

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ

Введение. На сегодня можно выделить три главные проблемы обеспечения надежности работы беспроводных сенсорных систем (БСС): создание сенсорных систем заданной конфигурации, обеспечивающих покрытие заданного участка сельхозугодий с жесткой привязкой сенсоров к местности; защита сенсоров и каналов связи от действия электрических и магнитных помех, наводок, перегруженности каналов связи, состояния атмосферы, окружающей среды и т. д.; создание метрологического обеспечения сенсоров и программно-алгоритмического обеспечения БСС. Первая проблема решается с применением теории множеств

и гиперграфов с учетом априори созданного алгоритма управления информационными потоками [1] и программным обеспечением маршрутизации и концентрации данных. Вторая проблема решается как конструктивно-технологическими, так и схематехническими методами [2]. Решение третьей проблемы связано с созданием интеллектуальных сенсоров (смарт-сенсоров [3]) и решается за счет введения информативной избыточности в потоки информации с последующей их обработкой с помощью персонального компьютера, например, концентратора или центрального процессора.

Цель работы. В работе описано два метода метрологического обеспечения смарт-сенсоров БСС, основанные на получении информативной избыточности и обработке результатов ряда измерений по априори выведенному алгоритму.

Результаты. Исследования показали, что проблема определения основных параметров метрологической надежности (МН) БСС по-прежнему остается актуальной. Она связана в первую очередь с решением задачи самокалибровки смарт-сенсоров БСС.

На сегодня можно выделить такие проблемы оценки МН БСС.

1. Отсутствие уравнений величин, описывающих закономерные связи метрологических характеристик (МХ) с параметрами МН БСС и предназначенных для решения задач прогнозирования и определения параметров МН БСС с сенсорами разных типов.

Основное внимание уделено описанию двух методов метрологического обеспечения смарт-сенсоров БСС. Они основаны на введении информационной избыточности путем проведения трех тактов измерений физической величины смарт-сенсором с последующей обработкой полученных данных по априори выведенному алгоритму. Показаны недостатки и достоинства методов. Констатируется, что использование теории избыточных измерений это единственно правильный путь решения задачи самокалибровки сенсоров и измерительных приборов.

Ключевые слова: оптические смарт-сенсоры, самокалибровка, беспроводные сенсорные системы, методы избыточных измерений, проблемы метрологической надежности.

Для этого актуальна как разработка строго вероятностных математических моделей, описывающих закономерную связь МХ и параметров МН БСС между собой со временем до наступления метрологического отказа (МО), так и разработка вероятностно-физических моделей МН БСС, наиболее отражающие происходящие в них процессы старения и деградации во времени чувствительных, конструктивных и функциональных элементов под действием внешних и внутренних факторов окружающей среды.

2. Разработка путей и методов стабилизации начального положения графиков наиболее часто используемых в приборостроении функций плотности распределения приведенной погрешности измерения и их вершин при изменениях коэффициента формы и времени наработки на МО. Это необходимо для преобразования и использования существующих функций плотности вероятности для решения задач МН БСС.

3. Установление взаимосвязи между временем $T_{но}$ наработки на МО и приведенной погрешностью измерения δ_x . Это необходимо для установления влияния начального значения погрешности δ_{x0} на значение времени $T_{но}$ наработки на МО канала связи смарт-сенсоров с сигнальным процессором концентратора.

4. Разработка современных методик определения параметров МН каналов связи при разных функциях плотности распределения их МХ и заданных прогнозных значениях параметров этой функции как при стабильных начальных значениях функции плотности вероятности, например, приведенной погрешности измерения, так и при нестабильных (при наличии энтропийного интервала (полосы) неопределенности).

5. Разработка и практическое использование современных методов измерений физических величин (ФВ), например, методов избыточных измерений, для определения текущих значений МХ средств измерений (СИ) независимо от проведения текущих (календарных и внеочередных) проверок и значений параметров нелинейной и нестабильной функции преобразования смарт-сенсора. Это необходимо для успешного прогнозирования и определения действительных значений параметров МН БСС.

6. Выделение типов БСС и соответствующих функций плотности вероятности, у которых моменты времени наработки на метрологический отказ совпадают с моментами времени наработки на функциональный отказ. Это целесообразно осуществить для дальнейшего высокоточного определения параметров МН данных типов БСС.

7. Выделение типов БСС и соответствующих функций плотности вероятности, у которых время проведения первой поверки составляет $(0,3...0,5)T_{но}$. Это необходимо для упорядочения или разделения типов БСС по стабильности МХ их смарт-сенсоров.

