

DOI 10.37882/2223-2966.2025.12.16

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И СИМУЛЯЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ

Койбаш Александр Андреевич

старший преподаватель, ФГБОУ ВО Донецкий национальный технический университет
mr.koibash@gmail.com

SOFTWARE IMPLEMENTATION AND SIMULATION MODELING OF A MODIFIED MEASUREMENT ALGORITHM FOR SENSOR SYSTEMS

A. Koibash

Summary. The paper presents research results on applying postbinary computing to sensor system data processing.

The objective is the theoretical substantiation of postbinary encoding applicability for representing measurements with uncertainty and creating a demonstration software implementation on modern binary platforms.

A modified algorithm for sensor data processing is described: interval symmetrization relative to the expected value followed by postbinary encoding. Two formats are analyzed: PostBinary 64/32 p (minimal memory consumption) and PostBinary 128/32 ip (unconditional accuracy of interval boundaries).

An object-oriented C++ library with encoding/decoding procedures has been developed. Simulation modeling of sensors with various error levels revealed format characteristics: 64/32p is effective for accurate sensors under stable conditions, while 128/32ip is preferable for large errors and sharp changes.

The results establish a theoretical foundation for the sensor component of computational infrastructure compatible with prospective postbinary architectures. The library is applicable in research projects studying postbinary data representation.

Keywords: post-binary computing, sensor systems, tetralogic, sensor data processing, four-valued logic.

Аннотация. В статье представлены результаты исследования применения постбинарного компьютеринга к обработке данных сенсорных систем.

Цель работы — теоретическое обоснование применимости постбинарного кодирования для представления измерений с погрешностью и создание демонстрационной программной реализации на современных двоичных платформах.

Описан модифицированный алгоритм обработки данных датчиков: симметризация интервала относительно математического ожидания с последующим постбинарным кодированием. Проанализированы два формата: PostBinary 64/32 p (минимальные затраты памяти) и PostBinary 128/32 ip (безусловная точность границ интервала).

Создана объектно-ориентированная библиотека на C++ с процедурами кодирования/декодирования. Симуляционное моделирование датчиков с различными погрешностями выявило особенности форматов: 64/32p эффективен для точных датчиков при стабильных условиях, 128/32ip предпочтителен при больших погрешностях и резких изменениях.

Результаты закладывают теоретическую основу для сенсорной составляющей вычислительной инфраструктуры, совместимой с перспективными постбинарными архитектурами. Библиотека применима в исследовательских проектах по изучению постбинарного представления данных.

Ключевые слова: постбинарный компьютеринг, сенсорные системы, тетралогика, обработка данных датчиков, четырёхзначная логика.

Введение

В последние десятилетия стремительность технического прогресса задала высокие темпы внедрения результатов научных исследований и инженерных разработок в повседневную жизнь. С появления первых компьютеров прошло, по историческим меркам, не столь много времени, однако уже сегодня нас окружает множество компактных вычислительных устройств, а компьютерные сети видимыми и невидимыми связями опутали целый мир.

Современная информационно-компьютерная инфраструктура для взаимодействия с миром требует по-

лучения точных данных об окружающей среде в режиме реального времени. Сенсорные системы выступают в роли «глаз и ушей» [1], преобразовывая аналоговую информацию в цифровой формат.

Существуют концепции интернета вещей и киберфизических систем, подразумевающих повсеместное встраивание датчиков в объекты реального мира. В связи с этим модернизация различных аспектов сенсорной составляющей окажет положительное влияние на работу и эффективность большинства цифровых систем, многие из которых будут использовать как отдельные датчики, так и подсистемы на их основе.

Литературный обзор

Современные исследования направлены на создание «суперсенсоров» [2–4], которые будут обладать высокой степенью интеграции разнородных сенсоров в рамках единых устройств. Активно производится интеграция сенсорных систем в медицине [5–6], решения масштабируются до уровня «умных городов» [7]. Однако пределы роста эффективности вычислительных устройств не являются безграничными, поэтому необходим качественно новый подход к вопросу архитектуры сенсорных систем.

