

Методика решения измерительных и вычислительных задач в условиях деградации информационно-вычислительной системы

В.В. Грызунов

Информационно-вычислительные системы (ИВС) военного назначения должны решать поставленные задачи в условиях воздействия противника. Воздействие противника ведёт к деградации ИВС, выражающейся в снижении производительности. Предлагаемая методика решения измерительных и вычислительных задач позволяет снижать требования к производительности ИВС за счёт использования допустимых погрешностей и временных резервов (временных лагов) решаемых задач. Приведён пример применения методики. В примере показано, что требования к производительности ИВС могут быть снижены в 1.24 и 1.29 раза.

Ключевые слова: решение задач деградирующей информационно-вычислительной системой; решение задач в условиях разрушения вычислительной среды.

1. Введение

Современные информационно-вычислительные системы (ИВС) военного назначения участвуют в решении большого количества измерительных и вычислительных задач. Это могут быть задачи радионавигации, радиолокации, многопозиционной радиолокации, вычисления целеуказаний, подготовки полётных заданий для высокоточного оружия и т.д. Высокий риск выведения из строя элементов ИВС военного назначения противником, с одной стороны, и жёсткие требования по выполнению целевых задач, с другой стороны, вынуждают искать пути повышения живучести ИВС. На сегодняшний день повышение живучести ИВС военного назначения достигается, в основном, использованием структурного резервирования. Дополнением, существенно расширяющим возможности данного метода, может выступить предлагаемая в статье методика. В методике используются резервы, имеющиеся в самих задачах (внутренние резервы). Рассмотрим место предлагаемой методики среди других методов повышения живучести ИВС.

Измерительные и вычислительные задачи далее будем называть вычислениями.

2. Место методики среди методов повышения живучести ИВС

Наиболее распространённой группой методов повышения живучести ИВС является использование структурных и/или функциональных резервов ИВС. Суть методов состоит в том, чтобы компенсировать деградацию ИВС с помощью резервов: подключение «страхующего» отдельного командно-измерительного комплекса, дополнительного вычислительного модуля в кластере, канала связи и т.д. В результате ИВС выполняет поставленные задачи

с требуемой точностью и в требуемое время. Однако если деградация ИВС продолжается, и резервы ИВС исчерпаны, то выполнение *всех* целевых задач становится невозможным.

К использованию структурных и/или функциональных резервов отнесём также следующие методы:

- 1) методы планирования вычислений и/или ресурсов. Цель таких методов – добиться минимальных простоев ИВС, что является использованием функциональных резервов;
- 2) методы оптимизации вычислительного процесса (виртуализация, конвейеризация, управление вычислительным процессом (WF) и др.);
- 3) методы оптимизации структуры ИВС (Software as a Service (SaaS), Desktop as a Service (DaaS), программирование структуры и т.д.).

Следующая группа методов выполнения вычислений в деградирующей ИВС – введение приоритетов. Методы этой группы применяются, как правило, в том случае, когда исчерпаны все резервы ИВС. Они направлены на решение с требуемой точностью и в требуемое время наиболее приоритетных задач. Приоритетность задач определяет пользователь. Например, подводная лодка не выполняет стрельбы, а все ресурсы сосредотачиваются на расчёте собственного курса и обеспечении жизнедеятельности, либо наоборот, все ресурсы сосредотачиваются на производство последнего выстрела.

Когда исчерпаны все резервы ИВС и деградация продолжается, целесообразно использовать внутренние резервы вычислений. В результате задачи, поставленные перед ИВС, будут решаться не в требуемый, но приемлемый срок, не с требуемой, но допустимой точностью.

Схематично применение методов повышения живучести ИВС на различных стадиях деградации ИВС можно представить так, как показано на рис. 1.

