

## ВНЕДРЕНИЕ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СРЕДСТВ В НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ПРАКТИКУ

**Порев Г. В., Порев В. А.**

*Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”*

К настоящему времени накоплен достаточный опыт создания и эксплуатации телевизионных систем прикладного назначения, дающий основание сделать вывод о том, что они образовали особый класс телевизионных измерительных систем (ТИС). Очевидно, что состав конкретного прибора обуславливается спецификой задачи и типом светозаписывающего преобразователя (СЭП), но с учетом накопленного на сегодня материала можно считать, что основными модулями ТИС являются оптическая система, передающая телевизионная камера, в которую входят СЭП и формирователь сигнала, а также компьютер [1]. В некоторых ТИС в перечне обязательных модулей имеется устройство ввода видеосигнала в компьютер, однако видеоадаптеры современных компьютеров позволяют в большинстве случаев отказаться от отдельных устройств ввода.

ТИС представляет собой оптико-электронный прибор, в котором информация о структуре, состоянии и свойствах объекта исследования, содержащаяся в излучении, преобразуется в изображение. Изображение может существовать в виде распределения освещенности, совокупности электрических сигналов, яркости экрана или матрицы цифровых кодов.

В общем случае изображение может образовываться как собственным, так и несобственным излучением или их смесью. Строго говоря, поток излучения всегда есть смесью собственного и несобственного излучения. Такое разделение достаточно условно и определяется только соотношением соответствующих компонент.

Физически работа ТИС базируется на последовательности преобразований потока излучения, попадающего во входную апертуру. Основной количественной характеристикой оптического поля, образующего поток излучения в спектральном диапазоне  $\lambda \dots \lambda + d\lambda$  с элементарного участка поверхности в телесный угол, опирающийся на входную аппаратуру прибора, является спектральная яркость  $L_\lambda(x,y)$ . Анализ функции  $L_\lambda(x,y)$  в ТИС производится путем выборки (формированием отсчетов в заданных точках), осуществляется при помощи электронной развертки и заключается в преобразовании пространственной функции яркости в совокупность электрических сигналов. Конечным звеном всей последовательности преобразований является цифровой сигнал, пропорциональный значению входного сигнала.

Размеры элемента разложения (пиксела) определяются типом СЭП и могут быть в диапазоне от единиц до десятков микрометров. Фактически СЭП представляет собой матрицу, состоящую из большого количества микропреобразователей. Это обстоятельство вместе с малым (десятки миллисекунд) временем формирования сигнала всей матрицы является принципиальной особенностью ТИС, которая открывает перед ними

широкие перспективы внедрения в научные исследования и технологическую практику.

Концепция использования телевизионных систем для контроля оптических полей базируется на предположении о том, что СЭП представляет собой упорядоченную совокупность идентичных и независимых преобразователей, что в общем случае выполняется очень редко [2]. В практике исследований предполагается, что адекватность реальных характеристик и указанного выше предположения может быть обеспечена коррекцией светосигнальной характеристики и работой ТИС в диапазоне линейности.

В ТИС коррекция светосигнальной характеристики осуществляется, как правило, программно путем формирования матрицы весовых коэффициентов  $C_{ij}$  при постоянном значении освещённости  $E$ , одинаковом для всех пикселов. При измерениях формируется выборка  $C_{ij}A_{ij}$ , где  $A_{ij}$  — текущее значение сигнала.

Анализируя зависимость выходного сигнала пиксела (группы пикселов) от освещённости [3], придём к выводу о необходимости формирования компенсирующей матрицы не для одного постоянного значения освещённости, а для некоторого, требующего обоснования интервала. Действительно, пусть угол наклона линейного участка светосигнальной характеристики пиксела  $i, j$  меньше угла наклона линейного участка светосигнальной характеристики пиксела  $p, k$ , а  $E_1 < E_2$ . Если сформировать компенсирующую матрицу при освещённости  $E_1$ , то при  $E_{ij} = E_{pk} = E_1$  получим  $A_{pk}(E_2) > A_{ij}(E_2)$ . Наоборот, если сформировать компенсирующую матрицу при освещённости  $E_2$ , то при  $E_{ij} = E_{pk} = E_2$  получим  $A_{pk}(E_2) < A_{ij}(E_2)$ .

Линейный участок светосигнальной характеристики определяется совокупностью точек, для которых модуль разности среднего значения сигнала и значения, взятого с аппроксимирующей прямой при одной и той же освещённости в заданное число раз меньше среднего квадратичного отклонения результата измерения. Установлением диапазона линейности ТИС уточняются также границы применимости теории линейных систем и критериев качества ТИС, базирующихся на использовании функции передачи модуляции (ФПМ), в частности разрешающей способности. Именно развитие и внедрение пространственно-частотных представлений в практику анализа телевизионных систем позволило определять разрешающую способность по ширине суммарной кривой ФПМ как величину, обратную пространственной частоте, на которой нормированный коэффициент передачи контраста отождествляется с пороговым. Эта оценка более строгая по сравнению с той, когда разрешение в плоскости изображения определяется размером пиксела.

