Модели параллельных специализированных процессоров для решения задачи разделения сигналов

В.А. Засов[1]

[1]Самарский государственный университет путей сообщения, Свободы 2-В, Самара, Россия, 443066

Аннотация. В работе рассматриваются модели высокопроизводительных специализированных процессоров, структуры которых ориентированы на параллельную обработку информации при решении задачи выделения отдельных сигналов из аддитивной смеси нескольких сигналов. Предложенные модели нерекурсивных, рекурсивных и с регуляризацией решений параллельных специализированных процессоров отличаются универсальностью при решении задачи разделения сигналов различными алгоритмами. Преимуществом процессоров с регуляризацией решений является обеспечение устойчивости решения в условиях априорной неопределенности параметров объектов в случаях, когда обратная задача разделения сигналов становится некорректной. Приведены результаты асимптотического анализа вычислительной сложности, определяющие время решения задач специализированными процессорами, определены условия их эффективного применения.

1. Введение

Содержанием задачи разделения сигналов является определение 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.

Вычислительная сложность алгоритмов решения задачи разделения сигналов велика и для многих приложений имеет порядок $O(N^3)$, где N - число источников сигналов [1], что усложняет практическое применение этих алгоритмов.

Традиционным подходом к уменьшению времени решения задачи разделения сигналов является распараллеливание вычислений [2,3]. Разработаны параллельные варианты алгоритмов разделения сигналов для многоядерных процессоров, мультипроцессорных систем с общей и распределенной памятью, мультикомпьютерных систем.

Дальнейшее существенное ускорение решения этой задачи возможно за счет специализации процессоров, т.е. создания процессоров с такой организацией структуры и вычислительных процессов, которые в максимальной степени соответствуют структуре алгоритма решаемого класса задач [1,4].

В настоящее время функциональные возможности производимых промышленностью специализированных цифровых процессоров сигналов и программируемых логических интегральных схем недостаточны для решения сложной задачи разделения сигналов. В [5] для специализированных процессоров разделения и восстановления сигналов в общем виде определены только задачи и функции, а в [6] для рассмотренных моделей специализированных процессоров анализ вычислительной сложности параллельной обработки недостаточен для определения условий их эффективного применения. Кроме этого, предложенные специализированные процессоры не обеспечивают устойчивости решения в условиях априорной неопределенности параметров объектов в случаях, когда обратная задача разделения сигналов становится некорректной.

Целью работы является разработка параллельных специализированных процессоров для разделения сигналов в условиях априорной неопределенности параметров объектов и асимптотический анализ вычислительной сложности параллельной обработки информации в процессорах для определения условий их эффективного применения.

2. Объект исследования

Для решения задачи разделения сигналов разработано множество алгоритмов [1,5-8], поэтому параллельные специализированные процессоры должны быть универсальными в этом классе задач. Модель процессора представим сочетание как двух частей: универсальной, осуществляющей процедурное моделирование (реализацию) алгоритма и специальной, осуществляющей структурное моделирование алгоритма.

Модель образования сигналов в объектах представим в виде линейной многомерной системы, имеющей N входов и M выходов [1,9]. Входными сигналами модели являются сигналы $s_n(k),\ n=1,2,...,N$, выходными сигналами $x_m(k)$, $m=1,2,...,M$. Входные сигналы – это сигналы, генерируемые различными источниками сигналов, недоступными для непосредственных измерений, а выходными сигналами этой системы могут являться сигналы различных приемных устройств, например, датчиков, антенн и т.п. Положим, что каждый из M выходов такой многомерной системы связан со всеми N входами линейными каналами передачи сигналов.

Математическая модель образования сигналов описывается уравнениями дискретной свертки (1), где m - ый наблюдаемый сигнал представляет собой аддитивную смесь искаженных каналами сигналов источников и шума [1,9], т.е.

$$x_m(k)=\sum_{n=1}^{N}\sum_{g=0}^{G-1}h_{mn}(g,\mathbf{I})s_n(k-g)+y_m(k), \qquad (1)$$

где $h_{mn}(g,\mathbf{I})$ - элемент $N\times M$ смешивающей матрицы $\mathbf{h}(g,\mathbf{I})$ импульсных характеристик каналов, $\mathbf{y}(k)$ – вектор шума, $g=0,...,G$-1 и $k=0,...,K$-1- число отсчетов импульсных характеристики каналов и сигналов соответственно. Положим, что импульсные характеристики каналов $h_{mn}(g,\mathbf{l})$ конечны изменяются в зависимости от некоторого вектора параметров $\mathbf{l}$ (времени, взаимного положения источников и приемников и т.п.) [9].