Сегодняшняя информационно-компьютерная инфраструктура построена на простом логическом дуализме: состояниях «да» и «нет», истины и лжи, нуля и единицы. Однако, что будет, если изменить сам фундамент нынешнего подхода? В монографии [8] авторы предлагают расширить текущую основу, добавив состояния множественности «и да, и нет» и неопределённости «ни да, ни нет». Такая эволюционировавшая архитектура вычислительной техники получила название «постбинарный компьютинг», который будет актуален в эпоху квантовых или генетических компьютеров. Этот подход позволяет экспериментально проверить особенности квантовых и генетических вычислений и преодолеть недостатки двоичной логики.

Материалы и методы

Данное исследование направлено на разработку теоретической основы для сенсорных систем будущего, в основе которых будет находиться расширенный кодологический базис, представленный постбинарным компьютингом. В работах [9–10] спроектирован алгоритм, основанный на постбинарном кодировании. Его преимущества [8] для сенсорных систем заключаются в следующем:

- внедрение информации о точности в числовое представление;
- кодирование множественных/вероятностных значений одним кодом;
- естественный параллелизм обработки информации.

Алгоритм включает две процедуры:

- 1) симметризация интервала относительно среднего значения, которая выполняется по формулам из работы [9];
- 2) постбинарное кодирование интервала: преобразование интервала в формат четырёх состояний (0, 1, «М»-множественность, «А»-неопределённость).

Сенсорная система проводит за короткий период 16 измерений [9], обеспечивающих результат с вероятностью 99,993 % в доверительном интервале $[-\sigma_x; +\sigma_x]$ и с вероятностью 95 % в доверительном интервале $[-0,5\sigma_x; +0,5\sigma_x]$.

Для анализа эффективности алгоритма требуются экспериментальные данные, которые можно было бы обработать приведенными выше процедурами. С этой целью в статье [9] выбран датчик температуры как доступный, простой в подключении и сборе информации. Кроме того, данная характеристика окружающей среды в повседневности является частым объектом измерения.

Терморезистор на плате STM32F407G выполнил 16 измерений температуры. Калибровка проведена аквариумным термометром. Получены значения: минимальное 17,0134 °C, максимальное 17,8780 °C, среднее 17,5531 °C, что свидетельствует о большой погрешности датчика. Согласно центральной предельной теореме, погрешности следуют нормальному распределению [11]. После симметризации получен интервал: [17,0134 °C; 18,0928 °C], который отображает нормальное распределение погрешности, а серединой интервала является целевое значение температуры, с большой вероятностью находящееся в доверительном интервале. Такой подход экономит память (два числа вместо трёх) и позволяет отслеживать деградацию датчика.

Авторами монографии [8] разработаны различные спецификации постбинарных чисел. Поскольку границы интервала определяются парой значений в двоичном формате float, для постбинарного кодирования определены следующие подходящие форматы на основе тетралогики:

- PostBinary 64/32 p, позволяющий хранить одно вещественное число одинарной точности в виде тетракода (рисунок 1);
- PostBinary 128/32 ip, предназначенный для хранения двух вещественных чисел одинарной точности в виде тетракода (рисунок 2).



Рис. 1. Спецификация формата PostBinary 64/32 p



Рис. 2. Спецификация формата PostBinary 128/32 ip

В статье [9] дан обзор первого формата, а сами алгоритмы преобразований описаны авторами монографии [8]. Для формата PostBinary 64/32 p в кратком изложении процедура кодирования выглядит следующим образом:

- первое несовпадение в битах чисел даёт начало серии множественности (M);
- последний элемент серии множественности даёт начало серии неопределённости (A).

