

Математическое, алгоритмическое и программное обеспечение

DOI 10.66032/2221-2574-2026-1-3-65-71

УДК 621.396.96

СВОЙСТВО ИЗОХРОННОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ СЕТЕВОЙ СТРУКТУРЫ С РАСПРЕДЕЛЁННЫМ ВЕКТОРНЫМ ВЫЧИСЛИТЕЛЕМ

Пальгужев Дмитрий Анатольевич

доктор технических наук, профессор кафедры радиотехники радиофизического факультета,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ).

Сурков Никита Игоревич

аспирант, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ).

Адрес: 603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

E-mail для связи: palguchev@rf.unn.ru

Аннотация: В работе рассмотрено свойство изохронности применительно к параллельным вычислительным процессам, выполняемым датчиками-измерителями в системе мониторинга воздушного пространства. За отправную точку принята феноменологическая модель информационной системы сбора, обработки и обмена информацией сетевой структуры о прогнозируемых процессах. Выявлено, что процессы измерения положения воздушных объектов в системах мониторинга воздушного пространства имеют признаки изохронности, т.е. требования проведения измерений и параллельных вычислений в распределённой системе в достаточно чётко определяемые временные промежутки. Установлена взаимосвязь между вероятностным подходом при объединении информации и выполнением условия изохронности и влияние этой взаимосвязи на достоверность и качество обрабатываемой информации в системе. Кроме того, условие изохронности может являться системным параметром, связанным монотонной зависимостью с достоверностью информации, обрабатываемой в системе. Рассмотрены различные системы параллельного программирования для разработки распределённого векторного вычислителя и выполнения условия изохронности. Сделан вывод о необходимости применения комбинации нескольких методов и систем параллельного программирования для наиболее полной реализации выявленных условий изохронности.

Ключевые слова: изохронность, распределённые параллельные вычисления, информационная система сетевой структуры, мониторинг воздушного пространства, модифицированный метод Linda.

Введение

Информационные системы сетевой структуры востребованы и актуальны во многих областях, в частности в области мониторинга воздушного пространства для сбора и обработки информации от пространственно-разнесённых некогерентных источников. Исследования характера параллельных вычислительных процессов, происходящих в подобных системах, использующих распределённый векторный вычислитель, позволили выявить системную особенность — изохронность характера измерений, и определить основные требования, предъявляемые в связи с ней, к быстродействию и своевременности обработки радиолокационной и разнородной информации о воздушных объектах в системах мониторинга воздушного пространства.

1. Феноменологическая модель информационной системы сбора, обработки и об- мена информацией сетевой структуры о прогнозируемых процессах дискретными датчиками-измерителями

Для анализа особенностей распределённых вычислительных процессов в информационных системах сете-

вой структуры, применяемых для сбора и обработки информации при мониторинге воздушной обстановки, воспользуемся феноменологической моделью информационной системы сбора, обработки и обмена информацией сетевой структуры о прогнозируемых процессах дискретными датчиками-измерителями (рис. 1, [1]). На рис. 1 в феноменологической модели выделена область применения распределённого векторного вычислителя (РВВ). Вместе с тем, при более детальном рассмотрении процессов измерения параметров воздушных объектов датчиками-измерителями (например, на рис. 1 ДИ-1 — Процесс 1, ДИ-1 — Процесс 2), не входящих в область применения распределённого векторного вычислителя, выявляются дополнительные требования к временным результатам процессов измерения датчиками-измерителями, которые имеют существенное влияние на последующую обработку.

Так, например, траектория воздушного объекта (ВО) может быть представлена как сумма измерений во времени $G_I(t)$ процесса 1 датчиком-измерителем 1 (ДИ-1):