В общем случае решение задачи разделения сигналов источников есть решение (1) и может быть представлено в виде:

$$\hat{s}_n(k)=\sum_{m=1}^{M}\sum_{g=0}^{G-1}w_{nm}(g,I)x_m(k-g), \qquad (2)$$

где $w_{nm}(g,I)$- импульсные характеристики разделяющих фильтров, образующие разделяющую матрицу $\mathbf{w}(g,\mathbf{I})$, которая является равной или близкой матрице, обратной матрице $\mathbf{h}(g,\mathbf{I})$.

При разделении сигналов по принадлежности источникам выделим два этапа вычислений.

На первом этапе по измеренным динамическим характеристикам каналов или параметрам сигналов вычисляются элементы $w_{nm}(g,I)$ разделяющей матрицы $\mathbf{w}(g,\mathbf{I})$и осуществляется настройка алгоритма разделения сигналов. Алгоритм вычислений $w_{nm}(g,I)$ (настройки) отражает специфику конкретного алгоритма разделения сигналов.

На втором этапе производится собственно разделение сигналов с помощью разделяющих цифровых фильтров, настроенных на первом этапе. Этот вычислительный процесс одинаков для разных алгоритмов разделения сигналов.

Поэтому, в модели параллельного специализированного процессора выделим два вычислительных устройства – настроечный процессор (НП) (универсальная часть) и функциональный процессор (ФП) (специальная часть).
Рассматриваемые ниже модели нерекурсивного, рекурсивного и с регуляризацией специализированных процессоров отличаются используемыми методами решения (1) при одинаковых базовых элементах, лежащих в основе моделей.

3. Модель нерекурсивного параллельного специализированного процессора
В модели нерекурсивного параллельного специализированного процессора реализуется метод решения системы уравнений (1) на основе обращения смешивающей матрицы $\mathbf{h}(g,\mathbf{I})$.
Модель нерекурсивного процессора [5,6] целесообразно представить в виде удобном для осуществления потоковой параллельной обработки во временной области:

$$\widehat{s}_1(k)=\sum_{m=1}^{M}\sum_{g=0}^{G-1} w_{1m}(g,I)x_m(k-g)$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots ,$$
$$\widehat{s}_N(k)=\sum_{m=1}^{M}\sum_{g=0}^{G-1} w_{Nm}(g,I)x_m(k-g)$$

где $\widehat{s}_1(k),\ldots,\widehat{s}_N(k)$ - вычисленные сигналы, являющиеся некоторыми приближениями – образами – истинных сигналов $s_1(k),\ldots,s_N(k)$ в точках их зарождения; $w_{nm}(g,I)$ элементы разделяющей матрицы $\mathbf{w}(g,\mathbf{I})$, вычисляемые следующим образом:

$$w_{nm}(g,I)=\frac{1}{K}\sum_{k=0}^{K-1} W_{nm}(\omega_g,I)\cdot exp\left(i\frac{2\pi k\omega_g}{K}\right).$$