8. Разработка современных методик определения времени проведения первой и последующих проверок, учитывающих текущие значения приведенной погрешности измерений, коэффициента метрологического запаса и других параметров МН БСС.

9. Создание базы данных по прогнозным значениям времени наработки на отказ и коэффициента формы для БСС разного типа.

10. Разработка современных методик определения времени наработки на МО для прецизионных БСС и БСС с малым жизненным циклом (БСС с биосенсорами, СИ специального назначения и т. д.).

11. Обоснование перечня нормируемых показателей МН БСС. Это необходимо для конкретизации параметров МН БСС и ограничения числа определяемых параметров и методик.

12. Разработка нормативных документов, связывающих обобщенную характеристику СИ (класс точности) со временем наработки на МО и коэффициентом формы.

Решение перечисленных проблем позволит существенно повысить качество БСС.

Самокалибровка – основной доступный прием метрологического обеспечения сенсоров беспроводных сенсорных систем. Представляют интерес два варианта МО оптических сенсоров БСС. Первый предназначен для использования оптических сенсоров без возможности нормированного изменения (автоматической перестройки) их параметров, например, чувствительности или крутизны преобразования, а также смещения. Этот метод подобен методу, описанному в работе [4]. Второй вариант используется при избыточных (5 – 7) измерениях (преобразованиях) потоков измерительно-преобразовательного канала (ИПК) описывается уравнением величин:

$$\begin{aligned} f'_x &= \Phi_x[(S_{\text{фп}} + \Delta S_{\text{фп}}) + \Delta U_{\text{фп}}][S_{\text{ус}} + \Delta S_{\text{ус}} + \Delta U_{\text{ус}}][(S_{\text{чп}} + \Delta S_{\text{чп}}) + (f_0 + \Delta_f)] = \\ &= \Phi_x[S_{\text{фп}}(1 + \gamma_{\text{фп}}) + \Delta U_{\text{фп}}][S_{\text{ус}}(1 + \gamma_{\text{ус}}) + \Delta U_{\text{ус}}][S_{\text{чп}}(1 + \gamma_{\text{чп}}) + (f_0 + \Delta_f)], \end{aligned} \quad (1)$$

где f'_x – результат преобразования с погрешностью; $S_{\text{фп}}$ – крутизна преобразования фотоприемника (ФП); $S_{\text{ус}}$ – крутизна преобразования усилителя Ус; $S_{\text{чп}}$ – крутизна преобразования преобразователя напряжение-частота (ПНЧ); $\gamma_{\text{фп}}$ и $\Delta S_{\text{фп}}$ – относительное и абсолютное изменение крутизны преобразования ФП в результате действия дестабилизирующих факторов окружающей среды; $\gamma_{\text{ус}}$ и $\Delta S_{\text{ус}}$ – относительное и абсолютное изменение крутизны преобразования (коэффициента усиления) усилителя Ус; $\gamma_{\text{чп}}$ и $\Delta S_{\text{чп}}$ – относительное и абсолютное изменение крутизны преобразования ПНЧ; f_0 – начальная частота выходного сигнала ПНЧ смарт-сенсора; Δ_f – девиация частоты ПНЧ. При этом предполагается, что за три такта измерений девиация частоты практически не наблюдается, т. е. $\{\Delta_f\} = \text{const}$.

Первый вариант основан на реализации тестовых методах коррекции погрешностей и предполагает проведение двух дополнительных тактов измерений напряжений нулевого и опорного уровней. Причем эти напряжения подаются на вход усилителя Ус, расположенного после ФП. Усиленные напряжения преобразуются в частоту электрических сигналов, которая затем измеряется. По полученным данным вычисляется оптимальное значение крутизны преобразования (коэффициента усиления) ИПК без ФП. Затем устанавливается оптимальное значение коэффициента усиления с последующим измерением частоты выходного сигнала ПНЧ при новом значении коэффициента усиления.

Следует отметить, что современные усилители позволяют программным путем вносить изменения в напряжение смещения и коэффициент усиления. В результате можно установить требуемые параметры смарт-сенсора с таким усилителем.

Второй вариант связан с избыточными измерениями физических величин, формированием не одной, а нескольких величин той же физической природы, что и измеряемая, их измерительным преобразованием в частоты электрических сигналов, измерением этих частот и определением (вычислением) значения искомой физической величины по выведенному уравнению избыточных измерений.

Рассмотрим оба варианта метода самокалибровки более подробно.