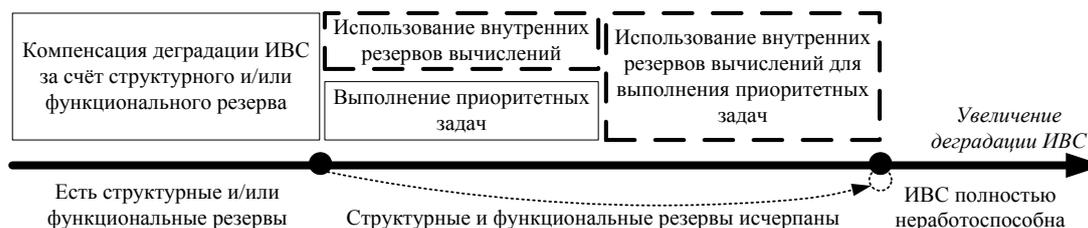


Рис. 1. Применение методов повышения живучести ИВС

Как видно из рисунка, использование внутренних резервов вычислений может применяться совместно с выполнением приоритетных задач, что позволит ещё больше повысить живучесть ИВС. Количественные оценки повышения живучести необходимо рассчитывать для каждой ИВС и каждого набора вычислений отдельно.

Выполнение приоритетных задач и использование внутренних резервов вычислений позволяет свести ситуацию с деградацией к той, когда в ИВС есть резервы (рис. 1) и предоставить возможность применять методы, использующие структурные и/или функциональные резервы ИВС (оптимизация процессов, планирование вычислений и т.д.).

Рассмотрим источники возникновения внутренних резервов вычислений.

3. Источники возникновения внутренних резервов вычислений

Практически всем вычислениям присуще наличие циклов. Циклы могут использоваться как на макроуровне (численное решение систем дифференциальных уравнений, решение вариационных задач и т.д.), так и на микроуровне (внутри операций деления/умножения, в процессе использования фрагментов микропрограмм процессора и т.п.). Количество повторений цикла влияет на точность результатов вычислений. Очевидно, меньшее количество

циклов требует меньших ресурсов ИВС, но и снижает точность результатов. Налицо оптимизационная задача, однако, для наших интересов достаточно ограничиться критерием пригодности, то есть использованием максимально допустимой погрешности вычислений:

δ^* – требуемая точность вычисления;

δ_{\min} – минимальная допустимая точность вычисления;

$\Delta\delta = |\delta^* - \delta_{\min}|$ – максимальная допустимая погрешность вычисления.

Следующей особенностью вычислений является срок, в течение которого результат вычислений должен быть получен и/или предоставлен потребителю. Здесь, аналогично требованиям по точности, существуют минимальное время, в течение которого должны получаться/предоставляться результаты, оптимальное время получения/предоставления результатов, и максимальное допустимое время, по истечению которого полученные результаты будут не актуальны. На основе названных величин формируется максимально допустимый временной лаг получения/ предоставления результатов:

t^* – требуемый момент времени получения/ предоставления результатов;

t_{\min}, t_{\max} – минимальный и максимальный допустимые моменты времени получения/ предоставления результатов;

$\Delta t = (t^* - t_{\min}) + (t_{\max} - t^*) = t_{\max} - t_{\min}$ – максимально допустимый временной лаг получения/ предоставления результатов вычислений.

Возможность использования максимально допустимой погрешности $\Delta\delta$ и максимального временного лага (Δt) может быть сформулирована в виде теоремы.

Теорема. Использование максимально допустимой погрешности ($\Delta\delta$) и максимального временного лага (Δt) позволяет снизить требования к производительности ИВС до минимального допустимого значения (Ω_{\min}).

Ограничение. Увеличение количества итераций (циклов) M увеличивает точность вычислений δ , то есть функция $\delta = f_M(M)$ монотонно возрастает (рис. 2). В противном случае вычисления не имеют смысла и должны быть остановлены.

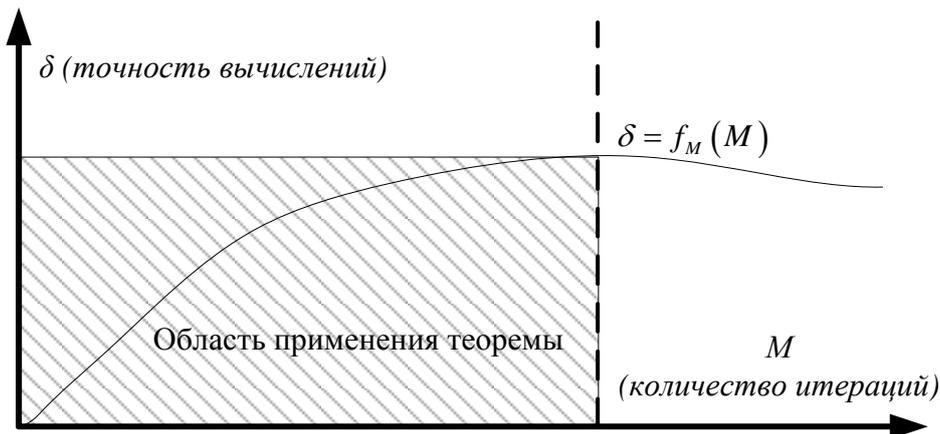


Рис. 2. Зависимость точности вычислений от количества итераций

Доказательство. В обозначенном выше контексте максимальная допустимая погрешность и максимальный временной лаг – резервы, независимые друг от друга, поэтому рассмотрим их отдельно.

