

# Разработка способа численной оценки достоверности результатов измерений для интеллектуального пирометрического датчика

М. В. Шевченко

Омский государственный технический университет

mshevchenkoooo@mail.ru

А. Б. Ионов

Омский государственный технический университет

abionov@omgtu.ru

**Аннотация.** В статье предложен и описан порядок расчета численного значения оценки достоверности результатов измерений для возможной реализации в интеллектуальных измерительных устройствах и системах. Под достоверностью в данном случае понимается вероятность соответствия текущих фактических условий измерительной задачи ограничениям используемой измерительной модели. Основная идея способа заключается в вероятностном анализе степени совместимости показаний основного и дополнительного метрологического измерительных каналов с учетом предварительно рассчитанных актуальных значений их неопределенности. Показано, что предлагаемый подход может быть полезен при проведении измерений в нестационарных условиях, что, как правило, характерно для задач бесконтактного мониторинга температуры в промышленности.

**Ключевые слова:** интеллектуальные измерительные системы; достоверность результата измерений; информационная избыточность; пирометрия

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время интеллектуальные датчики (ИД) и интеллектуальные измерительные системы получают все большее распространение в самых разнообразных сферах, включая промышленность, транспорт, область энергетики и т.п. Одной из основных задач их внедрения является повышение достоверности результатов измерений для минимизации риска возникновения критических ситуаций [1].

Известно [2], что температура, как количественный показатель внутренней энергии тел, является одной из универсальных характеристик объектов и процессов физического мира и поэтому, во многих случаях, может служить информативным показателем, описывающим, как их внутреннее состояние, так и характер их взаимодействия с окружающей средой. Среди основных достоинств методов бесконтактного измерения температуры (пирометрия, тепловидение) следует выделить высокое быстродействие, возможность измерения температуры труднодоступных объектов, отсутствие контакта с объектом контроля и другие. В промышленности использование методов и средств пирометрии позволяет, в частности, решать задачи управления технологическими процессами, повышения энергоэффективности и предупреждения аварий.

С другой стороны, важной особенностью пирометрии является то, что результаты измерений сильно зависят от внешних условий (состояния объекта и среды распространения излучения), которые в условиях промышленности могут быть подвержены резким изменениям [3]. В ряде случаев проблему можно частично решить введением внешней коррекции со стороны оператора, однако, влияние некоторых факторов (например – эффекта поглощения излучения водяным паром при его распространении от объекта к пирометру) заметно скомпенсировать практически невозможно, при этом итоговая погрешность может достигать десятков градусов и более [4].

Стандартные методы оценки неопределенности, реализуемые в ИД в режиме реального времени, оказываются в подобных случаях некорректными, поскольку не могут адекватно учесть все многообразие нестационарных факторов при построении бюджета неопределенностей. Возможным путем преодоления данной проблемы является формирование датчиком дополнительного количественного показателя, отражающего степень достоверности конкретных результатов измерений, что позволит повысить качество (степень адекватности) последующей их обработки в автоматическом режиме.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе [1] сделана попытка провести аналогию между теорией связи и метрологией, особо выделяя общий для этих двух сфер перспективный подход – использование информационной избыточности для повышения достоверности (как при передаче информации, так и при ее первичном получении путем измерения). Углубляясь в данную аналогию, можно отметить, что для системы связи (в особенности – радиосвязи) реальная достоверность принимаемой информации существенно варьируется вследствие нестационарности помеховой обстановки [5]. С целью обнаружения факта повреждения данных в алгоритмах помехоустойчивого кодирования предусмотрена избыточность – некоторая часть информации в пакете данных передается, по крайней мере, дважды. Например, в случае циклического избыточного кода (CRC-кода) это контрольная сумма [6]. Тогда проверка целостности фактически заключается в проверке на совместимость (эквивалентность) значений двух разноплановых оценок одного и того же показателя, вычисляемых на основе содержащейся в пакете избыточной информации.

