Цифровая обработка изображения на этапе дистанционного зондирования для построения системы автофокусировки

Digital image processing at the remote sensing stage for autofocusing system construction

Карманова / KarmanovaN.
Наталия Андреевна
(karmanova.ifmo@gmail.com)
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Университет ИТМО» (Университет ИТМО),
аспирант.
г. Санкт-Петербург

Карманов / Karmanov A.
Андрей Геннадиевич
(karmanova.nip@gmail.com)
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский Государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова»,
доцент кафедры информационных систем и технологий.
г. Санкт-Петербург

Макаренко / Makarenko A.
Александр Александрович
(makarenko_aa_el@radar-mms.com)
кандидат технических наук, доцент.
АО «Научно-производственное предприятие «Радар ММС».
г. Санкт-Петербург

Винокуров / Vinokurov L.
Лев Александрович
(levka.vin@gmail.com)
Университет ИТМО,
магистрант.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: автоматическая фокусировка изображения – automatic image focusing; оптикоэлектронная система – optoelectronic system; цифровая обработка изображения – digital image processing; амплитудный спектр – amplitude spectrum; дискретное преобразование Фурье – discrete Fourier transform; защита геоданных – geodata protection.

В статье изложен метод автофокусировки оптикоэлектронного изображения, основанный на цифровой обработке изображений. Метод основан на численном анализе двумерного амплитудного спектра изображения. Данный метод применим для системы защиты геоданных.

The article describes a method for autofocusing an optoelectronic image based on digital image processing. The method is based on the numerical analysis of the two-dimensional amplitude spectrum of the image. This method is applicable for the geodata protection system.

Значимость информационных систем, обрабатывающих пространственно-временные данные, возрастает пропорционально объему, скорости обработки и расширяющемуся кругу тематических задач, решаемых с ее помощью.

Одним из технологических звеньев геоинформационных систем является процесс дистанционного зондирования. Помимо авиации и космических аппаратов для этой цели с высокой степенью интенсивности стали использоваться платформы беспилотных авиационных систем [1].

Дистанционное зондирование (ДЗ) – важное технологическое звено геоинформационной системы. Во многих областях данные ДЗ являются ключевым компонентом в процессе принятия решений.

Высокая степень автоматизации получения и первичной обработки большого объема многокомпонентных входных данных ставит новые задачи по информационной безопасности. А именно к методам, аппаратно-программным и организационным средствам защиты систем формирования и предоставления пользователям достоверных информационных ресурсов различного вида. Таким образом, целью работы является формирования и предоставления достоверных данных роботизированными комплексами [2].

Важным фактором, влияющим на получение четкого изображения с камеры, является автоматическая фокусировка (АФ) камеры на нужном объекте. Для выполнения фокусировки могут применяться различные методы, но для снижения уровня демаскировки предпочтительно использовать устройство, которое не будет излучать электромагнитные волны радиодиапазона и диапазона видимого излучения. Приемлемым решением этой задачи является использование пассивной автофокусировки.

В настоящее время практически любая камера имеет объектив с системой автофокусировки. В большинстве случаев удобнее использовать автоматическую фокусировку, чем ручную, т. к. она позво-

ляет быстро и достаточно точно сфокусироваться на объекте съёмки. Даже на подавляющем большинстве смартфонов ручная фокусировка полностью отсутствует. Различают три основных типа систем автоматической фокусировки: активная, пассивная и комбинированная.

Активные системы автофокусировки

Активная система автофокусировки получила свое название исходя из принципа работы. Такая система сама излучает какой-либо сигнал, который при отражении от объекта возвращается на детектор. Исходя из данных полученного сигнала система получает информацию о расстоянии до объекта и настраивает фокус на него. В первой камере использовалась система звуковой навигации и определения расстояния. У такой системы имелся существенный недостаток – звуковые волны отражались от объектов, которые прозрачны для оптического диапазона. Чтобы решить данную проблему в современных активных системах автофокусировки в качестве излучаемого сигнала используется инфракрасный сигнал. Для обработки такого сигнала используют более сложные конструкции и системы расчета:

- триангуляционный метод;
- метод измерения времени прихода отраженного сигнала;
- метод измерения количества света, который отразился от объекта.

