**ПРИМЕНЕНИЕ НЕПОЗИЦИОННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ
В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ****Д.В. Моисеев¹, Н.Е. Сапожников²**

¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

² ФГКВБОУ ВПО «Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды
училище им. П.С. Нахимова» Министерства обороны Российской Федерации,
РФ, г. Севастополь, ул. Дыбенко, д. 1а
E-mail: dmitriymoiseev@mail.ru

Развитие современных, а также создание перспективных информационных систем требует создания единой архитектуры, с унифицированным аппаратным и программным обеспечением на базе комплексной интеграции не только на техническом, но и на функциональном уровне входящих в состав природно-технических информационных систем компонент. Реализация приведённой структуры приводит к многократному увеличению объемов вычислений над массивами данных большой разрядности, проводимых в реальном масштабе времени, усложнению вычислительных алгоритмов. Вследствие этого возникают острые противоречия между аппаратными затратами, быстродействием, точностью и отказоустойчивостью. Работа просвещена формированию методологии вероятностного представления и преобразования информации и разработка на её основе методик, методов и алгоритмов синтеза устройств вычислительной техники и компонент для перспективных и существующих информационных систем, построенных на отечественной элементной базе, которая становится эффективным и высокотехнологическим средством преодоления указанных противоречий.

Ключевые слова: вероятностная форма представления и преобразования информации, вероятностное отображение, вероятностный процессор, непозиционное представление, информационно-управляющая система.

Поступила в редакцию: 06.09.2021.

Введение. Состояние окружающей среды это неотъемлемый, ключевой компонент обобщенной категории качества жизни населения, в связи с этим, возникает объективная потребность разработки методов и средств, предназначенных для реализации системы непрерывного мониторинга ключевых показателей окружающей среды [1]. В настоящий момент известны различные способы контроля природной среды измерением параметров с различного вида носителей и обработкой измерительных данных [2].

Стремление к улучшению энергетической эффективности и универсальности устройств информационно-управляющих систем (ИУС) приводит к усложнению вычислительных алгоритмов, обострению проблемы аппаратных затрат, быстродействия и точности и повышению требований к отказо-

устойчивости устройств и помехоустойчивости каналов связи при передаче данных [3, 4]. Настоящий период развития теоретических положений, методов и алгоритмов синтеза устройств вычислительной техники (ВТ), используемых при разработке перспективных и совершенствовании существующих информационных систем (ИС), характеризуется интенсивным поиском новых принципов обработки и хранения информации, построения вычислительных архитектур и систем с привлечением современных технологий, среди которых технология вероятностного представления и преобразования информации (ВППИ) является одной из наиболее перспективных [5]. В общем виде суть стохастического или вероятностного преобразования информации в непозиционное вероятностное отображение (ВО) заключается в том, что любому значению преобразуемой

величины можно привести в соответствие некоторую вероятность – вероятность того, что значение преобразуемой величины будет больше величины, сгенерированной случайным образом внутри диапазона изменения преобразуемой величины. Реализация вычислительных устройств (ВУ), выполняющих арифметические и логические операции над ВО, приводит к многократному уменьшению аппаратного объема ВУ, а само ВППИ обеспечивает помехоустойчивость и криптографическую стойкость обрабатываемой и передаваемой информации [6].

Постановка задачи. Авторами разработана методология построения операционных устройств универсальных и специализированных вероятностных процессоров (ВП), повышающих эффективность ИУС, которые могут быть использованы при построении природно-технических систем различного назначения [5–9].

В соответствии с разработанной методологией, в общем случае структурная-схема вероятностной вычислительной машины (ВВМ) имеет вид, представленный на рис. 1.

Рис. 1. Структурно-функциональная схема устройства обработки вероятностно представленной информации

Fig. 1. Structural and functional scheme of the device for processing probabilistically presented information

В её состав входят следующие устройства: ввода информации (преобразователи код-ВО (ПКВ), и аналог-ВО (ПАВ), соответственно, выполняющие роль первичных преобразователей (ПП)); ВП; вывода информации (преобразователи вероятность-код (ПВК) и вероятность-аналог (ПВА) соответствен-

но); генераторы случайных и псевдослучайных чисел (ГСЧ и ГПСЧ); устройство управления (УУ).

Дополнительно в схему ВВМ могут быть включены комбинированный цифро-вероятностный процессор и вероятностный трансивер.

Таким образом, основу ВВМ составляет ВП, который, в свою очередь, может быть, как специализированным, так и универсальным.

