

УДК 53.082.6, 536.521.2, 617.7

**ОПТОВОЛОКОННЫЙ ПРЕЦИЗИОННЫЙ  
ИНФРАКРАСНЫЙ РАДИОМЕТР**

© 2011 г.

*И.Я. Орлов, А.В. Афанасьев, И.А. Никифоров*

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

orlov@rf.unn.ru

*Поступила в редакцию 27.06.2011*

Разработан беспроводной портативный микропроцессорный радиометр с двухканальной волоконно-оптической системой, предназначенный для прецизионных измерений в инфракрасном диапазоне длин волн. Радиометр измеряет поверхностную температуру объектов в диапазоне  $(10-45)^{\circ}\text{C}$  с погрешностью измерения менее  $0.1^{\circ}\text{C}$  при постоянной времени 1 с. Гибкие волноводы позволяют контролировать температуру в труднодоступных местах.

*Ключевые слова:* радиометр, пирометр, оптоволоконный, термокомпенсация.

Перспективность применения радиометров инфракрасного (ИК) излучения подтверждается практикой использования ИК тепловидения в ряде отраслей промышленности – металлургической, химической, электронной, медико-биологической. Им нет альтернативы при измерении температуры движущихся (металл на прокатном стане), труднодоступных или находящихся в опасных зонах (трансформаторы высокого напряжения) объектов [1]. Сфера применения ИК радиометров постоянно расширяется, при этом повышаются требования, предъявляемые к точности, чувствительности, пространственной разрешающей способности, быстродействию, динамическому диапазону ИК радиометров. Так, при проведении радиотермометрической диагностики заболеваний, особенно на ранней стадии болезни, требуется производить измерение температуры человека с высокой точностью и хорошей поверхностной разрешающей способностью [2]. Кроме того, важным фактором при медико-биологических исследованиях является компактность, простота и удобство использования прибора, особенно остро данная проблема стоит в области военной медицины.

Перечисленные проблемы, наряду с требованиями высокой точности, чувствительности и стабильности измерений, малой относительной погрешности  $<0.5\%$ , обеспечения высокого пространственного разрешения, портативности и удобства использования, а также необходимости измерения температуры в труднодоступных местах обуславливают разработку микропроцессорного ИК радиометра с волоконно-

оптической системой, способного работать в сложных внешних условиях.

Разработанный модуляционный ИК радиометр построен по модульному принципу и состоит из двух функционально-зависимых модулей – модуля оптико-электронного преобразователя (ОЭП) и модуля управления и обработки данных. На рис. 1 представлена структурная схема разработанного радиометра. Построение радиометра, состоящего из двух функциональных модулей, позволяет решить вопросы, связанные как с повышением функциональности прибора, использованием системных ресурсов и процессорного времени, подключением прибора к информационной сети и персональному компьютеру, так и с уменьшением размеров и удобством использования прибора.

В разработанном радиометре использована диафрагмированная волоконно-оптическая система, состоящая из ИК-световодов основного (измерительного) и компенсационного каналов. Соединение оптоволоконной и диафрагмированной оптической системы радиометра – разъемное. Модулятор расположен между оптической системой и приемником излучения, при этом собственное тепловое излучение оптической системы будет промодулировано и, следовательно, будет входить в измеряемое значение температуры объекта.

Используемое оптоволокно изготовлено в ИХВВ РАН (г. Н. Новгород) и представляет собой многожильный оптоволоконный кабель в непрозрачной оболочке из ПВХ с числом волокон в жгуте, равным 32, отполированными концами, загнанными в металлические втулки. Для