Выполнение каждой итерации (цикла) невозможно без выделения некоторого ресурса ИВС, следовательно, меньшему количеству итераций (циклов) требуется меньше ресурса.

Поскольку $\delta = f_M(M)$ монотонно возрастающая (см. ограничение), следовательно, меньшей точности соответствует меньшее количество итераций, а значит, и меньшее потребление ресурса. Итак, минимально допустимой точности вычислений δ_{\min} соответствует минимально допустимая производительность, то есть наибольший выигрыш в производительности $\Delta\Omega_\delta$.

По определению, производительность есть число задач, решённых в единицу времени, что графически отображается в виде тангенса угла наклона касательной к кривой выполненных вычислений (рис. 3). Из рисунка видно, что при увеличении времени, отводимого на выполнение вычислений, угол наклона кривой может быть изменён на более острый, то есть производительность снижена. Следовательно, использованию наибольшего временного лага соответствует минимально допустимая производительность, то есть наибольший выигрыш в производительности $\Delta\Omega_t$.

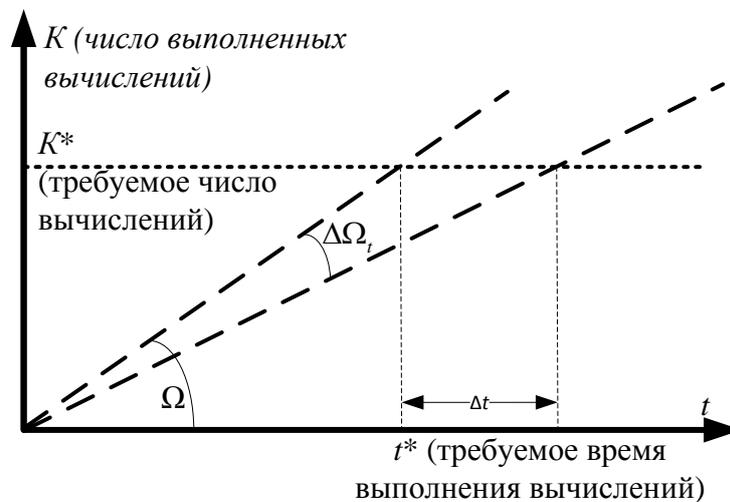


Рис. 3. Графическое представление производительности ИВС

Поскольку максимальная допустимая погрешность и максимальный временной лаг – резервы, независимые друг от друга, то общий эффект можно получить, используя принцип суперпозиции:

$$\Delta\Omega = \Delta\Omega_\delta + \Delta\Omega_t.$$

Раз оба слагаемых соответствуют наибольшим значениям выигрыша производительности, то и их сумма будет соответствовать наибольшему общему выигрышу производительности. Следовательно, использование максимально временного лага и максимально допустимой погрешности позволяет снизить требования к производительности до минимальной величины

$$\Omega_{\min} = \Omega - \Delta\Omega,$$

где Ω – требуемая производительность ИВС.

Поскольку операция сложения коммутативна, то не имеет значения порядок вычисления выигрыша производительностей (сначала максимальной допустимой погрешности, затем максимального временного лага, или наоборот).

Теорема доказана.

4. Содержание методики

Первым шагом методики выступает специальное представление задач в ИВС.

4.1. Представление задач в информационно-вычислительной системе

Будем утверждать, что для ИВС существенно не семантическое наполнение выполняемых вычислений, а информация о том, какие ресурсы, когда и на какой срок должны быть предоставлены. Представим вычисления в виде пакета, например, так, как это показано на рис. 4. На рисунке изображён один пакет, состоящий из 10 связанных между собой вычислений.