Универсальные ВП содержат следующие вычислительные узлы в различных сочетаниях: сумматоры; вычитатели; умножители, к которым, в свою очередь, относятся устройства возведения в целую степень, квадраторы; делители; блоки выполнения логических операций. Разработана методика построения указанных операционных устройств, выполнен синтез структурных схем и произведена оценка их точности и быстродействия. На большинство операционных устройств получены патенты на полезные модели и изобретения.

Разработанная методология представления информации в виде ВО позволила построить ряд комбинированных вычислительных устройств, выполняющих арифметические и логические преобразования над операндами, одни из которых могут быть представлены в виде ВО, а другие - в аналоговом или цифровом виде. Использование комбинированных цифро-вероятностных вычислителей позволяет расширить сферу применения ВВМ и облегчить процесс их внедрения в ИУС.

Дополнительно в их схему ВВМ могут быть включены преобразователи информации и различные периферийные устройства. Структурная схема универсального вероятностного процессора приведена на рис. 2.

Рис. 2. Структурно-функциональная схема вероятностного универсального процессора
Fig. 2. Structural and functional scheme of a probabilistic universal processor

Рис. 3. Изменение аппаратного объёма операционных устройств универсального ВП

Fig. 3. Changing the hardware volume of universal PP operating devices

Преимущества в аппаратном объёме, на уровне логического элемента, при реализации универсального ВП будут заключаться в следующем: вероятностный сумматор будет меньше «классического» цифрового аналога в 14 раз, умножитель меньше в 270 раз, схема возведения в квадрат меньше в 300 раз,

аппаратный объём разработанного вероятностного делителя по сравнению с цифровым аналогом меньше примерно в 6 раз. Таким образом, вся схема универсального ВП при сравнении с аналогичной цифровой схемой, выполняющей тот же набор арифметических операций, выигрывает по аппаратному объёму примерно в 150 раз (рис. 3).

К специализированным ВП, синтез и анализ которых выполнены авторами, относятся: вероятностные спектрометры; вероятностные устройства вычисления дробей; вероятностные анализаторы (вероятностные измерители математического ожидания; вероятностные измерители дисперсии; вероятностные измерители средней полной мощности; вероятностные шифраторы; вероятностные устройства решения дифференциальных уравнений); цифровые вероятностные фильтры; вероятностные дифференциальные анализаторы; вероятностные корреломеры; преобразователи Фурье и т.д. (см. рисунок 4). Большинство из представленных устройств могут быть использованы в системах контроля состояния природной среды.

Рис. 4. Классификация разработанных специализированных ВП

Fig. 4. Classification of the developed specialized PP

Разработанное устройство для вычисления спектральной плотности сигнала за счёт применения ВППИ будет обладать более высоким (в 10 раз) быстродействием и более высокими показателями надёжности вследствие значительного уменьшения аппаратного объёма (в 4 раза) [6, 8].

Для оценки первичной измерительной информации разработана схема комплексного вероятностного анализатора, измеряющего математическое ожидание, дисперсию и среднюю полную мощность, обладающая малым аппаратным объёмом, для измерения и контроля значений сигналов с первичных преобразователей ИУС.

Особо актуально применение разработанного комплексного вероятностного анализатора в ИУС автономных объектов, поскольку он обладает высоким быстродействием, малым аппаратным

объёмом, и, как следствие, высокой энергоэффективностью.

Развитие корреляционно-экстремальной тематики нашло своё отражение при создании высокоточных систем наведения беспилотных летательных аппаратов, включающих в себя специальные системы обработки изображений. К ним, прежде всего, относятся бортовые инерциальные и спутниковые навигационные системы, корреляционно-экстремальные системы навигации по геофизическим полям и подготовки эталонной информации.

Вероятностный коррелометр предлагается использовать в корреляционно-экстремальных системах наведения крылатых ракет, что позволит повысить точность их выхода к цели. По расчётам его аппаратный объём меньше цифрового аналога на два порядка, а производительность выше на один порядок.

Рис. 5. Структурно-функциональная схема вероятностной системы контроля состояния природной среды

Fig. 5. Structural and functional scheme of a probabilistic system for monitoring the state of the natural environment

Для использования специализированных ВП в системах радиационного и газового контроля ИУС разработано схемотехническое решение – амплитудный анализатор вероятностного широкодиапазонного гамма-спектрометра повышенной точности, реализующее метод повышения точности измерения уровней гамма-излучения, позволяющее измерять спектр, дозу и мощность дозы гамма-излучения в расширенном энергетическом диапазоне от 0,01 МэВ до 10 МэВ с заданной точностью в масштабе реального времени, обладающее малым аппа-

ратным объёмом и высокой устойчивостью к ИИ.

