

Разработка модифицированного алгоритма измерения физических величин для сенсорных систем

А. А. Койбаш

Донецкий национальный технический университет
mr.koibash@gmail.com

Аннотация

С целью улучшения характеристик сенсорных систем выполнен анализ основных источников погрешностей микроэлектромеханических датчиков. Определено взаимное влияние датчиков внутри интеллектуальной сенсорной системы, а также выявлена важность сохранения информации о точности самих сенсоров. Для определения погрешности, связанной с непосредственными характеристиками устройства, проведён эксперимент с использованием датчика температуры и микроконтроллера на плате STM32F407G Discovery. На основании результатов эксперимента предложен модифицированный алгоритм измерения физических величин в сенсорных системах.

Введение

Современный мир сложно представить без цифровых устройств. И всё более серьёзную роль в нём занимают датчики, играющие роль сенсорной составляющей всей информационно-компьютерной инфраструктуры [1]. Сенсорные устройства уже получили большое распространение в повседневности (смартфоны и различные умные устройства), однако спектр их применения лишь продолжит расширяться [2, 3].

С целью поиска перспектив развития сенсоров в статье [4] рассмотрены характеристики отдельных видов датчиков фирмы Analog Devices. Так, анализ процесса развития акселерометров с начала их серийного производства (1991-й год) показал экспоненциальное снижение веса и тока питания. Для гироскопов обнаружены тенденции к уменьшению габаритов и улучшению шумовых характеристик. Эти процессы также примечательны ещё и тем, что происходят на фоне общего экспоненциального развития элементов всей информационно-компьютерной инфраструктуры [1, 5, 6].

На основании статистических данных выявлены закономерности, позволяющие путём экстраполяции прогнозировать развитие на ближайшее будущее. В результате прогноза можно сделать вывод о дальнейшей миниатюризации датчиков. При этом, согласно документации ряда устройств [7–9], наблюдается всё более плотная интеграция между датчиками различных видов для взаимной компенсации слабых сторон каждого из них. Например, в современные микроэлектромеханические акселерометры и гироскопы интегрированы датчики температуры. Это позволяет в достаточно большой степени компенсировать изменения чувствительности и смещение нуля остальных сенсоров.

Учитывая выявленные закономерности и общие тенденции в микроэлектронике, можно утверждать, что процесс взаимной интеграции датчиков в дальнейшем будет продолжаться и даже наращивать темпы. Вследствие этого возникает ситуация, при которой датчики зависят друг от друга, и точность одних сенсоров напрямую зависит от точности других. Таким образом, неточности аккумулируются со всех этапов процесса получения информации с устройства: от непосредственного измерения физической величины до компенсации значения на основании показаний другого датчика.

Данная проблема усиливается с растущей степенью интеграции датчиков в единые системы. В дополнение к этому можно отметить тот факт, что достаточно часто точностью жертвуют ради удешевления производства или ещё большего уменьшения габаритов. Вследствие этого необходим анализ влияния точности измерений на работу сенсорных систем.

Анализ точности современных сенсоров

Точность является общим параметром для всех датчиков. Она представляет собой разницу между реальным значением измеряемой величины и значением, полученным в результате измерения. При серии измерений в идентичных условиях такие различия будут представлять собой случайную погрешность.

Появление таких погрешностей применительно к датчикам в большинстве случаев описывается законом нормального распределения Гаусса-Лапласа (рисунок 1), что следует из центральной предельной теоремы теории вероятностей – сумма бесконечно большого числа бесконечно малых случайных возмущений с любыми распределениями имеет нормальное распределение плотности вероятности. При измерении датчиком физической величины такими

бесконечно малыми случайными возмущениями является множество внешних факторов, ни один из которых не является преобладающим [10].