На рис. 1 приведена обобщенная схема (построенная в соответствии с [7]) двухканального интеллектуального пирометра, ориентированного на измерение температур в диапазоне 100...600 °С в режиме непрерывного мониторинга. Она содержит в своем составе основной (измерительный) канал (ОК), а также метрологический (дополнительный) канал (МК). Итоговая оценка температуры ( $T$ ) формируется на основе показаний основного широкополосного канала (с повышенным соотношением сигнал/шум на выходе приемника излучения). Дополнительный канал (как правило – узкополосный) предназначен только для проведения процедуры метрологического самоконтроля, в данном случае – для оценки достоверности ( $D$ ), а также итоговой неопределенности ( $\sigma_T$ ) результата измерения.

Анализируя специфику обобщенной задачи пирометрии на примере схемы рис. 1, можно отметить, что информация об истинном значении температуры объекта является одним из параметров моделей выходного сигнала каждого канала. Если указанные используемые модели адекватны текущим условиям измерений, то рассчитанные пирометром оценки температуры  $T_1$  и  $T_2$  будут совпадать в пределах учитываемого уровня неопределенности, т. е. будут совместимы. Тогда, контроль целостности информации о температуре объекта (по отношению к внешним факторам-помехам) также может быть проведен путем проверки на совместимость (эквивалентность) двух оценок одного и того же параметра по аналогии с [8]. Для этого могут быть потенциально задействованы те же виды информационной избыточности, что и при реализации процедур метрологического самоконтроля (структурная, функциональная, временная) [1, 7].

Таким образом, в рамках настоящей работы под достоверностью результата измерения ( $D$ ) понимается вероятность соответствия текущих фактических условий измерительной задачи ограничениям используемой ИД модели измерений. Другими словами – вероятность того, что данная модель адекватно учитывает все внешние дестабилизирующие факторы (включая случайные), проявляющиеся в конкретный момент времени. Предлагаемый в настоящей работе способ оценки достоверности результатов измерений основан на процедуре вероятностного анализа степени совместимости показаний основного и дополнительного метрологического каналов.

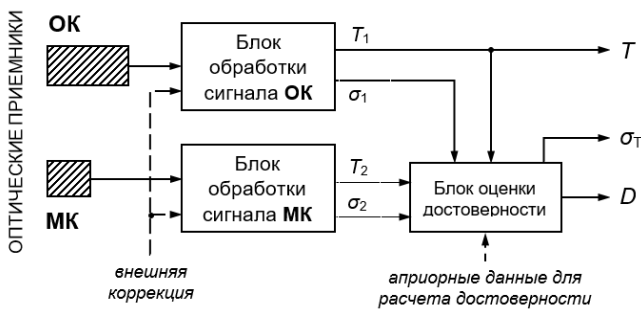


Рис. 1. Схема интеллектуального датчика для бесконтактного мониторинга температуры в нестационарных условиях

### III. ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ

Исходными данными для расчета количественного значения оценки достоверности результата измерения являются:

- показания основного канала – вычисленное значение температуры объекта  $T_1$  совместно с актуальной оценкой ее неопределенности  $\sigma_1$ ;
- показания дополнительного метрологического канала – вычисленные значения температуры объекта  $T_2$  и ее неопределенности  $\sigma_2$  (предполагается, что  $\sigma_1 \leq \sigma_2$ );
- значение уровня допустимой неучтенной неопределенности  $\sigma_A$ , наличие которой может дополнительно обосновать различие показаний  $T_1$  и  $T_2$ ;
- значение границы доверительного интервала  $\Delta\varepsilon$  показаний дополнительного канала, используемое при оценке их адекватности (точности);
- априорное значение достоверности показаний  $D_{PR}$  основного измерительного канала (актуальное до проведения процедуры оценки достоверности).

Идея предлагаемого подхода состоит в оценке вероятностей трех возможных несовместных ситуаций-исходов, составляющих в терминах теории вероятностей полную группу событий:

- $P_1$  – показания основного и метрологического канала совместимы (отклонения между  $T_1$  и  $T_2$  обусловлены наличием допустимых источников неопределенности  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_A$ );
- $P_2$  – показания основного и метрологического канала несовместимы (различие между  $T_1$  и  $T_2$  невозможно обосновать уровнем принимаемой во внимание неопределенности);
- $P_3$  – процедуру оценки достоверности невозможно провести адекватным образом по причине сильного рассеяния показаний дополнительного метрологического канала (вычисленное значение текущей неопределенности  $\sigma_2$  слишком велико).