Каждое вычисление описывается следующим образом:

$$\left(\Omega_N^k, \Omega_L^k, \Omega_{Sp}^k, \Omega_T^k, t^k, \Delta t^k, \delta^k, \Delta \delta^k \right), k = \overline{1, K^*}, \quad (1)$$

где K^* – число поставленных перед ИВС вычислений (размер пакета вычислений);

$\Omega_C^k, \Omega_L^k, \Omega_{Sp}^k, \Omega_T^k$ – необходимые для k -ого вычисления производительности вычислителей, каналов связи, памяти, устройств ввода/вывода. Если требования выполнены, вычисление реализуется с требуемой точностью за заданное время;

t^k, δ^k – требуемые время и точность выполнения k -ого вычисления;

$\Delta t^k, \Delta \delta^k$ – максимальный временной лаг и максимальная допустимая погрешность выполнения k -ого вычисления.

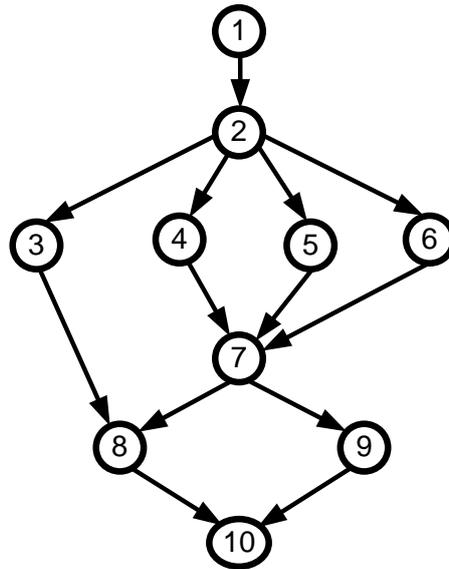


Рис. 4. Пример представления вычислений в виде пакета

Описывая задачи согласно (1) и используя максимальную допустимую погрешность и максимальный временной лаг, появляется возможность снизить требования к необходимым производительностям, а значит, решить задачи в деградирующей ИВС. В результате вычисление будет выполнено со следующими особенностями:

- не с требуемой, но допустимой точностью;
- не в требуемое, но приемлемое время.

4.2. Формализация задачи выполнения вычислений в деградирующей информационно-вычислительной системе

Деградация ИВС, вызывающая снижение производительности ИВС, может быть описана так:

Ψ_S – множество операций разрушения структурного элемента;

Ψ_F – множество операций разрушения функционального элемента.

Структурные разрушения включают в себя: разрушение элементов ИВС; разрушение каналов связи; изменение числа связей, которые могут образовывать элементы.

Разрушение одного структурного элемента обязательно влечёт за собой изменение возможностей ИВС по реализации одной или более функций (обнаружить объект, предоставить или зарезервировать канал связи и т.д.)

$$\Psi_S = 1 \rightarrow \Psi_F \geq 1.$$

Таким образом, деградация ИВС описывается выражением:

$$\Psi = \{\Psi_S, \Psi_F\}.$$

Задача о выполнении вычислений в деградирующей ИВС может быть сформулирована как поиск таких погрешностей (δ') и времён выполнения вычислений (t'), которые укладываются в максимальную допустимую погрешность и максимальный допустимый временной лаг и позволяют выдвинуть требования к минимально допустимой производительности ИВС.

Дано:

$$\langle \Omega_C^k, \Omega_L^k, \Omega_{Sp}^k, \Omega_T^k, t^k, \Delta t^k, \delta^k, \Delta \delta^k \rangle, k = \overline{1, K^*};$$

Требуется:

$$t'^k = t^k + \Delta t^k, \delta'^k = \delta^k - \Delta \delta^k :$$

$$: (\Omega_C^k \rightarrow \min, \Omega_L^k \rightarrow \min, \Omega_{Sp}^k \rightarrow \min, \Omega_T^k \rightarrow \min)$$

4.3. Шаги методики

Методика выполнения вычислений (пакета вычислений) в деградирующей ИВС включает следующие шаги:

