

---

---

# МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДУЛЯРНОЙ АРИФМЕТИКИ

---

---

УДК 681.03

## КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОДОВ МОДУЛЯРНОЙ АРИФМЕТИКИ

*В.И. БАРСОВ, А.А. СИОРА, В.А. КРАСНОБАЕВ, А.А. ЗАМУЛА, О.Е. БАРЫЛЬНИК, ХЕРИ АЛИ АБДУЛЛАХ*

---

Рассмотрена концепция создания системы обработки информации (СОИ) беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) на основе использования непозиционных кодовых структур модулярной арифметики. Такой подход к созданию систем обработки информации позволяет существенно повысить отказоустойчивость, надежность и живучесть функционирования СОИ БПЛА без снижения производительности обработки информации в реальном времени.

The paper considers the concept of creating a system of information processing (SIP) of pilotless aircraft (PLA) on the basis of using nonposition code structures of modular arithmetic. Such an approach to the creation of information processing systems allows to substantially increase fault-tolerance, reliability and survivability of functioning the PLA SIP without decreasing the real-time information processing rate.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих странах мира находит широкое применение беспилотная авиация. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) используются как в народном хозяйстве, так и в военном деле. Так, они успешно находят применение в качестве действенных средств мониторинга окружающей среды, при решении задач картографии и точного земледелия, геологической, метеорологической, радиационной, химической, бактериологической и биологической разведки без риска человеческих жизней, а также они эффективно используются при спасательных работах. При этом фотографические разведывательные комплексы БПЛА способны решать задачи как военной, так и экологической безопасности государства, т.е. в этом случае БПЛА являются летательными аппаратами (ЛА) двойного назначения [1-3].

В военном деле БПЛА могут быть более эффективны в боевой обстановке чем пилотируемые ЛА разведки, которые в первую очередь решают задачи космической и аэрофоторазведки, тактической воздушной разведки, радиоэлектронной борьбы, целеуказания и корректирования боевых действий, а также задачи боевого управления и связи в интересах различных видов и родов Вооруженных Сил любой страны и пр. [4].

Несомненные достоинства (отсутствуют недостатки ЛА, связанные с наличием на них людей, малогабаритность объема оборудования и маломощность источников питания ЛА и пр.) БПЛА обеспечивают их дальнейшее развитие во всем мире. Так, в США, например, для повышения эффективности использования парка авиационной техники в 1988 году было создано управление объединен-

ных программ по созданию БПЛА (UAV IPO). В 1993 году с целью дальнейшего совершенствования системы оперативного управления ЛА страны было создано управление воздушной разведки министерства обороны (DARO). В настоящее время в разработке и проектировании БПЛА участвуют более 20 стран. Так, например, в США разработаны: БПЛА RO-1 Predator, RO-4 Global Hawk, STM-5B Sentry; в Великобритании – Phoenix; во Франции – 532 UL Cougar MkI; в ФРГ – Brevel, Luna; в России – Ту 143 Рейс, Пчела-1Т, Стрекоза и т.д. В тоже время количество стран, которые уже широко используют БПЛА, составляет более 25.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Основными особенностями БПЛА являются отсутствие на ЛА человека и необходимость обработки в реальном времени большого объема информации за малый промежуток времени. Перспектива совершенствования БПЛА направлена, прежде всего на усложнение алгоритмов обработки информации в реальном времени (так, реализация адаптивных методов высоких степеней сжатия изображений на борту аэрофоторазведывательных БПЛА с учетом обеспечения оперативности обработки данных скорости и высоты полета, а также жестких требований к объему памяти бортовых запоминающих устройств (ЗУ) требует значительного увеличения вычислительной сложности реализуемых алгоритмов обработки информации), увеличение объема полезной нагрузки, а также связана с увеличением длительности времени пребывания в полете ЛА (так, например, длительность времени полета БПЛА Predator (США) составляет около 24 часов; во Франции разработан

многоцелевой БПЛА *Horus* с длительностью полета 35-40 часов). Вышеперечисленные обстоятельства и особенности функционирования систем обработки информации (СОИ) БПЛА приводят к снижению ее надежности функционирования и к увеличению длительности времени решения поставленных задач, что существенно снижает общую эффективность использования БПЛА [5, 6].