$$G_I(t) = \sum_{n1=1}^{N1} R_{n1}(t_{n1} \pm \Delta t_1), \quad (1)$$

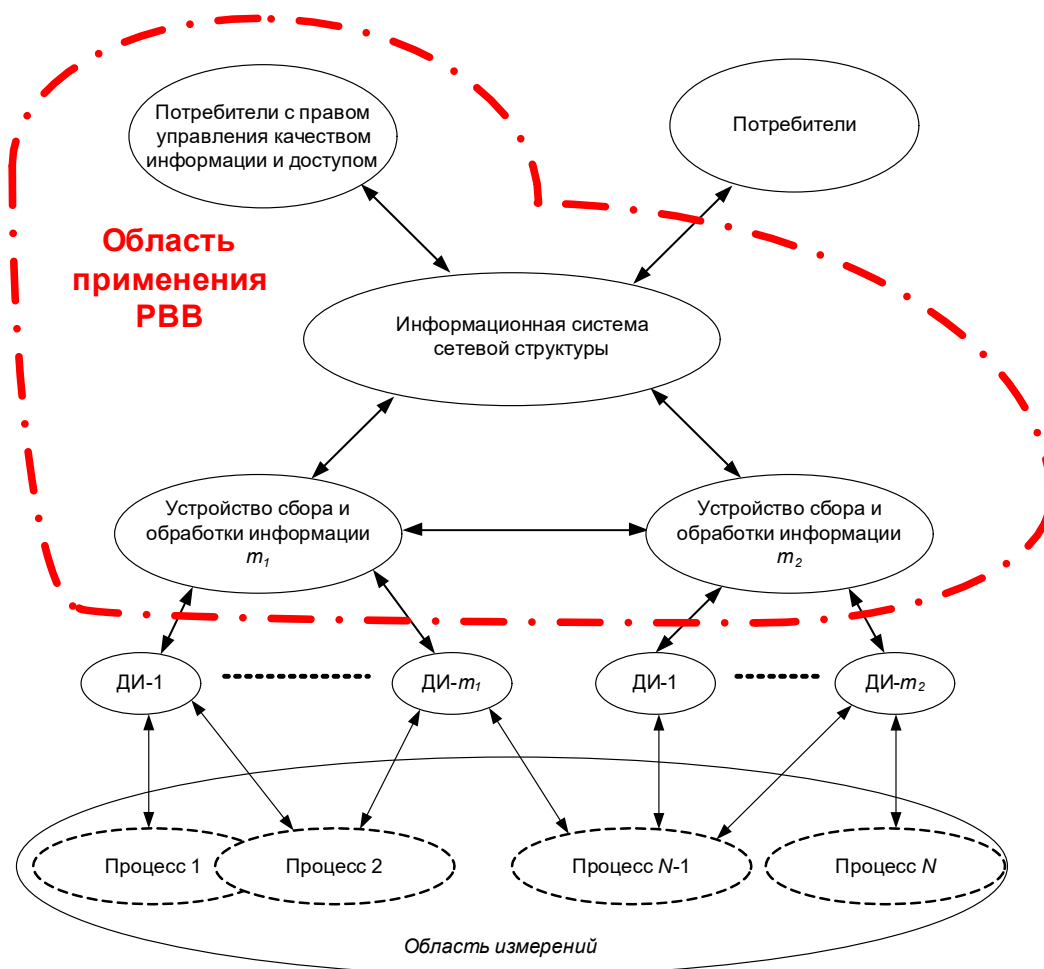


Рис. 1. Феноменологическая модель информационной системы сбора, обработки и обмена информацией сетевой структуры о прогнозируемых процессах дискретными датчиками-измерителями

где N_1 — количество измерений датчиком ДИ-1 траектории ВО; R_{n1} — значения измеренных параметров (координат, составляющих скоростей); $n1$ — порядковый номер измерения 1-го процесса; t_{n1} — значения момента времени $n1$ -го измерения; Δt_1 — допустимые отклонения от времени измерения, связанные с производительностью ДИ-1, способом измерения датчика-измерителя, а также задержками при обработке в устройстве сбора и обработки информации (УСОИ) и в каналах передачи данных. То есть параметр Δt_1 является не только параметром датчика-измерителя, но и является системным параметром, т.к. он характеризует особенности сбора и обработки информации в системе, и он связан монотонной зависимостью с достоверностью информации, динамически обновляемой в системе в соответствии с измерениями ДИ.

Данные по траектории ВО $G_1(t)$, как и данные по другим траекториям от ДИ-1, при поступлении в УСОИ распределённым векторным вычислителем не обрабатываются, т.к. получены от одного датчика-измерителя. Если процесс 1 одновременно измеряет ДИ-2, который пространственно разнесён и некоге-

рентен ДИ-1, его измерения будут происходить в другие моменты времени t_{n2} , а траектория как сумма измерений ДИ-2 будет выглядеть следующим образом:

$$G_2(t) = \sum_{n2=1}^{N_2} R_{n2}(t_{n2} \pm \Delta t_2). \quad (2)$$

Измерения ДИ-1 и ДИ-2, если они следуют во времени друг за другом, обрабатываются РВВ на УСОИ, которое определяет идентичность измерений объекта (процесса 1), измеренного ДИ-1 и ДИ-2 в соответствии с методом и алгоритмом сетевой обработки [1].