- 1) представить вычисления в пакете согласно выражению (1);
- 2) описать информационно-управляющие зависимости между вычислениями в пакете (рис. 4);
- 3) найти критический путь в пакете вычислений [1];
- 4) выбрать вариант расчёта временного лага:
 - а) найти временные лаги каждого вычисления, получить общий временной лаг пакета вычислений путём суммирования лагов вычислений;
 - б) взять общий временной лаг для всего пакета вычислений и распределить его между вычислениями на критическом пути;
- 5) использовать временные лаги для снижения требований к производительности пакета вычислений $\Delta t \rightarrow \Omega_t$,

$$K^* = t^* \Omega = (t^* + \Delta t) \Omega_t \Rightarrow \Omega_t = \frac{K^*}{(t^* + \Delta t)}, \Omega_t = \frac{t^*}{(t^* + \Delta t)} \Omega, \quad (2)$$

где Ω_t – минимальная требуемая производительность ИВС при использовании временных лагов;

Ω – требуемая производительность ИВС.

б) применить максимально допустимые погрешности вычислений на критическом пути для снижения требований к производительности $\Delta \delta \rightarrow \Omega_\delta$. Общий вид зависимости:

$$\Omega_{\delta} = f_{\delta}(\Delta\delta). \quad (3)$$

На этом шаге изменяется значение производительности (Ω_t) , полученное на предыдущем шаге. Полученное значение Ω_{δ} и будет минимальной допустимой производительностью ИВС Ω_{\min} .

7) если доступная производительность ИВС больше, чем максимальная из минимальных допустимых для каждой задачи, то составить расписание выполнения вычислений и порядок задействования ресурсов ИВС [2]. Выполнить пакет вычислений. В противном случае остановить выполнение пакета вычислений.

Под доступной производительностью будем понимать ресурсы, которые могут быть выделены для выполнения вычисления (пакета вычислений) на требуемый промежуток времени.

В зависимости от потребностей в оперативности или точности вычислений, шаг 6 может идти перед шагом 4. Шаги 5 или 6 могут отсутствовать.

Методика может применяться для поиска временных лагов и погрешностей, если максимальные доступные производительности ИВС заданы. В этом случае необходимо на шагах 5 – 6 решить уравнения относительно $\Delta t^k, \Delta\delta^k$, а формулировку задачи изложить следующим образом.

Дано:

$$\langle \Omega_C^k, \Omega_L^k, \Omega_{Sp}^k, \Omega_T^k, t^k, \Delta t^k, \delta^k, \Delta\delta^k \rangle, k = \overline{1, K^*};$$

$$\Omega_C^a, \Omega_L^a, \Omega_{Sp}^a, \Omega_T^a - \text{доступные производительности ИВС.}$$

Требуется:

$$(t^k + \Delta t^k) - ?, (\delta^k - \Delta\delta^k) - ?$$

Рассмотрим работу предлагаемой методики на примерах сопровождения цели условным стрельбовым комплексом.

4.4. Пример применения методики

Предположим, что пакет задач условного стрельбового комплекса, сопровождающего цель, содержит 8 вычислений (рис. 5). Для простоты ограничимся рассмотрением совокупной производительности бортовой ИВС, измеряемой в условных единицах.

Результат выполнения **первого шага** методики представлен в табл. 1.

Таблица 1. Представление задач для работы в методике

№ вычисления (k)	1	2	3	4	5	6	7
Ω^k	4	5	12	10	4	2	15
t^k, c	3	5	8	5	10	3	20
$\Delta t^k, c$	1	1	0.5	0.5	2	0.01	5
δ^k	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.99	0.95
$\Delta\delta^k \cdot 100\%$	0.05	0.05	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05

На **втором шаге** методики следует описать информационно-управляющие зависимости в пакете вычислений. Граф зависимостей представлен на рис. 5.