Однако инфракрасные системы фокусировки также имеют ряд недостатков:

- работа на расстоянии от 1,5 метров;
- объекты черного цвета могут поглотить сигнал, посланный системой;
- объекты с высокой температурой своим инфракрасным излучением могут нарушить работу такой системы;
- существует вероятность приема паразитного отражения (т.е. не от главного объекта в кадре);
- невысокая точность фокусировки.

Но активная система автофокусировки, функционирующая на базе инфракрасного излучения, имеет и значительные преимущества, такие как скорость работы и возможность работы в темноте без дополнительного освещения.

Пассивные системы автофокусировки

В данный момент широко применяются пассивные системы автоматической фокусировки. Такие системы не излучают никаких сигналов, а производят анализ полученного изображения и передают команду на перемещение фокусирующей линзы. Этот процесс повторяется, пока система не получит максимальную резкость картинки (рис. 1).

Модуль автофокуса считывает данные с датчика и посылает их в процессор, полученные данные обрабатываются, и процессор подает команду двигателю фокусирующей системы переместить фокусирующую линзу объектива в положение, соответствующее наилучшей фокусировке.

Примером пассивной системы автофокусировки является система автофокусировки, работа которой

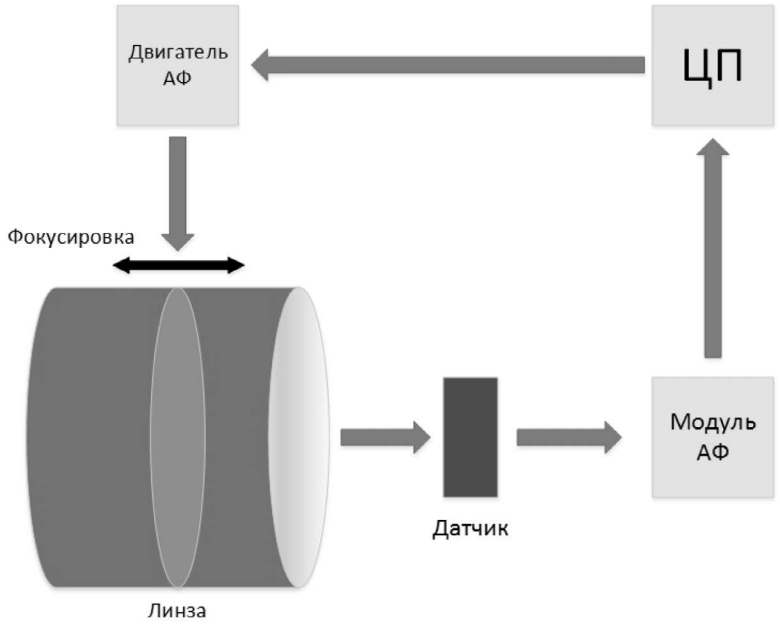

Рис. 1. Пассивная система автофокусировки

основана на определении максимального контраста изображения (рис. 2):

1) Линза перемещается из начальной позиции в конечную (т. к. система не знает, где находится зона резкости), при этом в каждой позиции линзы оценивается контрастность изображения;

2) После достижения линзой конечной точки анализируются данные о контрасте изображения при каждой позиции;

3) Линза перемещается в ту позицию, при которой был получен максимальный контраст изображения.

Основными недостатками таких систем являются низкая скорость работы и зависимость от освещения снимаемой картинки.

Основными достоинствами такой системы являются:

- Отсутствие специальных датчиков (датчиком выступает сама матрица);
- Возможность визуального контроля на дисплее;
- Отсутствие ограничений на дистанцию до объекта.

Другим примером пассивной системы автофокусировки является фазовая система автофокусировки, широко применяемая в зеркальных фотоаппаратах. Однако такие системы создаются на базе сложной оптики и требуют применения отдельных ПЗС-датчиков, которые определяют степень фокусировки.

Комбинированные системы автофокусировки

Также существуют комбинированные системы, в них применяются сразу активная и пассивная системы автоматической фокусировки. В таких устройствах сначала активная система определяет расстояние до объекта, за счет этого пассивная система определяет, в какую сторону сдвигать фокусирующую линзу и настраивается на максимальную резкость. При использовании комбинированных систем практически полностью устраняются недостатки каждой из них [3].

