbf{I}^2(i+l, j+m);$$

$$0 \leq l, m \leq N - M. \quad (3)$$

Формула (3) требует дополнительных вычислительных затрат, пропорциональных $N^2 \cdot M^2$, что является обременительным при больших размерах матриц либо их большом количестве, как в случае с ДВФ [8]. Это ограничение актуально для систем, работающих в режиме реального времени, в частности для КТ АОС крупноапертурных солнечных телескопов. При высокой скорости захвата кадров цифровой камерой алгоритм NCC может не успевать производить вычисления по формуле (3) для каждого кадра в выделенном интервале времени. Проблема скорости КТ может возникнуть во многих приложениях, где применяются корреляционные алгоритмы с нормировкой, но в случае с АОС солнечных телескопов программирование формулы (3) можно существенно упростить, для чего предлагается следующая модификация алгоритма.

Модификация процедуры нормировки в алгоритме NCC

Цифровая камера ДВФ формирует дискретное пиксельное изображение объекта в виде гартманогаммы, получаемой с помощью матрицы дифракционных линз. Анализ характера изменений изображения в поле зрения каждой из линз ДВФ во время наблюдения через турбулентную атмосфе-

ру позволяет предложить следующую упрощенную процедуру вычисления матриц нормировки (3) для каждой из субапертур гартманогаммы (рис. 1, а).

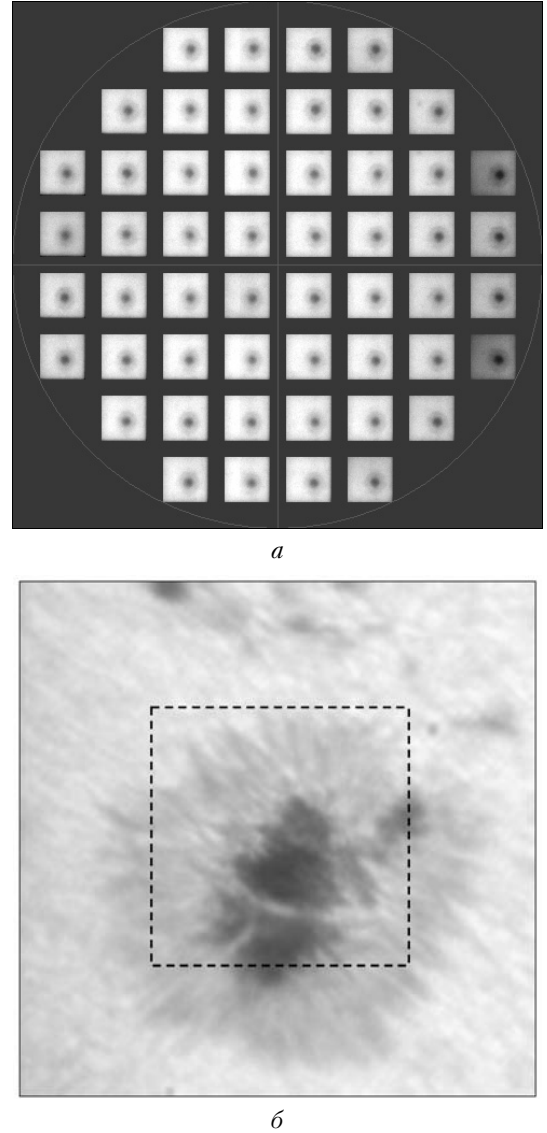


Рис. 1. Гартманогамма корреляционного ДВФ (а) и опорный кадр с изображением солнечного пятна в поле зрения одной из субапертур ДВФ и область текущего кадра (пунктир) (б). Снимки получены в ЛКАО ИОА СО РАН на Большом солнечном вакуумном телескопе Байкальской астрофизической обсерватории

В поле зрения каждой субапертуры можно выделить две области квадратной формы: окно поиска (рис. 1, б), которое назовем «опорным кадром» (ОК), и окно образца (пунктир) внутри окна поиска, которое назовем текущим кадром (ТК). В момент формирования опорного кадра содержимое матрицы ОК запоминается и в дальнейшем используется для сравнения с ТК (описание процедуры формирования ОК выходит за рамки данной работы). Для интервалов времени работы АОС порядка нескольких минут изображение ОК солнечной фотосферы представляет собой сцену, объекты кото-