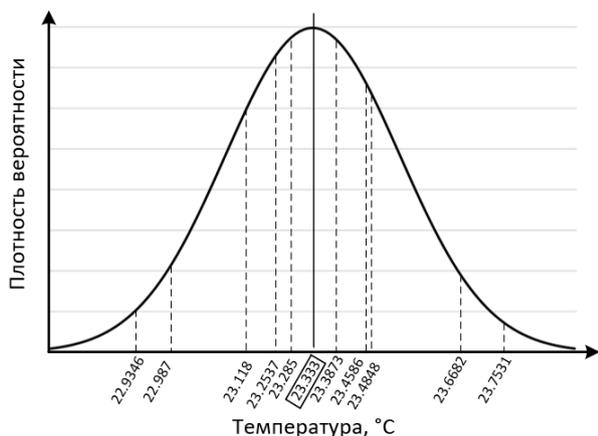


Рисунок 1 – Нормальное распределение Гаусса-Лапласа на примере значений температуры

Основными причинами, из-за которых изменяется точность измерений в сенсорных системах, являются следующие:

- внешние параметры окружающей среды;
- внутренние параметры самого датчика;
- конечная разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Как было описано ранее, результаты измерений одних датчиков могут оказывать влияние на сопутствующие вычисления при измерении других датчиков, входящих в ту же сенсорную подсистему. Поэтому для поиска путей решения данной проблемы необходимо определить, погрешность какой величины может возникать в датчиках электронных устройств, а также с какой причиной она может быть связана.

Так, в работе [11] описаны изменения внутри акселерометра при колебаниях температуры для следующих параметров:

- диэлектрической проницаемости;
- зазора между пластиной маятника и крышками;
- коэффициента упругости;
- теплового расширения.

Вышеописанные факторы вносят существенную погрешность. Поэтому с целью коррекции дополнительной температурной погрешности в сенсорных системах используются встроенные датчики температуры. Следовательно, исследование целесообразно выполнить на примере датчика температуры, поскольку он представляет собой хороший пример вспомогательного датчика в сенсорных системах, благодаря которому значительно расширяется температурный диапазон работы микроэлектромеханических акселерометров, гироскопов и магнитометров. Терморезистор обладает следующими особенностями:

- высокая чувствительность;
- небольшие размеры;

– удовлетворяющий целям эксперимента температурный диапазон $[-50\text{ }^{\circ}\text{C}; +100\text{ }^{\circ}\text{C}]$.

Для эксперимента использован микроконтроллер на плате STM32F407G Discovery, изображённый на рисунке 2. К аналоговому входу платы подсоединён терморезистор, преобразующий значение температуры в выходное напряжение (1). Квантование сигнала производится посредством 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя, обладающего диапазоном значений от 0 до 4095. Для уменьшения влияния разброса температуры был использован сосуд с веществом в жидком агрегатном состоянии с высокой удельной теплоёмкостью. Схема эксперимента отображена на рисунке 3.

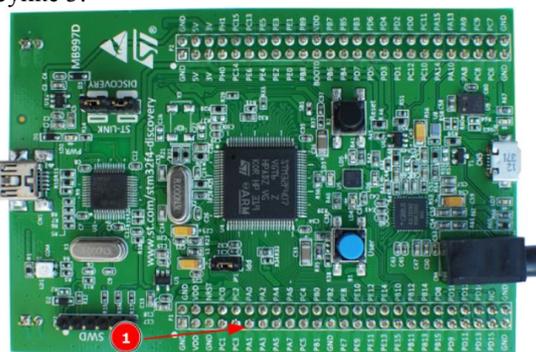


Рисунок 2 – Плата STM32F407G Discovery

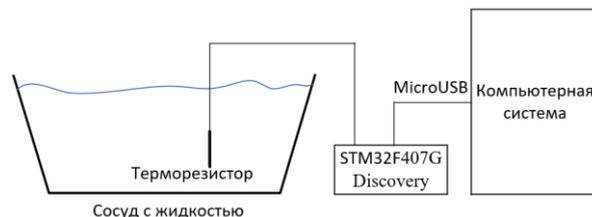


Рисунок 3 – Схема эксперимента

Поскольку в данном эксперименте интерес представляет величина погрешности непосредственно, то прецизионностью (общим смещением всех результатов измерений относительно истинного значения) можно пренебречь. Таким образом, для конвертирования значения АЦП в величину температуры использован вспомогательный аквариумный термометр с заводской калибровкой.