Частотный коэффициент передачи $W_{nm}(\omega_g,I)$, является элементом на пересечении n-ой строки и m-ого столбца спектральной матрицы $\mathbf{W}(\omega_g,\mathbf{I})$, обратной спектральной матрице $\mathbf{H}(\omega_g,\mathbf{I})$, т.е. $\mathbf{W}(\omega_g,\mathbf{I})=\mathbf{H}^{-1}(\omega_g,\mathbf{I})$ при $M=N$ (или псевдообратной матрицы $\mathbf{W}(\omega_g,\mathbf{I})=\mathbf{H}^{+}(\omega_g,\mathbf{I})$ при $M\neq N$).
Функциональный процессор (ФП) выполняет собственно разделение сигналов приемников $x_m(k)$ по принадлежности источникам $s_n(k)$. Этот процессор реализует модель, обратную модели образования сигналов и имеет регулярную однородную структуру, состоящую из $N\times M$ перестраиваемых фильтров (ПФ) и N блоков суммирования (БС). Вычисления линейных сверток блоками ПФ и БС осуществляются параллельно во времени и независимо друг от друга. Вычислительная сложность $L_{ФП}^{нер}(K)$ алгоритма работы ФП, определяющая время его работы, характеризуется высотой его параллельной формы, имеет порядок $L_{ФП}^{нер}(K)=O(K)$ и не зависит от числа источников сигналов.
В настроечном процессоре НП производится вычисление коэффициентов $w_{nm}(g,I)$ ПФ по измеренным отсчетам импульсных переходных характеристик каналов (детерминированные методы) или характеристикам источников сигналов (статистические методы разделения) [6-9].
Для детерминированных методов алгоритм вычисления параметров $w_{nm}(g,I)$ содержит следующие этапы: быстрое преобразование Фурье (БПФ) импульсных переходных характеристик каналов и получение смешивающей спектральной матрицы $\mathbf{H}(\omega,\mathbf{I})$; обращение спектральной матрицы $\mathbf{H}(\omega,\mathbf{I})$ и получение разделяющей спектральной матрицы $\mathbf{W}(\omega,\mathbf{I})$; обратное БПФ (ОБПФ) элементов разделяющей матрицы $\mathbf{W}(\omega,\mathbf{I})$ и получение весовых коэффициентов ПФ, задаваемых матрицей $\mathbf{w}(g,\mathbf{I})$.

Параллельная форма первого и третьего этапов алгоритма настройки имеет ширину $N \times M$ и реализуется $N \times M$ блоками БПФ и ОБПФ. Вычислительная сложность $L_{НП1,3}^{нер}(G)$, определяющая общее время выполнения этих этапов, определяемое высотой их параллельных форм, имеет порядок $L_{НП1,3}^{нер}(G) = O(G\,log_2 G)$.

Параллельная форма алгоритма вычисления разделяющей матрицы имеет ширину G и реализуется G блоками обращения матриц порядка N (положим N=M). В каждом из этих блоков, в свою очередь, реализуется параллельная форма алгоритма вычисления обратной матрицы (например, [3],) ширина которой $O(N^4)$, а высота $L_{НП2}^{нер}(N) = O(log_2^2 N)$ параллельной формы этого алгоритма определяет время обращения спектральной матрицы $\mathbf{H}(\omega,\mathbf{I})$.

Вычислительная сложность $L_{НП1,2,3}^{нер}(G,N)$ алгоритма работы НП (настройки) существенно больше вычислительной сложности $L_{ФП}^{нер} = O(K)$ алгоритма работы ФП, т.е.

$$O(G\,log_2 G) + O(log_2^2 N) = O(G\,log_2 G + log_2^2 N) > O(K).$$

Например, при $K \approx G \approx N$ отношение $\dfrac{L_{НП1,2,3}^{нер}(G,N)}{L_{ФП}^{нер}(K)} \to log_2 G$, поэтому разделение сигналов предложенным нерекурсивным процессором допустимо, если на интервале сигналов, определяемым числом отсчетов $K \le G\,log_2 G$, параметры смешивающей матрицы принимаются неизменными, т.е. модель образования сигналов является квазистационарной.

Кроме того, учитывая полиномиальную зависимость ширины $O(N^4)$ параллельной формы алгоритма обращения матрицы от числа источников сигналов, можно сделать вывод практической возможности применения рассмотренной модели нерекурсивного процессора для разделения сигналов $s_n(k)$ небольшого числа источников.

4. Модель рекурсивного параллельного специализированного процессора

Модель рекурсивного параллельного специализированного процессора, реализующая итерационный метод решения системы уравнений (1), приведена на рисунке 1.

Функциональный процессор ФП рекурсивной модели имеет регулярную однородную структуру, образованную M одинаковыми вычислительными модулями (ВМ) [5,6]. Все ВМ работают параллельно во времени и каждый из них реализует рекурсивный алгоритм выделения одного из сигналов $\hat{s}_n(k)$ источников из аддитивной смеси нескольких сигналов. Вычислительная сложность $L_{ФП}^{рек}(K\gamma)$ алгоритма работы ФП, определяющая время его работы, характеризуется высотой его параллельной формы, имеет порядок $L_{ФП}^{рек}(K\gamma) = O(K\gamma)$, γ - число итераций и не зависит от числа источников.