Первый вариант реализации метода самопроверки смарт-сенсоров. В работе [4] описан первый метод самокалибровки усилителя измерительного канала (ИК), который не может быть использован для самопроверки оптических смарт-сенсоров. Далее, на рис. 1, показана классическая структурная схема канала смарт-узла [8] БСС с неполным МО ИПК с управлением от микроконтроллера. На схеме используются следующие обозначения: ОИ – объект исследований; ОС – оптический сенсор, состоящий из ФП с встроенным входным светофильтром (СФ) с заданной шириной спектра $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ (рабочим диапазоном) и неравномерностью спектральной характе-

ристики, светодиода (СД); ИП – источник питания; АП – автоматический переключатель; Ус – усилитель с управляемыми параметрами, ПНЧ – преобразователь напряжение-частота; МК – микроконтроллер; ПП – приемопередатчик; ОШ – общая шина.

Следует отметить, что ИП формирует три напряжения: одно используется для запитки СД, второе – в качестве опорного, нормированного по значению, а третье – для питания остальных функциональных блоков (ФБ) смарт-сенсора.

Управление работой ФБ осуществляется по программе, записанной в ОЗУ микроконтроллера МК. Согласно этой программе цифровые коды через ОШ поступают на управляющие входы ФБ. Практическая реализация первого варианта метода самокалибровки смарт-сенсора осуществляется за пять тактов.

Наибольшую длительность имеют такты при многократных измерениях и преобразованиях выходного сигнала ФП. Рассмотрим каждый такт в отдельности.

Такт 1. В первом такте АП устанавливается в положение, показанное на рис. 1 (нижняя клемма АП), т. е. вход ИПК смарт-сенсора (без ФП) подключается к земляной шине.

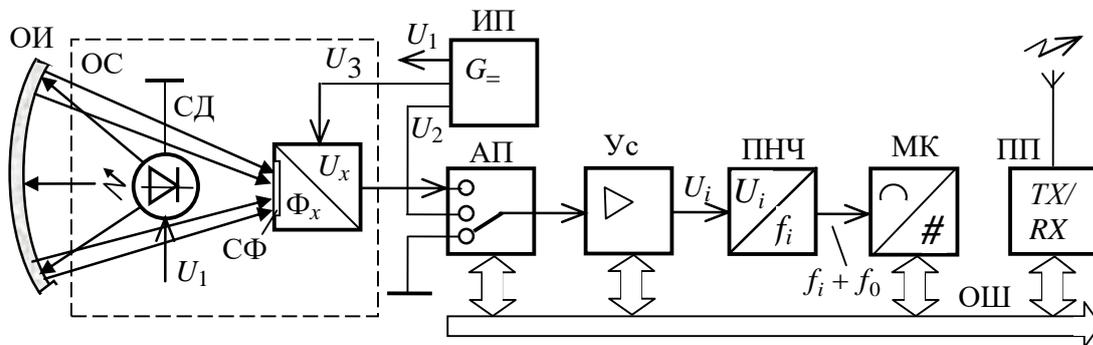


РИС. 1. Структурная схема оптического смарт-сенсора с неполным метрологическим обеспечением

Как видно из рис. 1, сам ОС является неуправляемым, а выход ФП подключается ко входу ИПК только в последнем такте. Это ограничивает возможности данного метода самокалибровки.

В первом такте на выходе Ус появится только напряжение смещения $\{U_1\} = \{\Delta U_{см}\}$. С помощью ПНЧ данное напряжение преобразуется в частоту выходного сигнала смарт-сенсора. Из уравнения (1) частота, с учетом, что $\{\Phi_x\} = 0$, определяется по уравнению величин:

$$f'_1 = \Delta U_{см} (S_{чп} \pm \Delta S_{чп}) + (f_0 + \Delta f) = \Delta U_{см} S_{чп} + \Delta U_{см} \Delta S_{чп} + (f_0 + \Delta f) = \Delta f_{см} + \Delta f_{мп1} + (f_0 + \Delta f). \quad (2)$$

Как видно из уравнения величин (2), результат измерений содержит информацию о начальном значении частоты ПНЧ и о ее девиации.

Полученный сигнал частоты (2) поступает на аналоговый вход МК, с помощью которого осуществляется измерение частоты f'_1 (2) и передача кода числа $N_1 = \Delta t_0 f'_1$, где Δt_0 – время измерений, в ПП. С помощью последнего осуществляется передача в концентратор (Кр) полученных данных. Передача осуществляется по запросу, поступающему на ПП с Кр. Код числа N_1 запоминается в памяти спецпроцессора (СП), входящего в состав Кр (см. рис. 1).