В ходе эксперимента терморезистор был погружён в жидкость. Произведено несколько серий из 10 измерений. Все измерения внутри каждой серии проводились автоматически с интервалом в 60 мс. Результаты эксперимента зафиксированы в компьютерной системе в значениях аналого-цифрового преобразователя и представлены на рисунке 4 и 5 для температур $\approx 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\approx 49\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Вне зависимости от температуры жидкости, в которую помещён терморезистор, результаты измерений характеризуются достаточно серьёзной погрешностью. Амплитуда её распределения составляет достигает 39 единиц АЦП, или же 1.02

°С. Таким образом, данная погрешность связана с базовыми характеристиками датчика, поскольку влияние окружающей среды в ходе эксперимента минимизировано использованием большого количества теплоёмкого вещества, а разрядности АЦП достаточно для фиксации широкой амплитуды распределения результатов измерений.

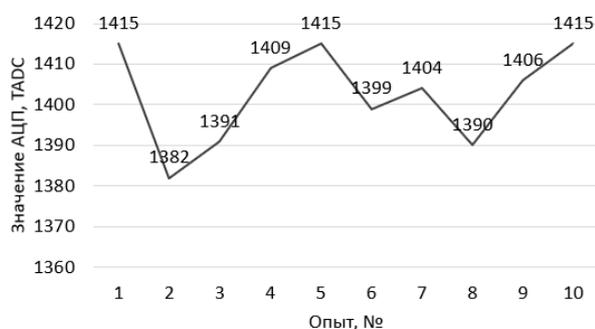


Рисунок 4 – Серия измерений при температуре ≈ 18 °С

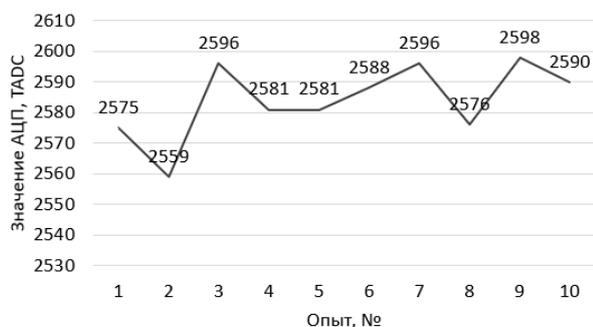


Рисунок 5 – Серия измерений при температуре ≈ 49 °С

Подобные неточности будут влиять на ход дальнейших вычислений, в особенности в тех случаях, когда результат с погрешностью выступает входным параметром при решении последующих задач (например, компенсации смещения нуля для микроэлектромеханических датчиков). Поэтому на следующем шаге целесообразно проанализировать уже существующие численные зависимости между датчиками различных видов.

Влияние точности сенсорной информации на точность вычислительной обработки информации

Помимо упомянутых температурных зависимостей для датчиков характерны зависимости и других видов. Следовательно, как и в случае с терморезистором, эти погрешности возможно компенсировать посредством данных, получаемых другими сенсорами в режиме реального времени. Таким образом, для определения масштаба подобного взаимного влияния между датчиками разных видов необходимо составить список главных источников их погрешностей. Анализ в данном

направлении проведён с уже рассмотренных в статье [4] микроэлектромеханических датчиков.

Основными источниками погрешностей для акселерометров являются:

- температурные;
- магнитные;
- вибрационные;
- частотные.

