

© 2012 г. В.А. ЗАСОВ, канд. техн. наук
(Самарский государственный университет путей сообщения, Самара),
М.В. РОМКИН
(Куйбышевская железная дорога – филиал ОАО РЖД, Самара)

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В ЗАДАЧЕ РАЗДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ В МНОГОМЕРНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Рассматриваются алгоритмы и структурные схемы параллельных специализированных вычислительных устройств, позволяющих осуществлять разделение сигналов в многомерных динамических системах, контролировать и обеспечивать устойчивость решения этой задачи в условиях априорной неопределенности свойств объекта. Предложенные алгоритмы и устройства позволяют представить вычислительный процесс мониторинга сложных объектов в виде ряда параллельных процессов и реализовать режим реального времени.

PARALLEL COMPUTING OF SIGNAL SEPARATION MULTICHANNEL DINAMIC SYSTEMS /V.A. Zasov (Samara State University of Transport, Department «Mechatronics in Automated Production»; Address: Perviy Bezymaynny per.,18, Samara, 443066, Russsia; E-mail: vzasov@mail.ru), M.V. Romkin (Kuibyshev railway, Chief of laboratory of service of automatics and telemechanics; Address: Neverova 168-A, Samara, 443036, Russia; E-mail: romkinmaks@rambler.ru). Algorithms of computing process and structures of parallel specialized computing systems for signal separations at multidimensional dynamic systems in conditions perturbations affecting the stability are considered in this paper. Structures of parallel specialized computing systems for algorithm implementation are offered, and also functional modules of separation and restoration of signals, which allow to present complex computing process in the form of a number of the parallel processes for realisation of a mode of real time.

1. Введение

Разделение сигналов (источников сигналов) – это решение задачи определения сигналов источников, недоступных для прямых измерений, по измеренным в доступных точках сигналам приемников, в которых сигналы представляют собой аддитивную смесь искаженных в процессе передачи сигналов источников.

Решение этой задачи необходимо во многих областях практической деятельности: мониторинге и диагностике технических объектов (например, виброакустической диагностике), связи, сейсмографии, гидроакустике, в медицинской диагностике и т.д. Это связано с тем, что в сложных системах (объектах) измеренные сигналы представляют собой аддитивную смесь сигналов, поступающих от многих элементов системы, и выделение параметров, описывающих текущее состояние конкретных элементов системы без разделения сигналов невозможно для большинства практических приложений.

Кроме того, разделение сигналов позволяет реализовать последующую параллельную обработку во времени каждого из выделенных сигналов, т.е. представить сложный вычислительный процесс мониторинга многомерных динамических систем в виде ряда параллельных процессов, что увеличивает быстродействие систем мониторинга.

В общем случае решение задачи разделения сигналов $s_n(k)$, $n = 1, 2, \dots, N$ источников в аддитивной смеси нескольких сигналов $x_m(t)$, $m = 1, 2, \dots, M$ в приемниках может быть

представлено как $\hat{s}_n(k) = \sum_{m=1}^M \sum_{g=0}^G w_{nm}(g, \mathbf{1}) x_m(k-g)$, где $\mathbf{s}(k) = [s_1(k), s_2(k), \dots, s_N(k)]^T$,

$\mathbf{x}(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_M(k)]^T$ сигналы источников и приемников соответственно в дискретный момент времени k , $w_{nm}(g, \mathbf{1})$ - элемент $N \times M$ разделяющей матрицы $\mathbf{w}(g, \mathbf{1})$ импульсных характеристик. В частотной области решение задачи разделения описывается в виде $\mathbf{S}(\omega) = \mathbf{W}(\omega, \mathbf{1}) \cdot \mathbf{X}(\omega)$, где $\mathbf{W}(\omega, \mathbf{1})$ - разделяющая матрица частотных коэффициентов передачи равная $\mathbf{W}(\omega, \mathbf{1}) = \mathbf{H}^{-1}(\omega, \mathbf{1})$, если смешивающая матрица частотных коэффициентов передачи каналов $\mathbf{H}(\omega, \mathbf{1})$ не является сингулярной [1]. Динамические характеристики каналов $\mathbf{H}(\omega, \mathbf{1})$ являются квазистационарными, т.е. изменяются в зависимости от некоторого параметра $\mathbf{1}$ (времени, температуры, взаимного положения источников и приемников).

