

УДК 004.021

**Дейлик Егор Сергеевич,**

студент,

кафедра «Аналитика больших данных и методы видеоанализа»,

Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента

России Б.Н.Ельцина»

г. Екатеринбург, Российская Федерация

**Берг Иван Александрович,**

кандидат технических наук,

кафедра «Аналитика больших данных и методы видеоанализа»,

Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента

России Б.Н.Ельцина»

г. Екатеринбург, Российская Федерация

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ ФАКЕЛЬНОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА**

### *Аннотация:*

В статье были проанализированы известные методы для обработки информации, получаемой в инфракрасном спектре электромагнитных волн при тепловизионной съёмке горящего факела. Приведены результаты серии пробных экспериментов методом быстрого преобразования Фурье.

### *Ключевые слова:*

Тепловизор, факел, обработка информации, частотный анализ, быстрое преобразование Фурье.

В наши дни отсутствуют промышленные способы контроля факельного сжигания энергетического топлива, при которых используется измерение параметров факела напрямую. Как показывают современные исследования, в целях получения информации о процессе горения, возможно использовать бесконтактные методы, а также панорамные методы измерения теплофизических и газодинамических характеристик в зоне горения. При этом, одним из наиболее перспективных подходов является исследование факела в инфракрасном (ИК) спектре электромагнитных волн (ЭВ), который может быть реализован на практике с помощью тепловизионных камер [1].

Как было экспериментально выявлено [2, 3], при проведении тепловизионной съёмки горящего пламени напрямую (без использования дополнительных теплопередающих устройств [4]), наибольшее количество информации передаётся в диапазоне длин волн 2,5-5 мкм. Однако, у информации, полученной таким способом, есть важная особенность – в процессе дальнейшей математической обработки результатов традиционными способами, невозможно вычислить значения температурного поля, поскольку отсутствует информация о распределении значений коэффициента излучения внутри факела.

В связи с этим, для анализа такого типа информации требуется разработка и применение принципиально новых подходов.

В данной статье обзревается известные, на сегодняшний день, способы обработки информации, полученной при ИК съёмке горящего факела, а также приведены результаты предварительных экспериментов, доказывающие целесообразность применения некоторых подходов.

## ИЗВЕСТНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для обработки информации о горящем факеле, полученной при тепловизионной съемке, в работах [5, 6] было предложено использовать методы частотного и вейвлет анализа. Для получения первичной информации исследователями записывался тепловизионный фильм (последовательность термограмм) горящего факела, с частотой 30 кадров в секунду. Далее, полученная тепловизионная последовательность делилась на фрагменты длиной от 512 кадров. Данные фрагменты могут быть представлены в виде трёхмерного массива  $T_{i,j,k}$ , где  $i, j$  – соответствующие координаты пикселя на матрице тепловизионной камеры,  $k$  – номер кадра.

При вычислении стохастических характеристик для каждой точки (пикселя) с координатами  $I, J$  строился временной ряд (ВР)  $T_{I,J,k}$ . Составленные ВР обрабатывались при помощи процедуры быстрого преобразования Фурье (БПФ), в результате чего для каждой точки получались графики изменения спектральной плотности мощности вариаций температуры (собственный спектр)  $ST(f)$ . В каждом спектре определялась характерная частота  $fm$ , соответствующая максимальному значению спектральной плотности  $STm$ . Затем, полученными значениями  $fm$  заполнялись ячейки (с соответствующими координатами) итоговой матрицы, которая далее визуализировалась цветовой шкалой.

Для составленных ВР, в представленных исследованиях, совместно с преобразованием Фурье проводился вейвлет-анализ. Результатам анализа каждого из ВР являлся ВР изменения характерных (выделенных исследователями) коэффициентов вейвлет-анализа, что позволяло, в итоге, получить трёхмерный массив коэффициентов для всего исходного фрагмента  $T_{i,j,k}$ . Типичные результаты обработки описанным выше способом представлены на рис. 1.