Хотя микроэлектромеханический гироскоп имеет похожую на микроэлектромеханический акселерометр структуру, его внутреннее устройство представляет собой более сложный механизм. Из этого можно сделать вывод, что его характеристики подвержены аналогичным факторам, как и в случае с акселерометром. Так, компенсация дрейфа нуля гироскопа до сих пор является актуальной проблемой [12].

На формирование погрешностей магнитометров оказывают влияние следующие факторы [13]:

- магнитное наклонение (связанное с магнитным полем Земли);
- магнитные поля вокруг сенсора;
- наличие неподалёку ферромагнитных материалов.

Погрешности магнитометра также поддаются корректировке. Например, посредством добавления/вычитания магнитного склонения представляется возможным компенсировать влияние магнитного наклонения. Так, в своей статье [14] авторы предлагают установку микроэлектромеханических акселерометров совместно с магнитометром. Это даст возможность алгоритмической коррекции инструментальных погрешностей магнитометров и превращает совокупность датчиков в интеллектуальную сенсорную систему.

Проследить конкретные численные значения можно на примере интеллектуальных датчиков давления. Они также имеют достаточно высокую зависимость от температуры, и для компенсации погрешностей также ставят соответствующие датчики. Это даёт возможность использовать математические методы, что позволяет повысить точность устройства.

Так, в статье [15] авторами исследованы источники дополнительной погрешности для интеллектуальных датчиков давления. Они имеют следующие причины появления:

- температурный диапазон;
- электромагнитные помехи;
- вибрация;
- долговременная стабильность.

Для датчика Honeywell ST 3000 серии 100 обнаружено, что влияние температуры на нуль и шкалу на каждые 28° С составляет $\pm 0,4625\%$ от шкалы. Это также подтверждается официальной документацией производителя по устройству [16].

Для датчиков «Метран-100» производителем указана формула (1), для каждых 10 °С:

$$\Delta t = \pm \left(0,05 + 0,04 \frac{P_{max}}{P_B} \right), \quad (1)$$

где $P_{вх}$ – максимальный верхний предел измерений, а P_B – верхний предел измерений модели, выбранный из ряда верхних значений пределов измерений.

Подытоживая вышесказанное, можно сделать вывод, что точность измерения вспомогательных сенсоров может иметь существенное влияние на точность измерения основных датчиков. При этом, как видно из примера с датчиком давления, сама величина погрешности может также иметь важное значение, поскольку является показателем такой важной характеристики, как долговременная стабильность. Благодаря сохранению такой информации можно вести статистический учёт и своевременно определить необходимость технического обслуживания датчика, либо же полной его замены.

Таким образом, существует необходимость в повышенной точности измерений физических величин при сохранении информации об исходной погрешности путём модификации алгоритмов измерения физических величин и способов хранения информации.

Модификация алгоритма измерения физических величин

Блок-схема предлагаемого алгоритма представлена на рисунке 6. После модификации в алгоритме можно выделить 3 процедуры:

- нахождение среднего арифметического из значений, полученных в результате серии измерений;
- формирование и нормализация интервала из максимального и минимального значения в серии;
- постбинарное кодирование интервала.