Из общего решения следует, что задача разделения сигналов имеет большую вычислительную сложность, а из ее принадлежности к классу обратных задач следуют возможные некорректность и неустойчивость вычисления сигналов $\mathbf{s}(k)$ источников.

Целью работы является разработка параллельных алгоритмов и специализированных вычислительных устройств (СВУ), позволяющих осуществлять разделение сигналов, контролировать и обеспечивать устойчивость решения этой задачи в условиях априорной неопределенности свойств объекта.

2. Алгоритмы и структурные схемы параллельных вычислительных устройств для разделения сигналов

Для разделения источников сигналов предлагаются параллельные СВУ, структурная схема которых состоит из двух процессоров: функционального и настроечного. Функциональные процессоры (ФП) в СВУ осуществляют собственно разделение сигналов источников, т.е. реализуют оператор $\mathbf{W}(g)$, который по существу является обратной моделью для модели образования сигналов. Это специализированные параллельные процессоры, имеющие регулярную структуру, образуемую перестраиваемыми фильтрами и блоками суммирования. Число процессоров равно числу контролируемых узлов объекта и обработка информации в процессорах производится параллельно во времени [1].

Вычисление параметров перестраиваемых фильтров осуществляется настроечными процессорами (НП), которые реализуют алгоритмы разделения сигналов.

Рассмотренные СВУ для решение задачи разделения источников, имеют регулярную структуру, однотипные функциональные процессоры, что упрощает их реализацию.

Алгоритмы определения элементов матрицы $\mathbf{W}(g)$ можно разделить на две группы. Первая группа алгоритмов (детерминированных алгоритмов) базируется на основе априорной информации о характеристиках каналами передачи сигналов, т.е. на матрице импульсных характеристик $\mathbf{H}(g)$, которые либо измеряются, либо определены из теоретических положений.

Особенностью алгоритмов второй группы (называющихся статистическими или сле-

пыми) является то, что элементы матрицы $H(g)$ в явном виде неизвестны и информацией, используемой для определения входных сигналов s , является реализация вектора измеряемых сигналов x и знание свойств источников сигналов s [2,3].

Априорные свойства источников сигналов, на основе которых возможна реализация слепых алгоритмов можно разделить на две группы: собственные свойства сигналов и их взаимные отношения. К первой группе относятся: свойства законов распределения (гаусово, неравномерное и т.д.) сигналов, их стационарность-нестационарность, случайность-детерминированность. Ко второй группе относятся взаимная некоррелированность сигналов, их статистическая независимость, ортогональность. Алгоритмы этой группы не требуют знания импульсных переходных характеристик каналов передачи сигналов, что выгодно отличает эти алгоритмы от алгоритмов первой группы.

На рис.1 и рис.2 приведены примеры структуры СВУ разделения источников сигналов для рассмотренных двух групп алгоритмов. Как уже было отмечено выше, структурные схемы СВУ разделения источников сигналов состоят из двух процессоров - функционального и настроечного.