Настроечный процессор НП состоит из блока синхронизации БСХР и M групп устройств, состоящих из блока настройки БН и блока памяти БП. Вычисление импульсных характеристик фильтров ПФ$_{mn}$, $n = 1,...,N$, $m = 1,...,M$ (причем исключаются $m \ne n$) в НП производить не нужно, т.к. частотные характеристики фильтров ПФ$_{mn}$ равны частотным характеристикам соответствующих по индексам каналов в смешивающей матрице $\mathbf{H}(\omega,\mathbf{I})$ модели образования сигналов. Эти характеристики необходимо лишь запоминать в блоках памяти БП$_m$, $m = 1,...,M$.

Вычисление импульсных переходных характеристик $\tilde{h}_{11}(g), \tilde{h}_{22}(g),...,\tilde{h}_{MN}(g)$, $g = 0,...,G-1$, перестраиваемых обратных фильтров ПОФ$_{mn}$ (только для случаев $m = n$), осуществляется в БН$_m$, $m = 1,...,M$.

Алгоритм вычисления $\tilde{h}_{mn(m=n)}(g,I)$ содержит следующие этапы: БПФ импульсных переходных характеристик каналов $h_{mn(m=n)}(g,I)$ и получение характеристик $H_{mn}(\omega_g, I)$;

вычисление $\tilde{H}_{mn}\left(\omega_g,I\right)=\dfrac{1}{H_{mn}\left(\omega_g,I\right)}$; ОБПФ характеристик $\tilde{H}_{mn}\left(\omega_g,I\right)$ и получение весовых коэффициентов $\tilde{h}_{mn(m=n)}\left(g,I\right)$ ПОФ.

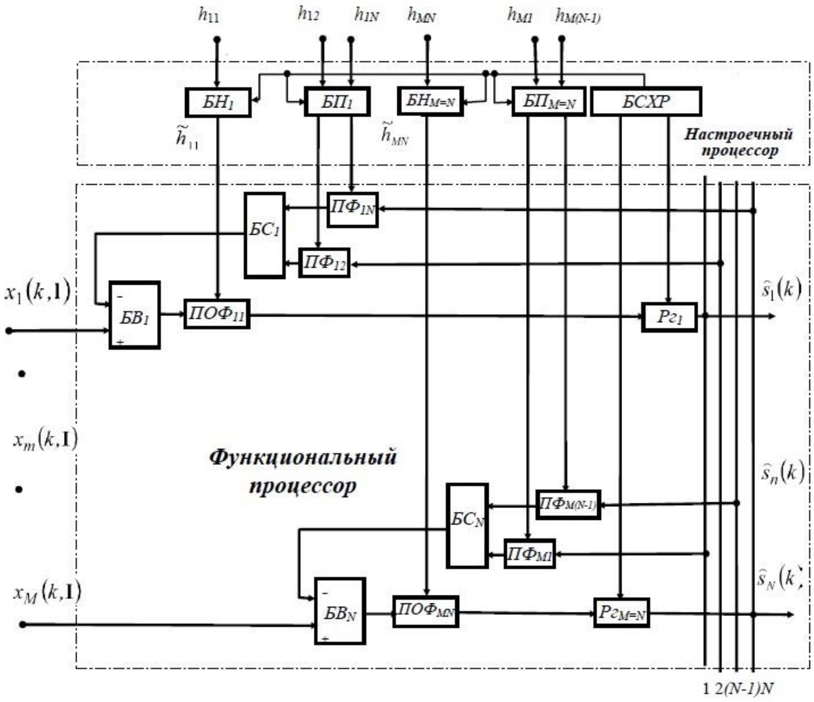

Рисунок 1. Модель рекурсивного параллельного специализированного процессора ($N=M$).