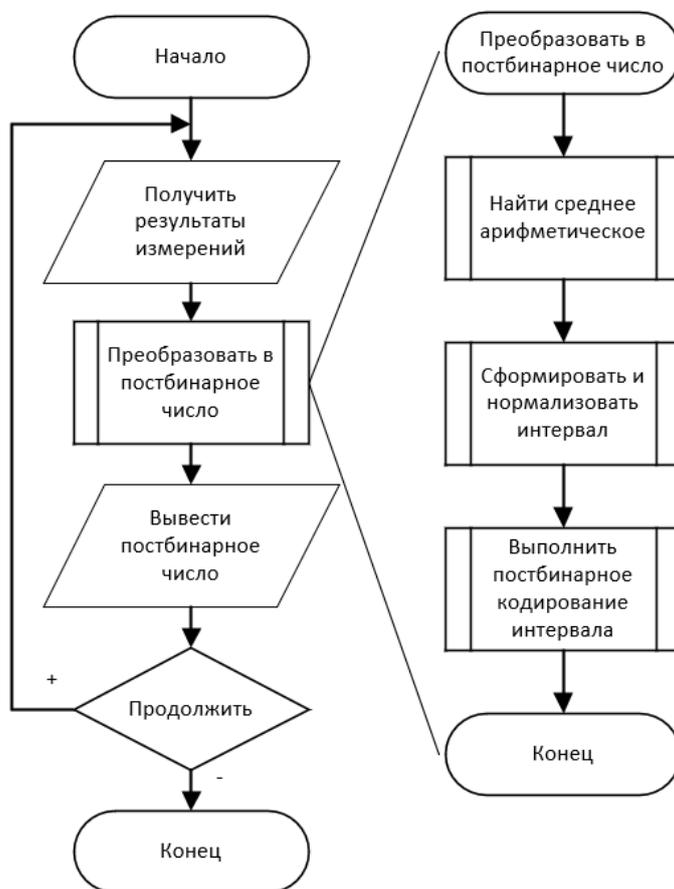


Рисунок 6 – Блок-схема модифицированного алгоритма измерения физических величин для сенсорной системы

На первом этапе будет получен более точный результат измерений. Так как распределение результатов подчиняется закону распределения, близкого к нормальному, то среднее арифметическое расположено близко к математическому ожиданию.

Второй этап позволяет рационализировать способ хранения информации. Благодаря этому

параллельно с улучшением точности результатов измерений датчиков внутри сенсорной системы появляется возможность эффективно хранить информацию об исходной погрешности.

Третий этап путём постбинарного кодирования интервала повысит эффективность представления информации, что даст возможность в полной мере пользоваться доказанными

преимуществами постбинарного компьютеринга [17-18]. В рамках первого этапа целесообразно определить необходимое количество повторных измерений, производимых сенсорной системой за небольшой промежуток времени. Следовательно, нужно найти количество измерений n , необходимых для попадания в доверительный интервал с вероятностью β (формула 2):

$$n \geq \left(k_{\beta} \frac{\sigma_x}{\varepsilon}\right)^2, \quad (2)$$

где k_{β} – значение функции Лапласа; σ_x – среднеквадратическое отклонение (постоянная величина для одного и того же датчика); ε – точность.

Рассмотрены следующие варианты:

– точность равна среднеквадратическому отклонению ($\varepsilon = \sigma_x$). Тогда $\sigma_x/\varepsilon = 1$. Следовательно, $n \geq k_{\beta}^2$.

– точность равна половине среднеквадратического отклонения $\varepsilon = \sigma_x/2$ (в два раза более узкий интервал). Тогда $\sigma_x/\varepsilon = 2$. Следовательно, $n \geq 4k_{\beta}^2$.

Значения количества измерений n просчитаны для вероятностей попадания в доверительный интервал со значением в 95%, 99% и 99,993%. Результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Значения количества измерений физической величины

| σ_x/ε | β | 95% | 99% | 99,993% |
|------------------------|---------|-----------|-----|-----------|
| 1 | | 4 | 7 | <u>16</u> |
| 2 | | <u>16</u> | 27 | 64 |

Для сенсорной системы выбрана величина в 16 измерений за небольшой интервал времени, поскольку в данном случае результат будет расположен:

- с вероятностью 99.993% в доверительном интервале $[-\sigma_x; +\sigma_x]$;
- с вероятностью 95% в доверительном интервале $[-0.5\sigma_x; +0.5\sigma_x]$.

Для реализации второго шага составлена процедура нормализации интервала. Допустим, за временной интервал T будет получено множество значений, как указано в формуле 3:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_{15}, x_{16}\}. \quad (3)$$

Тогда границы интервала представлены минимальным и максимальным значением из серии измерений (формула 4):

$$x \in [x_{\min}, x_{\max}]. \quad (4)$$

Наиболее точное значение, как было описано ранее, является значением среднего арифметического элементов из серии измерений \bar{x} .