Как известно, в первичной радиолокации широко распространены устройства обработки, использующие для когерентного накопления пакета отражённых радиолокационных сигналов процедуру быстрого преобразования Фурье (БПФ). Применение процедуры БПФ при обработке пакета импульсных радиолокационных сигналов с конечным числом импульсов приводит к искажению оценок спектральных составляющих сигнала, а выполнение дискретного преобразова-

ния Фурье (ДПФ) является трудоёмкой задачей, поскольку требует многократного выполнения комбинации операций умножения и сложения. Для уменьшения времени, необходимого для выполнения преобразований, предлагается использование информации, представленной в виде ВО [9].

Данными примерами использование специализированных и универсальных ВП не ограничивается, т.к. известные преимущества схемотехнических решений, построенных на вероятностном принципе, позволяют широко использовать их во всех областях народного хозяйства и, в частности, в ИУС, сочетающих малые затраты оборудования с высокими живучестью, надёжностью, точностью, помехоустойчивостью, криптостойкостью и требуемым быстродействием, на рис. 5 представлена структурно-функциональная схема вероятностной системы контроля состояния природной среды.

Заключение. Авторами разработана комплексная методология вероятностного представления информации при создании перспективных и совершенствовании существующих ИУС и их компонент, включающая в себя следующие теоретические положения:

- основы теории псевдовероятностного представления и преобразования информации;
- методику оценки точности и быстродействия узлов ВТ, входящих в состав ИУС, обрабатывающих информацию, представленную в виде ВО;
- методику параллельных вычислений над данными, представленными в виде ВО;
- методику синтеза и анализа устройств ВТ и компонент ИУС, обрабатывающих информацию, представленную в виде ВО.

Разработанная методика синтеза и анализа устройств ВТ и компонент ИУС, обрабатывающих информацию, представленную в виде ВО, характеризующихся повышенным быстродействием и малым аппаратным объёмом, которые могут быть конструктивно исполнены в виде ИМС. Синтезированы следующие вероятностные устройства ВТ:

- первичные преобразователи «значение сигнала – вероятность», «вероятность – вероятность» и «вероятность – значение сигнал», а также блоки, входящие в их состав;

- операционные устройства, выполняющие арифметические операции сложения, вычитания, умножения, возведения в степень и деления над вероятностно представленными данными, в том числе и в параллельных кодах;

- операционные устройства, выполняющие логические операции над вероятностно представленными данными;

- универсальные ВП, преимущества при реализации которых, по сравнению с аналогичной двоичной схемой, выполняющей тот же набор арифметических операций, достигают уменьшения аппаратного объёма примерно в 150 раз. При реализации всей схемы ВП на базе вероятностного делителя, аппаратный объём дополнительно уменьшается в два раза, и всё устройство выигрывает в аппаратном объёме более чем в 300 раз. Предложенные универсальные ВП могут заменить в устройствах ВТ классические цифровые, улучшая тем самым надёжность, массогабаритные и энергоэффективные показатели ИУС;

- специализированные вероятностные процессоры:

- а) измеритель математического ожидания, вероятностный дисперсиометр, измеритель средней полной мощности и комбинированный вероятностный анализатор, которые позволяют значительно повысить надёжность компонент ИУС за счёт размещения первичных измерительных преобразователей непосредственно возле датчиков, и, как следствие, добиться передачи значительно меньших массивов данных по линиям связи за счёт предварительной обработки сигнала;

- б) вероятностные коррелометры, аппаратный объём которых меньше цифрового аналога на два порядка, а производительность выше на один порядок, которые могут быть использованы в корреляционно-экстремальных системах наведения беспилотных летательных аппаратов, в том числе и крылатых ра-

кет, что повысит точность их выхода к цели;

в) амплитудный анализатор вероятностного широкодиапазонного гамма-спектрометра повышенной точности, позволяющий расширить диапазон измерения гамма-излучения при радиационном контроле до 10 кЭв – 10 МЭв с одновременным повышением точности более чем на 1500% и производить измерения в масштабе реального времени, который может быть использован в системах радиационного и газового контроля;

г) вероятностное устройство вычисления спектральной плотности сигнала, в котором достигается уменьшение аппаратного объёма по сравнению с классическим цифровым в 20 раз, с одновременным повышением быстродействия в 6 раз, которое может быть использовано в оптических или тепловых головках наведения зенитных управляемых ракет и позволит повысить вероятность поражения ими цели;

д) устройство для вычисления БПФ и ДПФ, которое обладает более высоким (в 10 раз) быстродействием и более высокими показателями надёжности вследствие уменьшения в 20 раз аппаратного объёма;

– устройства криптографической и стеганографической защиты вероятностно представленной информации.