Если к УСОИ $m1$ подключено k -датчиков-измерителей, сумма измерений по всем датчикам-измерителям процесса 1, поступающая во времени на УСОИ, определяется следующим выражением:

$$G(t) = \sum_1^k G_k(t) = \sum_{n1=1}^{N_1} R_{n1}(t_{n1} \pm \Delta t_1) + \sum_{n2=1}^{N_2} R_{n2}(t_{n2} \pm \Delta t_2) + \dots + \sum_{nk=1}^{N_k} R_{nk}(t_{nk} \pm \Delta t_k). \quad (3)$$

Выражение (3) определяет совокупность последовательных измерений во времени k -датчиками-

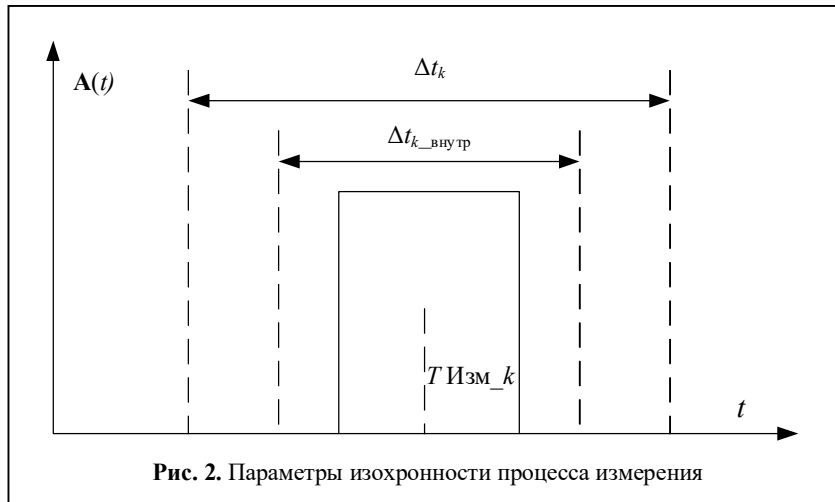


Рис. 2. Параметры изохронности процесса измерения

измерителями одного процесса — траектории воздушного объекта.

Используем термин изохронность, применяемый в основном к изохронности колебаний [2, 3], к более высокому уровню информационной системы — к параллельным процессам. Изохронность измерений одного и того же процесса разными ДИ определяется соотношениями периода измерений (обзора РЛС) $T_{изм_k} = t_{(n+1)k} - t_{nk}$ и допустимым отклонением от времени измерения Δt_k , которое в общем случае разное для каждого ДИ, а кроме того, необходимо учитывать физический смысл измеряемого процесса (он должен быть экстраполируемым в соответствии с условиями феноменологической модели [1]) и задержку передачи данных единичного измерения от ДИ до УСОИ. Если задержка превышает период измерения $\Delta t_k > T_{изм_k}$, в этом случае изохронность процесса измерения датчиками-измерителями нарушается, текущее измерение вследствие задержки обработки будет недостоверным и не может быть принято в обработку на УСОИ, так как при этом не будет соблюдена очередность обработки измерений от датчиков-измерителей во времени.

Параметры, определяющие требования к изохронности процесса измерения, показаны на рис. 2.

На этом рисунке видно, что отклонение длительности Δt_k включает отклонение длительности $\Delta t_{k_внутр}$, обусловленное особенностями алгоритма обработки и производительностью датчика-измерителя. $A(t)$ обозначен динамический массив данных датчиков-измерителей, в котором находятся результаты единичных измерений в конкретный момент времени. Следовательно, условие изохронности распределённых процессов измерения и обработки в информационной системе в целом имеет следующий вид:

$$G(t) = \sum_k G_k(t) = \sum_{n1=1}^{N_1} R_{n1}(t_{n1} \pm \Delta t_1) + \sum_{n2=1}^{N_2} R_{n2}(t_{n2} \pm \Delta t_2) + \dots \\ \dots + \sum_{nk=1}^{N_k} R_{nk}(t_{nk} \pm \Delta t_k), \text{ при } \Delta t_{k_внутр} \leq \Delta t_k \leq T_{изм_k}. \quad (4)$$

Отметим, что Δt_k и $\Delta t_{k_внутр}$ могут принимать отрицательные значения, например, при переменном темпе обзора в РЛС с ФАР, или с динамическим времен-

ным ресурсом обзора, в этих случаях сообщение с данными измерения может приходить раньше $T_{изм_k}$.