Таким образом, точное значение вместе с погрешностью представляют три величины:

- среднее арифметическое \bar{x} ;
- левая граница интервала x_{\min} ;
- правая граница интервала x_{\max} .

С целью рационализации способа хранения информации необходимо произвести нормализацию интервала. В таком случае среднее арифметическое результатов измерений \bar{x} должно совпадать с центром интервала x_c . Подготовленный к нормализации интервал изображён на рисунке 7 а нормализованный – на рисунке 8.

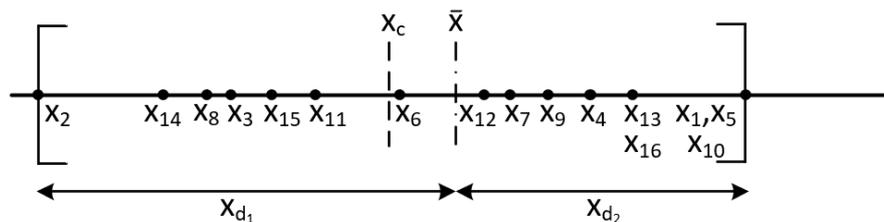


Рисунок 7 – Подготовленный к нормализации интервал

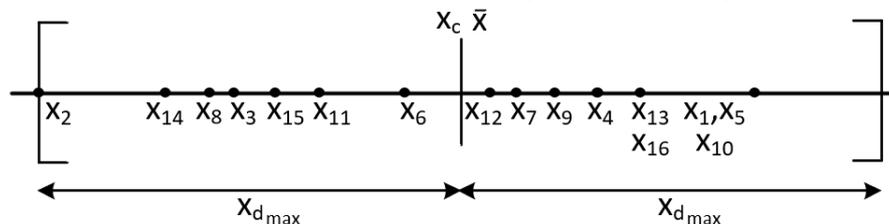


Рисунок 8 – Нормализованный интервал

Данная процедура выполняется в три шага:

– вычисление расстояний до границ интервала (формулы 5, 6):

$$x_{d1} = |\bar{x} - x_{\min}| \quad (5)$$

$$x_{d2} = |\bar{x} - x_{\max}| \quad (6)$$

– поиск максимального расстояния из предыдущего шага (формула 7):

$$x_{d_{max}} = \max\{x_{d_1}, x_{d_2}\}, \quad (7)$$

– расширение границ интервала (формула 8):

$$x \in [\bar{x} - x_{d_{max}}, \bar{x} + x_{d_{max}}] \quad (8)$$

Из рисунков видно, что среднее арифметическое значений вычислений совпадает с центром интервала, и вычисляется как полусумма границ. Таким образом, необходимую информацию предоставляют всего два значения:

- левая граница интервала x_{\min} ;
- правая граница интервала x_{\max} .

Третий этап модифицированного алгоритма представляет собой кодирование нормализованного интервала с использованием алгоритмов постбинарного компьютеринга. В этой логике 4 состояний, кроме состояния истины (1) и лжи (0) присутствуют ещё 2:

– А – ни истина, ни ложь (неопределённость);

| | | | | | | | | |
|----------|------|---------------|---|---------------|----------|---------|---------|-----------------|
| 17.0134 | 0 | 1 0 0 0 0 0 1 | 1 | 0 0 0 1 0 0 0 | 0 0 0 1 | 1 0 1 1 | 0 1 1 1 | 1 0 0 1 |
| 17.8780 | 0 | 1 0 0 0 0 0 1 | 1 | 0 0 0 1 1 1 1 | 0 0 0 0 | 0 1 1 0 | 0 0 1 0 | 0 1 0 1 |
| Rb64/32p | 0 | 1 0 0 0 0 0 1 | 1 | 0 0 0 1 | M M M | M M M M | A A A A | A A A A A A M 0 |
| 17.0078 | 0 | 1 0 0 0 0 0 1 | 1 | 0 0 0 1 | 0 0 0 0 | 0 0 0 0 | 1 1 1 1 | 1 1 1 1 1 1 0 0 |
| 17.9922 | 0 | 1 0 0 0 0 0 1 | 1 | 0 0 0 1 | 1 1 1 1 | 1 1 1 1 | 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 0 1 0 |
| | Знак | Порядок | | | Мантисса | | | |