Такт 2. АП по команде с МК, устанавливается в среднее положение, при котором вход Ус смарт-сенсора подключается ко второму выходу ИП, выходное напряжение которого является нормированным по значению (опорным) напряжением (рис. 1, блоки АП, Ус и ИП). В ИПК опорное напряжение $U_2 = U_{оп}$ усиливается по амплитуде и преобразуется в частоту с помощью ПНЧ:

$$f'_2 = f'_{оп} = (U_{оп} \pm \Delta U_{см})(S_{чп} \pm \Delta S_{чп}) + f_0 = U_{оп}S_{чп} + U_{оп}\Delta S_{чп} + \Delta U_{см}S_{чп} + \Delta U_{см}\Delta S_{чп} + f_0 = f_{оп} + \Delta f_{мп2} + \Delta f_{см} + (f_0 + \Delta f). \quad (3)$$

Полученный результат измерений содержит информацию о частоте, пропорциональной опорному напряжению, о начальном значении частоты ПНЧ, а также о мультипликативной и аддитивной составляющих погрешности ИПК (без ОС).

Как и в первом такте, полученный сигнал поступает на аналоговый вход МК, где осуществляется измерение частоты f'_2 (3) и передача кода числа $N_2 = \Delta t_0 f'_2$ в ПП. Полученный код числа N_2 передается из ПП в Кр, где запоминается в памяти СП.

Такт 3. В этом такте осуществляется обработка результатов (2) и (3) промежуточных измерений (преобразований) для подстройки значения крутизны преобразования ИПК до номинального значения $S_{ипк}$. Если в идеале

$$S_{ипк} = \frac{(f_2 + f_0) - (f_1 + f_0)}{U_{оп} - U_{см}} = \frac{f_2 - f_1}{U_{оп} - U_{см}} = \frac{S_{ипк}U_{оп} - S_{ипк}U_{см}}{U_{оп} - U_{см}} = \frac{S_{ипк}(U_{оп} - U_{см})}{U_{оп} - U_{см}}, \quad (4)$$

где f_1 и f_2 – идеальные величины (без погрешностей).

Реальное отклонение $\Delta S_{ипк}$ крутизны преобразования ИПК от номинального значения $S_{ипк}$ определяется по уравнению величин:

$$S'_{ипк} = \frac{N_2 - N_1}{U_{оп}} = \frac{\Delta t_0 [f_{оп} + \Delta f_{мп2} + \Delta f_{см} + (f_0 + \Delta f)] - \Delta t_0 [\Delta f_{см} + \Delta f_{мп1} + (f_0 + \Delta f)]}{\Delta t_0 f_{оп}} = \frac{f_{оп} + (\Delta f_{мп2} - \Delta f_{мп1})}{f_{оп}} = 1 + \frac{\Delta f_{мп2} - \Delta f_{мп1}}{f_{оп}} = 1 + \Delta S_{ипк}, \quad (5)$$

где $\Delta f_{мп2} - \Delta f_{мп1} = \Delta f_{мп21}$ – разность мультипликативных составляющих погрешностей преобразования напряжений в частоту.

Из уравнения (4)

$$\Delta N = \{\Delta S_{ипк}\} = \{S'_{ипк}\} - 1. \quad (6)$$

Полученные результаты (5) и (6) записываются в память МК и используются для подстройки крутизны преобразования ПНЧ или коэффициента усиления усилителя U_c .

Такт 4. В данном такте по команде с МК формируется код числа (5), который поступает на управляющий вход U_c и изменяет его напряжение смещения $\Delta U_{см}$ (см. (3)) до получения равенства $\Delta t_0 f_2 = \Delta t_0 f'_{оп}$. Изменение выходной частоты ИПК осуществляется при подключенном ко входу U_c нормированного по значению напряжения $U_{оп}$.

Такт 5. В пятом такте, после установки номинального значения крутизны преобразования ИПК, АП устанавливается в крайнее верхнее положение. В результате вход U_c подключается к выходу ФП. Выходной сигнал ФП содержит полезную информацию, например, о концентрации хлорофилла в листке растения, т. е. в ОИ.