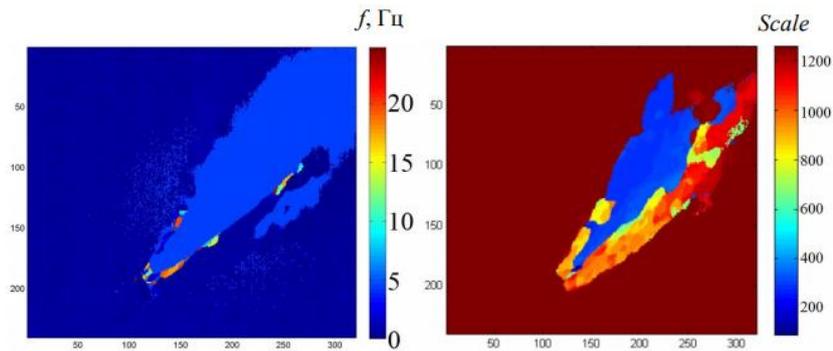


Рисунок 1 – Результаты БПФ (слева), и результаты вейвлет-анализа (справа) возмущенного факела [5, 6]

Авторы утверждают, что непрерывное комплексное вейвлет-преобразование позволяет получить пространственно-временное распределение частот и фаз пульсации температуры (или другого измеренного значения), что делает его более информативным, по сравнению с преобразованием Фурье. При этом результаты обработки согласуются, и авторы выделяют «характерные структуры» в факеле – области в которых измеренные значения изменяются по одному периодическому закону (с одинаковой частотой и фазой) на протяжении времени тепловизионной съёмки, которые, предположительно, свидетельствуют о наличии турбулентных завихрений в выделенной зоне.

Данный подход позволил авторам исследовать соударяющиеся факела газообразного топлива (изобутан 80 %, бутан 15 %, пропан 5 %), формируемого соосными встречно направленными инжекционными горелками. В результате была определена область в зоне соударения с наиболее интенсивным теплообменом (рис. 2). К сожалению, дальнейшая интерпретация результатов авторами не проводилась.

В работах других исследователей [7] предложено комбинировать описанный метод съёмки газового факела с методом Particle Image Velocimetry (PIV) [1], известный в отечественной литературе как «Метод цифровой трассерной визуализации». Данный подход, дополнительно, обеспечивает измерение мгновенного поля скорости потока в заданном сечении, в течение некоторого временного интервала. Для этого в поток жидкости или газа

добавляются специальные частицы малого размера (трассеры). Для представленных экспериментов исследователи в качестве трассеров использовали мелкодисперсный порошок оксида титана. В результате были получены мгновенные поля скоростей в пламени при различных режимах горения (расходов газо-воздушной смеси) (рис. 3).

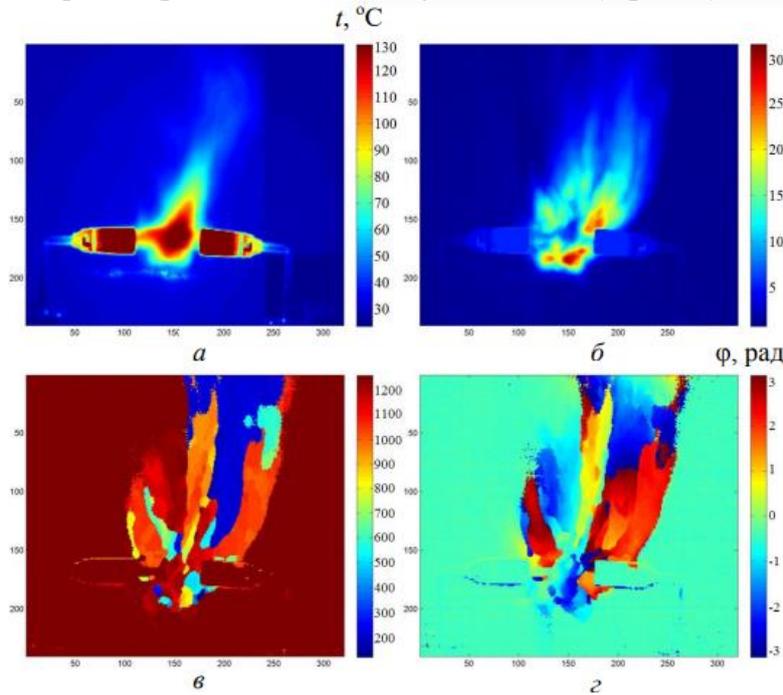


Рисунок 2 – Визуализация результатов вейвлет-анализа соударяющихся соосно факелов: а - исходная термограмма; б - поле амплитуд; в - скэйлограмма; г – фазограмма [5, 6]