Рисунок 9 – Пример кодирования и декодирования интервала

Выводы

Таким образом, обоснована целесообразность использования модифицированного алгоритма измерения физических величин в сенсорных системах. Приведение интервала к необходимому формату даст возможность эффективно хранить точное значение наряду с информацией о погрешности, а переход к постбинарному кодированию позволит использовать все преимущества, связанные с таким форматом хранения данных.

Литература

1. Койбаш А. А. Пути повышения эффективности устройств сенсорной составляющей информационно-компьютерной инфраструктуры / А. А. Койбаш // Информатика и кибернетика. – Д.: ДонНТУ, – 2019. – № 2(16). – С. 51-57.
2. Velasquez, J. A Talk With Janusz Bryzek: The Father of Sensors / J. Velasquez // Available at: <https://www.alleywatch.com/2013/12/a-talk-with-janusz-bryzek-the-father-of-sensors/> (accessed 25 August 2021)
3. Аноприенко, А. Я. Анализ эффективности устройств сенсорной составляющей

– М – и истина, и ложь (множественность).

Структурную единицу представления информации, аналогично биту для двоичной логики, в постбинарной логике представляет тетрит.

Таким образом, интервал из двух чисел кодируется в одно постбинарное число. Для этого используется следующий алгоритм:

- первое несовпадение в битах чисел интервала даёт начало серии множественности (М);
- последний элемент серии множественности (М) даёт старт серии неопределённости (А), которая распространяется до конца числа.

Впоследствии данное постбинарное число понадобится декодировать для различных нужд. По законам постбинарного компьютеринга результатом будет пара чисел, представляющих интервал. Состояния конвертируются по следующим правилам:

- для нижней границы: М => 0; А => 1;
- для верхней границы: М => 1; А => 0.

Пример кодирования и декодирования интервала отображён на рисунке 9.

образовательной системы умного города / А. Я. Аноприенко, А. А. Койбаш, Е. И. Приходченко // Информатика и кибернетика. – Д.: ДонНТУ, – 2020. – № 1(19). – С. 5-11.

4. Аноприенко, А. Я. Закономерности развития инерциальных датчиков информационно-компьютерной инфраструктуры / А. Я. Аноприенко, А. А. Койбаш, Н. С. Максименко, К. А. Сидоров // Информатика и кибернетика. – Д.: ДонНТУ, – 2021. – № 1 - 2 (23 - 24). – С. 14-21.

5. Аноприенко, А. Я. Основные закономерности эволюции компьютерных систем и сетей / А. Я. Аноприенко // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: Проблемы моделирования и автоматизации проектирования. – № 1-2. – С. 10-32.

6. Аноприенко, А. Я. Системный анализ закономерностей мирового развития компьютерных систем / А. Я. Аноприенко, К. А. Сидоров, Н. С. Максименко, А. А. Койбаш // Информатика и кибернетика. – Д.: ДонНТУ, – 2019. – № 4(18). – С. 41-48.

7. ADXL354/ADXL355: Low Noise, Low Drift, Low Power, 3-Axis MEMS Accelerometers Data Sheet (Rev. B). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical->

documentation/data-sheets/adx1354_355.pdf (accessed 24 August 2020).

8. ADXRS290: Ultralow Noise, Dual-Axis Gyroscope Data Sheet (Rev. A). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXRS290.pdf> (accessed 11 October 2020).