Выходное напряжение $U_3 = U_x$ ФП усиливается и преобразуется в частоту f_3 выходного сигнала ПНЧ при $S_{ипк}$:

$$f'_3 = \Phi_x(S_{фп} + \Delta S_{фп}) + \Delta U_{фп} S_{ипк} + f_0 = f'_x + \Delta f'_{мп} + \Delta f'_{ад} + f_0, \quad (7)$$

где $f'_x = (\Phi_x S_{фп}) S_{ипк}$, $\Delta f'_{мп} = (\Phi_x \Delta S_{фп}) S_{ипк}$, $\Delta f'_{ад} = \Delta U_{фп} S_{ипк}$.

Электрический сигнал с частотой f_3 (7) поступает на аналоговый вход МК. В МК осуществляется ее измерение. Полученное значение частоты в виде кода числа $N_3 = \Delta t_0 f_3$ поступает в ПП, а затем передается в Кр. Полученные данные запоминаются в памяти СП.

Как видно из уравнения величин (7), описанный метод самокалибровки обеспечивает подстройку номинального значения крутизны преобразования ИПК, но не исключает мультипликативную и аддитивную составляющие погрешности измерения и преобразования в частоту потока оптического излучения Φ_x от ОИ.

Второй вариант реализации метода самопроверки смарт-сенсоров. На рис. 2 показана структурная схема канала связи, реализующая второй вариант метода самопроверки оптического структурно-избыточного смарт-сенсора БСС и Кр смарт-узла. Кр включает в себя, как правило, приемопередатчик (ПП2), СП и внешнее ОЗУ, обеспечивающие управление работой смарт-сенсорными узлами и обработку больших массивов данных.

Основу смарт-сенсора составляет структурно-избыточный сенсор (СИС). В отличие от ОС, приведенного на рис. 2, в СИС дополнительно введены второй светодиод (СД2), отражающая за-слонка (ОЗ) и второй автоматический переключатель (АП2).

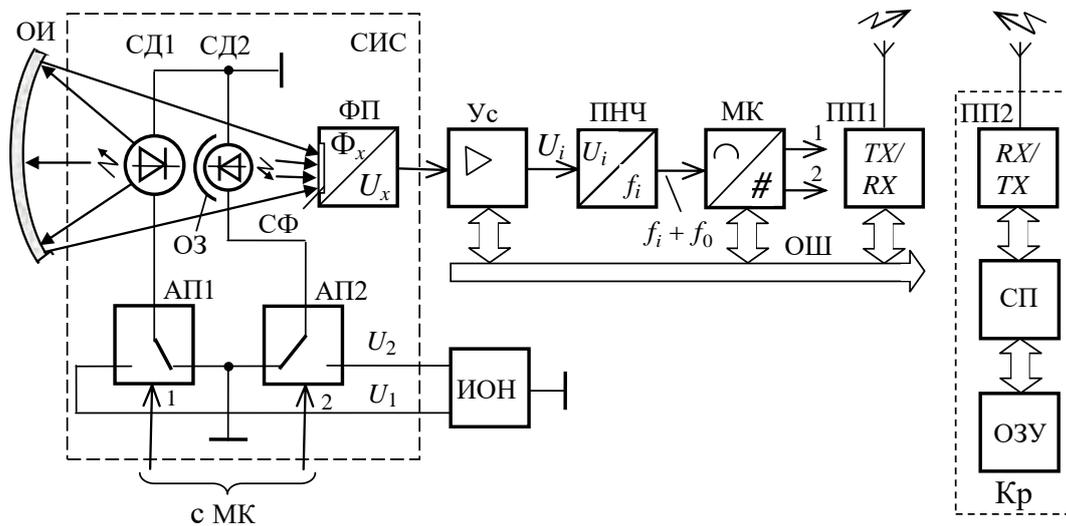


РИС. 2. Структурная схема структурно-избыточного смарт-сенсора и концентратора смарт-узла

Практическая реализация второго варианта метода самокалибровки смарт-сенсора осуществляется за три такта измерений и преобразований в частоту отраженного от ОИ потоков оптического излучения, и одного такта обработки полученных значений частоты. В зависимости от программы, записанной в ОЗУ МК или в ОЗУ Кр, обработка данных может проводиться в МК или в СП Кр.