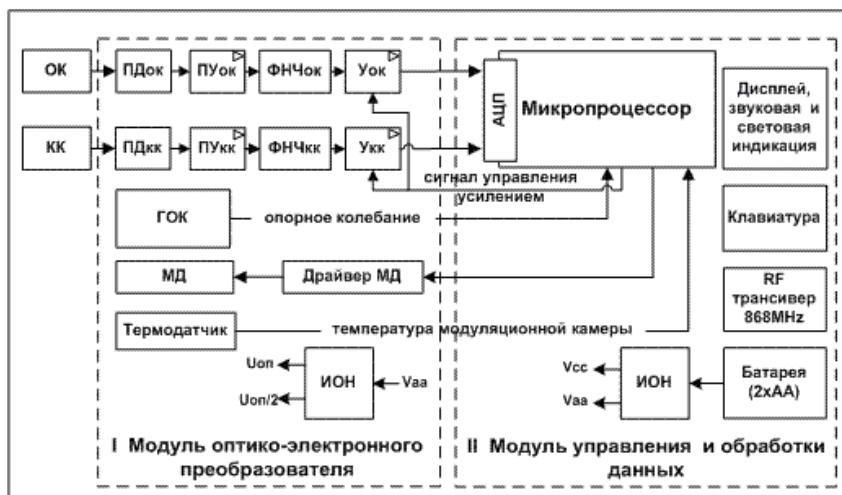


Рис. 1. Структурная схема ИК радиометра: ОК – основной (измерительный) канал, КК – компенсационный канал, ПД – пиродатчик, ПУ – предварительный усилитель, ФНЧ – фильтр низких частот, У – усилитель, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь, ИОН – источник опорного напряжения, МД – микродвигатель, ГОК – генератор опорного колебания

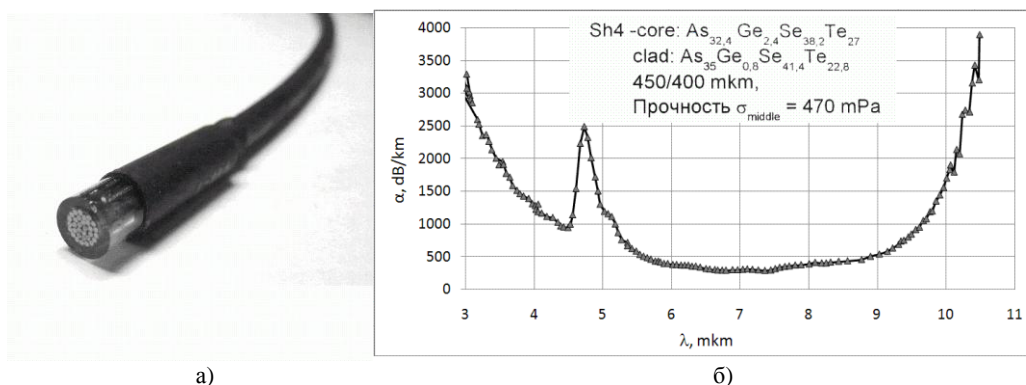


Рис. 2. Световод типа «Sh4» (а) и его спектральная характеристика (б) (коэффициент затухания оптического волокна  $\alpha$  от длины волны  $\lambda$ )

изготовления оптоволоконных жгутов было использовано волокно 2-х марок: «Xdt101» и «Sh4». В ходе экспериментов было принято решение использовать волокно типа «Sh4» (рис. 2), для которого были получены приемлемые значения чувствительности радиометра для медико-биологических исследований.

В качестве термочувствительного элемента ИК излучения выбран одноканальный пироэлектрический датчик (ПД) LME-345 фирмы «InfraTec». Данный ПД имеет удельную обнаружительную способность не менее  $2.6 \times 10^8 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{Вт}$  при частоте модуляции 10 Гц и оптический фильтр Si LWP на входе с окном пропускания не менее 50% в диапазоне 7.3–16 мкм, что позволяет получить высокую чувствительность измерений в исследуемом диапазоне температур.

Радиометр построен на базе высокопроизводительного 16 битного микроконтроллера (МК) семейства MSP430 компании TI. Ключевым отличием данного МК является возможность тактировать любой модуль периферии асинхронно

от ядра, что позволяет гибко управлять скоростью (а значит и потреблением) каждого модуля. МК обеспечивает функционирование прибора, осуществляет управление всеми его функциональными частями и обмен данными с ПК. Кроме того, МК осуществляет оптимальную фильтрацию сигнала и его интегрирование с различными значениями постоянной времени цифрового интегратора.

Программное обеспечение было распределено среди двух основных частей: основного и фоновых процессов. Работа прибора начинается в основном процессе с инициализации векторов прерываний, аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), системных таймеров, интерфейсов (SPI, UART, I2C) и периферийных устройств (рис. 3). Задаются такие параметры, как частота модуляции, равная 12.5 Гц, на которой чувствительность пироэлектрического датчика максимальная, коэффициенты усиления ОЭП. Цифровой потенциометр в связке с операционным усилителем обеспечивают переменный коэффициент усиления, что позволяет уве-



Рис. 3. Алгоритм работы основного процесса

личить чувствительность при измерении низких температур и заглубить при измерении высоких, тем самым расширить диапазон измеряемых температур.