Для декодирования постбинарного числа необходимо свести все биты множественности и неопределённости к двоичным значениям 0 и 1. При этом необходимо руководствоваться следующими правилами:

- для формирования минимального («узкого») интервала в левой границе M = 0, A = 1, а в правой границе M = 1, A = 0;
- для формирования максимального («широкого») интервала в левой границе M = 0, A = 0, а в правой границе M = 1, A = 1.

Пример кодирования и декодирования на диапазоне [17.0134 °C; 18.0928 °C] приведён в таблице 1.

Как видно из таблицы, из-за слабой точности терморезистора и большого разброса результатов измерений постбинарное число также теряет в точности. Даже при одинаковом знаке и порядке (экспоненте) числа с плавающей запятой большую часть мантиссы составляют значения множественности и неопределённости.

Во втором формате сразу встроено хранение каждой границы интервала по отдельности, поэтому в числах можно не задействовать такое количество разрядов M и A. Из недостатков такого подхода — большой расход памяти.

Таким образом, PostBinary 64/32 p характеризуется меньшими затратами памяти. Однако в процессе преобразования крайне важно, чтобы не был затронут порядок вещественного числа. Такое может происходить в реальных ситуациях, например, при резком изменении значений температуры. Также при достаточно существенной дисперсии значений, как это происходит в датчиках с большими погрешностями измерений, итоговый результат может быть серьёзно искажён. В подобных случаях лучше показывает себя формат PostBinary 128/32 ip.

Таблица 1.

Результаты кодирования и декодирования проверочного интервала

	Знак	Порядок	Мантисса	Значение в 10 сист. счисл.
Число 1	0	10000011	00010000001101101110001	17.0134
Число 2	0	10000011	00100001011111000001110	18.0928
Постбинарный код	0	10000011	00MMAAAAAAAAAAAAAAAAAAAM0	
Минимальный интервал				
Число 1 (декод.)	0	10000011	000011111111111111111111	17
Число 2 (декод.)	0	10000011	001100000000000000000000	19
Максимальный интервал				
Число 1 (декод.)	0	10000011	000000000000000000000000	16
Число 2 (декод.)	0	10000011	001111111111111111111111	20

Для проверки процедуры кодирования и декодирования выполнены 9 серий измерений температуры по 16 измерений в каждой за интервал в 1 секунду. После этого были сформированы и симметризованы интервалы. Сравнительная характеристика результатов кодирования и декодирования с использованием обоих постбинарных форматов представлена в таблице 2.

Из таблицы видно, что в использовании форматов есть свои особенности. Так, PostBinary 64/32 p имеет меньший расход памяти. Однако для таких датчиков с большой погрешностью и столь серьёзным разбросом значений, как используемый в эксперименте терморезистор, проявляются недостатки: потеря точности границ интервала, а также постоянная необходимость отслеживания некорректных значений множественности в порядке вещественного числа. Формат PostBinary 128/32 ip, напротив, характеризуется высокой точностью

Таблица 2.

Сравнительная характеристика результатов кодирования и декодирования

№	Оригинальный интервал		PostBinary 64/32 p		PostBinary 128/32 ip	
	$[t_{nmin}; t_{nmax}], °C$	$\bar{t}, °C$	$[t_{decmin}; t_{decmax}], °C$	$\bar{t}_{dec}, °C$	$[t_{decmin}; t_{decmax}], °C$	$\bar{t}_{dec}, °C$
1	[17,0134; 18,0928]	17,5531	[17; 19]	18	[17,0134; 18,0928]	17,5531
2	[17,7994; 18,3706]	18,0850	[16,5; 19,5]	18	[17,7994; 18,3706]	18,0850
3	[22,9346; 23,7364]	23,3355	[22,25; 23,75]	23	[22,9346; 23,7364]	23,3355
4	[25,5126; 26,7336]	26,1231	[25; 27]	26	[25,5126; 26,7336]	26,1231
5	[29,4374; 30,2182]	29,8278	[29; 31]	30	[29,4374; 30,2182]	29,8278
6	[33,9386; 34,7404]	34,3395	[33; 35]	34	[33,9386; 34,7404]	34,3395
7	[36,9516; 37,7376]	37,3446	[36,25; 37,75]	37	[36,9516; 37,7376]	37,3446
8	[37,9210; 38,7228]	38,3219	[37; 39]	38	[37,9210; 38,7228]	38,3219
9	[47,8508; 49,1608]	48,5058	[34; 62]	48	[47,8508; 49,1608]	48,5058

как границ интервала, так и результата вычисления. Тем не менее, расход памяти также становится больше.