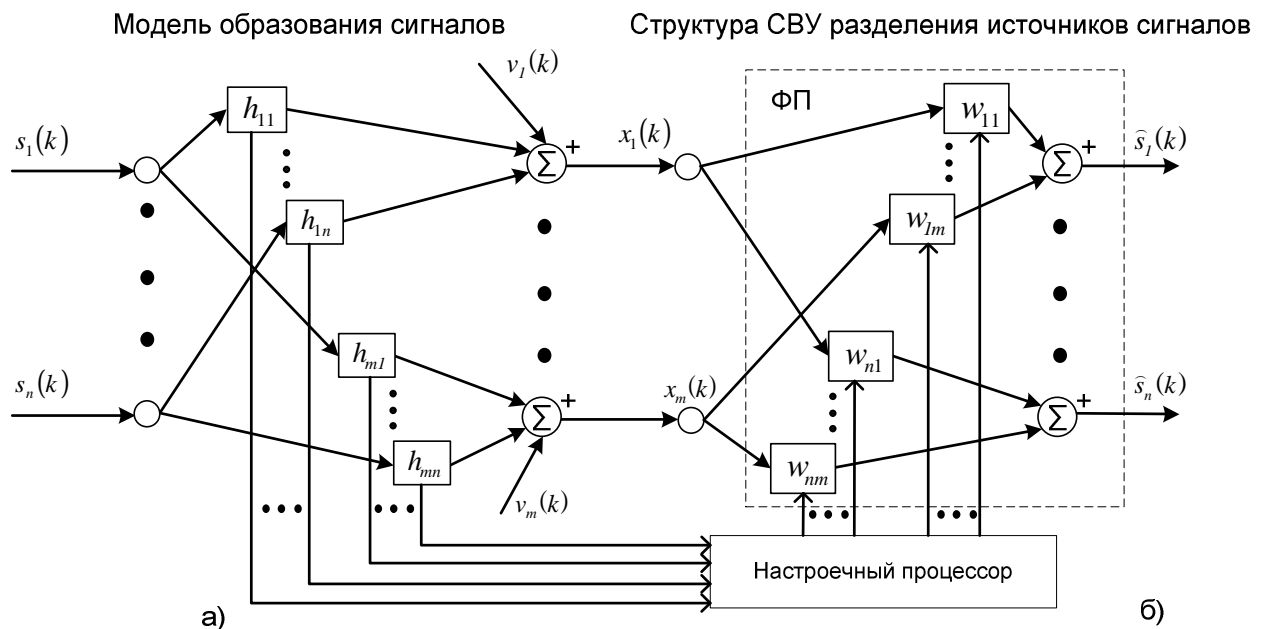


Рис.1. Структурные схемы модели образования и вычислительной модели разделения источников сигналов для детерминированных методов

Предложенные СВУ, описывающие решение задачи разделения источников, имеют одинаковую структуру, одинаковые ФП и различаются лишь НП, реализующими алгоритмы вычислений параметров обратной модели.

НП позволяют также анализировать устойчивость решения задачи разделения сигналов при различных видах вариаций параметров модели образования сигналов, контролировать и обеспечивать методами регуляризации устойчивость решения задачи разделения сигналов в условиях априорной неопределенности свойств объектов.

Организация параллельные вычислений в предложенных СВУ позволяют обеспечить режим реального времени при выполнении требований к надежности вычислений в зада-

чах разделения сигналов в практических приложениях мониторинга и контроля сложных объектов.

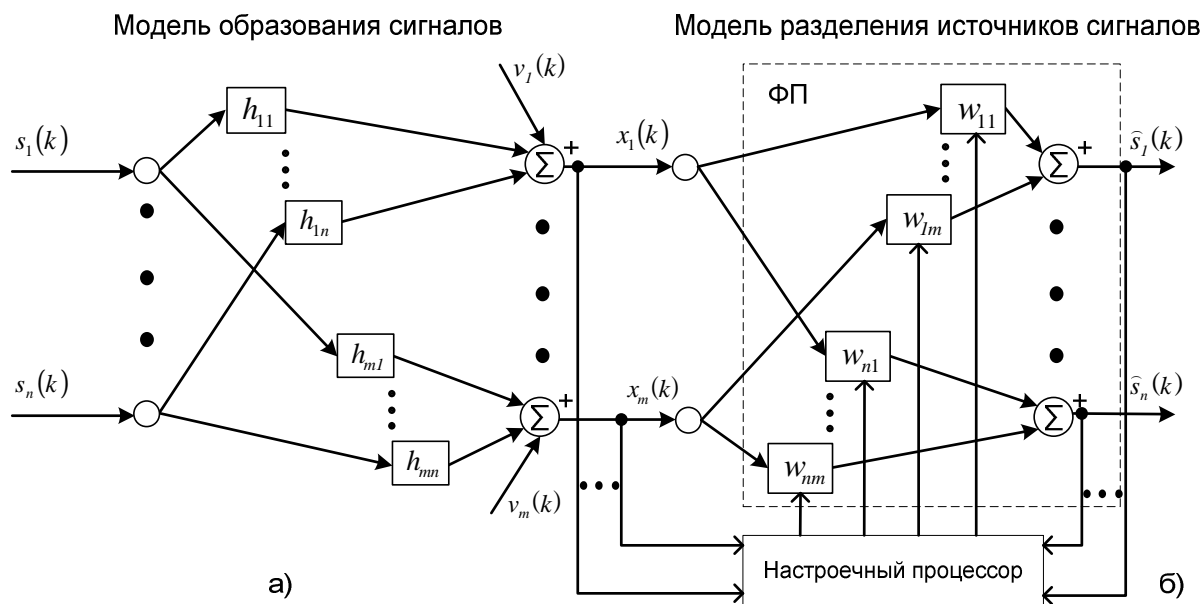


Рис.2. Структурная схема модели образования и вычислительной модели разделения источников сигналов для статистических (слепых) методов