Параллельная форма первого и третьего этапов алгоритма настройки имеет ширину N и реализуется N блоками БПФ и ОБПФ. Вычислительная сложность $L^{рек}_{НП1,3}\left(G\right)$, определяющая общее время выполнения этих этапов, определяемое высотой их параллельных форм, имеет порядок $L^{рек}_{НП1,3}\left(G\right)=O(G\,log_2\,G)$.

Параллельная форма алгоритма вычисления обратных характеристик $\tilde{H}_{mn}\left(\omega_g,I\right)$ каналов имеет ширину $O(N\times G)$ и реализуется $N\times G$ блоками деления, а высота $L^{рек}_{НП2}(N)=O(1)$ параллельной формы алгоритма является константой.

Блок БСХР синхронизирует передачу параметров из НП в ФП, задает начальные условия и управляет выходными регистрами, реализуя итерационные циклы. Алгоритм работы этого блока имеет константную сложность $L^{рек}_{БСХР}(N)=O(1)$.

Оценка отношения вычислительных сложностей алгоритмов работы НП и ФП (например, при $K\approx G$)

$$\frac{L^{рек}_{НП1,2,3}\left(G\right)}{L^{рек}_{ФП}(K)}=\frac{O(G\,log_2\,G)+O(1)+O(1)}{O(K\gamma)}\to log_2\,G\,,$$

для рекурсивного процессора позволяет сделать вывод: разделение сигналов предложенным рекурсивным процессором допустимо для квазистационарной модели образования сигналов.

Однако ширина параллельной формы алгоритма НП рекурсивного процессора значительно меньше по сравнению шириной алгоритма нерекурсивного: $O(N\times G)$ против $O(N^4\times G)$. Это преимущество рекурсивного процессора по сравнению с нерекурсивным позволяет реализовать практическое решение задачи разделения сигналов $s_n\left(k\right)$ значительно бóльшего числа источников в условиях ограничения вычислительных ресурсов.

Для устойчивого разделения сигналов рекурсивными процессорами объект должен позволять устанавливать приемники сигналов таким образом, чтобы в линейной суперпозиции сигналов на выходах каждого из них преобладал сигнал от определенного источника.

5. Модель параллельного специализированного процессора с регуляризацией решений

Если параметры смешивающей матрицы $\mathbf{H}(\omega,\mathbf{I})$ или сигналов $\mathbf{s}(k)$ источников таковы, что задача разделения сигналов попадает в область некорректных задач или имеет место априорная неопределенность этих параметров, целесообразно сразу искать регуляризированное устойчивое решение системы (1) или ее аналога в частотной области.

Предлагаемая модель специализированного процессора с регуляризацией решений базируется на методе регуляризации Тихонова [10].

В модели процессора задаются два условия регуляризации Тихонова: минимизация невязки $\left\|\widehat{\mathbf{H}}\mathbf{s}-\widehat{\mathbf{x}}\right\| = \min\limits_{\mathbf{s}}$, как в методе наименьших квадратов (МНК), и минимизация нормы решения $\|\mathbf{s}\| = \min\limits_{\mathbf{s}}$, как в методе псевдообратной матрицы Мура-Пенроуза [11]. В процессоре находится такое решение $\mathbf{s}_\alpha$, которое реализует глобальный минимум сглаживающего функционала $F^\alpha[\mathbf{s}]$ вида

$$F^\alpha[\mathbf{s}] = \left\|\widehat{\mathbf{H}}\mathbf{s}-\widehat{\mathbf{x}}\right\|^2 + \alpha\Omega[\mathbf{s}],$$

где $\alpha > 0$–параметр регуляризации, $\Omega[\mathbf{s}_\alpha]$ - стабилизирующий функционал, а $\widehat{\mathbf{H}}$ и $\widehat{\mathbf{x}}$ – приближенные значения $\mathbf{H}$ и $\mathbf{x}$ такие, что

$$\left\|\widehat{\mathbf{H}}-\mathbf{H}\right\| \le \xi_{\mathbf{H}} \quad \text{и} \quad \left\|\widehat{\mathbf{x}}-\mathbf{x}\right\| \le \delta,$$

где δ и $\xi_{\mathbf{H}}$ – оценки сверху абсолютных погрешностей измерений сигналов $\mathbf{x}$ и элементов смешивающей матрицы $\mathbf{H}$. В рассматриваемой модели в качестве стабилизирующего функционала выбран функционал вида $\Omega[\mathbf{s}_\alpha] = \|\mathbf{s}_\alpha\|^2$.