рой сами по себе и их расположение не меняются в процессе работы, т.е. статичны. Сцена и объекты смещаются и искажаются с течением времени на изображении под воздействием внешних факторов – вибрации, атмосферной турбулентности и т.д. Если амплитуда дрожания изображения такова, что смещения координат объектов в ТК не выходят за границы внешнего ОК, то в этом случае $C_{\text{норм}}$ можно вычислить один раз.

Предлагаемый алгоритм можно представить следующим образом.

Зададим размеры матрицы пикселей $I(i, j)$ опорного кадра из $N \times N$ элементов, а матрицы пикселей $J(i, j)$ текущего кадра из $M \times M$ элементов внутри ОК ($M < N$). Выберем для примера $N = 4$ и $M = 2$. На рис. 2 изображены все возможные положения ТК, который выделен цветом, относительно ОК.

Центральное положение ТК (рис. 2, д), которое равноудалено от границ ОК, соответствует нулевому смещению ТК относительно ОК. Координаты ОК и ТК на сетке окна видеокамеры трека должны быть предварительно выбраны оператором, зафиксированы и не изменяются при работе алгоритма.

Алгоритм работы КТ стартует в режиме постоянного захвата кадров цифровой видеокамерой либо по команде, либо автоматически и состоит из двух этапов.

Этап I. Захват видеокadra, формирование ОК стартового кадра и расчет матриц нормировки

для всех субапертур гартманогаммы. Этот этап выполняется один раз. Для каждой субматрицы гартманогаммы выполняем следующую последовательность действий:

- копируем значения пикселей изображения объекта в области ОК в массив $I()$. Этот массив соответствует опорному положению объектов в области ОК каждой субапертуры;

- согласно рис. 2 вычисляем последовательно слева направо и сверху вниз квадратичные нормы (суммы квадратов пикселей) всех субматриц ОК (выделены цветом) и результаты заносим согласно стрелкам в массив $C_{\text{норм}}$ – в нашем случае из 3×3 элементов (справа на рис. 2).

Этап II. Циклический захват видеокамерой текущих кадров. Он состоит из непрерывного захвата последующих кадров и вычисления координат смещений точки максимума двумерной нормированной ВКФ.

Для каждой субматрицы гартманогаммы выполняем следующую последовательность действий:

- копируем содержимое ТК субматрицы в массив $J()$ и вычисляем его квадратичную норму J^2 ;
- находим ненормированную взаимную ковариационную функцию $C()$ текущей матрицы $J()$ и опорной матрицы $I()$ согласно выражению (1). Выбор алгоритма вычисления здесь может быть обусловлен различными причинами [9]. Автор предпочитает использовать для этой цели параллельные