Из вышеприведенного можно сделать вывод, что при больших погрешностях и слишком «широких» интервалах целесообразнее использовать PostBinary 128/32 ip. Во всех остальных случаях, когда множественность не затрагивает порядок и старшие разряды мантиссы, достаточно оперировать форматом PostBinary 64/32 p.

С целью дальнейшей проверки работоспособности алгоритма необходимо выполнить симуляционное моделирование. Для этого создана библиотека на языке программирования C++. Основными критериями при выборе являлись быстрдействие, кроссплатформенность, интегрируемость. Объектно-ориентированная иерархия в пространстве имён Postbinary представлена на рисунке 3 и в её состав входят следующие классы:

- Number, основная функция которого заключается в работе с памятью и кодировании тетритов парами битов («A₄=00₂, 0₄ = 01₂, 1₄ = 10₂, M₄ = 11₂);
- Fractional, наследующий Number и представляющий вещественные числа с кодированием/декодированием интервалов;
- Pb64_32p, реализующий постбинарный тип данных с полями 1 тетрит (знак), 8 тетритов (порядок) и 21 тетритов (мантисса), а также поле в 2 тетрита для особенного кода формата.
- ByteOrder, Convert, являющиеся вспомогательными классами для платформенезависимости.

Библиотека протестирована компиляторами для различных платформ и архитектур: MSVC, g++, ARM Compiler v6 на Windows, Linux, STM32.

Симулятор представлен классом SensorSimulator, который моделирует работу датчика, генерируя значения согласно нормальному распределению с параметрами: математическое ожидание, стандартное отклонение, интервал между измерениями. Каждое измерение обрабатывается следующими шагами: накопление 16 значений (FIFO) → вычисление статистики (min, max, среднее) → симметризация интервала → постбинарное кодирование → декодирование → регистрация (CSV). Реализованы четыре режима симуляции (480 измерений, 30 секунд):

- статические измерения (0–10 с);
- медленное изменение +1°C/с (10–20 с);
- быстрое изменение +10°C/с (20–25 с);
- стабилизация (25–30 с).

Результаты

Первая серия измерений выполнена при симуляции датчика, аналогичного по погрешности терморезистору (отклонение равно 0,258 °C). Вторая серия проведена при симуляции работы более точного датчика, обладающего умеренным уровнем погрешности. Результаты обеих серий представлены на рисунке 4. При крайне высокой погрешности даже со стабильной температурой декодированный постбинарный интервал показывает искажение диапазона. При умеренных погрешностях значение остаётся точным и постбинарный формат сохраняет все свои преимущества.

На рисунке 5 представлен график возрастающей температуры симулируемого датчика. При стабильной температуре в начале и конце измерений значения сохраняются точными. При резких изменениях температуры наблюдаются «пузыри» из-за широкого интервала при резком росте температуры.