3. Организация параллельных вычислений на основе СВУ разделения сигналов при мониторинге объектов

Отличительной особенностью задач мониторинга сложных протяженных объектов по параметрам динамических процессов (например, виброакустического контроля механических конструкций и машин, многоканальных систем связи и т.п.) является необходимость применения сложных алгоритмов обработки информации с целью выделения параметров сигналов, диагностических признаков и распознавания технического состояния объектов. Это обусловлено сложной структурой измеряемых сигналов, большим уровнем помех и, при диагностировании зарождающихся дефектов, малыми изменениями параметров сигналов при незначительных изменениях параметров технического состояния объектов.

Поэтому актуальной задачей при практической реализации широких потенциальных возможностей методов мониторинга объектов по параметрам динамических процессов (МПДП) является создание эффективных алгоритмов анализа сигналов, а также специализированных вычислительных систем (СВС) для реализации этих алгоритмов в реальном времени в условиях индустриальной среды и имеющих высокие производительность и надежность при небольшой стоимости, малых энергопотреблении, весе и размерах.

Наиболее перспективными методами создания высокопроизводительных надежных встраиваемых вычислительных систем для приложений контроля и диагностики являются архитектурные методы, среди которых своей эффективностью выделяются методы параллельной обработки и специализация.

Важным направлением повышения производительности и быстродействия МПДП является разработка такого представления алгоритма вычислительного процесса при МПДП

объектов, форма которого наиболее удобна для параллельной обработки. Параллельная форма алгоритма МПДП должна отображать естественный параллелизм протекающих в объекте процессов, выделять вытекающие из постановки задачи параллельные ветви и конвейеры обработки сигналов [4,5].

Это направление очень важно, ибо неудобная для параллельной обработки форма алгоритма в значительной мере снижает эффект повышения производительности параллельных вычислений. Один из подходов, позволяющих реализовать это направление, рассмотрим ниже.

Определим функцию обобщенной СВС МПДП и разработаем структуры СВС, реализующих эту функцию в системах контроля различного назначения, например, виброакустического контроля распределенных механических конструкций и механизмов.

Функция СВС задается в форме ориентированного графа алгоритма вычислительного процесса, общего для класса задач МПДП, и определяется на основе предлагаемой информационной модели объекта, в которой выделены две составляющие – диагностическая модель и модель распространения сигналов в объекте [1]. Диагностическая модель отражает процесс преобразования (в определенном смысле «кодирования») параметров технического состояния объекта параметрами сигналов, сопровождающих функционирование объекта. Модель распространения сигналов в объекте отражает процесс преобразования сигналов при передаче их от узлов объекта к датчикам.

Информационная модель объекта приведена на рис.3 и представлена в виде ориентированного графа $G_{ИМ}$ преобразования сигналов в работающем объекте. Вершины ориентированного графа $G_{ИМ}$ соответствуют операторам преобразования сигналов, а дуги отображают информационные связи между операторами.

Положим, что в объекте (например, сложной машине или механической конструкции) выделено k узлов, каждый из которых является источником некоторого диагностического сигнала ζ_r^s , $s = \overline{1, k}$, например, виброакустического или ультразвукового широко используемых в задачах контроля и диагностики.

Положим также, что состояние s -ого узла определяется совокупностью m параметров состояния Z_i^s , $i = \overline{1, m}$. Тогда сигнал ζ_r^s получается из идеального диагностического сигнала $\zeta_{ид}^s$ путем преобразования некоторых параметров U_i^s , $i = \overline{1, m}$ этого сигнала под действием параметров Z_i^s , $i = \overline{1, m}$ технического состояния s -ого узла (например, кинематической пары машины), т.е. «кодирования» параметров Z_i^s параметрами U_i^s сигнала - носителя диагностической информации. Сигнал $\zeta_{ид}^s$ генерируется некоторой идеальным узлом (кинематической парой), под которым понимается некоторый эталонный узел, который находится в исправном техническом состоянии. Процесс преобразования сигнала $\zeta_{ид}^s$ в сигнал ζ_r^s для s -ого узла отображается подмножеством операторов P_1^s из множества P_1 , которое представляет диагностическую модель объекта.