При принятии допущения о нормальности закона распределения неопределенности (как и далее везде) вероятность  $P_3$  может быть вычислена на основе выражения:

$$P_3 = 1 - \int_{-\Delta\varepsilon}^{\Delta\varepsilon} \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(t - T_2)^2}{2\sigma_2^2}\right] dt.$$

Другими словами, вероятность выхода показания дополнительного канала за пределы доверительного интервала  $[-\Delta\varepsilon; \Delta\varepsilon]$  принимается за количественный показатель степени его неадекватности.

Для оценки значения показателя  $P_1$  необходимо провести вероятностный анализ случайной величины, представляющей собой разницу между показаниями основного и дополнительного каналов. Поскольку события, соответствующие вероятностям  $P_1$  и  $P_3$ , являются несовместными, то в этом случае (при расчете  $P_1$ ) плотность вероятности показаний дополнительного

канала  $W_{C2}(T)$  следует ограничить пределами доверительного интервала  $[-\Delta\varepsilon; \Delta\varepsilon]$  и дополнительно нормировать на величину  $(1 - P_3)$  в знаменателе:

$$W_{C2}(x) = \frac{h(x + \Delta\varepsilon) - h(x - \Delta\varepsilon)}{\sigma_2 \sqrt{2\pi} \cdot (1 - P_3)} \cdot \exp\left[-\frac{(x - T_2)^2}{2\sigma_2^2}\right],$$

где  $h(x)$  – функция Хэвисайда (единичный скачок).

Тогда плотность вероятности  $W_{\Delta}(\delta)$  разности показаний основного и метрологического каналов может быть получена путем вычисления свертки (с учетом уровня дополнительной неопределенности  $\sigma_A$ ):

$$W_{\Delta}(\delta) = \int_{-\Delta\varepsilon}^{\Delta\varepsilon} \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi} \cdot (1 - P_3)} \cdot \exp\left[-\frac{t^2}{2\sigma_2^2}\right] \times \\ \times \frac{1}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_A^2} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\delta - t + T_2 - T_1)^2}{2 \cdot (\sigma_1^2 + \sigma_A^2)}\right] dt.$$

В качестве выражения для оценки вероятности  $P_1$  предлагается использовать отношение значения плотности вероятности при  $\delta = 0$  к максимальному ее значению (при  $\delta = T_1 - T_2$ ) с обязательным учетом факта несовместности событий, соответствующих  $P_1$  и  $P_3$ :

$$P_1 = \frac{W_{\Delta}(0)}{W_{\Delta}(T_1 - T_2)} \cdot (1 - P_3).$$

Таким образом, данное значение будет максимально при  $T_1 = T_2$ . После подстановки и упрощения получим:

$$P_1 = \frac{\int_{-\Delta\varepsilon}^{\Delta\varepsilon} \exp\left[-\frac{(T_1 - T_2 + t)^2}{2 \cdot (\sigma_1^2 + \sigma_A^2)} - \frac{t^2}{2 \cdot \sigma_2^2}\right] dt}{\int_{-\Delta\varepsilon}^{\Delta\varepsilon} \exp\left[-\frac{t^2}{2 \cdot \left(\frac{1}{\sigma_1^2 + \sigma_A^2} + \frac{1}{\sigma_2^2}\right)}\right] dt} \cdot (1 - P_3).$$

Итоговое значение достоверности результата измерения  $D$  определяется в соответствии с выражением:

$$D = P_1 + P_3 \cdot D_{PR}.$$

Рассмотрим пример расчета оценки достоверности. Зададим:  $T_1 = 300$ ;  $\sigma_1 = 0,5$ ;  $\sigma_A = 2,5$ ;  $\Delta\varepsilon = 5$ ;  $D_{PR} = 0,5$ . Проанализируем влияние показаний дополнительного канала ( $T_2$  и  $\sigma_2$ ) на итоговый результат.