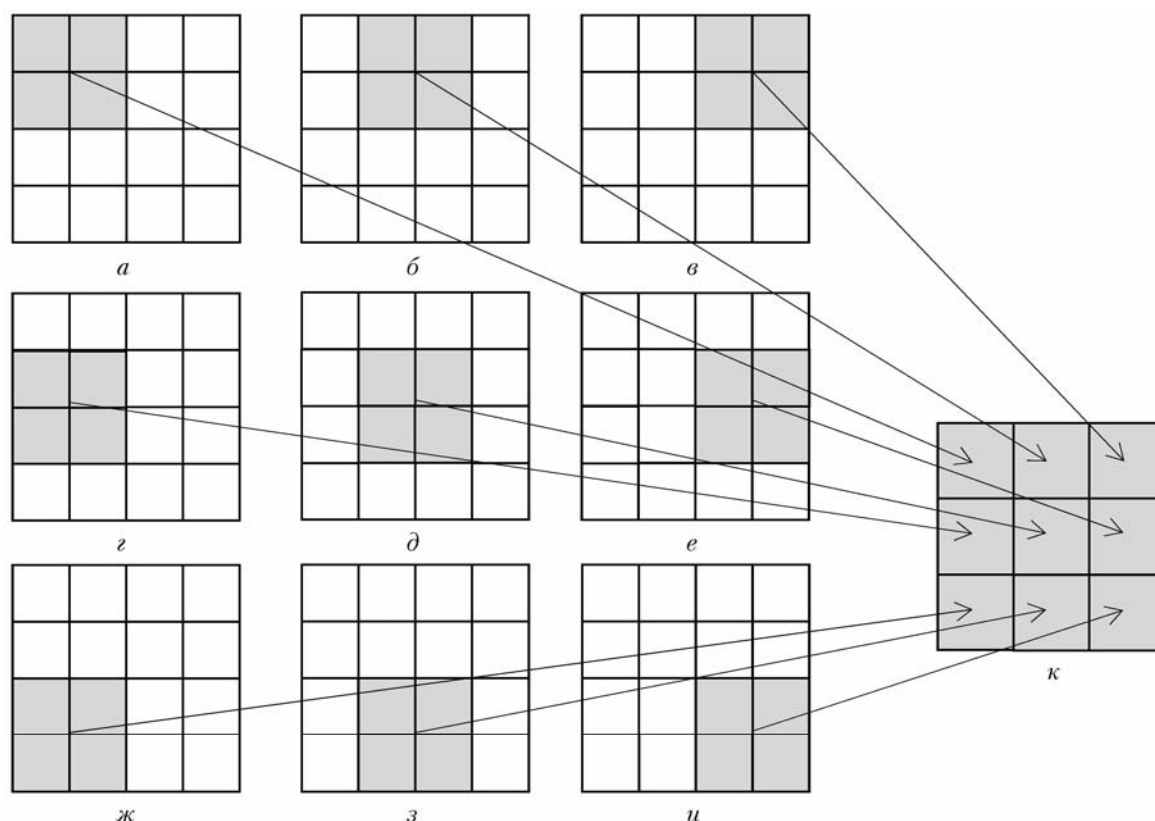


Рис. 2. Девять возможных положений (а–и) матрицы ТК размером 2 × 2 клеток-пикселей (выделены серым цветом) относительно матрицы ОК размером 4 × 4 пикселя. Вычисленные значения квадратичных норм ТК записываются в матрицу нормировки $C_{\text{норм}}$ (к)

алгоритмы БПФ из библиотек Intel MKL и IPP ввиду их высокой скорости вычислений [11];

- вычисляем нормированную взаимную ковариационную матрицу $\mathbf{C}_{\text{NCC}}$ согласно выражениям (2), (3) с учетом множителя J^2 ;

- определяем смещение ТК относительно ОК по сдвигу координат максимума матрицы $\mathbf{C}_{\text{NCC}}(i_{\text{max}}, j_{\text{max}})$. Для точности используем квадратичную интерполяцию [9];

- возврат на начало цикла.

Отличительной чертой алгоритма NCC является высокая надежность в условиях шумовых помех и атмосферной турбулентности. Алгоритм без нормировки при нахождении координат максимума двумерной ВКФ может давать ложные показания, о чем указано в работе [6]. Автором проведено моделирование такой ситуации на примере сгенерированного случайно-неоднородного двумерного поля распределенной сцены с засветкой области ТК (рис. 3, *a*). Смещения координат максимума двумерной автокорреляционной матрицы по определению должны равняться нулю, а сам максимум,