Результаты измерений отдельными датчиками-измерителями $A(t)$ (5) после обработки распределённым векторным вычислителем $F(A(t))$ (6) вносятся в динамический массив данных, обновляемый при последовательном поступлении соответствующих данных от датчиков-измерителей и не содержащих повторяющейся информации от разных датчиков-измерителей об одном и том же процессе:

$$A(t) = \{A(t)^{(1)} \cup A(t)^{(2)} \cup \dots \cup A(t)^{(m)}\} =$$

$$= \begin{pmatrix} x_1^{(1)} & \dots & x_{N_1}^{(1)} & x_1^{(2)} & \dots & x_{N_2}^{(2)} & \dots & x_1^{(m)} & \dots & x_{N_m}^{(m)} \\ y_1^{(1)} & \dots & y_{N_1}^{(1)} & y_1^{(2)} & \dots & y_{N_2}^{(2)} & \dots & y_1^{(m)} & \dots & y_{N_m}^{(m)} \\ z_1^{(1)} & \dots & z_{N_1}^{(1)} & z_1^{(2)} & \dots & z_{N_2}^{(2)} & \dots & z_1^{(m)} & \dots & z_{N_m}^{(m)} \\ V_{x_1}^{(1)} & \dots & V_{x_{N_1}}^{(1)} & V_{x_1}^{(2)} & \dots & V_{x_{N_2}}^{(2)} & \dots & V_{x_1}^{(m)} & \dots & V_{x_{N_m}}^{(m)} \\ V_{y_1}^{(1)} & \dots & V_{y_{N_1}}^{(1)} & V_{y_1}^{(2)} & \dots & V_{y_{N_2}}^{(2)} & \dots & V_{y_1}^{(m)} & \dots & V_{y_{N_m}}^{(m)} \\ V_{z_1}^{(1)} & \dots & V_{z_{N_1}}^{(1)} & V_{z_1}^{(2)} & \dots & V_{z_{N_2}}^{(2)} & \dots & V_{z_1}^{(m)} & \dots & V_{z_{N_m}}^{(m)} \\ n_1^{(1)} & \dots & n_{N_1}^{(1)} & n_1^{(2)} & \dots & n_{N_2}^{(2)} & \dots & n_1^{(m)} & \dots & n_{N_m}^{(m)} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$F(A(t)) \Rightarrow B(t) =$$

$$= \begin{pmatrix} x_1^{(1)} & \dots & x_{N_1}^{(1)} & x_1^{(2)} & \dots & x_{N_2}^{(2)} & \dots & x_1^{(q)} & \dots & x_{N_q}^{(q)} \\ y_1^{(1)} & \dots & y_{N_1}^{(1)} & y_1^{(2)} & \dots & y_{N_2}^{(2)} & \dots & y_1^{(q)} & \dots & y_{N_q}^{(q)} \\ z_1^{(1)} & \dots & z_{N_1}^{(1)} & z_1^{(2)} & \dots & z_{N_2}^{(2)} & \dots & z_1^{(q)} & \dots & z_{N_q}^{(q)} \\ V_{x_1}^{(1)} & \dots & V_{x_{N_1}}^{(1)} & V_{x_1}^{(2)} & \dots & V_{x_{N_2}}^{(2)} & \dots & V_{x_1}^{(q)} & \dots & V_{x_{N_q}}^{(q)} \\ V_{y_1}^{(1)} & \dots & V_{y_{N_1}}^{(1)} & V_{y_1}^{(2)} & \dots & V_{y_{N_2}}^{(2)} & \dots & V_{y_1}^{(q)} & \dots & V_{y_{N_q}}^{(q)} \\ V_{z_1}^{(1)} & \dots & V_{z_{N_1}}^{(1)} & V_{z_1}^{(2)} & \dots & V_{z_{N_2}}^{(2)} & \dots & V_{z_1}^{(q)} & \dots & V_{z_{N_q}}^{(q)} \\ n_1^{(1)} & \dots & n_{N_1}^{(1)} & n_1^{(2)} & \dots & n_{N_2}^{(2)} & \dots & n_1^{(q)} & \dots & n_{N_q}^{(q)} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где $x, y, z, V_x, V_y, V_z, n$ — координаты, составляющие скорости и номера трасс воздушных объектов, поступающие на УСОИ от отдельных датчиков-измерителей в качестве результатов измерений, и размещаемые в соответствующих матрицах.