Анализируя достоинства и недостатки систем автоматической фокусировки можно сделать вывод, что те или иные методы применяются исходя из спектра задач оборудования, на котором они устанавливаются. Для активных систем существуют ограничения по расстоянию до объекта съемки, что является минусом при использовании их в камере, установленной на борту БПЛА. Контрастная автофокусировка может давать большие погрешности при недостаточной освещенности или засветке кадра. Точность фазовой автофокусировки сильно зависит от качества датчика. Также следует отметить, что чем более высокие характеристики датчика фазовой автофокусировки, тем выше его стоимость. Кроме того, системы фазовой автофокусировки требуют очень точной калибровки.

Перечисленные недостатки современных систем автофокусировки препятствуют их широкому применению в бортовой оптикоэлектронной аппаратуре БПЛА с вертикальным взлетом и посадкой. Поэтому требуется разработать метод пассивной автофокусировки, который может быть реализован на любой камере, в объективе которой существует возможность управления фокусировкой формируемого изобра-

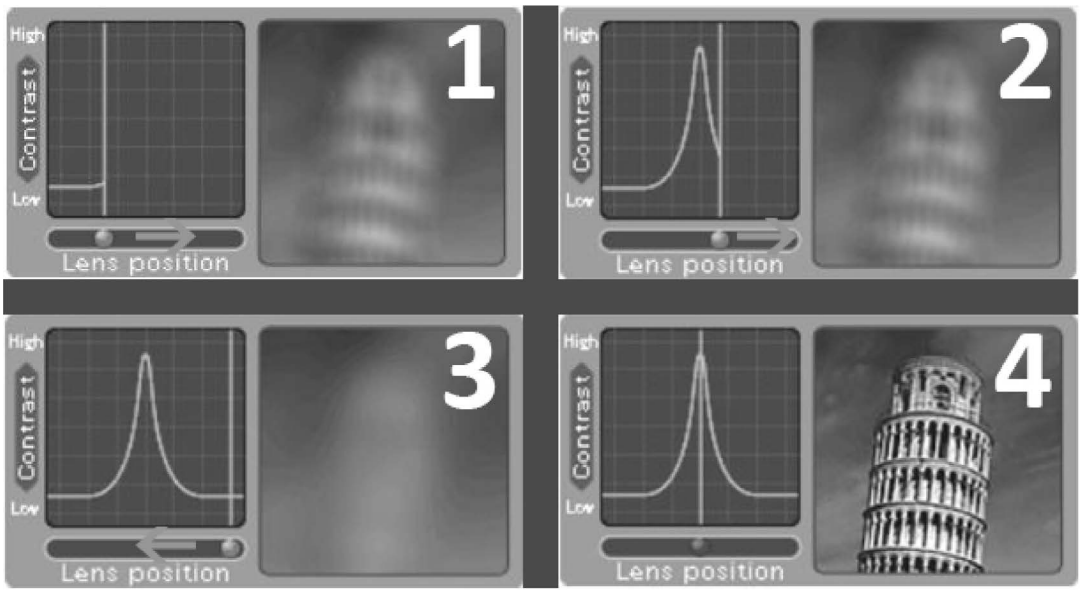

Рис. 2. Алгоритм работы автофокусировки, основанный на определении максимального контраста. Цифрами (1–4) показаны шаги работы алгоритма

жения. Для минимизации затрат на модернизацию существующих камер при реализации такого метода существующие камеры не должны подвергаться какому-либо изменению.

Проблема фокусировки изображения наиболее актуальна для объективов с переменным фокусным расстоянием. После установки нужного фокусного расстояния объектива фокусировка изображения осуществляется путём перемещения фокусирующей линзы или группы линз (рис. 3).

При включенном автоматическом режиме фокусировки двигатель, перемещающий группу фокусирующих линз, получает команды от системы управления и перемещает линзы в нужное положение. Выбор нужного положения осуществляется по одному из методов, описанных ранее.

Известно [4], что зрительная система человека осуществляет пространственную оценку содержания наблюдаемого изображения с целью осуществления наилучшей фокусировки тех его объектов, которые представляют наибольший интерес или опасность. Это действие она выполняет, исходя из анализа спектрального состава областей наблюдаемого изображения. Наилучшая фокусировка определяется по наибольшей ширине спектра пространственных частот объекта, проецируемого в область фовеа внутри глаз. Такая оценка позволяет фокусировать нужный объект на наблюдаемом изображении даже при отсутствии бинокулярного зрения (одним глазом), в чём можно очень легко убедиться. Поэтому для определения признака степени фокусировки было решено анализировать форму амплитудного спектра изображения, спроецированного объективом на фотоприёмную матрицу.