Для наглядности, на рис. 2 приведены графики, отображающие нормированные по максимальному значению плотности вероятности рассеяния показаний основного  $W_{1H}(T)$  и дополнительного  $W_{2H}(T)$  каналов (для демонстрации соотношения между  $T_1$  и  $T_2$ ,  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ ). Рис. 2а соответствует незначительному отличию средних значений ( $T_1 = 300$ ,  $T_2 = 299$ ), рис. 2б – их заметному расхождению ( $T_2 = 292$ ). На рис. 3 показаны плотности распределения вероятности  $W_{\Delta}(\delta)$  разности показаний указанных выше каналов при различной комбинации параметров в соответствии с данными, представленными на рис. 2. Вертикальные линии и жирные точки на графиках рис. 3 дают представление о значениях  $W_{\Delta}(\delta)$ , по которым выполняется расчет  $P_1$  для каждого случая. Вычисленные значения  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  и  $D$ , соответствующие указанным вариантам примера, сведены в табл. 1.

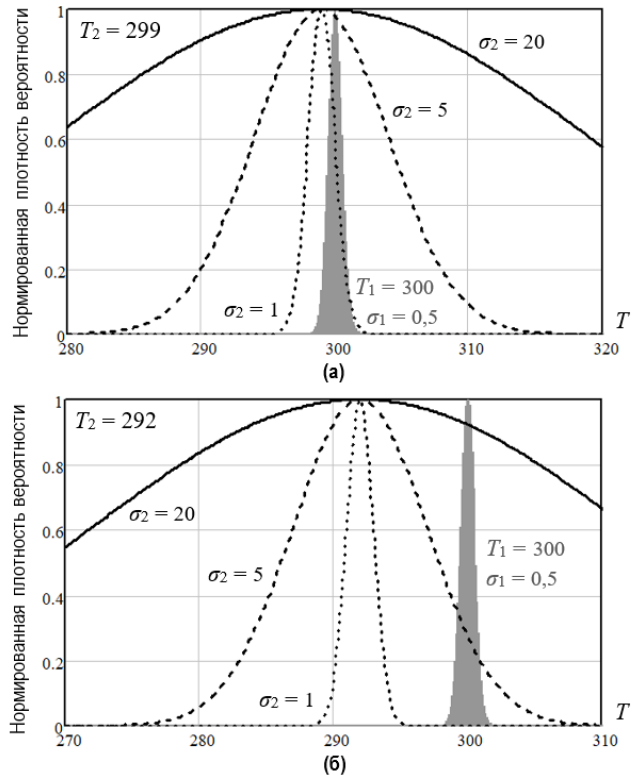


Рис. 2. Нормированные по максимальному значению плотности вероятности рассеяния показаний основного (серая заливка) и дополнительного (черные линии) каналов для различной комбинации параметров  $T_2$  и  $\sigma_2$