Так как для задач контроля временная форма представления сигналов более естественна и удобна, представим при условиях $M = N$ и $K = G$ сглаживающий функционал следующим образом:

$$F^\alpha[\mathbf{s}] = \sum_{m=1}^{M}\sum_{k=0}^{K-1}\left[\widehat{x}_m(k,\mathbf{I}) - x_m(k,\mathbf{I})\right]^2 + \alpha\sum_{n=m=1}^{N=M}\sum_{k=0}^{K-1}\left|\widehat{s}_{n,\alpha}(k)\right|^2. \tag{3}$$

Сигнал $\widehat{x}_m(k,\mathbf{I})$ в (3) получается повторным искажением моделью образования сигналов результатов разделения, т.е.

$$\widehat{x}_m(k,\mathrm{I}) = \sum_{n=1}^{N}\widehat{s}_{n,\alpha}(k) * h_{mn}(k,\mathrm{l}),$$

где $\widehat{s}_{n,\alpha}(k,\mathrm{I})$ – регуляризированные результаты разделения сигналов для *n*-го узла объекта.

Сглаживающий функционал при упомянутых выше условиях можно также представить в виде

$$F^\alpha[\mathbf{w}] = \sum_{m=1}^{M}\sum_{k=0}^{K-1}\left[\widehat{x}_m(k,\mathbf{I}) - x_m(k,\mathbf{I})\right]^2 + \alpha\sum_{n=m=1}^{N=M}\sum_{g=0}^{G-1}\left|\tilde{w}_{nm,\alpha}(g,\mathbf{I})\right|^2,$$

более удобном для регуляризированного вычисления элементов $\tilde{w}_{nm,\alpha}(g,\mathbf{I})$ разделяющей матрицы $\tilde{\mathbf{w}}_\alpha(g,\mathbf{I})$, задающей веса перестраиваемых фильтров функционального процессора.

Элементы $\tilde{w}_{nm,\alpha}(g,\mathbf{I})$ при выбранном параметре регуляризации α определяются из условия минимума сглаживающего функционала $F^\alpha[\mathbf{w}]$, учитывая, что квадратичная форма этого функционала положительно определённая. Элементы $\tilde{w}_{nm,\alpha}(g,\mathbf{I})$ можно вычислить, например, путем решения системы из $M \cdot N \cdot G$ уравнений вида $\dfrac{\partial F^{\alpha}(\tilde{w})}{\partial \tilde{w}_{nm}(g,1)} = 0$ относительно $\tilde{w}_{nm,\alpha}(g,\mathbf{I})$, используя параллельные алгоритмы решения линейных алгебраических уравнений [2,3].

При известных (заданных) погрешностях $\xi_{\mathbf{H}}$ и δ параметр регуляризации предлагается определять как корень уравнения

$$\left\|\widehat{\mathbf{H}}\mathbf{s}_{\alpha} - \widehat{\mathbf{x}}\right\|^{2} = \left(\delta + \xi_{\mathbf{H}}\left\|\mathbf{s}_{\alpha}\right\|\right)^{2} / \beta\left(r, M, N\right),$$

в котором α является параметром $\mathbf{s}_{\alpha}$, где $\beta(r,M,N) \geq 1$ – масштабирующий множитель, определяемый размерностью задачи ($M \times N$) и погрешностью измерения параметров сигналов и каналов (определяемой, в частности, разрядностью r аналого-цифрового преобразования). Вычисленное таким образом значение параметра регуляризации α обеспечивает приемлемые для практики гладкость и невязку решения $\mathbf{s}_{\alpha}$.

Модель специализированного процессора с регуляризацией приведена на рисунке 2. Функциональный процессор ФП представляет собой модель, обратную модели образования сигналов объекта и выполняет собственно разделение измеренных сигналов. Этот процессор имеет однородную структуру, состоящую из перестраиваемых фильтров ПФ и блоков суммирования БС.