Амплитудный спектр изображения определяется посредством применения преобразования Фурье дискретной функции одной переменной $f(x)$, $x = 0, 1, 2, \ldots, M-1$, определяется выражением:

$$F(u) = \frac{1}{M}\sum_{x=0}^{M-1} f(x) e^{-\frac{i2\pi ux}{M}}, \quad (1)$$

где $u = 0, 1, 2, \ldots, M-1$.

Следует отметить, что дискретное преобразование Фурье, в отличие от непрерывного преобразования Фурье, всегда существует.

Для подтверждения логичности предложенного варианта оценки степени фокусировки изображения на рис. 4 представлены одномерные дискретные сигналы и их амплитудные спектры. Из рисунка видно, что ширина амплитудного спектра зависит от гладкости изменений значения сигналов. Это объясняется тем, что для описания более гладкой функции требуется меньший набор гармоник. Для первого сигнала сумма амплитуд всех гармоник составила 3448, тогда как для последнего – 834. Из этого следует вывод, что чем более резкие перепады в сигнале, тем шире его амплитудный спектр и, соответственно, больше сумма всех составляющих спектра. Также это может быть применимо и к функциям двух переменных, т.е. изображений.

Прямое дискретное преобразование Фурье функции $f(x,y)$ размерами $M \times N$ (где $x = 0, 1, 2, \ldots, M-1$ и $y = 0, 1, 2, \ldots, N-1$) задается следующим равенством:

$$F(u,v) = \frac{1}{MN}\sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{N-1} f(x,y) e^{-i2\pi\left(\frac{ux}{M}+\frac{uv}{N}\right)}, \quad (2)$$

где $u = 0, 1, 2, \ldots, M-1$ и $v = 0, 1, 2, \ldots, N-1$.

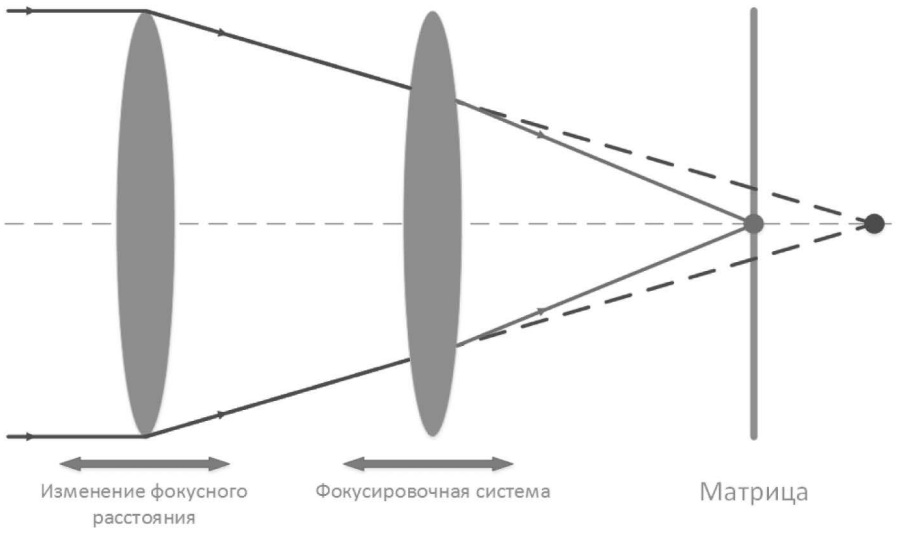

Рис. 3. Схематичное изображение процесса фокусировки

Как и в случае с одномерной функцией, это выражение должно быть вычислено для всех u и v.

Гладкость сигнала изображения, характеризующая степень фокусировки этого изображения, в эксперименте изменялась путем обработки изображения в фильтре Гаусса. Фильтр применялся в пространственной области и задался выражением:

$$G(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

где x и y – ширина и высота окна фильтра, σ – среднеквадратичное отклонение.