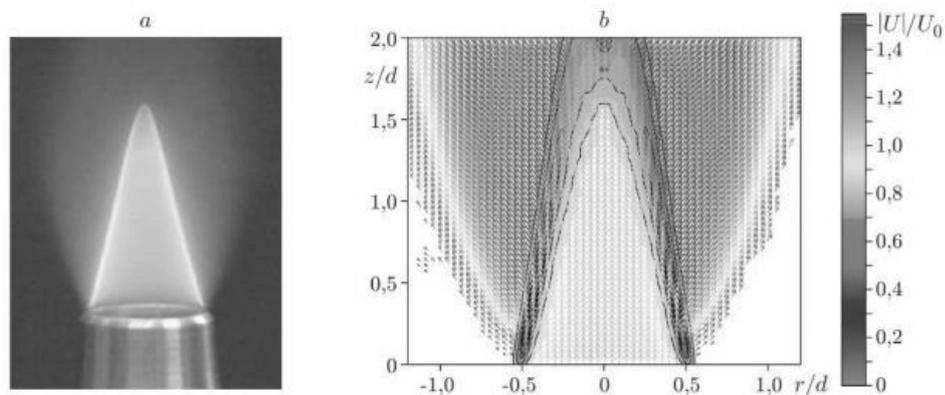


Рисунок 3 - Фотография исследуемого пламени (слева), поле средней скорости (справа), средняя скорость потока на выходе из сопла  $U_0 = 2,2$  м/с; диаметр выходного сечения сопла  $d = 15$  мм [7]

Представленные результаты позволили дополнить, полученную в ИК спектре картину, полями скоростей, что, в свою очередь, позволяет более полно с физической точки зрения интерпретировать результат. Однако отметим, что данный подход применим только в лабораторных исследованиях, и представленная комбинация методов измерения не может быть использована в промышленных условиях.

Принципиально иной подход к обработке тепловизионной информации о горящем факеле предложен в работе [8]. Автор предлагает выделять на каждом кадре тепловизионной последовательности две характерные области  $N_1, N_2$  (соответствующие ядру факела, первой и второй реакционным зонам), и далее составлять ВР  $N_{1,k}, N_{2,k}$ , полученных для каждого кадра  $k$  значений. С помощью метода Розенблатта-Парзена, БПФ и Сингулярного Спектрального Анализа (SSA) авторами было доказано [9], что распределение количества пикселей по

диапазонам измеренных значений на каждом кадре имеет вид двумодального распределения с ограниченной областью рассеяния (рис. 4), а выделенные информационные параметры (экстремумы на распределении  $T_{1max}$ ,  $T_{2max}$ ,  $T_{min}$ ), являются стационарными величинами, не зависящими от момента проведения измерений или режима подачи топлива в исследуемую горелку.