Из анализа выражений (4)–(6) можно сделать вывод, что единичные результаты измерений процессов, которые не выполняют условие по изохронности измерений, не могут быть обработаны распределённым векторным вычислителем вследствие большой потери достоверности и невозможности экстраполяции на длительный временной интервал, а объединённые результаты не могут включать данные от датчика-измерителя, которые вследствие задержки во времени (по любым причинам) теряют свою достоверность. Из

этого вывода следует, что при выполнении параллельных вычислений измерений протекающих во времени процессов необходимо учитывать время обработки в датчиках-измерителях и время доставки обработанной информации до устройств сбора и обработки информации по каналам передачи данных или по сети. Сформулированное условие является условием выполнения изохронности параллельных вычислительных процессов в большой вычислительной системе для случая наблюдения непрерывных, экстраполируемых процессов некогерентными дискретными датчиками-измерителями.

Ещё одним следствием из условия выполнения изохронности параллельных вычислений в большой распределённой системе мониторинга воздушного пространства является применение не только общепринятого вероятностного, но и временного подхода к объединению информации от нескольких источников. Именно стремлением «попасть» в изохронный интервал, обусловленный темпом обзора РЛС в многопозиционной радиолокационной системе, объясняется одна из задач работы [4].

Совместный вероятностно-временной подход позволяет учесть особенности сбора (получения измерений) информации от датчиков-измерителей, выявить неподходящую для объединения информацию по временным признакам и, следовательно, в целом повысить достоверность объединённой информации в системе и уменьшить объем производимых параллельных вычислений.

2. Особенности параллельных процессов сбора и обработки информации в информационной системе сетевой структуры с учётом выполнения условий изохронности

Следующим следствием из предыдущего вывода является особенность организации динамического массива обработанных данных $F(A(t))$, которая также должна подчиняться требованиям изохронности, но на более высоком уровне — уровне динамического массива обработанной информации. Это означает, что разные УСОИ, входящие в РВВ, получая и обрабатывая информацию от датчиков-измерителей по одному и тому же процессу, вносят изменения в динамический массив данных не произвольно, а с выполнением определённых правил.

Первое правило заключается в ограничении частоты обновления, и зависит от частоты реализации измерений датчиками-измерителями и от требований информационной системы и системы управления по частоте обновления, особенно в тех случаях, когда для построения достаточно точной объединённой траектории объекта не требуется слишком большое количество точек измерений, так как большое количество избыточных данных перегружает и датчики-измерители, и систему передачи данных, и сами УСОИ.

Второе правило заключается в ограничении одновременного доступа разным УСОИ к обновлению данных об одном и том же процессе в динамическом

массиве данных. Для этого случая оптимальным представляется организация вычислений по системе параллельного программирования Linda [5, с. 268] с некоторыми дополнениями, присущими особенностям изохронных параллельных вычислений. В системе Linda все параллельные процессы имеют доступ к общей памяти, единицей хранения данных которой является кортеж, а общее пространство памяти является пространством кортежей. Особенностью организации доступа к пространству кортежей является изъятие кортежа из пространства для внесения в него изменений. Процесс, который произвёл изъятие, вносит изменения в кортеж и размещает его обратно в пространство кортежей. Изменить кортеж непосредственно в пространстве нельзя. Это правило исключает одновременный доступ и изменение единицы хранения. В динамической памяти РВВ кортежем выступает единица хранения — столбец обработанных данных об объекте за последний текущий момент времени. Для выполнения требования изохронности можно установить минимальное время, в течение которого любой из параллельных процессов не может вносить изменения в конкретный кортеж. Если в течение этого времени запрета изменения измерения по конкретному объекту стали неактуальны или появились более новые в другом параллельном процессе, то доступ получит процесс с более новыми измерениями. Время последнего измерения вносится в кортеж при его возвращении в пространство кортежей.

Необходимо отметить определённое удобство системы Linda, которое заключается в том, что в любой последовательный язык достаточно добавить четыре функции, чтобы обеспечить параллельное программирование. Описание функций достаточно подробно представлено в [5].

Известны и другие системы параллельного программирования и фреймворки [6–8], которые могут быть в определённой мере применены при создании программного обеспечения РВВ. Фреймворки типа Apache Kafka, Storm, набор инструментов и библиотек ROS изначально асинхронны и требуют создания средств внешнего управления для обеспечения изохронности, а Apache Flink использует метки времени, отправляемые по сети, но разные узлы могут начать процессы вычислений в разное время из-за задержек сети, а, следовательно, также необходима разработка дополнительных методов обеспечения синхронности.

Наиболее подходящими в рассматриваемой предметной области мониторинга воздушного пространства являются системы OpenMP и MPI [9–17].

3. Комбинирование методов параллельного программирования в обработке информации применительно к области мониторинга воздушного пространства

В данной статье представлены только основные особенности из анализа ряда работ [9–17] по системам параллельного программирования применительно к рассматриваемой области параллельных вычислений,

которые в сокращённом виде могут быть изложены следующим образом:

Linda: отсутствие временной модели в спецификации, асинхронность, отсутствие готовых библиотек, малая распространённость, что приводит к необходимости реализации данного метода без основных базовых библиотек с дополнительными обязательными дополнениями.