После инициализации запускается вся аналоговая часть опико-электронного преобразователя: генератор опорного колебания (ГОК), усилители и аналоговые фильтры, подается питание на пирозлектрический датчик и разрешается обработка внешнего прерывания от ГОК. При этом внешнее прерывание настроено так, что по фронту сигнала опорного колебания можно определить положительный (Т+) и отрицательный (Т-) полупериоды модуляции.

ГОК представляет собой ИК оптопару, которая прерывается обтюратором модулирующей системы. Сигнал с оптопары проходит через триггер Шмидта и поступает на вход порта внешнего прерывания МК. Использование триггера Шмидта позволяет исключить дребезг сигнала на входе МК и исключить пологие фронты опорного сигнала. Сигнал от генератора опорного колебания является опорным для механизма синхронного детектирования (СД).

Встроенный аналогово-цифровой преобразователь представляет собой 7-канальный сигма-дельта АЦП разрядностью 12 бит, на вход которого поступает усиленный и отфильтрованный программируемыми фильтрами низких частот сигнал компенсационного и сигнального каналов. Причем, каналные входы АЦП сгруппированы между собой для синхронизации преобразований (рис. 4).

Для осуществления корректного преобразования аналогового сигнала в цифровой вид необходимо определить моменты времени, в которые будут производиться выборки аналогового сигнала. Флуктуации фазы и длительности кадра опорного колебания приводят к рассинхронизации аналогового входного сигнала  $U_{\text{ацп}}$  и опорного колебания  $U_{\text{оп}}$ . Чтобы исключить указанную погрешность вводится временная задержка  $\Delta T$  между фронтом импульса опорного колебания и моментом старта/остановки программного синхронного детектора. Т.е. создается внутреннее опорное колебание, сдвинутое по времени относительно модулирующего на  $\Delta T$ , и которое используется как опорное для операции синхронного детектирования. Аналогово-цифровое преобразование осуществляется на частоте 4096 Гц в интервале 37 мс полупериода синхронного детектора, при том что интервал полупериода опорного колебания равен 40 мс. Таким образом, опорное колебание является лишь триггером для запуска и остановки программного синхронного детектора; фаза и длительность кадра которого выбирается из критерия наименьшей ошибки измеренной температуры. Значение СД сдвига определяется при автоматической калибровке радиометра.

Надо учесть, что синхронное детектирование сигнала проводится средствами цифровой обработки. Для этого значения АЦП, полученные в интервале Т-, инвертируются. Значение выборки сигнала на выходе 12-битного АЦП может принимать значение от 0 до 4095, и можно считать, что выборки, сделанные в положительный полупериод опорного колебания, принимают значения от 2048 до 4096, а в отрицательный – от 0 до 2047. Причем за значение «0» измеряемого сигнала может быть принято как значение АЦП 2047, так и 2048 ввиду симметричности амплитудной характеристики АЦП.

По окончании преобразования в АЦП формируется системное прерывание, в обработчике которого стартует фоновый процесс (рис. 5). В фоновом процессе происходит аналогово-цифровое преобразование, формирование опорного сигнала СД и отсчетов для подсчета частоты модуляции. Отличительной особенностью

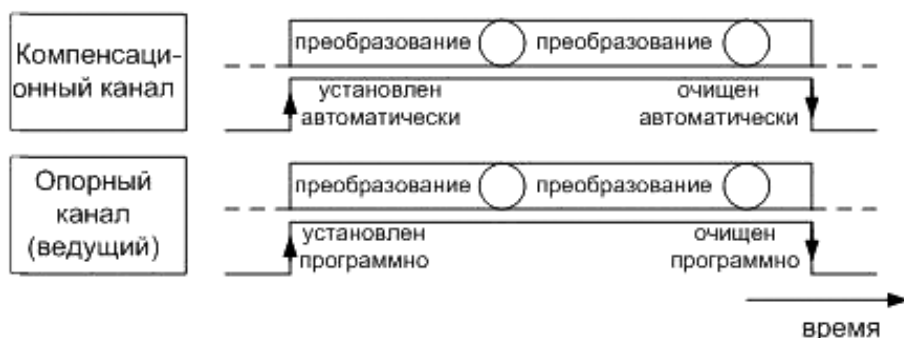


Рис. 4. Процесс аналого-цифрового преобразования сгруппированных каналов

данного радиометра является то, что для синхронного накопления используется квадратическое значение сигнала, т.е. на выходе синхронного детектора формируется среднеквадратическое значение сигнала (RMS) для каждого канала измерения