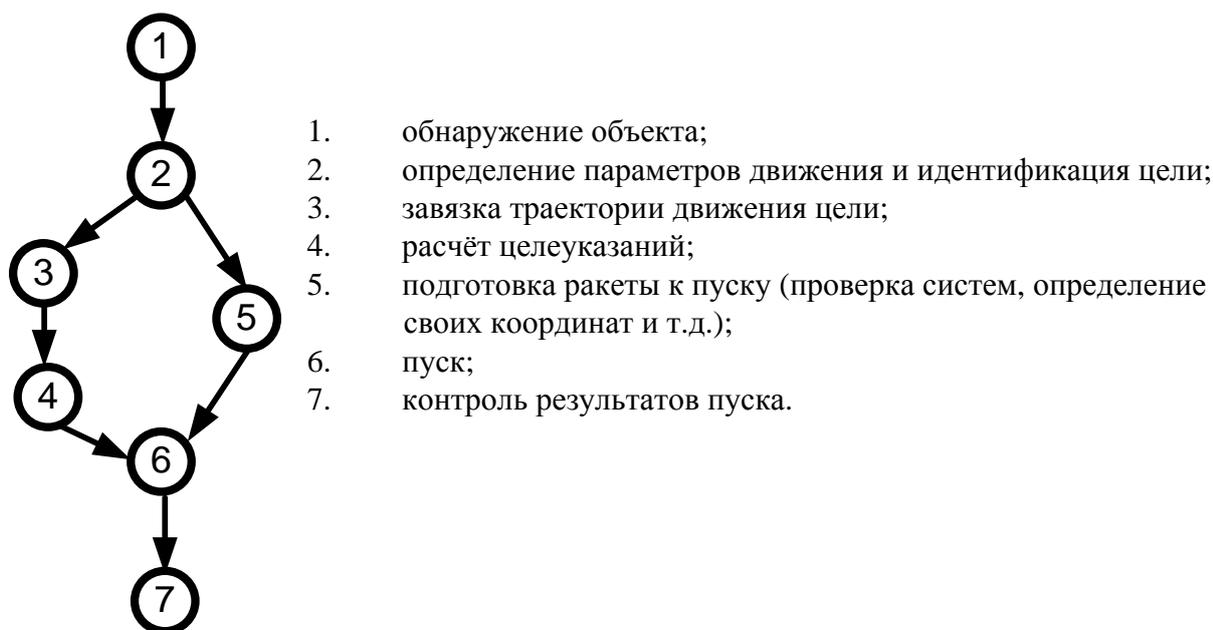


Рис. 5. Пакет задач условного стрельбового комплекса

Третий шаг методики предполагает поиск критического пути.

На графе есть два пути:

- I. 1-2-3-4-6-7 продолжительностью $3+5+8+5+3+20=44$ с (без учёта временных лагов);
- II. 1-2-5-6-7 продолжительностью $3+5+10+3+20=41$ с (без учёта временных лагов).

Первый путь является критическим.

Определение суммарного временного лага производится на **четвёртом шаге** методики.

С учётом временных лагов (вариант расчёта «а»).

- I. 1-2-3-4-6-7 продолжительностью $(3+1)+(5+1)+(8+0.5)+(5+0.5)+(3+0.01)+(20+5)=52.01$ с (с учётом временных лагов);
- II. 1-2-5-6-7 продолжительностью $(3+1)+(5+1)+(10+2)+(3+0.01)+(20+5)=50.01$ с (с учётом временных лагов).

После использования временных лагов критический путь в пакете задач не изменился.

Расчёт выигрыша производительности за счёт использования временных лагов и максимальной допустимой погрешности осуществляется на **пятом и шестом шагах** методики. Результат расчётов представлен в табл. 2. При подсчёте выигрыша производительности использовалась зависимость, изображённая на рис. 6, то есть уменьшение точности на 5% приводило к уменьшению требуемой производительности на 5%.

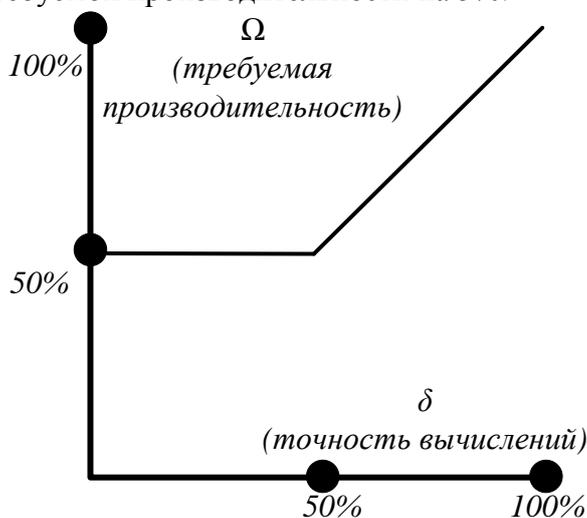


Рис. 6. Зависимость требуемой производительности от требуемой точности вычислений

Таблица 2. Выигрыш в производительности для каждого вычисления в пакете и минимальная допустимая производительность ИВС