Как известно, наибольшую сложность при реализации конкретных ИУС представляет собой нахождение элементов оценочной матрицы. В предлагаемом варианте эта проблема разрешается естественным способом на основе решений, полученных при моделировании работы ИУС построенных на вероятностном принципе. Эти решения позволяют найти значения частных критериев и сформировать картежи альтернативных вариантов реализации ИУС построенной на вероятностном принципе: «стоимости, быстродействия, надёжности, точности».

Применение известных классических критериев часто приводит к тому, что использование различных критериев плохо согласуются. Это не позволяет в

достаточной степени ЛПП оценить все риски от последствий принимаемых решений и, тем самым, обосновать использование тех или иных вариантов реализации ИУС. Для того чтобы поддержать процесс принятия решений экспертом далее предлагается геометрическая интерпретация схемы принятия решений и сравнения вариантов систем. При этом возможны две принципиально различные ситуации:

- множество опорных решений содержит абсолютно сравнимые варианты ИУС по всем критериям;
- в опорное множество входят несравнимые варианты ИУС.

Таким образом, на основании разработанных теоретических положений, результаты которых позволяют считать неоспоримым первенство нашей страны в теории ВППИ, заложен интеллектуальный задел для создания перспективных ИУС природно-технического мониторинга с недостижимыми при иной форме представления информации парето-эффективных решений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-29-06023/20 и в рамках внутреннего гранта ФГАОУ ВО СевГУ (грант № 31/06-31).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скатков А.В., Брюховецкий А.А., Моисеев Д.В. Мультивариантный многоканальный программно-измерительный комплекс обнаружения аномальных состояний природно-технических объектов и систем // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 2 (44). С. 119–130. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-2-119-130
2. Гайский В.А., Гайский П.В. Многомерный гармонический анализ при измерениях полей морской среды // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС, 2019. № 4 (38). С. 33–42. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-4-33-42
3. Лебедев Е.К., Галанина Н.А. Сравнительный анализ позиционной и непозиционной обработки информации сигнальными процессорами // Динамика

нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы V Всерос. науч. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2003. С. 193–196.

4. Дзегеленок И.И., Оцоков Ш.А. Алгебраизация числовых представлений в обеспечении высокоточных суперкомпьютерных вычислений // Вестник МЭИ. 2010. № 3. С. 107–116.

5. Моисеев Д.В., Сапожников Н.Е., Чужикова-Проскурнина О.Д. Сравнение различных форм непозиционного вероятностного отображения информации // Системы контроля окружающей среды. 2016. № 4 (24). С. 66–73.

6. Moiseev D. Methodology of Probabilistic Representation and Transformation of Information // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2019, P. 1–5. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934304

7. Сапожников Н.Е., Моисеев Д.В. Патент на полезную модель № 171033 U1 Российская Федерация, МПК G06F 19/00. Параллельный вероятностный сумматор: № 2017100704: заявл. 10.01.2017; опубл. 17.05.2017; заявитель

Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования "Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П.С. Нахимова" Министерства обороны Российской Федерации.

8. Моисеев Д.В. Вероятностное представление информации в экологическом мониторинге // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018: сборник статей по материалам междунар. науч.-практ. конф., Севастополь, 24–27 сентября 2018 г. / под ред. Л.И. Лукиной, Н.А. Бежина, Н.В. Ляминой. Севастополь: ФГАОУ ВО Севастопольский гос. университет, 2018. С. 821–823.

9. Моисеев Д.В., Чужикова-Проскурнина О.Д. Вероятностное устройство вычисления спектральной плотности сигнала // Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 11–15 сентября 2017 г. / науч. ред. В.Я. Копп. Севастополь: ФГАОУ ВО Севастопольский гос. университет, 2017. С. 151–152.