OpenMP: не поддерживает распределённую память, максимальное число потоков ограничено ресурсами одного вычислительного узла, как правило менее 256 потоков, стандартный компьютер 4–16 потоков.

MPI: полный контроль над изохронностью в распределённой системе, наличие библиотек, широкая распространённость. Один из минусов — сложность отладки и внедрения.

Основные положения по созданию комбинированной системы параллельного программирования, предназначенной для решения задач в системе мониторинга воздушного пространства с точки зрения организации параллельных вычислений в условиях соблюдения требований изохронности, по мнению авторов, можно кратко изложить следующим образом.

В основу комбинированной системы предлагается положить модифицированный метод Linda. Узлы обработки информации из состава УСОИ периодически генерируют кортежи с собранной информацией и помещают в распределённое пространство кортежей, другие узлы забирают их для обработки. Модификация заключается в добавлении специальных кортежей-маркеров, которые запускают обработку или сигнализируют о наступлении определённого временного интервала, а также добавление точных временных меток к каждому собранному кортежу, чтобы процессы обработки могли фильтровать кортежи по временным меткам (в пределах требуемого временного окна), таким образом достигается изохронность параллельных процессов.

OpenMP не предназначен для распределённой памяти, но его можно использовать вместе с другими методами [11, с. 72], в данном случае с Linda. Применение заключается в распараллеливании процессов внутри каждого узла по отдельности, а не всей сетевой структуры вместе. Благодаря свойству инкрементальной параллелизации появляется возможность постепенно внедрять метод в узлы без глобального изменения кода, распределяя сбор и обработку данных по потокам. Изохронность достигается путём планирования на основе времени и синхронизации потоков с помощью барьеров.

Подход, основанный на разбиении системы на узлы и их распределении как по процессам, так и по потокам, показал эффективность в исследовании [17]. Работа посвящена разработке и исследованию реализации версии модели мелкой воды, в которой MPI используется между узлами, а OpenMP — внутри каждого узла. На небольшом числе узлов чистый MPI подход на основе обмена сообщениями оказывается эффективнее гибридного. Это связано с накладными

расходами на создание и синхронизацию потоков, а также с тем, что при малом числе узлов нагрузка на коммуникационную сеть мала, и выигрыш от снижения числа межузловых пересылок не компенсирует издержки многопоточности. Но по мере увеличения числа узлов, начиная с шести и более, гибридный подход начинает превосходить чистый обмен сообщениями. Сокращение объёма межузловой коммуникации за счёт обмена через общую память внутри узла показывает прирост производительности.

В этой статье идея развивается далее. Вместо MPI предлагается координация через модифицированное пространство кортежей Linda, что дополнительно обеспечивает изохронность работы информационной системы.

Таким образом, за счёт комбинирования методов параллельных вычислений достигается их оптимизация в рассматриваемой области, начинаясь с отдельных узлов и продолжаясь на сетевом уровне системы, при этом на всех уровнях выполняется требование изохронности.

Выводы

Процессы измерения положения воздушных объектов в системах мониторинга воздушного пространства имеют признаки изохронности, т.е. требования проведения измерений и параллельных вычислений в распределённой системе в достаточно чётко определяемые временные промежутки. Если измерения, вычисления и последующая обработка информации проводятся без соблюдения выявленных особенностей, происходит резкое уменьшение достоверности информации, она может быть значительно задержана во времени и внести существенные искажения при объединении её с информацией от других источников. Требование по соблюдению изохронности в связке процессов измерения и последующей обработки также может быть использовано при разработке и оценке эффективности информационных систем сетевой структуры, предназначенных для применения в системах мониторинга воздушного пространства.

Одним из способов соблюдения требований изохронности обработки информации от датчиков-измерителей при разработке программного обеспечения может являться комбинированная система параллельного программирования, основой которой является система Linda с некоторыми дополнениями в части временных ограничений по внесению изменений в пространство кортежей.

Применение вероятностно-временного подхода к созданию комбинированной системы параллельного программирования позволяет оптимизировать параллельные вычислительные процессы в системах мониторинга воздушного пространства [18]. Свойство изохронности параллельных процессов в распределённой системе вносит определённые изменения в систему параллельного программирования, но вместе с тем, оно не требует выполнения условий временной или фазовой когерентности датчиков-измерителей, то есть в данном контексте изохронность можно определить

как нежесткую, «мягкую» синхронизацию параллельных вычислительных процессов в системе мониторинга воздушного пространства.