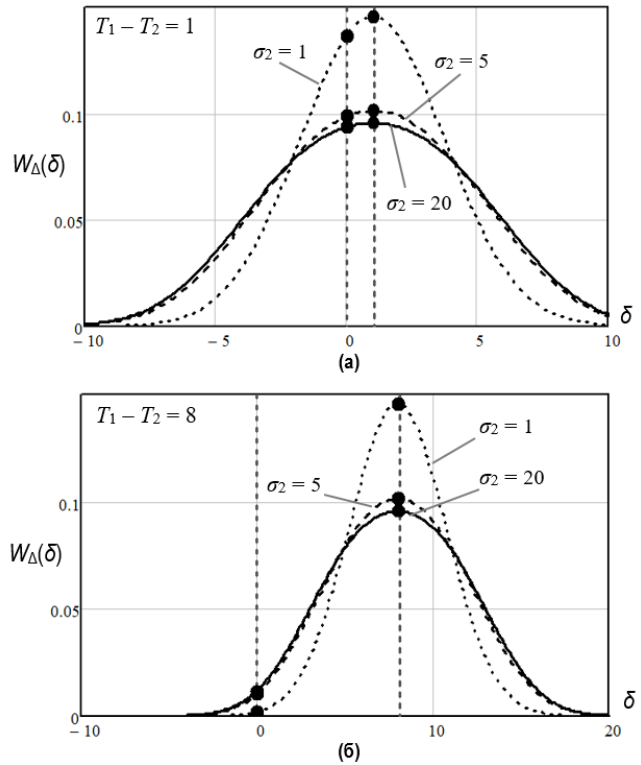


Рис. 3. Плотности распределения вероятности разности показаний основного и дополнительного каналов для различной комбинации параметров  $T_2$  и  $\sigma_2$  (в соответствии со случаями, показанными на рис. 2)

ТАБЛИЦА I. Данные, полученные при расчете достоверности для случаев, показанных на рис. 2-3

$T_1 = 300, \sigma_1 = 0,5$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$D$
$T_2 = 299, \sigma_2 = 1$	0,936	0,064	0,000	<b>0,936</b>
$T_2 = 299, \sigma_2 = 5$	0,665	0,018	0,317	<b>0,824</b>
$T_2 = 299, \sigma_2 = 20$	0,194	0,004	0,802	<b>0,595</b>
$T_2 = 292, \sigma_2 = 1$	0,014	0,986	0,000	<b>0,014</b>
$T_2 = 292, \sigma_2 = 5$	0,070	0,613	0,317	<b>0,229</b>
$T_2 = 292, \sigma_2 = 20$	0,025	0,173	0,802	<b>0,426</b>

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для демонстрации предлагаемого способа было проведено моделирование процесса бесконтактного измерения температуры интеллектуальным пирометром (рис. 1). Моделирование выполнялось по аналогии с методикой, изложенной в [4]. Спектральная область чувствительности приемников излучения: 2,6...4,2 мкм (основной канал); 3,51...3,65 мкм (метрологический). Значения оценок неопределенности для каждого канала ( $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ ) рассчитаны по аналогии с [4].

Предварительно алгоритм пирометра был условно откалиброван под задачу проведения измерений с расстояния 15 м при уровне влажности окружающего воздуха 10,4 г/м<sup>3</sup>. Далее были промоделированы четыре измерительные ситуации, соответствующие реальным промышленным условиям и отличающиеся уровнем влажности атмосферы (среды распространения излучения): 1) 10,4 г/м<sup>3</sup> (влажность 60 % при температуре воздуха 20°C); 2) 16,5 г/м<sup>3</sup> (95 % при 20°C); 3) 24,3 г/м<sup>3</sup> (80 % при 30°C); 4) 41 г/м<sup>3</sup> (80 % при 40°C).

На рис. 4 показана полученная путем моделирования зависимость систематического отклонения показаний пирометра (фактически – основного канала) от температуры объекта, изменяемой в диапазоне от 100 до 600 °C, для перечисленных выше уровней концентрации водяного пара. Как и предполагалось, с увеличением влажности воздуха погрешность возрастает, что в итоге может привести к недопустимым последствиям. На рис. 5 приведены результаты моделирования значений оценки достоверности, дополнительно формируемой пирометром ( $\sigma_A = 2,5$  °C;  $\Delta\varepsilon = 5$ ;  $D_{PR} = 0,5$ ). Ее наличие дает возможность оператору своевременно разобраться в ситуации и принять соответствующие меры.