APPLICATION OF NON-POSITIONAL REPRESENTATION OF INFORMATION IN ENVIRONMENTAL MONITORING SYSTEMS

D.V. Moiseev¹, N.E. Sapozhnikov²

¹Sevastopol State University,
RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

²Black Sea Higher Naval Order of the Red Star School named after P.S. Nakhimov,
RF, Sevastopol, Dybenko St., 1a

Developing forward-looking and advanced information systems requires the creation of a unified architecture, with unified hardware and software based on comprehensive integration of components of natural and technical information systems not only at the technical, but also at the functional level. The implementation of the above structure leads to a multiple increase in the volume of calculations on large-bit data arrays carried out in real time, as well as to the complexity of computational algorithms. It results in sharp contradictions between hardware costs, speed, accuracy and fault tolerance. The work is concerned with the formation of a methodology for the probabilistic representation and information transformation and the development on its basis of techniques, methods and algorithms for the synthesis of computing devices and components for advanced and existing information systems built on the domestic element base, which becomes an effective and high-tech means of overcoming these contradictions.

Keywords: probabilistic form of information representation and transformation, probability mapping, probabilistic processor, non-positional representation, information and control system.

REFERENCES

1. Skatkov A.V., Bryuhoveckij A.A., and Moiseev D.V. Mul'tivariantnyj mnogokanal'nyj programmno-izmeritel'nyj kompleks obnaruzheniya anomal'nyh sostoyanij prirodno-tekhnicheskikh ob"ektov i system (Multivariate multichannel software and measurement complex for detecting anomalous states of natural and technical objects and systems). *Monitoring systems of environment*, 2021, No. 2 (44), pp. 119–130. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-2-119-130
2. Gajskij V.A., and Gajskij P.V. Mnogomernyj garmonicheskij analiz pri izmereniyah polej morskoy sredy (Multidimensional harmonic analysis for measurements of marine environment). *Monitoring systems of environment*, 2019, No. 4 (38), pp. 33–42. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-4-33-42
3. Lebedev E.K., and Galanina N.A. Sravnitel'nyj analiz pozicionnoj i nepozicionnoj obrabotki informacii signal'nymi processorami. *Dinamika nelinejnyh diskretnyh elektrotekhnicheskikh i elektronnyh sistem: materialy V Vseros. nauch. konf. CHEboksary: Izd-vo CHuvash. un-ta*, 2003, pp. 193–196.
4. Dzegelenok I.I., and Ocokov Sh.A. Algebraizaciya chislovyh predstavlenij v obespechenii vysokotochnykh superkomp'yuternykh vychislenij. *Vestnik MEI*, 2010, No. 3, pp. 107–116.
5. Moiseev D.V., Sapozhnikov N.E., and Chuzhikova-Proskurnina O.D. Sravnenie razlichnyh form nepozicionnogo veroyatnostnogo otobrazheniya informacii (Comparison of various forms of non-positional probabilistic display of information). *Monitoring systems of environment*, 2016, No. 4 (24), pp. 66–73.
6. Moiseev D. Methodology of Probabilistic Representation and Transformation of Information. *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, 2019, pp. 1-5. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934304
7. Sapozhnikov N.E., and Moiseev D.V. Patent na poleznuyu model' № 171033 U1 Rossijskaya Federaciya, MPK G06F 19/00. Parallel'nyj veroyatnostnyj summator: № 2017100704: zayavl. 10.01.2017: opubl. 17.05.2017; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe voennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "CHernomorskoe vysshee voenno-morskoe ordena Krasnoj Zvezdy uchilishche imeni P.S. Nahimova" Ministerstva oborony Rossijskoj Federacii.
8. Moiseev D.V. Veroyatnostnoe predstavlenie informacii v ekologicheskom monitoringe // *Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bez-opasnost' - 2018: sbornik statej po materialam mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Sevastopol', 24–27 sentyabrya 2018 goda / pod red. L.I. Lukinoj, N.A. Bezhina, N.V. Lyaminoj. Sevastopol': Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Sevastopol'skij gosudarstvennyj universitet"*, 2018, pp. 821–823.
9. Moiseev D.V., and Chuzhikova-Proskurnina O.D. Veroyatnostnoe ustrojstvo vychisleniya spektral'noj plotnosti signala. *Avtomatizaciya i priborostroenie: problemy, resheniya: Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, Sevastopol', 11–15 sentyabrya 2017 goda / Nauchnyj redaktor V.Ya. Kopp. Sevastopol': Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Sevastopol'skij gosudarstvennyj universitet"*, 2017, pp. 151-152.