№ вычисления (k)	1	2	3	4	5	6	7
Ω^k	4	5	12	10	4	2	15
$t^k, \text{с}$	3	5	8	5	10	3	20
$\Delta t^k, \text{с}$	1	1	0.5	0.5	2	0.01	5
$t^k + \Delta t^k$	4	6	8.5	5.5	12	3.01	25
$\Delta \Omega_t^k$	1.00	0.83	0.71	0.91	0.67	0.01	3.00
Ω_t^k	3.00	4.17	11.29	9.09	3.33	1.99	12.00
$\delta^k \cdot 100\%$	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.99	0.95
$\Delta \delta^k \cdot 100\%$	0.05	0.05	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05
$\Delta \Omega_\delta^k$	0.16	0.22	1.19	0.48	0.18	0.10	0.63
$\Delta \Omega^k$	1.16	1.05	1.89	1.39	0.84	0.11	3.63
$\Omega_\delta^k = \Omega_{\min}^k$	2.84	3.95	10.11	8.61	3.16	1.89	11.37

Для пути I суммарная требуемая производительность Ω^I составит 48. Минимальная требуемая производительность для первого пути $\Omega_{\min}^I = 38.77$.

Для пути II суммарная требуемая производительность $\Omega^{II} = 30$, минимальная требуемая $\Omega_{\min}^{II} = 23.21$.

Таким образом, выигрыш в суммарной производительности для I и II путей составит 1.24 и 1.29 раз, соответственно.

Если производительность ИВС будет меньше максимальной из минимальных (меньше 11.37), то условный стрельбовый комплекс не сможет решать поставленные перед ним задачи по сопровождению целей.

Сравнение вероятностей выполнения целевой задачи условным стрельбовым комплексом до и после применения методики представлены на рис. 7.



Рис. 7. Вероятности выполнения целевой задачи условным стрельбовым комплексом до и после применения методики

Предложенную методику целесообразно применять для вычислений, выполняемых ИВС, риск деградации которых высок: радиолокационных станций, центров управления полётами, центров подготовки полётных заданий и т.д. Дополнительной областью применения служат ИВС, в которых возможно резкое увеличение числа решаемых задач при неизменной до-

ступной производительности (маршрутизаторы, обработчики изображений и т.д.). Такая ситуация связана с дефицитом ресурса и аналогична рассматриваемой в статье ситуации с неизменным потоком задач в деградирующей ИВС.

5. Заключение

Таким образом, в статье изучены возможности использования внутренних резервов измерительных и вычислительных задач для снижения требований к производительности обрабатывающих устройств, описана деградация ИВС в виде множества структурных и функциональных разрушений, предложена методика использования внутренних резервов, приведён пример применения методики. В приведённом примере требования к производительности ИВС могут быть снижены в 1.24 и 1.29 раза.

Направления дальнейших исследований:

- добавить возможность распределения ресурсов ИВС между пакетами, имеющими разные приоритеты;
- разработать алгоритм распределения ресурсов ИВС между погрешностью ($\Delta\delta$) и временным лагом (Δt), когда решается задача поиска их значений по максимально доступной производительности.

Литература

1. Барский А.Б. Параллельные информационные технологии: учебное пособие. – М.: Интернет-Университет информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 503 с.
2. Кустов В.Н. Основы теории ограниченного структурного параллелизма. – МО, 1992. 136 с.

*Статья поступила в редакцию 23.07.2014;
переработанный вариант — 23.09.2014*

Грызунов Виталий Владимирович

к.т.н., с.н.с., начальник 573 лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского (197198, г. Санкт-Петербург, Ждановская, 13), тел. +7 (921) 955-69-33, e-mail: viv1313r@mail.ru

Problem solving method of measuring and calculating tasks under conditions of data computing system degradation

V. Gryzunov

Military data- computing systems must solve the assigned tasks during adversary attacks. Adversary attacks results in degrading of computing system that is evident as productivity slowdown. The suggested problem solving methods of measuring and calculating tasks allow to low standards of the computing system's performance at the cost of using permissible errors and time reserves (time lags). The example of this method is provided in this paper. In this example, it is shown that requirements to data computing system's performance can be 1.24 and 1.29 times lower.

Keywords: problem solving by degrading computing system, problem solving under conditions of computing system destruction.