Такт 1. По программе, записанной в ОЗУ МК, с выходов «1» и «2» МК на входы управления АП1 и АП2 поступает двухразрядный код «00» числа 0, при котором АП1 и АП2 устанавливаются в положение, указанное на рис. 2. В результате питание СД1 и СД2 отключается. В ИПК усиливается и преобразуется в частоту электрического сигнала темновой поток Φ_1 (приведенный ко входу ФП), значение которого $\{\Phi_1\} = \{\Phi_r\}$. Данный поток оптического излучения с помощью ФП преобразуется в напряжение, усиливается в Ус, а затем преобразуется в частоту

$$f_1 = \Phi_1[(S_{\text{фп}} + \Delta S_{\text{фп}}) + \Delta U_{\text{фп}}][S_{\text{yc}} + \Delta S_{\text{yc}}) + \Delta U_{\text{yc}}][(S_{\text{чп}} + \Delta S_{\text{чп}}) + f_0] \quad (8)$$

электрического сигнала. Этот сигнал с выхода ПНЧ поступает в МК. Измеренная с помощью МК частота в виде кода числа $N_1 = \Delta t_0 f_1$ запоминается в МК.

Такт 2. В этом такте с выходов «1» и «2» МК на входы управления АП1 и АП2 поступает код числа, например, «01», при котором АП2 устанавливается в положение, противоположное указанному на рис. 2. В результате включается СД2 и через СФ на вход ФП поступает нормированный по значению поток Φ_2 оптического излучения. Этот поток формируется с помощью СД2 и ОЗ, направляющей поток оптического излучения через входной СФ на вход ФП. Суммарное значение потока, поступающего на ФП, с учетом приведенного ко входу темного потока Φ_T , равно $\{\Phi_2\} = \{\Phi_H\} + \{\Phi_T\}$. Ограниченный по спектру поток оптического излучения Φ_2 с помощью ФП преобразуется в напряжение, усиливается в Ус, а затем преобразуется в частоту

$$f_2 = (\Phi_H + \Phi_T)[(S_{\text{фп}} + \Delta S_{\text{фп}}) + \Delta U_{\text{фп}}][S_{\text{yc}} + \Delta S_{\text{yc}}) + \Delta U_{\text{yc}}][(S_{\text{чп}} + \Delta S_{\text{чп}}) + f_0] \quad (9)$$

электрического сигнала. С выхода ПНЧ полученный сигнал, поступает в МК. С помощью МК измеряется частота f_2 (6) электрического сигнала. Результат измерений в виде кода числа $N_2 = \Delta t_0 f_2$ запоминается в оперативной памяти МК или в ОЗУ Кр.

Такт 3. В третьем такте на входы управления АП1 и АП2 с выходов «1» и «2» МК поступает код числа, например, «11», который устанавливает их в положения, противоположные указанным на рис. 2. В результате включаются оба светодиода – СД1 и СД2. Через СФ на вход ФП поступает ограниченный по спектру поток оптического излучения Φ_3 , состоящий из отраженного от ОИ потока Φ_x , и нормированного по значению потока Φ_2 ($\{\Phi_2\} = \{\Phi_H\}$) и приведенного ко входу темного потока Φ_T . Суммарное значение потока оптического излучения Φ_3 равно $\{\Phi_3\} = \{\Phi_x\} + \{\Phi_H\} + \{\Phi_T\}$. С помощью ФП этот поток преобразуется в напряжение, усиливается в Ус, а затем преобразуется в частоту

$$f_3 = (\Phi_x + \Phi_H + \Phi_T)[(S_{\text{фп}} + \Delta S_{\text{фп}}) + \Delta U_{\text{фп}}][S_{\text{yc}} + \Delta S_{\text{yc}}) + \Delta U_{\text{yc}}][(S_{\text{чп}} + \Delta S_{\text{чп}}) + f_0] \quad (10)$$

электрического сигнала на выходе ПНЧ.

С выхода ПНЧ сигнал частоты f_3 , поступает в МК. С его помощью измеряется частота (8) электрического сигнала. Полученный результат измерений в виде кода числа $N_3 = \Delta t_0 f_3$ запоминается в оперативной памяти МК или в ОЗУ Кр.

Такт 4. Обработка результатов промежуточных измерений.

Значения частот, полученные в каждом из трех тактов цикла измерений, обрабатываются в МК согласно уравнению избыточных измерений

$$\Phi_x = \Phi_0 \frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1} \quad (11)$$