$$S_{СК,КК} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N x_n^2}$$

где  $N$  – число выборки в полупериоде. Экспериментальные исследования чувствительности и стабильности радиометра показали правильность сделанного выбора. RMS записывается в виде 16-битного массива 3-го порядка, который хранится в 48-битных регистрах процессора, удобных для дальнейших математических выселений с большими числами. Это позволило сократить нагрузку на центральный процессор при выполнении математических операций до 30%.

Фоновый процесс передает управление основному процессу через выставление соответствующих флагов. В основном процессе реализован цифровой фильтр данных, который методом скользящего окна интегрирует значения сигнала по кадрам, причем постоянная времени интегрирования может быть задана во время измерения в пределах от 80 мс до 2 сек.

Модуляционный принцип измерения радиометров предусматривает формирование выходного сигнала, пропорционального разнице величин, одна из которых пропорциональна температуре объекта, а вторая, опорная величина, пропорциональна температуре эталонного излучателя. В модуляционных радиометрах инфракрасного излучения за эталонное принимается излучение, пропорциональное температуре механического модулятора  $T_0$ . Датчик температуры устанавливается в непосредственной близости от вращающегося модулятора. Сигнал с выхода синхронного детектора поступает в блок вычисления температуры, в котором значения кодов АЦП ИК радиометра преобразуются в температуру, с использованием калибровочной кривой  $T = f^{-1}(S(T))$ . На выходе блока вычисления

температуры формируется температура объекта  $T_x = (T_0 + T_{СК}) - T_{КК}$ .

Аналоговый тракт радиометра построен на базе малошумящих прецизионных ОУ компании «Analog Devices». Для уменьшения возможного влияния шумов длина высокочастотных линий была оптимизирована. Аналоговый тракт измерительной системы локализован, что обеспечивает возможность экранирования и, тем самым, уменьшения влияния высокочастотных шумов.

Источник постоянного опорного напряжения (ИОН) предназначен для генерации прецизионных постоянных опорных напряжений –  $U_{оп}/U_{оп}$ , необходимых для нормальной работы пироэлектрического модуля и аналогового тракта модуля оптико-электронного преобразователя.

МД вращает обтюратор, используемый в качестве механического модулятора. Основное преимущество механических модуляторов перед всеми другими типами заключается в уникальности совокупности характеристик – большая глубина модуляции (высокий контраст) при почти неограниченном спектральном окне прозрачности. Глубина модуляции составляет практически 100% для поглощающих и несколько меньше (95–100)% для отражающих модуляторов. Драйвер МД предназначен для обеспечения работы МД на данной частоте модуляции. Для изменения частоты модуляции используется 8-битный ЦАП, управляемый цифровыми сигналами микропроцессора. Так как чувствительность ПД зависит от частоты модуляции падающего излучения, то флуктуации этой частоты вносят погрешность в измерения. В радиометре реализован алгоритм стабилизации частоты вращения обтюратора на основе алгоритма ПИД-регулирования. Это позволяет, в случае необходимости, расширить или сузить динамический диапазон измеряемых температур, т.е. увеличить чувствительность при измерении низких температур и «заглубить» ее при измерении высоких температур.



Рис. 5. Алгоритм работы фонового процесса

МД, ЦАП, буфер образуют петлю автоматического регулирования частоты модуляции [3].

ГОК представляет собой ИК оптопару, которая прерывается обтюратором модулирующей системы. Сигнал с оптопары проходит через триггер Шмидта и поступает на вход порта внешнего прерывания МК. Использование триггера Шмидта позволяет исключить «дребезг» сигнала на входе микроконтроллера и исключить пологие фронты опорного сигнала. Сигнал от ГОК является опорным для механизма синхронного детектирования (СД). Дело в том, что поскольку тепловое электромагнитное излучение объекта носит шумовой характер, то для измерения яркостной температуры необходимо применение известных методов измерения слабых шумовых излучений. Применение предварительной модуляции теплового потока позволяет использовать такой метод оптимального выделения сигналов на фоне собственных шумов как СД. Синхронное детектирование является оптимальной операцией при приеме сигналов на фоне шума и имеет ряд существенных преимуществ перед нелинейным детектированием, а именно: большой динамический диапазон, высокую линейность амплитудной

характеристики, позволяет выделить знак разности яркостных температур источника излучения и опорного излучателя.