Данное обстоятельство обуславливает необходимость формулировки и решения противоречивой научно-технической проблемы одновременного повышения отказоустойчивости функционирования БПЛА и производительности обработки информации в реальном времени. Это в свою очередь приводит к необходимости решения проблемы обеспечения необходимого уровня надежности (отказоустойчивости) системы обработки информации, как основного звена в системе управления (в системе приема, обработки и передачи информации) БПЛА. Отметим, что при решении задачи повышения отказоустойчивости СОИ БПЛА необходимо обеспечить и заданный уровень производительности обработки информации.

Анализ работ, связанных с исследованием задач автоматизации процессов обработки информации СОИ аэрофоторазведывательных комплексов на базе БПЛА, свидетельствует о существенном росте обрабатываемых объемов информации в реальном времени (использование в качестве процедур сжатия дискретного двумерного преобразования в базисе Хаара, зонально-пороговой селекции и арифметического кодирования коэффициентов преобразования, при обеспечении целочисленности данных арифметических операций, реализация методов арифметического кодирования и пр.). Необходимость обработки СОИ БПЛА в реальном времени больших массивов информации за короткий промежуток времени приводит к возможному старению или даже потери части важной информации. Кроме этого, большой объем (так, при обработке изображений известными методами необходимо выполнить следующее количество целочисленных операций: 14680064 операций типа сложения-вычитания и 16777216 операций типа умножения-деления при использовании метода на основе зональной селекции (ЗС) коэффициентов дискретно-косинусного преобразования; 3670016 операций типа сложения-вычитания и 2097152 операций типа умножения-деления при использовании метода на основе ЗС коэффициентов быстрого целочисленного преобразования Хаара) информации (при ее несвоевременной обработке) перегружает канал связи «борт-земля», что снижает общую эффективность использования БПЛА. Это свидетельствует о том, что для БПЛА характерно то, что надежность (отказоустойчивость) функционирования СОИ тесно связана с производительностью обработки информации в реальном времени. Отметим, что обработка СОИ визуальной информации на борту БПЛА также связана с рядом дополнительных требований к системе обработки информации. Необходимость соблюдения габаритно-весовых

требований к СОИ БПЛА вступает в противоречие с необходимостью обрабатывать и передавать в реальном времени большие объемы информации. В этом случае пропускная способность существующих каналов связи не всегда может обеспечить качественную передачу с борта БПЛА визуальной информации в реальном времени, что подтверждает актуальность задачи повышения отказоустойчивости СОИ с учетом требований по ограничению масса-габаритных характеристик БПЛА без снижения производительности обработки визуальной информации (без увеличения времени реализации методов сжатия) [7, 8].

Основной практический метод повышения надежности систем обработки информации ЛА, функционирующих в обычных двоичных позиционных системах счисления (ПСС), есть метод создания на основе структурного резервирования отказоустойчивых троированных мажоритарных структур обработки информации. Недостаток этого метода – большое количество дополнительно вводимого оборудования для обеспечения необходимого уровня надежности функционирования СОИ. Данный недостаток существенно негативно влияет на основные характеристики БПЛА.

Анализ методов повышения отказоустойчивости СОИ БПЛА без снижения пользовательской производительности обработки информации, основанных на введении различных видов избыточности (структурной, информационной, временной и пр.) в ПСС, показал, что в пределах позиционных систем счисления этого добиться практически невозможно без ухудшения тактико-технических и боевых характеристик БПЛА [9, 10].

Таким образом, результаты проведенных исследований известных и перспективных методов повышения отказоустойчивости функционирования систем обработки информации БПЛА, основанные на использовании позиционных систем счисления, показали, что они не всегда удовлетворяют возрастающим требованиям по повышению надежности средств обработки информации реального времени.