Для количественных оценок порогового контраста  $K_{\Gamma}$  возможно использование разных методик. Наиболее адекватной, по-видимому, следует считать методику, изложенную в работе [4], где пороговый контраст определяется для заданного значения вероятности  $p$  регистрации сигнала с учетом входного контраста  $K_{вх}$  и показателя степени светосигнальной характеристики  $\gamma(E)$ . При условии, что  $\gamma(E) = 1$ , т.е. СЭП работает в диапазоне линейности

$$K_{II} = \frac{q_{II}(p)}{K_{ex}q(E)}, \quad (1)$$

где  $q(E)$ ,  $q_{II}(p)$  — отношение сигнала к шуму при освещенности  $E$  и пороговое при заданной вероятности регистрации.

Определённые проблемы с точностью измерений могут возникнуть при использовании ТИС для контроля температуры.

Во-первых, это проблемы с определением коэффициента излучающей способности, влиянием излучения сторонних источников и изменением коэффициента пропускания среды, которые в традиционной пирометрии излучения являются главными источниками погрешностей. Задача их компенсации должна решаться для конкретной технологии на основе исследований процесса формирования поля яркости и с учётом возможностей прибора.

Во-вторых, источником значительных погрешностей могут быть попытки механического перенесения в телевизионную пирометрию одного из фундаментальных понятий пирометрии излучения — эффективной длины волны. Определение эффективной длины волны в телевизионной пирометрии имеет некоторые особенности, связанные с тем, что значение  $\lambda_3$  может оказаться различным для разных участков СЭП или даже для отдельных пикселей [5]. А это, в свою очередь, может привести к дополнительным погрешностям измерения температуры, особенно если изображение объекта занимает значительную часть мишени СЭП. Очевидно, что при некоторых условиях вклад погрешности определения значения  $\lambda_3$  в суммарную погрешность измерения температуры может оказаться весьма значительным.

В то же время, используя методику, приведённую в [6], несложно получить формулу, позволяющую вычислить  $\lambda_3$  по измерению сигналов  $A_{ij}(T_1)$  и  $A_{pk}(T_2)$ , образованных при разных температурах  $T_1$  и  $T_2$  разными пикселями с учетом различий в их коэффициентах преобразования  $b_{ij}$  и  $b_{pk}$ :

$$\lambda_3 = \frac{C_2 [T_2^{-1} - T_1^{-1}]}{\ln \frac{A_{ij}(T_1)}{A_{pk}(T_2)} - \ln \frac{b_{pk}}{b_{ij}}}. \quad (2)$$

В настоящее время в технологически развитых странах ТИС широко применяется в научных исследованиях и промышленных технологиях — в астрономии, при решении задач экологического мониторинга, на транспорте, в металлургии и прокатном производстве, при вакуумном напылении, электросварке, в медицинской диагностике и т. д. С помощью ТИС удалось также на порядок увеличить точность измерения параметров вращающейся микрокапли в задаче определения межфазного натяжения на границе раздела жидкостей [7].

Весьма выигрышным может быть использование ТИС при исследовании процессов локального нагрева в лазерных и электронно-лучевых технологиях, с которыми, в

частности, связывают перспективы получения материалов с новыми свойствами, и эффективность которых напрямую зависит от поддержания параметров теплового режима — распределения и динамики температурного поля, что предполагает наличие адекватной методологии контроля температурного поля в зоне воздействия.

В частности, использование телевизионной системотехники позволило решить достаточно сложную задачу контроля параметров электронно-лучевой бестигельной зонной плавки в реальном масштабе времени, получить данные об особенностях формирования зоны плавки на разных этапах её развития и уточнить характер распределения температуры в жидкой фазе [8, 9].

В принципе для этих целей возможно использование приборов с оптико-механической развёрткой или даже объективных пирометров, но если температурное поле имеет сложную форму, малые размеры, значительные градиенты и динамический характер, то эффективный контроль возможен только при анализе изображений объекта в реальном масштабе времени с высоким пространственным разрешением. Наиболее полно этим требованиям отвечают ТИС, обеспечивающие измерение температуры в наибольшем формате выборки, с наивысшим пространственным разрешением в течение минимального времени.

Следует также ожидать, что последовательное внедрение ТИС в эксперименты, направленные на создание и совершенствование космических технологий, позволит повысить эффективность научных исследований. Речь может идти об исследовании механизма диффузии в нагретых кристаллах и расплавах в условиях микрогравитации, об исследовании процесса роста кристаллов методом прямого наблюдения за фазовой границей, и других натуральных экспериментах по выращиванию монокристаллов. В этих и аналогичных задачах ТИС, созданная на базе уточнённой концепции применения телевизионных средств для анализа оптических полей, обеспечит:

- контроль и документирование распределения температуры (от 500 °С и выше) на поверхности образца (температурный профиль) в реальном масштабе времени с высоким пространственным разрешением (10 мкм в плоскости СЭП);
- контроль и документирование формы фронта кристаллизации в реальном масштабе времени;
- измерение и документирование геометрических параметров капли (монокристалла) в развитии и в процессе плавки (выращивания).