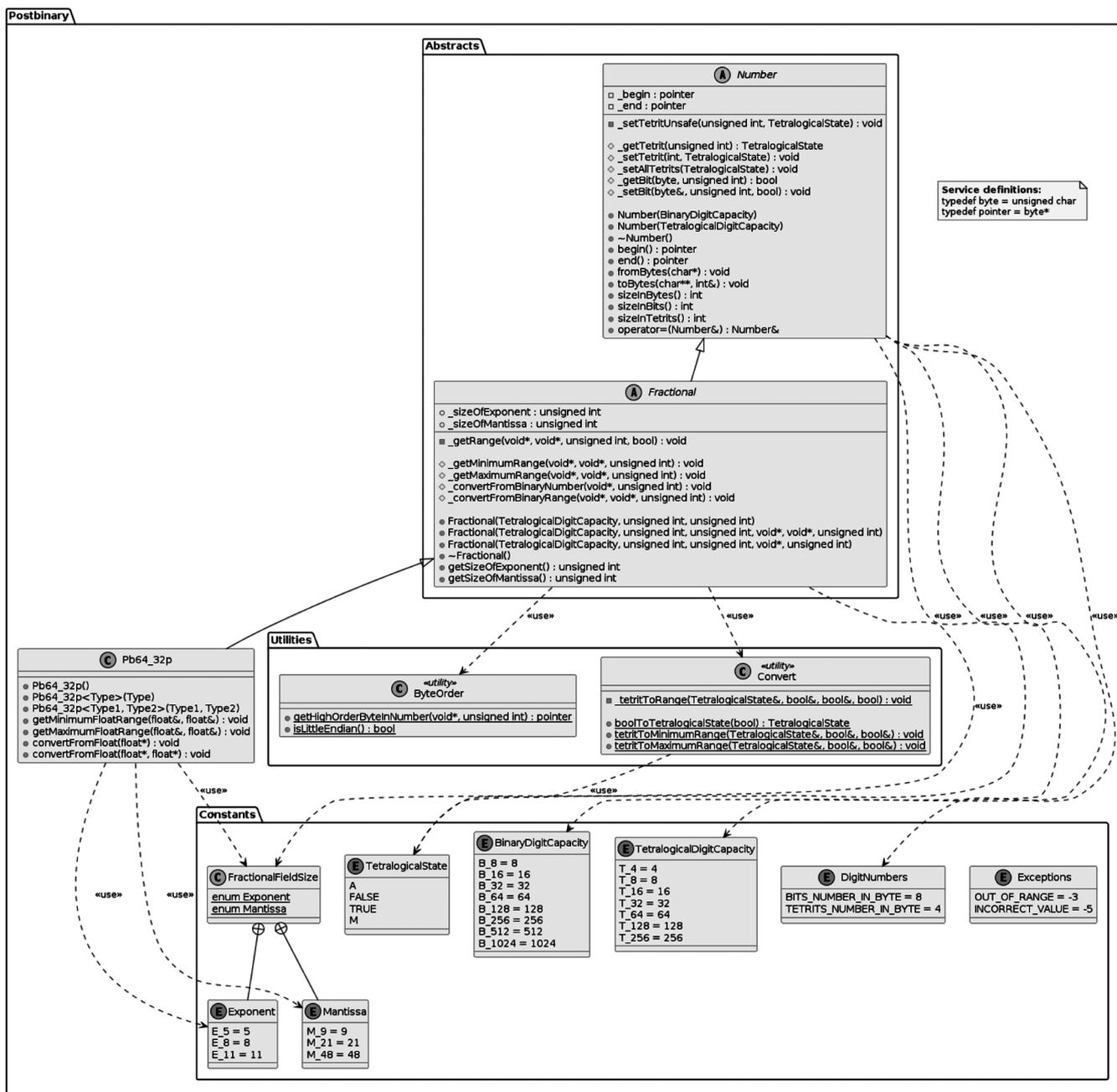


Рис. 3. Диаграмма классов

Обсуждение

Симуляция точного датчика показала, что постбинарный формат сохраняет приемлемую точность и информацию о погрешности. Симметризованный интервал [17,5499°C; 17,557°C] после декодирования «разворачивается» как [17,5488°C; 17,5605°C], охватывая значения погрешности. Результат сдвигается в пределах 0,001°C — такой ошибкой можно пренебречь.

Эффект «пузырей» может сигнализировать как об изменениях температуры, так и о различии порядков чисел на краях интервала. Для устранения таких искажений в мо-

мент сильного расширения интервала целесообразно кодировать информацию форматом PostBinary 128/32 ip.