Поиски путей повышения отказоустойчивости СОИ реального времени без снижения производительности обработки информации показали, что в пределах ПСС этого добиться практически невозможно без существенного ухудшения массагабаритных и других основных характеристик БПЛА. Это с одной стороны.

С другой стороны, результаты исследований в этом направлении известных авторов (Валах М., Свобода А., Сабо Н., Акушский И.Я., Юдицкий Д.И., Глушков В.М., Синьков М.В., Амербаев В.М., Евстигнеев В.Г., Инютин С.А., Коляда А.А., Пак И.Т., Червяков Н.И., Вышинский В.А., Долгов А.И., Торгашев В.А., Морозов В.Н., Финько О.А., Овчаренко Л.А., Лебедев Е.К., Барсов В.И., Краснобаев В.А., Blum T., Paar C., Kawamura S., Ko Ae M., Sano F., Shimbo A., Paulier P., Thornton M.A., Dreschler R., Miller D.M. и др.) показали, что использование в качестве системы счисления

СОИ непозиционной системы счисления модулярной арифметики (МА) (в частности, системы счисления в остаточных классах (СОК)), может существенно положительно решить научно-техническую задачу обеспечения отказоустойчивости СОИ БПЛА без снижения пользовательской производительности обработки информации и с существенно меньшим, чем в ПСС, дополнительно вводимом количеством оборудования. Данное обстоятельство дает возможность существенно повысить надежность СОИ, а также улучшить некоторые важные летно-технические и боевые характеристики БПЛА.

Введем понятие непозиционной системы счисления в остаточных классах. Для этого зададим набор взаимно попарно простых чисел  $m_1, m_2, \dots, m_n$ , которые называются модулями или основаниями МА. Для представления числа  $A$  в СОК необходимо определить набор таких вычетов (остатков)  $\{a_i\}, i=1, n$ , чтобы выполнялась система следующих сравнений:

$$\begin{aligned} A &= a_1 \pmod{m_1}, \\ A &= a_2 \pmod{m_2}, \\ &\vdots \\ A &= a_n \pmod{m_n}. \end{aligned}$$

В диапазоне  $[0, M)$ , где  $M = \prod_{i=1}^n m_i$ , выбор остатков  $a_i$  однозначно определяют число  $A$ . Для числа  $A \geq M$  это определение неоднозначно. Таким образом, число  $A$  в СОК представляется в виде набора остатков

$$A_{\text{СОК}} = (a_1, a_2, \dots, a_n).$$

Этот набор остатков можно отождествить непосредственно с суммой  $n$ -полей Галуа  $\sum_{i=1}^n GF(m_i)$ .

Из алгоритма представления чисел в классе вычетов, очевидно, что все арифметические операции в СОК выполняются независимо и параллельно над одноименными разрядами (остатками), а структура операционного устройства ЭВМ представляется в виде независимых вычислительных трактов, каждый из которых функционирует по своему основанию  $m_i$  СОК.

Сложение, вычитание и умножение в СОК осуществляется по очень простому алгоритму: эти операции модульные и производятся независимо по каждому модулю СОК в пределах разрядной сетки  $[0, M)$ .

Кратко охарактеризуем свойства МА:

1. *Независимость остатков.* Это свойство дает возможность построить СОИ в виде набора независимых вычислительных трактов (отдельных каналов, функционирующих по своему определенному модулю  $m_i$  в МА). При этом время реализации арифметических операций определяется временем реализации в вычислительном тракте по наибольшему основанию  $m_n$  МА. Как видно, ошибки, возникающие за счет отказов (сбоев) схем двоичных разрядов в произвольном вычислительном тракте СОИ, не «размножаются» в соседние тракты (остаются в пределах одного остатка), что дает возможность повысить достоверность вычислений.

2. *Равноправность остатков.* Любой остаток  $a_i$  числа  $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$  несет информацию обо всем исходном числе. Использование этого свойства вместе с первым, а также используя известные в ПСС способы структурного резервирования, можно синтезировать надежную модель СОИ в МА, соответствующую модели динамического резервирования.