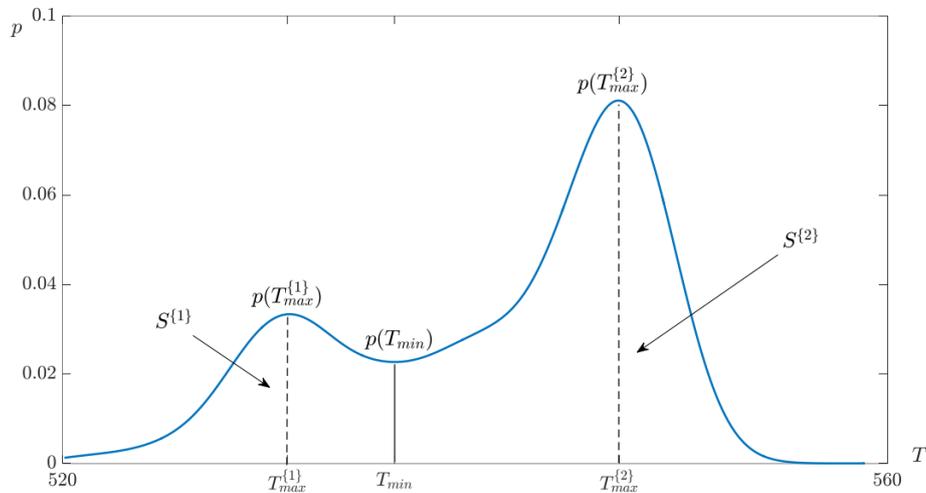


Рисунок 4 – Распределение количества пикселей на кадре [9]

С учётом этого, с целью сокращения требований к вычислительным мощностям и времени обработки в целом, авторами предложен «быстрый» алгоритм составления ВР  $N_{1,k}$ ,  $N_{2,k}$ , путём прямого подсчёта количества пикселей с использованием выделенных информационных параметров, с дальнейшим частотным анализом составленных ВР методами БПФ или SSA.

Полученные результаты представляют собой нормированные спектры, характеризующие изменение объёмов, выделенных зон, положение которых согласуется с известными теплофизическими моделями. Результаты спектрального анализа позволяют сделать выводы о стабильности процесса горения в различных зонах факела, и, в дальнейшем, рассчитывать параметры для управляющего воздействия.

В результате проведённого анализа можно заключить, что методы для обработки тепловизионной информации о факельном горении газообразного топлива существуют, причём различные подходы предоставляют принципиально разный результат. В связи с этим, потребовалось провести сравнительный анализ результатов представленных подходов, с целью определения наиболее подходящих для промышленного использования.

### ПРОВЕДЕНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для получения первичной информации было проведено экспериментальное исследование на автоматизированном стенде для изучения пульсационного горения [10]. В исследовании использовалась стандартная эжекционная прямоточная горелка для газообразного топлива. В результате использованная горелка формировала диффузионный турбулентный факел без предварительного смешения. Сегодня данный тип факела формируют горелочные устройства подавляющего большинства промышленных энергетических установок.

Серии экспериментов представляли собой запись тепловизионных последовательностей с помощью тепловизора FLIR 7700M в оконном режиме съёмки, в разрешении  $320 \times 256$  и частотой 412 Гц. В результате, полученная исходная информация представляла собой трехмерные матрицы  $T_{i,j,k}$ , размерностью  $320 \times 256 \times 1024$  (рис. 5).



Рисунок 5 – Фотография горящего диффузионного факела в установке (слева); визуализация тепловизионного изображения на кадре ИК-тепловизионной последовательности (справа)

Для обработки полученной информации, с учётом рекомендаций изложенных в [8], идентифицировались следующие зоны факела: ядро факела, а также первая и вторая реакционные зоны. Далее, в соответствии приведёнными в [5] алгоритмами расчёта полей средних значений и стандартных отклонений измеряемых величин, выбиралось некоторое количество пикселей, принадлежащих разным зонам факела. Затем формировались ВР  $T_{l,j,k}$ . изменения значений измеряемого выбранным пикселем, после чего вычислялся с помощью БПФ и нормировался спектр исследуемого ВР. Типичные результаты пробной обработки представлены на рис. 6, 7.