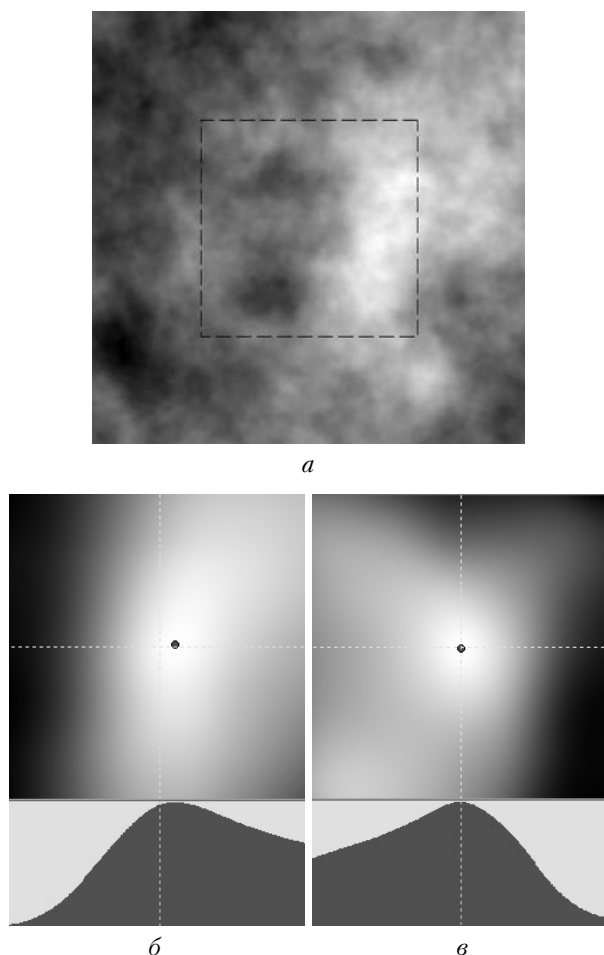


Рис. 3. Опорный кадр протяженной сцены (*a*) с ТК внутри (пунктирный квадрат). Корреляционный алгоритм без нормировки дает смещение максимума двумерной автокорреляционной функции (*б*) относительно центра. Алгоритм NCC с нормировкой дает правильный результат — максимум на оси координат (*в*)

помеченный точкой, должен находиться в центре системы координат (пунктирные линии). Корреляционный алгоритм без нормировки дает ложное смещение точки максимума относительно центра на десятки пикселей (рис. 3, *б*), в то время как алгоритм NCC с нормировкой дает правильный результат — нулевые смещения с погрешностью десятой доли пикселя (рис. 3, *в*).

Факторы, влияющие на точность измерения координат корреляционным методом, изучены и описаны в литературе достаточно подробно [1, 3–5, 9, 10]. Среди них доминирующим является воздействие на оптическое излучение атмосферной турбулентности, которое приводит к абберациям и искажениям изображений объектов, размытию и снижению контраста, усилению дрожания изображения за счет резких порывов ветра. Количественно это выражается в ограничении углового радиуса W поля зрения опорного кадра величиной дисперсии углов прихода σ_θ^2 :

$$W^2 > \sigma_\theta^2 = K(\lambda/d)^2(d/r_0)^{5/3}, \quad (4)$$

где λ — длина волны; d — размер субапертуры ДВФ; r_0 — радиус когерентности Фрида; $K \sim 0,3–0,5$ в зависимости от алгоритма интерполяции координат максимума ВКФ. Формула (4) позволяет прогнозировать параметры корреляционного алгоритма при проектировании ДВФ адаптивной системы с учетом турбулентного параметра d/r_0 при заданных атмосферных условиях.

Заключение

Предложена модификация корреляционного алгоритма NCC с нормировкой опорного кадра, которая может применяться в адаптивной оптике крупногабаритных систем, например солнечных телескопов, а также других приложений корреляционного метода с наличием протяженных объектов и статичной сценой. Этот алгоритм прошел апробацию в системе стабилизации светового потока в первом контуре АОС Большого солнечного вакуумного телескопа и показал высокое быстродействие, надежность и точность в условиях умеренно-сильной турбулентности на Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ РАН.

Упрощение процедуры нормировки опорного кадра позволяет значительно ускорить вычисления и использовать предложенный алгоритм для проектирования будущей многоконтурной адаптивной системы Большого солнечного вакуумного телескопа на всех стадиях ее работы, включая датчик волнового фронта второго контура адаптивных оптических систем и цифровую обработку изображения в реальном времени в третьем контуре этих систем.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке РФФ (грант № 23-42-00043).