Таким образом, симуляция подтверждает сильные и слабые стороны приведенных выше постбинарных форматов. В тех случаях, когда датчик проводит достаточно точные измерения («разброс» значений не превышает сотые доли измеряемой величины) и измеряемый параметр окружающей среды в конкретном моменте остаётся стабильным, подходит тип данных PostBinary 64/32 p. При большом отклонении результатов и резких изменениях в окружающей среде необходимо сохранить приемлемую точность в формате PostBinary 128/32 ip ценой увеличения потребления памяти.

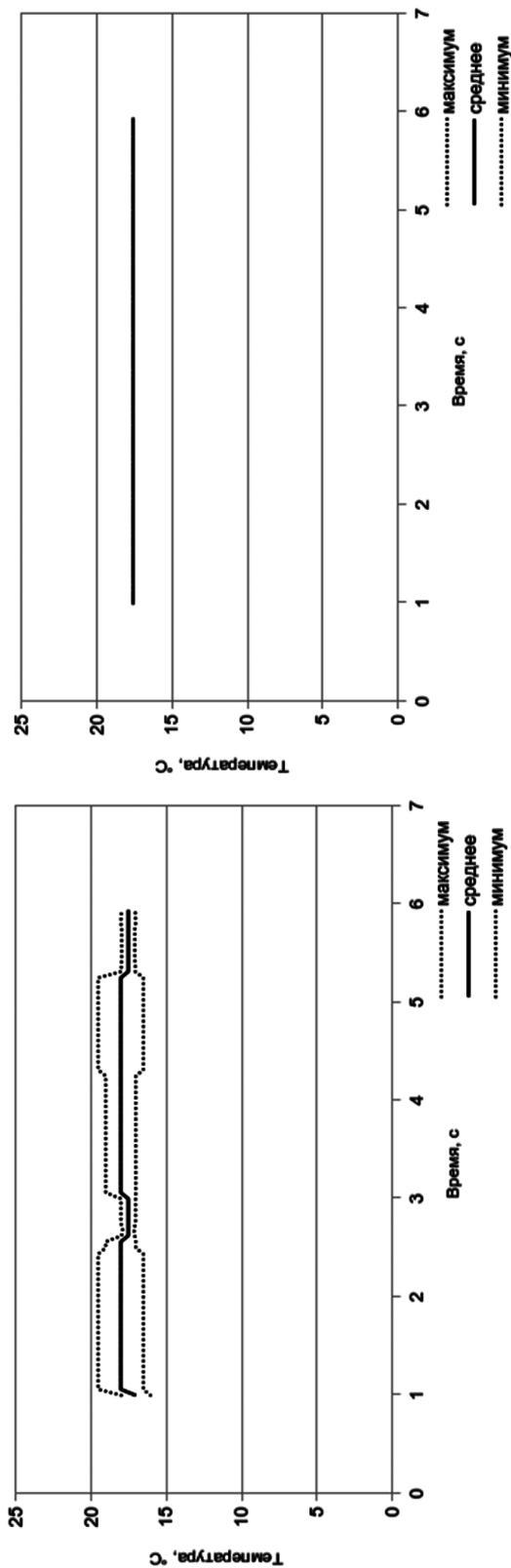


Рис. 4. Декодированный диапазон значений при измерениях с большой погрешностью (слева) и умеренной погрешностью (справа)