Поскольку гауссовское распределение по направлению к краям быстро стремится к нулю, обычно размеры окна фильтра берутся равными $[6\sigma]\times[6\sigma]$, где $[\cdot]$ – округление к большему [5]. Далее происходит свертка окна фильтра с изображением.

$$S=\sum_{u=0}^{M}\sum_{v=0}^{N}\left|F(u,v)\right| \quad (4)$$

Используя вышеуказанную зависимость, можно сформулировать признак степени фокусировки изображения, получаемого матрицей ТВ-камеры: чем больше сумма амплитуд всех гармоник пространственного спектра, тем лучше изображение сфокусировано [7].

Для применения данного признака в системе автоматической фокусировки требуется вычислять суммы амплитуд всех гармоник пространственного спектра при каждом положении фокусирующей системы линз. Затем найти максимальное значение этой суммы и переместить фокусирующую систему в положение, которое соответствует максимальной сумме.

Исходя из вышеописанных зависимостей можно построить алгоритм автоматической фокусировки, основанный на анализе пространственного спектра изображений [8]. Для того, чтобы камера сфокусировалась необходимо:

1) Установить фокусирующую систему линз в начальное положение (рис. 6);

2) Перемещать эту систему в конечное положение, при этом в каждом положении вычислять сумму амплитуд всех гармоник пространственного спектра получаемого изображения (рис. 7);

3) При достижении конечного положения на основании полученных данных найти то положение фокусирующей системы линз, при котором сумма амплитуд всех гармоник пространственного спектра была максимальной [9];

4) Переместить фокусирующую систему линз в нужное положение (рис. 8).

В соответствии с изложенным алгоритмом изображение, получаемое камерой, будет максимально сфокусировано [10].