Список литературы

1. Ballesteros E., Collados M., Bonet J., Lorenzo F., Viera T., Reyes M. Two-dimensional, high spatial reso-

- lution, solar spectroscopy using a correlation tracker // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1996. V. 115. P. 353–365.
2. *Scharmer G.B., Dettori P., Lofdahl M.G., Shand M.* Adaptive optics system for the new Swedish solar telescope // *Proc. SPIE.* 2002. V. 4853-52. DOI: 10.1117/12.460387.
3. *Rimmele T.R., Marino J.* Solar Adaptive Optics // *Living Rev. Sol. Phys.* 2011. V. 8, N 2. DOI: 10.12942/lrsp-2011-2.
4. *Rais M., Morel J.-M., Thiebaud C., Delvit J.-M., Facciolo G.* Improving wavefront sensing with a Shack–Hartmann device // *Appl. Opt.* 2016. V. 55, N 28. P. 7836–7846. DOI: 10.1364/AO.55.007836.
5. *Leese J.A., Novak C.S.* An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation // *J. Appl. Meteorol.* 1971. V. 10. P. 118–132.
6. *Barnea D.I., Silverman H.F.* A class of algorithms for fast digital image registration // *IEEE Trans. Comp.* 1972. V. C-21. P. 179–186.
7. *Lewis J.P.* Fast template matching // *Vision Interface 95, Canadian Image Processing and Pattern Recognition Society, Quebec City, Canada, May 15–19, 1995.* P. 120–123. URL: https://www.researchgate.net/publication/242325076_Fast_Template_Matching (last access: 09.06.2024).
8. *Hii A.J., Hann C.E., Chase J.G., Van Houten E.W.* Fast normalized cross correlation for motion tracking using basis functions // *Comput. Meth. Prog. Biomed.* 2006. V. 82, N 2 P. 144–156. DOI: 10.1016/j.cmpb.2006.02.007.
9. *Lukin V.P., Botygina N.N., Emaleev O.N., Konyaev P.A.* Wavefront sensors for adaptive optical systems // *Meas. Sci. Rev.* 2010. V. 10. P. 102–107. DOI: 10.1117/12.831133.
10. *Berkefeld N., Schmidt D., Soltan D., Heidecke F., Fischer A.* The adaptive optics system of the 1.5 m GREGOR Solar telescope – four years of operation // *Proc. SPIE.* 2016. V. 9909. P. 1–7. DOI: 10.1117/12.2232604.
11. *Hartlieb S., Wang Z., Rudinger A., Haist T., Reichelt S.* Large dynamic range Shack–Hartmann wavefront sensor based on holographic multipoint generation and pattern correlation // *Opt. Engin.* 2024. V. 63, N 2. P. 024107. DOI: 10.1117/1.OE.63.2.024107.
12. *Коняев П.А.* Обработка цифровых изображений для коррекции атмосферных турбулентных искажений в реальном времени // *Оптика атмосф. и океана.* 2021. Т. 34, № 7. С. 564–568. DOI: 10.15372/AOO20210712; *Konyaev P.A.* Digital image processing for real-time correction of atmospheric turbulent distortions // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N 3. P. 197–201.

P.A. Konyaev. Correlation algorithm for adaptive optics systems of solar telescopes.

In adaptive optics systems (AOS) applied in astrophysics, normalized cross correlation (NCC) algorithm is widely used, usually in tracking and stabilization blocks, as well as for measuring the optical parameters of AOS, for example, local tilts in wavefront sensors (WFS). Due to the tendency to increase the apertures of modern telescopes and the improvement of the resolution of digital video cameras, the problem of increasing the speed of the NCC algorithm for real-time control calculations is relevant. The article proposes a modification of the NCC algorithm for measuring the displacement of images of extended objects of a static scene in adaptive atmospheric optics applications. This type of algorithm can be used in tracking systems to eliminate jitter of the entire image, as well as for measuring the wavefront phase in WFS. Due to the simplification of the reference frame normalization procedure, the algorithm wins in speed and can be used in AOS of large-aperture solar telescopes.