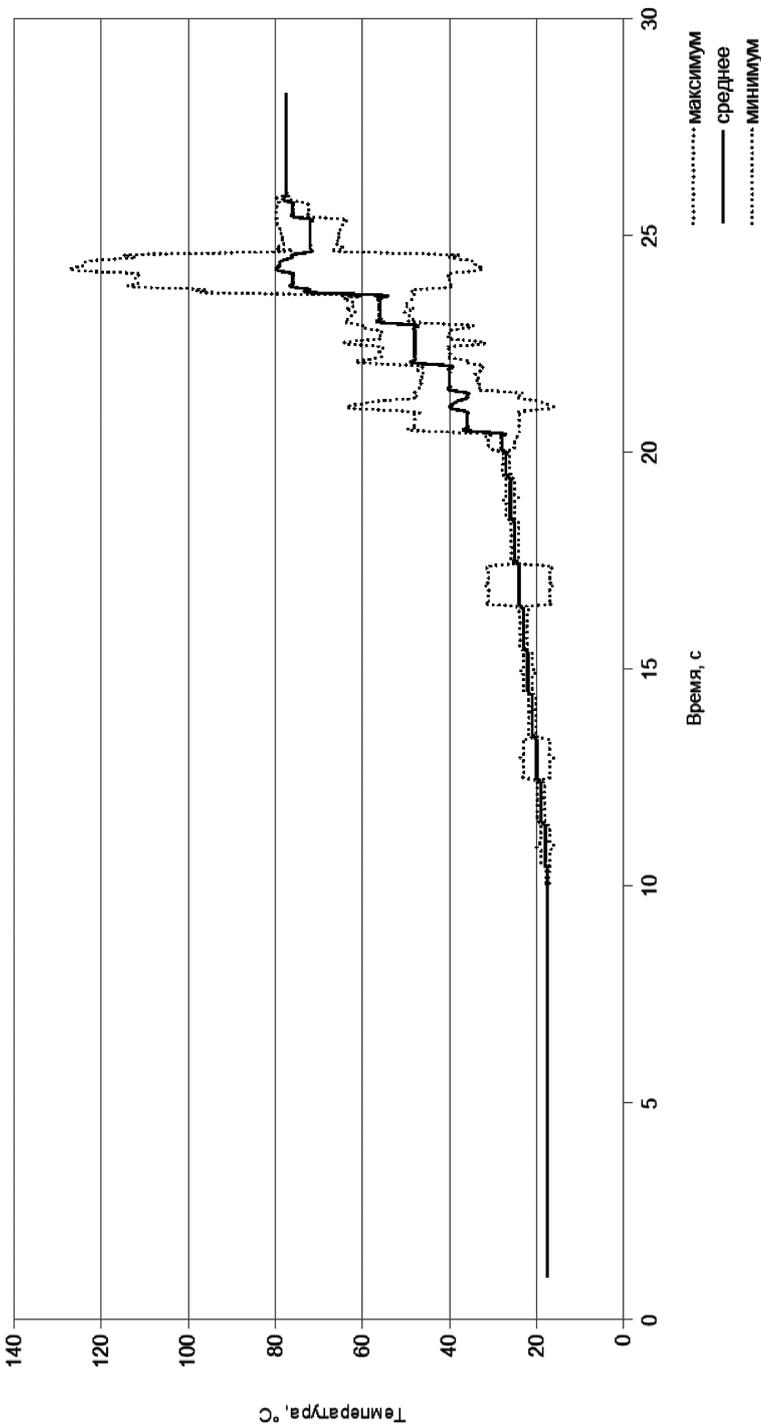


Рис. 5. Декодированный диапазон измерений при умеренной погрешности измерений виртуального датчика и возрастающей температуре

Заключение

В работе реализована модель модифицированного алгоритма измерения физических величин для сенсорных систем на основе постбинарного кодирования. Алгоритм включает симметризацию интервала относительно среднего арифметического с последующим постбинарным кодированием диапазона, что создаёт теоретическую основу для сенсорных систем на постбинарных вычислительных архитектурах.

Создана кроссплатформенная C++ библиотека для форматов PostBinary 64/32 p и 128/32 ip, протестированная на различных платформах и архитектурах и демонстрирующая реализуемость концепции на современных двоичных системах.