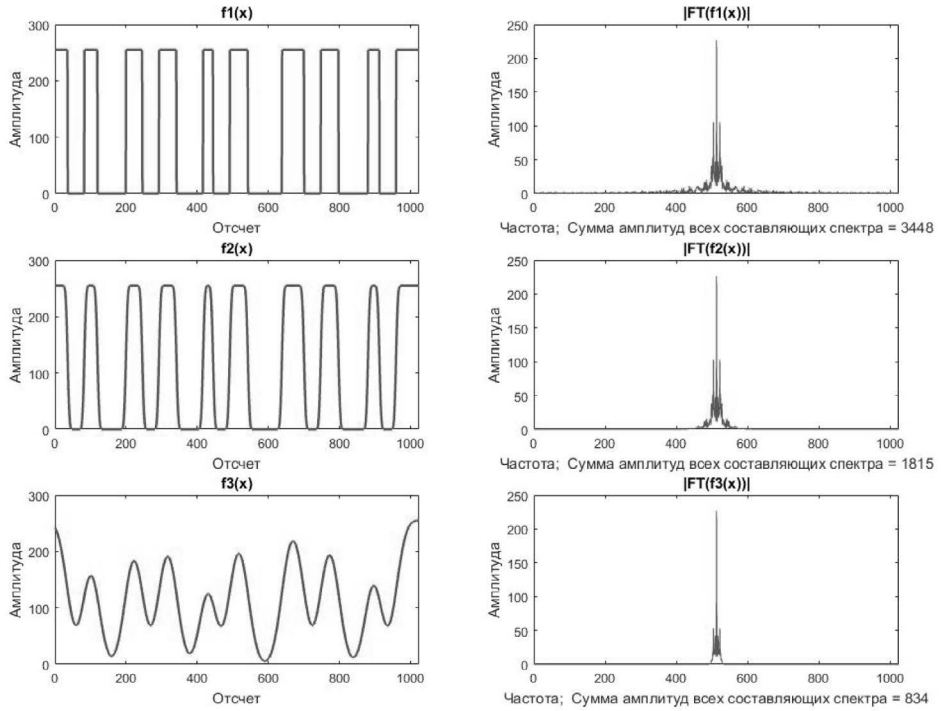

Рис. 4. Сигналы и их амплитудные спектры

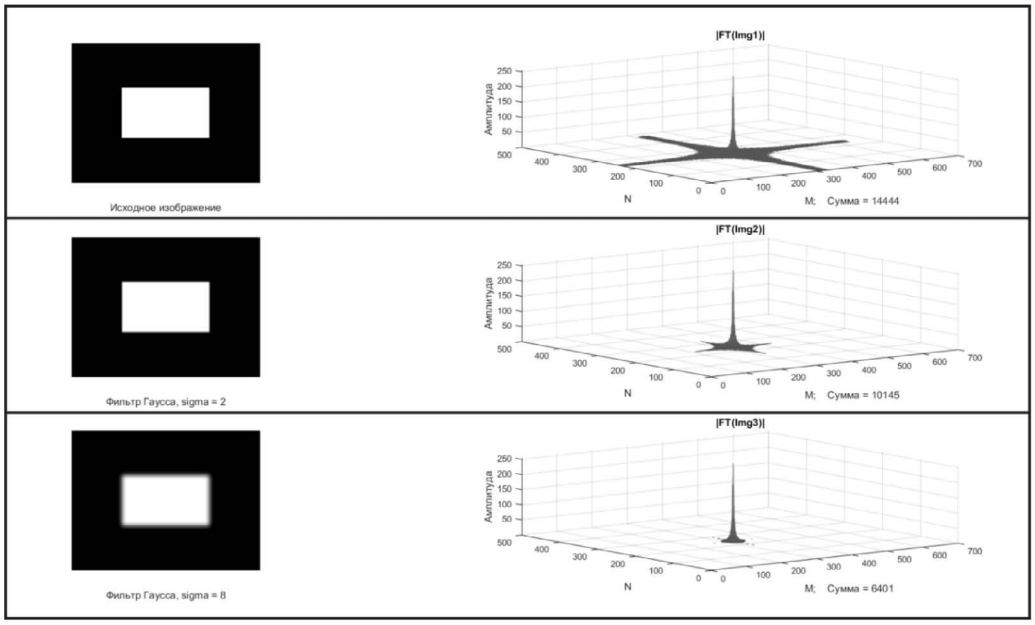

Рис. 5. Изображения и их амплитудные спектры

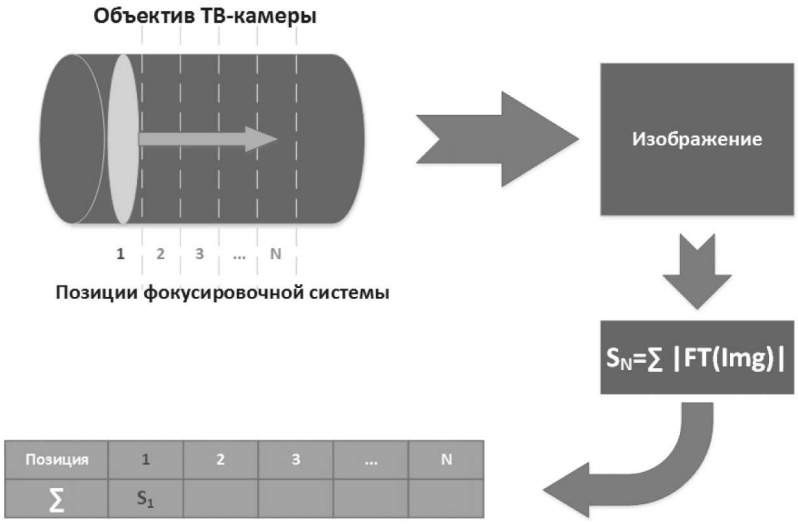

Рис. 6. Алгоритм автофокусировки. Шаг 1

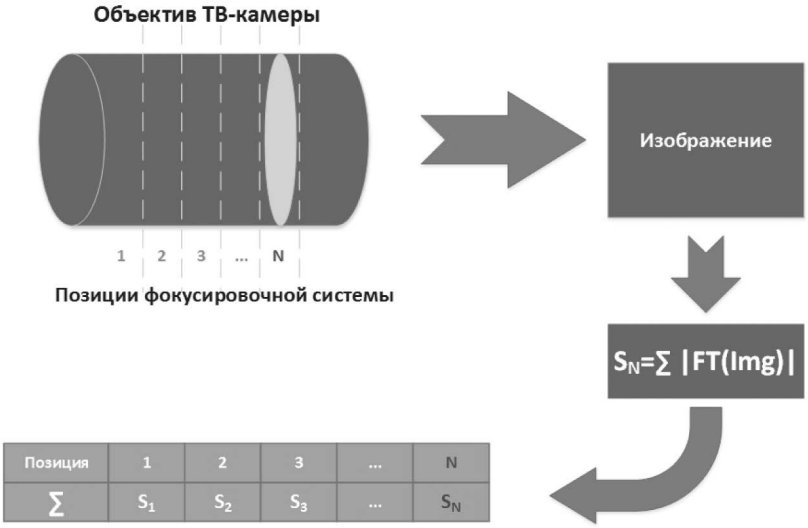

Рис. 7. Алгоритм фокусировки. Шаг 2

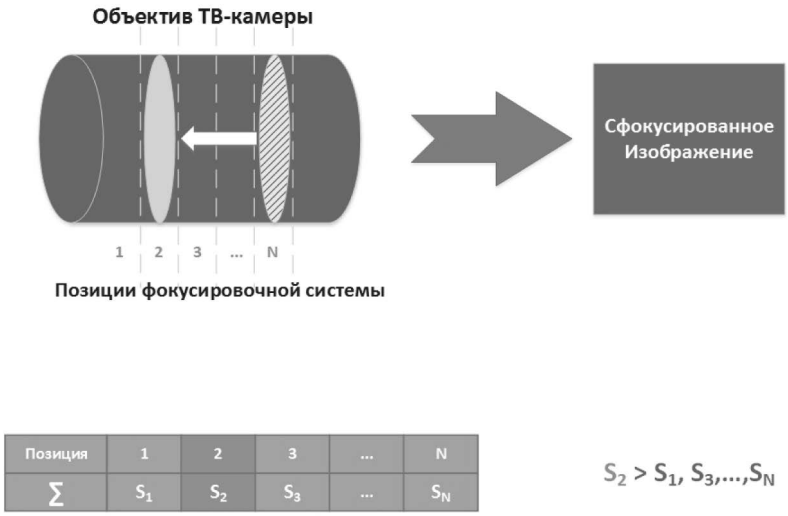

Рис. 8. Алгоритм автофокусировки. Шаги 3 и 4

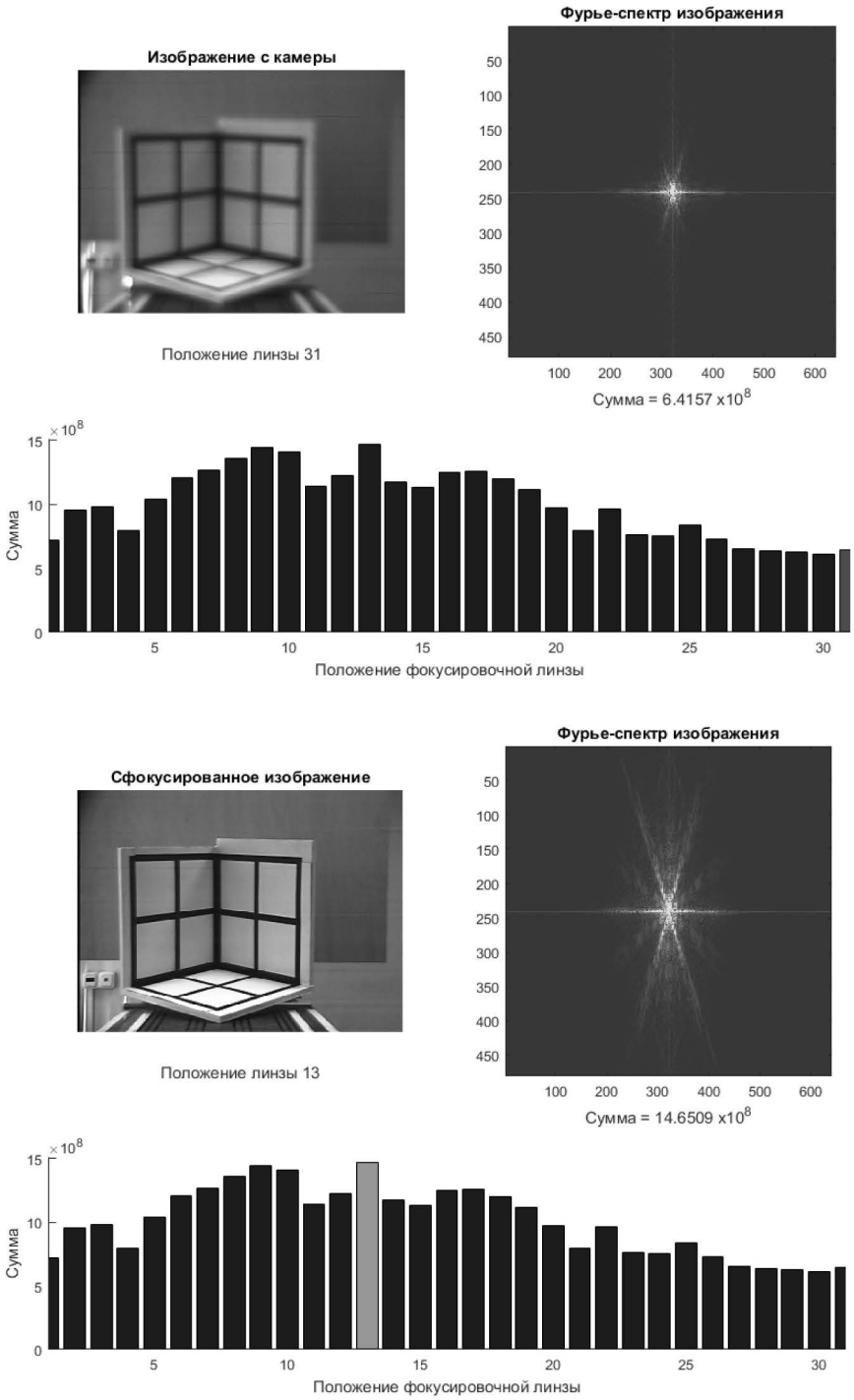

Рис. 9. Демонстрация определения максимальной степени фокусировки

По 31 изображению, каждое из которых соответствует определенному положению фокусирующей системы, была вычислена сумма амплитуд всех гармоник пространственного спектра (рис. 9). На основе анализа этих данных определена позиция системы фокусировки, в которой сумма максимальна [11].

Также результаты эксперимента продемонстрировали, что разработанный алгоритм автофокусировки оказался точнее, чем алгоритм автофокусировки, встроенный в камеру SONY Mintron MTV-54G26H, использованную в эксперименте [12].