Множество операторов P_2 отображает процесс преобразования (искажения) диагностических сигналов при распространении сигналов из точек генерации (узлов объекта) в точки измерения. Множество операторов P_3 отображает процесс сложения диагностических сигналов (получения аддитивной смеси сигналов) в точках измерения – местах расположения датчиков. Множества операторов P_2 и P_3 представляют модель распространения сигналов в объекте.

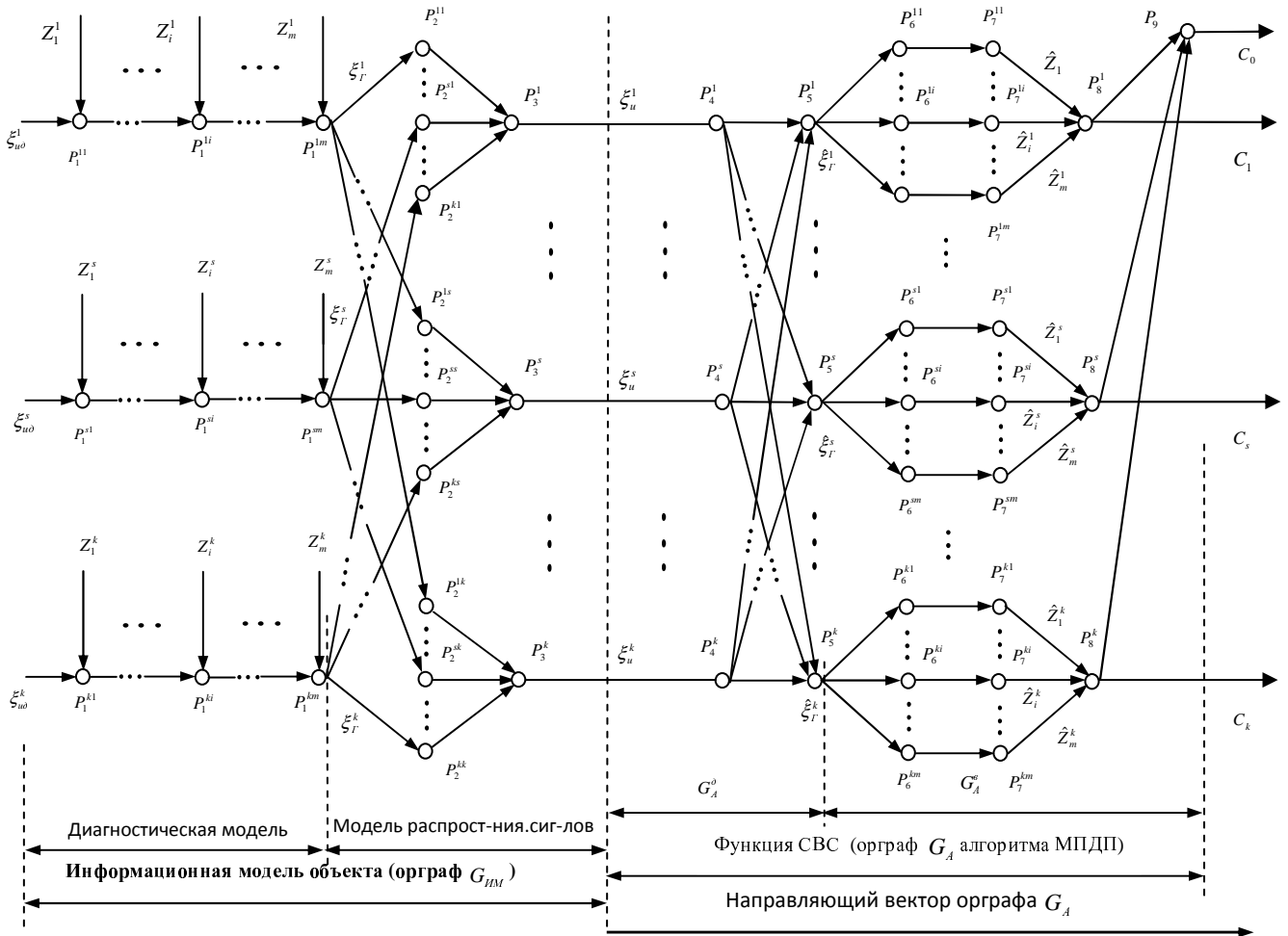


Рис.3. Информационная модель объекта и функция специализированной вычислительной системы

Например, для виброакустической диагностики представленная информационная модель объекта справедлива для среднечастотного диапазона (100 – 1300 Гц).