Литература

1. Пальгуев Д.А. Система сбора, обработки и управления качеством информации сетевой структуры от пространственно разнесенных дискретных датчиков-измерителей о прогнозируемых процессах // Проектирование и технология электронных средств. 2022. № 4. С. 14–20.
2. ГОСТ Р МЭК 61883-7-2016. Аудио-/видеоаппаратура бытового назначения. Цифровой интерфейс. Часть 7. Передача системы В ITU-R BO.1294. М.: Стандартинформ, 2016.
3. ГОСТ 26886-86. Стыки цифровых каналов передачи и групповых трактов первичной сети ЕАСС. Основные параметры. М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990.
4. Пальгуев Д.А., Ильясафов А.Д., Пиунов К.Н., Багурин А.С. Особенности вторичной и третичной обработки информации о воздушных объектах в многопозиционных пространственно-разнесенных некогерентных радиолокационных системах // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2024. № 2. С. 52–58.
5. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. СПб.: БХВ-Петербург, 2002. 608 с.
6. Shaheen J.A. Apache Kafka: Real time implementation with Kafka architecture review // International Journal of Advanced Science and Technology. 2017. Vol. 109. Pp. 35–42.
7. Iqbal M.H., Soomro T.R. Big data analysis: apache storm perspective // International Journal of Computer Trends and Technology. 2015. Vol. 19, No. 1. Pp. 9–14.
8. Корицунова Е.В., Сыркин И.С., Садовец В.Ю. Архитектурное сравнение ROS1 и ROS2 в контексте ра-

боты с данными облаков точек лидара // Доклады ТУСУР. 2025. Т. 28, №3. С. 132–138.

9. Волосова А.В. Параллельные методы и алгоритмы: учебное пособие. М.: МАДИ, 2020. 176 с.
10. Соснин В.В., Балакиин П.В., Шилко Д.С., Пушкарев Д.А., Мишенёв А.В., Кустарев П.В., Тропченко А.А. Введение в параллельные вычисления. СПб.: Университет ИТМО, 2023. 128 с.
11. Антонов А.С. Параллельное программирование с использованием технологии OpenMP: учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2009. 77 с.
12. Gropp W., Lusk E., Skjellum A. Using MPI: Portable Parallel Programming with the Message-Passing Interface. 3rd ed. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2014. 310 p.
13. Chandru V., Mueller F. Hybrid MPI/OpenMP Programming on the Tilera Manycore Architecture // International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS), Innsbruck, Austria, 2016. Pp. 326–333.
14. Романюта А.А., Курносоев М.Г. Алгоритмы операций All-to-All стандарта MPI с использованием разделяемой памяти // Проблемы информатики. 2024. № 3. С. 72–82.
15. A Message-Passing Interface Standard Version 4.0. URL: <http://www.mpi-forum.org/docs/mpi-4.0/mpi40-report.pdf> (дата обращения: 8.10.2025).
16. Романюта А.А., Курносоев М.Г. Алгоритмы редукции и широковещательной рассылки MPI на базе разделяемой памяти многопроцессорных узлов // Вычислительные методы и программирование. 2023. № 4. С. 339–351.
17. Чаплыгин А.В., Гусев А.В. Гибридная модель мелкой воды с использованием технологий MPI-OpenMP // Проблемы информатики. 2021. № 1. С. 65–82.
18. Грудинин И.В., Пальгуев Д.А., Шентябин А.Н. Информационная подсистема сбора, обработки и обмена радиолокационной информацией сетевой структуры // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2020. № 675. С. 243–253.

Поступила 12 ноября 2025 г.

English

THE PROPERTY OF ISOCHRONY OF COMPUTATIONAL PROCESSES IN AN INFORMATION SYSTEM OF A NETWORK STRUCTURE WITH A DISTRIBUTED VECTOR CALCULATOR

Dmitry Anatolyevich Palguyev — Grand Dr. in Engineering, Professor, Department of Radio Engineering, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN).

Nikita Igorevich Surkov — Postgraduate student, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN).

Address: 193232, Russian Federation, Saint Petersburg, Bolshevikov ave., 22/1.