или по уравнению числовых значений

$$\{\Phi_x\} = \{\Phi_H\} \frac{N_3 - N_2}{N_2 - N_1}. \quad (12)$$

Действительно, подставив значения частот в (11), получаем:

$$\Phi_x = \Phi_H \frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1} = \frac{(\Phi_x + \Phi_H + \Phi_T)[(S_{\text{фп}} + \Delta S_{\text{фп}}) + \Delta U_{\text{фп}}][S_{\text{yc}} + \Delta S_{\text{yc}}] + \Delta U_{\text{yc}}][(S_{\text{чп}} + \Delta S_{\text{чп}}) + f_0] - (\Phi_H + \Phi_T)[(S_{\text{фп}} + \Delta S_{\text{фп}}) + \Delta U_{\text{фп}}][S_{\text{yc}} + \Delta S_{\text{yc}}] + \Delta U_{\text{yc}}][(S_{\text{чп}} + \Delta S_{\text{чп}}) + f_0]}{(\Phi_H + \Phi_T)[(S_{\text{фп}} + \Delta S_{\text{фп}}) + \Delta U_{\text{фп}}][S_{\text{yc}} + \Delta S_{\text{yc}}] + \Delta U_{\text{yc}}][(S_{\text{чп}} + \Delta S_{\text{чп}}) + f_0] - \Phi_1[(S_{\text{фп}} + \Delta S_{\text{фп}}) + \Delta U_{\text{фп}}][S_{\text{yc}} + \Delta S_{\text{yc}}] + \Delta U_{\text{yc}}][(S_{\text{чп}} + \Delta S_{\text{чп}}) + f_0]} = \Phi_H \frac{(\Phi_x + \cancel{\Phi_H} + \cancel{\Phi_T}) - \cancel{\Phi_H} + \cancel{\Phi_T}}{\Phi_H + \cancel{\Phi_x} - \cancel{\Phi_x}}. \quad (13)$$

Полученный результат по команде с МК поступает в ПП и передается, по полученному запросу, в ОЗУ Кр.

Как видно из уравнения величин (13), полученное значение мощности потока оптического излучения от ОИ не зависит от нестабильности параметров функций преобразования фотоприемника, усилителя и ПНЧ. При этом должны выполняться следующие условия: девиация частоты ПНЧ и смещение нуля усилителей должны быть величинами второго порядка малости и не изменяться в течение трех тактов измерений потоков оптического излучения; нормированный по значению мощности поток оптического излучения Φ_H должен быть выбранным и установленным таким, чтобы на выходе ПНЧ генерировался сигнал, нормированный по значению частоты.

Таким образом, добавлением двух тактов измерений к основному, обеспечивается решение задачи самокалибровки смарт-сенсоров, направленной на метрологическое обеспечение любого количества смарт-сенсоров в смарт-узле БСС.

Выбором времени измерения (усреднения) частоты (за 1 сек, за 3 сек и т. д.) достигается уменьшение влияния помех и шумов на стабильность на результат измерений. При многократных измерениях используется уравнение числовых значений

$$\{\Phi_x\} = \{\Phi_H\} \left(\frac{\sum_{i=1}^n N_{3i} - \sum_{i=1}^n N_{2i}}{\sum_{i=1}^n N_{2i} - \sum_{i=1}^n N_{1i}} \right). \quad (14)$$

В общем случае число измерений n в каждом такте может быть различным, что устанавливается программой исследований.

Выводы. Проблема определения основных параметров метрологической надежности беспроводных сенсорных систем по-прежнему остается актуальной. Она тесно связана с решением задачи самокалибровки оптических смарт-сенсоров, входящих в состав смарт-узлов системы.

На основе вышеизложенного можно утверждать, что задача самокалибровки смарт-сенсоров решается при выполнении трех основных условий: 1) при создании и использовании структурно-избыточных оптических сенсоров, предназначенных для реализации методов избыточных измерений; 2) при разработке светодиодов или иных высокостабильных источников оптического излучения, в том числе и с управляемыми параметрами, на любой заданный спектральный диапазон длин волн; 3) при создании в микроисполнении светофильтров на заданный диапазон спектра оптических сигналов.

Использование теории избыточных измерений для решения поставленных задач – это единственно правильный путь решения задачи самокалибровки сенсоров и измерительных приборов.

Учитывая жесткие условия эксплуатации оптических смарт-сенсоров, предпочтительно их изготовление с использованием высоких технологий.