В тех случаях, когда технологический процесс производится при температурах, меньших 500 °С, весьма перспективным средством контроля может оказаться пировидиконная телевизионная система, имеющая практически равномерную спектральную характеристику в диапазоне от 0.4 мкм до 12 мкм и не требующая охлаждения. К сожалению, потенциальные возможности пировидиконных систем в значительной мере ограничиваются их низкой разрешающей способностью. Анализ этого вопроса и некоторые аспекты повышения разрешающей способности освещены в работах [10, 11], где указывается, что повысить разрешающую способность можно технологическими мера-

ми — используя пьезоэлектрический материал с уменьшенным коэффициентом термодиффузии, изготавливая мишень в виде мозаики из отдельных элементов с одновременным заполнением межэлементного пространства теплоизолирующим материалом. Однако в результате этих и аналогичных технологических усилий в лучшем случае будут созданы только предпосылки для достижения более высоких значений разрешающей способности. А будут ли они реализованы — это определится условиями формирования сигнала, главным образом скоростью перемещения изображения по мишени и временем формирования выборки. Дело в том, что чувствительность пировидикона различна в режимах панорамирования и обтюрации. В частности, наиболее перспективный на сегодня пировидикон РЕМЕТ имеет чувствительность в режиме панорамирования 100 мкА/Вт, в режиме обтюрации — 10 мкА/Вт [12]. Следовательно, в ряде задач предпочтительным окажется режим панорамирования, для которого характерно наличие такого значения скорости перемещения изображения по мишени, при котором выходной контраст для всех пространственных частот и разрешающая способность будут иметь максимальные значения.

Таким образом, с одной стороны, постоянно растёт спрос на измерительные приборы с характеристиками, которые могут быть обеспечены только телевизионной системотехникой, предпринимаются многочисленные попытки решения конкретных задач, в том числе в рамках создаваемых космических технологий, а с другой — вследствие упрощённого подхода к методологии измерений существует реальная опасность получить результаты, неадекватные возможностям ТИС.

В определённой мере при решении указанных проблем можно ориентироваться на результаты теоретических и практических исследований, ведущихся в НТУУ КПИ, где сформирована методология использования телевизионных приборов для анализа оптических полей, ведутся работы по созданию метрологического и программного обеспечения ТИС, и выполнен ряд проектов [7, 8], которые являются убедительной иллюстрацией потенциальных возможностей ТИС.

1. Горелик С. Л., Кац Б. М., Киврин В. И. Телевизионные измерительные системы.—М.:Связь, 1980.—168 с.
2. Порев В. А., Порев Г. В. Концептуальні аспекти використання приладів з електронним розгортанням зображення для аналізу оптичних полів // Наукові вісті НТУУ “КПІ”.—2001.—№ 1.—С.56–61.
3. Порев Г. В., Тавальбех Ф. М., Порев В. А. Експериментальне дослідження діапазону лінійності телевізійних засобів контролю // Наукові вісті НТУУ “КПІ”.—1998, №4.
4. Брацлавец П. Ф., Росселевич И. А., Хромов Л. И. Космическое телевидение.—М.:Связь, 1973.—87 с.
5. Порев В. А., Порев Г. В., Тавальбех Ф. М. Визначення ефективної довжини хвилі телевізійних засобів контролю температурних полів // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.— 1998.—№ 2.—С.168–170.
6. Свет Д. Я. Оптические методы измерения истинных температур.—М.: Наука, 1982.—296 с.
7. Порев В. А., Порев Г. В., Кісіль Р. І. Виділення контурів зображень складної форми методом радіальної розгортки // Методи та прилади контролю якості.—2000.—№6—С.32–36.
8. Порев В. А. Контроль температурного поля зоны плавки // Дефектоскопия.—2001, № 5.—с.7.
9. Порев В. А. Телевизионный пирометр // Приборы и техника эксперимента, 2002, №1, с.150.
10. Кейзан Б. Достижения в технике передачи и воспроизведения изображений: Пер. с. англ.—М.: Мир, 1980.—с.63.

11. Порев В. А. Застосування піровідконних приладів для аналізу оптичних полів // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.—1998, № 4—с.64.
12. Березкин Н. А., Дун А. З., Меркин С. Ю. Новая высокочувствительная телевизионная передающая трубка с пироэлектрической мишенью, использующая эффект модуляции тока электронного луча, РЕМЕТ (Pyroelectric Modulation Effect Tube) // Оптический журнал. 1997. №6. Т.64. С.93–98.