В этом случае информационные тракты  $m_1 \div m_n$  СОИ играют роль рабочих элементов, а тракты  $m_{n+1} \div m_{n+k}$  – роль резервных элементов (где  $k$  – количество контрольных (резервных) оснований СОК).

3. *Малоразрядность остатков.* Это свойство позволяет существенно повысить быстродействие выполнения арифметических операций как за счет малоразрядности построения вычислительных трактов СОИ, так и за счет возможности практического применения (в отличие от ПСС) табличной арифметики, где арифметические операции сложения, вычитания и умножения выполняются практически в один такт.

Ранее полученные результаты решения задачи оптимального резервирования в модулярной арифметике для времени полета БПЛА равного  $t < 40$  часов показали, что использование кодов в модулярной арифметике позволяет существенно (по сравнению с позиционной двоичной троированной мажоритарной системой обработки информации) повысить отказоустойчивость (по вероятности безотказной работы  $P(t)$ ) и при значительно меньшем дополнительно вводимом количестве оборудования, обеспечивающим системы обработки информации свойством отказоустойчивости. Так, например, для обеспечения некоторого заданного уровня  $P_{\text{зад}}(t) = 0,9999$  (для  $t = 1$  час) надежности однобайтовой ( $l = 1$ ) системы обработки информации БПЛА в модулярной арифметике необходимо 20 условных единиц количества оборудования СОИ, а для позиционной двоичной троированной мажоритарной системы обработки информации – 24 единицы. В этом случае на 15% сокращается количество необходимого для повышения надежности дополнительно вводимого в систему обработки информации оборудования. Это обстоятельство дает возможность улучшить летно-технические характеристики БПЛА. При этом  $P_{\text{СОК}}(t) = 0,9999997 > P_{\text{ПСС}}(t) = 0,999998 > P_{\text{зад}}(t) = 0,9999$ . В данном разделе показано, что с ростом значения  $l = 2, 3$  и 4 эффективность использования модулярной арифметики возрастает [11-13].

## ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований методов повышения отказоустойчивости систем обработки информации реального времени с учетом требований по пользовательской производительности и по количеству дополнительно вводимого оборудования показали, что существующие и возможные перспективные пути решения данной научно-технической проблемы, базирующиеся в основном на использовании двоичных позиционных систем счисления, не могут решить данную задачу без существенного ухудшения технико-экономических и других характеристик БПЛА.

Проведенный в работе анализ влияния используемой системы счисления на основные технико-экономические и другие важные характеристики СОИ БПЛА показал, что с точки зрения обеспечения необходимых значений показателей надежности (без снижения производительности обработки информации) наиболее эффективным путем повышения отказоустойчивости является применение непозиционных кодовых структур в модулярной арифметике.

Результаты проведенных в [9-13] теоретических исследований, а также приведенные в работе результаты решения задачи оптимального резервирования в МА показали, что использование модулярной арифметики существенным образом влияет на архитектуру и принципы функционирования системы обработки информации БПЛА. В работе показано, что применение непозиционных кодовых структур дает возможность значительно повысить надежность при значительно меньшем количестве, чем в позиционных системах счисления, дополнительно вводимого избыточного оборудования, т.е. вторичной избыточности. Это имеет особое значение для бортовых систем обработки информации летательных аппаратов.