Список литературы

1. Штанько Н.Н. Обзор методов определения местоположения объекта. URL: http://aes.psuti.ru/wp-content/uploads/2017/10/PTiTT_2017_3.pdf (дата звернення: 01.02.2020).
2. Метрологическое обеспечение. URL: <http://metro.ru/html/mo/> (дата звернення: 01.02.2020).
3. Беспроводной стандарт ZigBee. URL: <https://rozetka.com.ua/umnie-datchiki/c4638399/besprovodnoy-standart141008=zigbee/> (дата звернення: 01.02.2020).
4. Самокалибровка при измерениях. URL: <http://robotosha.ru/electronics/self-calibration-measurements.html> (дата звернення: 01.02.2020).
5. Кондратов В.Т. Теория избыточных измерений – теория мирового значения. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2007. № 1. С. 152 – 160.
6. Кондратов В.Т. Теория избыточных измерений и ее структура. Научные труды X-й Юбилейной Международной науч.-техн. конф. „Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики”. Книга „Приборостроение”. М.: МГУ ПИ, 2007. С. 143 – 150.
7. Кондратов В.Т. Новая стратегия измерений. *Законодательная и прикладная метрология*. 2008. № 3. С. 101 – 121.
8. Романов В.О. Вимоги до сенсорних вузлів у системах Інтернету речей. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. 2018. № 17. С. 5 – 9. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/150600>

Получено 10.02.2020

Кондратов Владислав Тимофеевич,

доктор технических наук, профессор

Института кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины, Киев, Украина.

vladikon@kievnet.com.ua

УДК 006.90.01.39:681.2

В.Т. Кондратов**МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ СИСТЕМ***Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова, Київ, Україна**Листування: vladikon@kievnet.com.ua*

Вступ. У роботі виділено дванадцять проблем метрологічної надійності бездротових сенсорних систем, які вимагають свого рішення. Найбільш актуальною є проблема визначення основних параметрів метрологічної надійності бездротових сенсорних систем. Вона тісно пов'язана з вирішенням задачі самокалібрування оптичних смарт-сенсорів, що входять до складу смарт-вузлів системи. Задача самокалібрування смарт-сенсорів вирішується при виконанні трьох основних умов: 1) при створенні та використанні структурно-надлишкових оптичних сенсорів, призначених для реалізації методів надлишкових вимірювань; 2) при розробці світлодіодів чи інших високостабільних джерел оптичного випромінювання, в тому числі й з керованими параметрами, на будь-який заданий спектральний діапазон довжин хвиль; 3) при створенні в мікрвиконанні світлофільтрів на заданий діапазон спектра оптичних сигналів. У роботі описані два методи метрологічного забезпечення смарт-сенсорів БСС, заснованих на введенні інформаційної надмірності шляхом проведення трьох тактів вимірювань фізичної величини смарт-сенсором з подальшою обробкою отриманих даних по виведеному алгоритму. Показано недоліки і переваги методів. Констатується, що використання теорії надлишкових вимірювань – це є правильний шлях вирішення задачі самокалібрування сенсорів і вимірювальних приладів. З огляду на жорсткі умови експлуатації оптичних смарт-сенсорів, переважно їх виготовлення з використанням високих технологій. На сьогоднішній день в Україні практичним вирішенням проблем метрологічної надійності бездротових сенсорних мереж і вирішення задач самокалібрування смарт-сенсорів ніхто не займається.

Ключові слова: оптичні смарт-сенсори, самокалібрування, бездротові сенсорні системи, методи надлишкових вимірювань, проблеми метрологічної надійності.

UDC 006.90.01.39:681.2

V.T. Kondratov

METROLOGICAL SUPPORT FOR WIRELESS SENSOR SYSTEMS

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics, Kyiv, Ukraine

Correspondence: vladikon@kievnet.com.ua

Introduction. The paper identifies twelve problems of metrological reliability of wireless sensor systems that require their solution. The most urgent is the problem of determining the main parameters of the metrological reliability of wireless sensor systems. It is closely related to solving the problem of self-calibration of optical smart sensors that are part of the smart nodes of the system. The task of self-calibration of smart sensors is solved when three basic conditions are met: 1) when creating and using structurally redundant optical sensors designed to implement methods of redundant measurements; 2) when developing LEDs or other highly stable sources of optical radiation, including those with controlled parameters, for any given spectral range of wavelengths; 3) when creating in micro-performance filters on given range of the spectrum of optical sines. The article describes two methods of metrological support for BSS smart sensors, based on the introduction of information redundancy by conducting three clock cycles of measuring physical quantity with a smart sensor, followed by processing the data using a derived algorithm. The disadvantages and advantages of the methods are shown. It is stated that the use of the theory of excess measurements is the only correct way to solve the problem of self-calibration of sensors and measuring instruments. Given the harsh operating conditions of optical smart sensors, it is preferable to manufacture them using high technology. Today, in Ukraine, no one is engaged in a practical solution to the problems of metrological reliability of wireless sensor systems and the solution of the problems of self-calibration of smart sensors.

Keywords: optical smart sensors, self-calibration, wireless sensor systems, methods of redundant measurements, problems of metrological reliability.