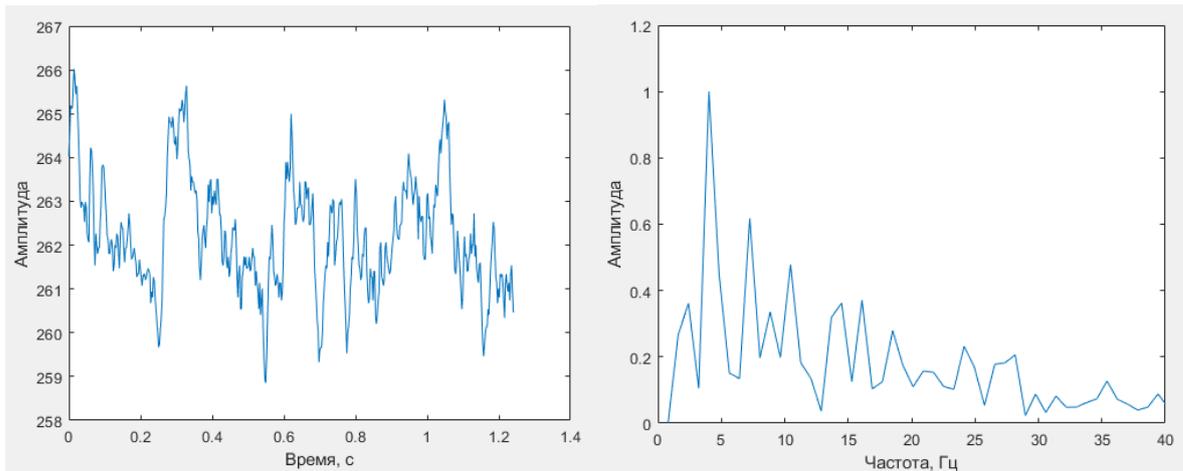


Рисунок 6 – Фрагмент ВР  $T_{l,j,k}$ . (слева) и его нормированный спектр (справа),  $I = 150$ ,  $J = 235$

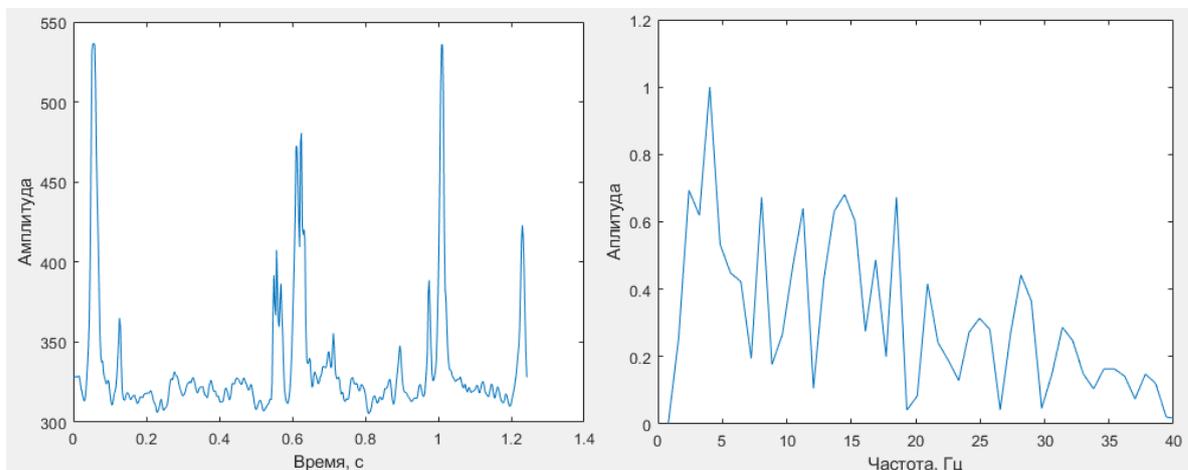


Рисунок 7 – Фрагмент ВР  $T_{l,j,k}$ . (слева) и его нормированный спектр (справа),  $I = 180$ ,  $J = 130$

В результате проведённой обработки было выявлено, что в исследуемых ВР, соответствующих первой и второй реакционным зонам факела, действительно содержатся периодические составляющие, что согласуется с опубликованными ранее результатами аналогичных исследований. При этом было выявлено, что спектр исследуемых ВР, соответствующих непосредственно ядру факела, представляет собой реализации «фликкер-шума» [11].

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате проведённого анализа было показано, что использование тепловизионных камер в целях контроля параметров факельного сжигания газообразного топлива целесообразно и может быть реализовано на практике с применением тепловизионных камер. Были проанализированы известные методы для обработки информации, получаемой в ИК спектре ЭВ при тепловизионной съёмке горящего факела.