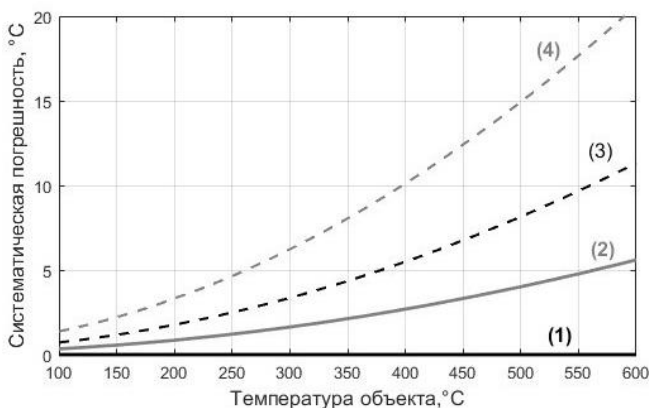


Рис. 4. Систематическая погрешность пирометра при различных уровнях концентрации водяного пара в среде распространения излучения: кривая (1) – абсолютная влажность равна 10,4 г/м<sup>3</sup> (условия калибровки); (2) – 16,5 г/м<sup>3</sup>; (3) – 24,3 г/м<sup>3</sup>; (4) – 41 г/м<sup>3</sup>

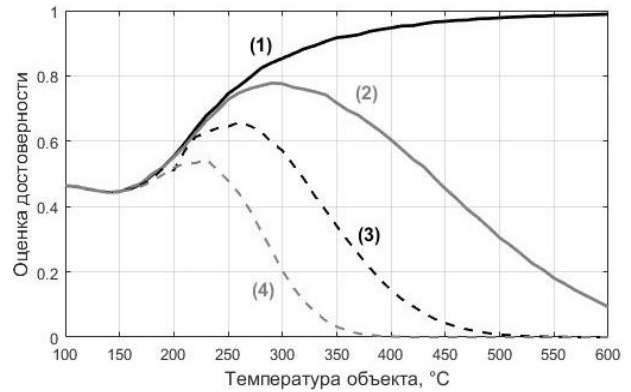


Рис. 5. Результаты моделирования значений оценки достоверности, формируемой пирометром, для случаев, соответствующих рис. 4

В диапазоне ниже 200 °C для всех случаев значение оценки достоверности близко к 0,5 по причине высокого уровня неопределенности метрологического канала ( $\sigma_2 = 38,9$  °C при 100 °C), при этом с ростом температуры наблюдается значительное его снижение ( $\sigma_2 = 1,2$  °C при 350 °C;  $\sigma_2 = 0,54$  °C при 500 °C), что позволяет принимать более однозначное решение о степени соответствия текущих условий измерения нормальным (стандартным).

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый способ оценки достоверности результатов измерений, безусловно, не является единственно возможным. По мнению авторов, его достоинство заключается в формировании количественного значения, которое может быть задействовано при принятии решений на верхнем уровне в автоматическом режиме. Таким образом, параллельно рассчитываемые интеллектуальным датчиком оценки достоверности и неопределенности, дополняя друг друга, должны способствовать повышению качества измерений, проводимых в нестационарных условиях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Пронин А.Н., Сапожникова К.В., Тайманов Р.Е. Достоверность измерительной информации в системах управления. Проблемы и решения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т.9. №3. С. 32-37.
- [2] Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД Спектр, 2009. 544 с.
- [3] Ионов А.Б. Метрологические проблемы пирометрии: анализ и перспективы преодоления // Измерительная техника. 2013. №6. С. 42-45.
- [4] Ионов А.Б., Чернышева Н.С., Ионов Б.П., Рябова М.А. Оценка влияния атмосферного водяного пара на результаты бесконтактного измерения температуры // Омский научный вестник. 2023. №3. С. 131-139.
- [5] Котов П.А. Повышение достоверности передачи цифровой информации. М.: Связь, 1966. 184 с.
- [6] Турдиев О.А., Клименко С.В., Тухтаходжаев А.Б. Оценки эффективности обнаружения ошибок контрольного суммирования (CRC) передаваемых данных // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2019. №8. С. 54-58.
- [7] Chernysheva N.S., Ionov A.B., Ionov V.P. The Main Principles of Development of an Intelligent Multi-Channel Radiation Thermometer // 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), June 29 – July 03, 2020 / Chemal, Russia, 2020. P. 226-233.
- [8] Duta M., Henry M. The Fusion of Redundant SEVA Measurements // IEEE Trans. on Control Sys. Tech. 2005. V.13. №2. P. 173-184.