Таким образом, экспериментальные исследования доказали эффективность работы предложенного алгоритма, для реализации которого не требуется дополнительного оборудования и вмешательства в механические и электронные компоненты оптикоэлектронной камеры.

Литература

1. Свищев, Г. П. Авиация: Энциклопедия / Г.П. Свищев. - М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. – 736 с.

2. Пат. № 2 456 211 C1 Российская Федерация, МПК B64D 17/80. Беспилотный летательный аппарат с парашютной системой посадки / Д.В. Булгаков, Ю.Н. Пугачев, М.А. Тетюшев; патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский авиационный институт (государственный технический университет); заявл. 17.11.2010; опубл. 20.07.2012. – 10 с.

3. Газаров, А. Ю. Цифровая фотография от А до Я / А.Ю. Газаров. – М.: Эксмо, 2011. – 256 с.

4. Мозг, познание, разум: введение в когнитивные нейронауки : в 2-х т. Т. 1 / под ред. Б. Баарса, Н. Гейдж ; пер. с англ. ; под ред. проф. В.В. Шульговского. – М.: Лаборатория знаний, 2019. – 541 с.

5. Shapiro, L. G. Computer Vision / L.G. Shapiro, G.C. Stockman. – Prentice Hall, 2001. – 608 p.

6. Волков, Ю. Системы автоматической фокусировки / Ю. Волков, Н. Капустина, В. Коротков // Советское фото. – 1986. – № 11. – С. 42.

7. Кузнецова, И. А. Влияние высоты полета беспилотного летального аппарата при обработке данных в автоматизированных программных обеспечениях / И.А. Кузнецова, М.Р. Гильязов // StudNet. – 2021. –Т. 4, № 5. – С. 78.

8. Реализация основных методов цифровой обработки изображений на языке C# / А.А. Тарасьев [и др.] // Территория науки. – 2016. – № 3. – С. 52–59.

9. Симонова, Г. В. Использование структурных признаков при цифровой обработке изображения / Г.В. Симонова, Е.П. Хлебникова, Д.П. Симонов // Интерэкспо Гео-Сибирь – 2009. V Международный научный конгресс: сборник материалов. Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г. – Т. 5, № 2. – С. 168–170.

10. Байбикова, Т. Н. Комплексы программ для цифровой обработки изображений / Т.Н. Байбикова // Вестник МФЮА. – 2016. – № 2. – С. 255–265.

11. Non-Contact Dermatoscope with Ultra-Bright Light Source and Liquid Lens-Based Autofocus Function / D. Fricke [et al.] // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9, No. 11. – P. 2177.