E-mail: palguyev@rf.unn.ru

Abstract: The issues of studying the functioning of air space monitoring systems in order to improve the quality of information received in them are currently always relevant and in demand. Studies of the nature of parallel computing processes, occurring in particular in their information collection, processing and exchange systems, have revealed a systemic feature – the isochronous nature of parallel measurements. The analysis of the nature of parallel computing was based on a phenomenological model of an information system for collecting, processing and exchanging information about predicted processes in a network structure, which corresponds to the processes of measuring, collecting and processing information about air objects in airspace monitoring systems. The ratios of time parameters are obtained, indicating the isochronous nature of measurements, such as measuring processes, the position of air objects and the processing of information about them in the information system. Identifying the isochrony of parallel computing processes allows us to apply a probabilistic-temporal approach to processing and evaluating the quality of information received, and also allows us to conclude that isochrony is a system parameter of the monitoring system as a whole and is associated with a monotonous dependence on the reliability and timeliness of information delivery. An analysis of various parallel programming systems has been carried out to assess the possibility of further development of a distributed

vector calculator. It is concluded that it is necessary to use a combination of several parallel programming methods and systems for the most complete implementation of the identified isochrony conditions in the information system of a network structure combining data from incoherent spatially spaced measuring sensors

Keywords: isochrony, distributed parallel computing, network structure information system, airspace monitoring, modified Linda method.

References

1. *Palguyev D.A.* System for collecting, processing and managing the quality of information of a network structure from spatially separated discrete sensors-measuring instruments about predicted processes. *Proektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv*. 2022. No. 4. Pp. 14–20.
2. GOST R MEK 61883-7-2016. Audio/video equipment for consumer use. Digital interface. Part 7. Transmission of ITU-R BO.1294 system. Moscow: Standartinform, 2016.
3. GOST 26886-86. Joints of digital transmission channels and group paths of the primary EASS network. Main parameters. Moscow: State Committee of the USSR for Product Quality Management and Standards, 1990.
4. *Palguyev D.A., Ilyasov A.D., Pionov K.N., Bagurin A.S.* Features of secondary and tertiary processing of information about air objects in multi-position spatially distributed non-coherent radar systems. *Radioengineering and telecommunication systems*. 2024. No. 2. Pp. 52–58.
5. *Voevodin V.V., Voevodin V.I.* Parallel computing. Saint Petersburg: BHV-Peterburg, 2002. 608 p.
6. *Shaheen J.A.* Apache Kafka: Real time implementation with Kafka architecture review. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2017. Vol. 109. Pp. 35–42.
7. *Iqbal M.H., Soomro T.R.* Big data analysis: Apache Storm perspective. *International Journal of Computer Trends and Technology*. 2015. Vol. 19, No. 1. Pp. 9–14.
8. *Korshunova E.V., Syrkina I.S., Sadovets V.Yu.* Architectural comparison of ROS1 and ROS2 in the context of working with lidar point cloud data. *Doklady TUSUR*. 2025. Vol. 28, No. 3. Pp. 132–138.
9. *Volosova A.V.* Parallel methods and algorithms: textbook. Moscow: MADI, 2020. 176 p.
10. *Sosnin V.V., Balakshin P.V., Shilko D.S., Pushkarev D.A., Mishenev A.V., Kustarev P.V., Tropchenko A.A.* Introduction to parallel computing. Saint Petersburg: ITMO University, 2023. 128 p.
11. *Antonov A.S.* Parallel programming using OpenMP technology: textbook. Moscow: MSU Publishing House, 2009. 77 p.
12. *Gropp W., Lusk E., Skjellum A.* Using MPI: Portable Parallel Programming with the Message-Passing Interface. 3rd ed. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2014. 310 p.
13. *Chandru V., Mueller F.* Hybrid MPI/OpenMP Programming on the Tilera Manycore Architecture. *International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS)*, Innsbruck, Austria, 2016. Pp. 326–333.
14. *Romanyuta A.A., Kurnosov M.G.* Algorithms of All-to-All operations of the MPI standard using shared memory. *Problems of Informatics*. 2024. No. 3. Pp. 72–82.
15. A Message-Passing Interface Standard Version 4.0. URL: <http://www.mpi-forum.org/docs/mpi-4.0/mpi40-report.pdf> (accessed: 8.10.2025).
16. *Romanyuta A.A., Kurnosov M.G.* Algorithms of reduction and broadcast in MPI based on shared memory of multiprocessor nodes. *Computational methods and programming*. 2023. No. 4. Pp. 339–351.
17. *Chaplygin A.V., Gusev A.V.* Hybrid shallow water model using MPI-OpenMP technologies. *Problems of Informatics*. 2021. No. 1. Pp. 65–82.
18. *Grudin I.V., Palguyev D.A., Shentyabin A.N.* Information subsystem for collecting, processing and exchanging radar information of a network structure. *Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky*. 2020. No. 675. Pp. 243–253.