9. ADXRS645: High Temperature, Vibration Rejecting $\pm 2000^\circ/\text{sec}$ Gyroscope Data Sheet (Rev. B). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXRS645.pdf> (accessed 11 October 2020).

10. Шабалдин, Е. Д. Метрология и электрические измерения: Учеб. пособие / Е. Д. Шабалдин, Г. К. Смолин, В. И. Уткин, А. П. Зарубин // Под ред. Е. Д. Шабалдина. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т». – 2006. – 282 с.

11. Максюзин, Г. В. Учет погрешностей МЭМС-акселерометра при его моделировании / Г. В. Максюзин, Н. С. Соболева // Политехнический молодежный журнал. – 2019. – С. 1-7.

12. Крылов, А. А. Технологические подходы к устранению смещения нуля МЭМС гироскопов в составе гироинерциального блока / А. А. Крылов, Д. В. Корнюк // Труды МАИ. Выпуск № 103. – С. 1-18.

13. Горянина, К. И. Стохастический подход к уменьшению ошибок калибровки MEMS датчиков

ориентации / К. И. Горянина. – С. 16-24.

14. Астраханцев, Ю. Г. Алгоритмическая коррекция инструментальных погрешностей магнитометра / Ю. Г. Астраханцев, Н. А. Белоглазова // Измерительная техника № 5, 2020. – С. 50-57.

15. Пьявченко, О. Н. Погрешности интеллектуальных датчиков давления / О. Н. Пьявченко, Е. В. Удод // Известия ТРТУ. Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении. – С. 126-132.

16. Интеллектуальные датчики давления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/tech-specs/34-ST-03-60-RU.pdf> (дата обращения: 17.07.2021)

17. Аноприенко, А. Я. Введение в постбинарный компьютеринг. Арифметикологические основы и программно-аппаратная реализация / А. Я. Аноприенко, С. В. Иваница – Донецк: ДонНТУ. – УНИТЕХ, 2017. — 308 с.

18. Аноприенко, А. Я. Пример Румпа в контексте традиционных, интервальных и постбинарных вычислений / А. Я. Аноприенко, В. А. Гранковский, С. В. Иваница // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия «Проблемы моделирования и автоматизации проектирования» (МАП-2011). Выпуск: 9 (179). – Донецк: ДонНТУ. – 2011. – 356 с.

Койбаш А. А. Разработка модифицированного алгоритма измерения физических величин для сенсорных систем. С целью улучшения характеристик сенсорных систем выполнен анализ основных источников погрешностей микроэлектромеханических датчиков. Определено взаимное влияние датчиков внутри интеллектуальной сенсорной системы, а также выявлена важность сохранения информации о точности самих сенсоров. Для определения погрешности, связанной с непосредственными характеристиками устройства, проведён эксперимент с использованием датчика температуры и микроконтроллера на плате STM32F407G Discovery. На основании результатов эксперимента предложен модифицированный алгоритм измерения физических величин в сенсорных системах.

Ключевые слова: сенсоры, сенсорные системы, МЭМС, алгоритм измерения физических величин, микроконтроллер, постбинарный компьютеринг.

Koibash A. Development of modified algorithm for measuring physical quantities for sensor systems. In order to improve the characteristics of sensor systems analysis of the main sources of errors was made in microelectromechanical sensors. The mutual influence of sensors within an intelligent sensor system is determined, and the importance of maintaining information about the accuracy of the sensors themselves is revealed. To determine the error associated with the direct characteristics of the device, an experiment was conducted using a temperature sensor and a microcontroller on the STM32F407G Discovery board. The modified algorithm is proposed for measuring physical quantities in sensor systems based on the results of the experiment.

Keywords: sensors, sensor systems, MEMS, algorithm for measuring physical quantities, microcontroller, post-binary computing.

Статья поступила в редакцию 18.11.2021
Рекомендована к публикации профессором Аноприенко А. Я.