#### Литература.

- [1] Аерокосмічна розвідка в локальних війнах сучасності / Л.М. Артюшин, С.П. Мосов, Д.В. П'яковський, В.Б. Толубко. – К.: НАОУ, 2002. – 208 с.
- [2] Артюшин Л.М. Методичний підхід до вирішення завдань відмовостійкого автоматичного керування груповим польотом безпілотних літальних апаратів // Системи озброєння і військова техніка. – 2005. – №1 (1). – С.3-10.
- [3] Афинов В. Стратегические разведывательные БЛА и направления развития беспилотной авиации в США. «Зарубежное военное обозрение», 1998, №7, с. 35-42.
- [4] Смоляков А.В. Организация разведывательных комплексов на основе малоразмерных беспилотных летательных аппаратов. «Авиационно-космическая техника и технология». Сб. науч. трудов. Вып. 6. Харьков, «ХАИ», 1998, с. 54-64.
- [5] Aquila RPV may never meet its purpose, sayes GAO. «Jane's Defence Weekly», 1987, v.8, №20, p.1 168.
- [6] Глюшко В.М., Федорович О.Е., Митрахович М.М. Методичні основи системного аналізу та моделювання складних технічних систем спеціального призначення. «Авіаційно-космічна техніка та технологія». Харків, «ХАІ», 1998, с. 46-52.
- [7] Мохамед Джасим Мохамед. Концепція створення систем обробки інформації на основі застосування модулярної арифметики // Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Вип. 37. Том 2. 2005. С. 159-163.
- [8] Краснобаев В.А., Мохамед Джасим Мохамед. Система обробки інформації реального часу, що функціонує у модулярній арифметиці // Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Вип. 43. Том 2. 2006. С. 82-88.
- [9] Илюшко В.М., Мохаммед Джасим Мохаммед, Краснобаев В.А. Концепция проектирования отказоустойчивых систем обработки информации реального времени // Збірник наукових праць. Системи обробки інформації. - Харків: НАНУ ПАНМ, ХВУ. 2005. – Вип. 4. (44). – С. 52-56.
- [10] Илюшко В.М., Мохаммед Джасим Мохаммед. Выбор и обоснование показателей для оценки отказоустойчивости систем обработки информации реаль-

ного времени, функционирующих в модулярной арифметике // Збірник наукових праць. Системи обробки інформації. - Харків: НАНУ ПАНМ, ХВУ. 2005. – Вип. 3. (43). – С. 56-59.

- [11] Илюшко В.М., Мохаммед Джасим Мохаммед. Постановка и решение задачи оптимального резервирования в системе остаточных классов // Моделювання та інформаційні технології. Київ: НАНУ. – 2005. – Вип. 32. – С. 93-97.
- [12] Илюшко В.М., Мохаммед Джасим Мохаммед, Краснобаев В.А. Исследование влияния свойств модулярной арифметики на структуру и принципы функционирования систем обработки информации реального времени // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2005. – №2 (10). – С. 132-139.
- [13] Мохаммед Джасим Мохаммед, Луханин М.И., Краснобаев В.А., Деренько Н.С. Методы и алгоритмы обработки информации в модулярной арифметике // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: НАКУ (ХАИ). – 2006. – Вып. № 3. – С. 139-150.



Поступила в редколлегию 5.09.2008

**Сиора Александр Андреевич**, председатель правления ЗАО «Научно-производственное предприятие» «РАДИЙ», кандидат технических наук. Область научных интересов: создание систем обработки информации и управления объектами критического применения.



**Краснобаев Виктор Анатолевич**, профессор кафедры автоматизации и компьютерных технологий Харьковского национального технического университета сельского хозяйства им. Петра Василенко, доктор технических наук, профессор, Заслуженный изобретатель Украины, Почётный радист СССР. Область научных интересов: теоретическое обоснование и практическое создание сверхбыстродействующих и высокоотказоустойчивых вычислительных структур в модулярной арифметике.



**Замула Александр Андреевич**, профессор кафедры БИТ ХНУРЭ, кандидат технических наук, доцент. Область научных интересов: технологии защиты информации в информационно-телекоммуникационных системах.



**Барыльник Ольга Евгеньевна**, специалист кафедры БИТ ХНУРЭ. Область научных интересов: защита информации в информационно-телекоммуникационных системах.



**Хери Али Абдулла**, аспирант кафедры производства радиоэлектронных средств летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского («ХАИ»). Область научных интересов: технология создания систем обработки информации летательных аппаратов на основе использования непозиционных кодовых структур модулярной арифметики.