Симуляционное моделирование датчиков с различными погрешностями выявило характерные особенности форматов:

- формат PostBinary 64/32 p демонстрирует корректное представление данных при малых погрешностях датчиков (сотые доли измеряемой величины) и стабильных условиях измерения, обеспечивая компактное хранение информации;

— формат PostBinary 128/32 ip показывает устойчивость при больших погрешностях измерений и резких изменениях параметров, безусловно сохраняя точность границ интервала.

Экспериментально установлен эффект расширения интервала («пузыри») в формате 64/32p при резких изменениях измеряемой величины вследствие распространения состояний множественности на старшие разряды. Данное свойство должно учитываться при проектировании или компенсироваться переключением на формат 128/32ip.

Разработанные алгоритм и библиотека подтверждают возможность рационального хранения измерений с погрешностью (два значения вместо трёх), встраивания информации о точности в числовое представление и создают основу для применения постбинарного компьютинга в сенсорных системах будущего.

Результаты вносят вклад в развитие постбинарного кодо-логического базиса и применимы при разработке программно-алгоритмического обеспечения для перспективных вычислительных систем (квантовых, генетических и других).

ЛИТЕРАТУРА

1. Койбаш А.А. Пути повышения эффективности устройств сенсорной составляющей информационно-компьютерной инфраструктуры / А.А. Койбаш // Информатика и кибернетика. — Донецк: ДонНТУ, 2019. — № 2(16). — С. 51–57.
2. Варзар Р.Л. Аппаратная архитектура сенсорного модуля суперсенсорного компьютера и его параметры / Р.Л. Варзар, А.Я. Аноприенко // Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг (ИУС КМ — 2013): сборник материалов IV Всеукраинской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Донецк. — Донецк: ДонНТУ, 2013. — С. 720–728.
3. Койбаш А.А. Закономерности развития сенсорной составляющей мобильных компьютерных систем / А. Койбаш, Н.С. Максименко, К.А. Сидоров // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2020): сборник трудов XVIII Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (Таганрог, 3–5 декабря 2020 г.): в 3 т. / Южный федеральный университет. — Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2020. — Т. 1. — 284 с.
4. Varga R. Super-sensor for 360-degree Environment Perception: Point Cloud Segmentation Using Image Features / R. Varga, A. Costea, H. Florea, I. Giosan, S. Nedeveschi // IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems. — Yokohama: 2017. — P. 1–8.
5. Wu F. WE-Safe: A Self-Powered Wearable IoT Sensor Network for Safety Applications Based on LoRa / F. Wu, J. Redouté, M. R. Yuce // IEEE Access, 2018, Vol. 6, pp. 40847–40853, Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8419707> (accessed 25 February 2019).
6. Varatharajan R. Wearable sensor devices for early detection of Alzheimer disease using dynamic time warping algorithm / R. Varatharajan, G. Manogaran, M.K. Priyan, R. Sundarasekar // Cluster Computing, 2017, Vol. 21, Issue 2, pp. 681–690.
7. Аноприенко А.Я. Анализ эффективности устройств сенсорной составляющей образовательной системы умного города / А.Я. Аноприенко, А.А. Койбаш, Е.И. Приходченко // Информатика и кибернетика. — Донецк: ДонНТУ, 2020. — № 1(19). — С. 5–11.
8. Аноприенко А.Я. Введение в постбинарный компьютинг. Арифметико-логические основы и программно-аппаратная реализация / А.Я. Аноприенко, С.В. Иваница. — Донецк: ДонНТУ — УНИТЕХ, 2017. — 308 с.
9. Койбаш А.А. Разработка модифицированного алгоритма измерения физических величин для сенсорных систем / А.А. Койбаш // Информатика и кибернетика. — Донецк: ДонНТУ, 2021. — № 4(26). — С. 63–69.
10. Койбаш А.А. Анализ эффективности модифицированного алгоритма измерения физических величин для сенсорных систем / А.А. Койбаш // Информатика и кибернетика. — Донецк: ДонНТУ, 2023. — № 1(31). — С. 50–58.
11. 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.

© Койбаш Александр Андреевич (mr.koibash@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»