Для подтверждения возможности применения известных подходов, были проведены тестовые серии экспериментов, с последующей обработкой полученных данных. В результате обработки была обоснована целесообразность проведения дальнейшего анализа с целью комбинирования известных методов для конкретных исследовательских или промышленных задач, а также оптимизации используемых алгоритмов. Важным результатом является доказанная возможность выполнять анализ выбранными методами на рядовых компьютерах, не обладающих специальными вычислительными мощностями.

Автором далее планируется проведение экспериментального исследования и выполнение математической обработки полученной информации, с учётом результатов тестовых серий экспериментов результатов.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Carlomagno G. M. Thermo–fluid–dynamics of submerged jets impinging at short nozzle–to–plate distance: A review / G. M. Carlomagno, A. Ianiro // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2014. – Vol. 58. – P. 15–35.
2. Экспериментальное исследование спектров изменения температуры горения некоторых горючих материалов с помощью ИК–диагностики в узких спектральных интервалах / М. В. Агафонцев, Е. Л. Лобода, В. В. Рейно // *Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]*. — 2015. — Т. 326, № 5. — С. 22–27.
3. Тепловизионные исследования пламени при сжигании жидких углеводородов с паровой газификацией / И. С. Ануфриев, Е. Л. Лобода, Е. П. Копьев // *Теплофизические основы энергетических технологий: сборник трудов конференции*. – 2014. – С. 11–15.
4. Тепловизионное определение характеристик теплообмена при течении газа: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / А. В. Ефимова; Урал. федер. ун–т имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2006. – 155 с.
5. Газодинамика и теплообмен при соударении прямоочных газовых струй: дис. ... канд. физ.–мат. наук: 01.04.14 / П. Ю. Худяков; Урал. федер. ун–т имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2013. – 172 с.
6. Структурно–динамические характеристики температурного поля и теплообмен в прямоочных газовых импактных струях и факелах: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / А. Ю. Кисельников; Урал. федер. ун–т имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2010. – 180 с.
7. Применение современных оптических методов для диагностики и пространственной структуры турбулентных пламён / В. М. Дулин, Д. М. Маркович, М. П. Токарев, Л. М. Чикишев // *Автометрия*. - 2012. - Т. 48, № 3. - С. 22-32.
8. Исследование методов трансформации и анализа ИК–тепловизионной видеоинформации о факельном горении газообразного топлива: дис. ... канд. физ.–мат. наук: 05.13.01 / Берг И.А.; Урал. федер. ун–т имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2020. – 182 с.

9. The study of methods for analysis burning torch infrared images / I.A. Berg, S.V. Porshnev // *Scientific Visualization*, 2020, volume 12, number 2, pages 37 – 52.
10. .Берг И. А. Автоматизация измерительного комплекса для исследования пульсационного горения / И. А. Берг, П. Ю. Худяков, В. Ю. Ощепкова // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 6. – С. 24-28.
11. Кузовлев Ю. Е. Почему природе нужен  $1/f$  шум / Ю. Е. Кузовлев // *Успехи физических наук*. – 2015. – Т. 185, № 7. – С. 773–783.

**Deylik Egor Sergeevich,**

Student,

Department "Big Data Analytics and Video Analysis Methods",  
Institute of Radio Electronics and Information Technologies-RTF  
Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin"  
Yekaterinburg, Russian Federation

**Berg Ivan Aleksandrovich,**

Ph.D. in Engineering,

Department "Big Data Analytics and Video Analysis Methods",  
Institute of Radio Electronics and Information Technologies-RTF  
Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin»  
Yekaterinburg, Russian Federation

**AN ANALYSIS OF THE DATA PROCESSING APPROACHES FOR NON-CONTACT TORCH COMBUSTION CONTROL**

*Abstract:*

The article analyzes well-known methods for processing information obtained in the infrared spectrum of electromagnetic waves during thermal imaging of a burning torch. The results of a series of trial experiments using the fast Fourier transform method are presented.

*Keywords:*

Thermal imager, information processing, flaring, fast Fourier transform.