Проведение измерений поверхностной температуры в инфракрасном диапазоне длин волн сопровождается погрешностями, обусловленными изменениями окружающего температурного фона. В таких условиях проходят измерения большинства как технологических, так и медико-биологических процессов. Как правило, уменьшение влияния температурного фона приводит к существенному усложнению конструкций радиометрических измерителей, что влияет на портативность прибора. В целях компенсации возможного влияния изменения температуры световода на точность измерения в радиометре предусмотрен компенсационный канал с закрытым приемным окном, который находится в тех же условиях, что и измерительный канал, но не пропускает излучение объекта [3]. Принимаемые измерительным и компенсационным каналами излучения поступают в модуляционную камеру оптико-электронного преобразователя. Промодулированные механическим модулятором излучения преобразуются измерительным и компенсационным ПД в переменные напряжения, которые усиливаются и поступают на вход 12-битного АЦП микроконтроллера. При этом сигнал, полученный с компенсационного канала, необходимо вычитать из сигнала измерительного канала. Рисунок 6 показывает, что использование компенсационного канала позволяет уменьшить погрешность измерений, вызванную дрейфом температуры волоконно-оптической системы.

Для коммуникации с компьютером в радиометре предусмотрен модуль RF трансивера, работающий в нелицензируемом диапазоне 868 МГц и построенный на базе ультрамаломощного однокристалльного FSK-трансивера CC1100 от компании TI с рекордно низким напряжением питания, и модуль RF-USB dongle на стороне ПК. Беспроводной канал передачи данных позволяет объединить радиометрическую систему и ПК в единый измерительный комплекс, решить вопросы с удобством использования прибора и расширить область его применения, дает возможность упрощенного подключения беспроводных приборов в самоорганизующуюся сеть. Использование беспроводных приборов для измерения параметров технологических процессов позволяет увеличить количество собираемой информации для более эффективного управления. Используя ПК и специально разработанное программное обеспечение, можно проводить необходимую обра-



Рис. 6. Температура объекта с компенсацией дополнительным каналом (кривая 2) и без ее учета (кривая 1)

ботку полученных данных (например, цифровую фильтрацию данных, вычисление дисперсии результатов измерения), их отображение в реальном времени в виде графика, а также сохранение данных в файл.

Таким образом, разработанный ИК радиометр обеспечивает высокую точность, чувствительность и стабильность измерений, высокое поверхностное разрешение, устранение влияния внешнего фона, возможность измерения температуры в труднодоступных местах, портативность, возможность беспроводного удаленного мониторинга температурных режимов объектов.

*Работа выполнена при поддержке Правительства Российской Федерации для государ-*

*ственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования (грант 11.G34.31.0066).*

#### Список литературы

1. Линеверг Ф. Измерение температуры в технике. Справочник. М.: Metallurgy, 1980.
2. Розенфельд Л.Г. // Врачебное дело. 1991, № 1, С. 28–31
3. Афанасьев А.В., Орлов И.Я., Никифоров И.А. Прецизионный радиометр инфракрасного излучения // Датчики и системы. 2009. № 11. С. 35–38.
4. Патент 2215269 РФ МПК G01J5/00. Пирометр / А.Н. Семенов, В.Н. Тюрин, И.Я. Орлов, А.В. Афанасьев // Заявл. 06.05.02; Опубл. 27.10.03.

## PRECISION INFRARED FIBER OPTIC RADIOMETER

*I.Ya. Orlov, A.V. Afanasyev, I.A. Nikiforov*

A wireless portable microprocessor based two channel fiber optic radiometer designed for precision temperature measurements in the IR region has been developed. The radiometer measures the surface temperature of objects within 10-45°C with the measurement error less than 0.1°C and a time constant of 1 s. Flexible fiber optic waveguides allow temperature control in hard-to-reach places.

*Keywords:* radiometer, pyrometer, fiber optic, temperature compensation.