Функция СВС МПДП представлена в виде орграфа G_A алгоритма вычислительного процесса мониторинга объекта. Множество вершин орграфа G_A разбито на непересекающиеся подмножества вершин P_4, \dots, P_9 (ярусов) и соответствующих им операторов алгоритма, которые характеризуются однотипностью выполняемых операций. Представленная форма алгоритма выгодно отличается высокой степенью параллелизма, характеризуемой шириной алгоритма (яруса), равной $k \times m$, где k и m – число узлов и параметров состояния узлов соответственно, и длиной алгоритма, равной числу ярусов. Такая форма алгоритма является естественной и следует из постановки задачи мониторинга объектов.

Преобразования сигналов, выполняемые операторами орграфа G_A алгоритма МПДП, являются обратными преобразованиям сигналов в информационной модели объекта. Отсюда ярусы графа алгоритма отражают следующие процедуры обработки диагностических сигналов: P_4 - восстановление сигналов, искаженных при преобразовании датчиками и при передаче по объекту от мест зарождения в точки измерения; P_5 - разделение сигналов по принадлежности соответствующим узлам; P_6 - выделение параметров сигналов, являющихся диагностическими признаками; P_7 - определение параметров технических

состояний узлов по значениям диагностических признаков; P_8 и P_9 классификация и прогноз состояний соответственно узлов и объекта в целом по значениям параметров технического состояния.

Множество переменных ξ_u^s , $s = \overline{1, k}$ отображает диагностические сигналы в доступных для измерения точках механизма, множество C_1, \dots, C_k, C_0 отображает сигналы, характеризующие техническое состояние узлов и объекта мониторинга в целом.

Для описания структуры СВС МПДП выбраны три основные компоненты: множество функциональных модулей (ФМ), коммуникационная среда, обеспечивающая обмен информацией между ФМ, множество программ работы совокупности ФМ.

Для определения этих компонент введено математическое описание СВС МПДП – ориентированный граф G_{BC} вычислительной системы, который получается из ориентированного графа G_A алгоритма с помощью операций простого гомоморфизма (свертки) вершин, образующих непересекающиеся подмножества. Каждой вершине ориентированного графа G_{BC} ставится в соответствие ФМ, функции которого соответствуют сворачиваемым вершинам.

Рассмотрены следующие варианты свертки вершин орграфа G_A : принадлежащих одному ярусу, принадлежащих одной ветви, и предельные случаи – все вершины в одну и без использования свертки. Этот прием [5,6] позволяет получить орграфы G_{BC} различных параллельных СВС МПДП: конвейерных (MISD), векторных с общим управлением (SIMD), матричных (MIMD), а также классических однопроцессорных (SISD).

Таким образом, на основе предложенного подхода возможно создание СВС, отличающихся высокой степенью параллелизма обработки диагностических сигналов в задачах мониторинга

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Засов В.А., Никоноров Е.Н., Тарабардин М.А. Идентификация входных сигналов в задачах контроля и диагностики динамических объектов/Сборник трудов четвертой международной конференции по проблемам управления (МКПУ-IV) – М.: Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – 2009. – 2030 с.
2. Cichocki, C. Amari. Adaptive blind signal and image processing: Learning algorithms and applications. Wiley, 2002. - 555 p.
3. Hyvarinen, A. and Oja, E. Independent component analysis: Algorithms and applications. Neural Networks, 13(4-5): 2000. P.411-430.
4. Воеводин В.В. Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ – Петербург, 2002. – 608 с
5. Воеводин В.В. Математические модели и методы в параллельных процессах. – М.: Наука: Гл. ред. физ. – мат. лит., 1986. – 296 с.
6. Гергель В.П. Теория и практика параллельных вычислений: учебное пособие. – ИНТУ-ИТ: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 423 с.