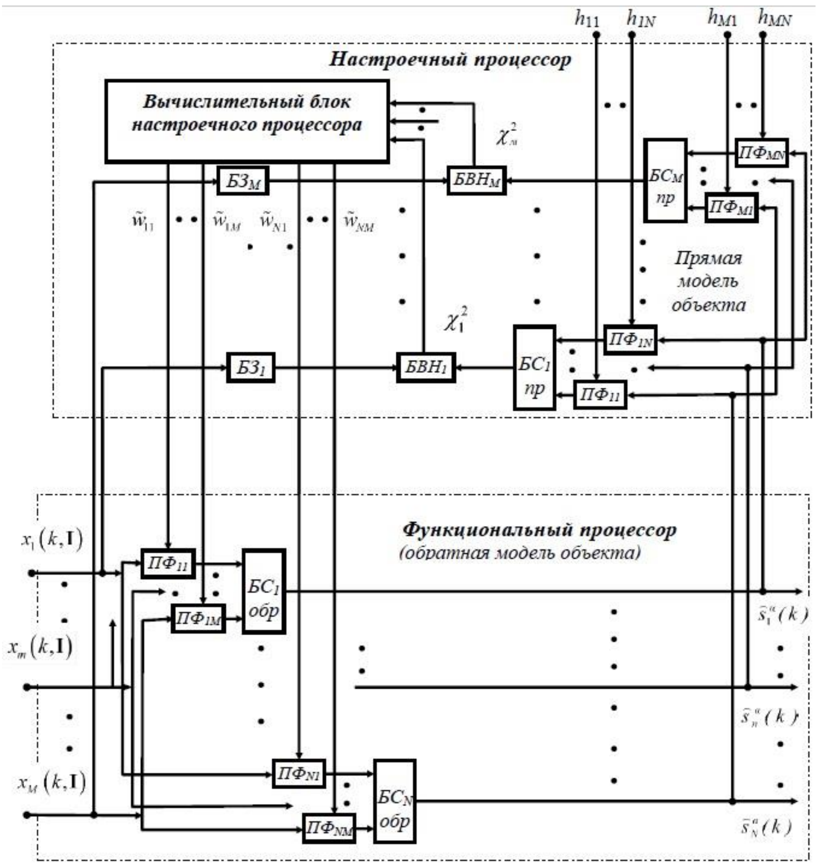

Рисунок 2. Модель параллельного специализированного процессора с регуляризацией решений.

Вычисление параметра регуляризации α и настройка ПФ, число которых равно M^2, осуществляется НП, в вычислительном блоке (ВБ) которого методом наименьших квадратов путем минимизации сглаживающего функционала $F^{\alpha}[\mathbf{w}]$ рассчитываются параметры ПФ. Элементы смешивающей матрицы $\mathbf{h}(g,\mathbf{I})$, задающих отсчеты импульсных характеристик

каналов модели образования сигналов, поступают на входы настроечного процессора НП, в котором формируется прямая модель образования сигналов.
В блоках вычисления невязок (БВН), на которые поступают задержанные блоками задержки БЗ сигналы со входов процессора и сигналы с выходов прямой модели образования сигналов, вычисляются невязки χ_m^2 для каждого из m каналов процессора.
Для минимизации сглаживающего функционала $F^{\alpha}\left[\mathbf{w}\right]$ целесообразно применять детерминированные параллельные алгоритмы оптимизации [12], разработанные для многоядерных процессоров.
Работа всех ПФ осуществляется параллельно и независимо друг от друга, что обеспечивает высокие быстродействие и надежность работы предлагаемого процессора.
Представленная на рисунке 2 модель процессора с регуляризацией является обобщенной для получения устойчивых решений системы (1) и поэтому имеет высокую сложность. На практике эту модель можно существенно упростить, если использовать дополнительную априорную информацию о модели образования сигналов (например, наличии опорных входов [13]) или применять более простые алгоритмы регуляризации [10].

6. Основные выводы

Для решения задачи разделения сигналов предложены модели высокопроизводительных нерекурсивных, рекурсивных и с регуляризацией решений параллельных специализированных процессоров, у которых время решения задачи после завершения настройки не зависит от числа источников сигналов, т.е. имеет порядок $T_{ФП}(N)=O(1)$.
Разработанные модели параллельных процессоров возможно применять в случаях изменяющихся (квазистационарных) параметров модели образования сигналов.
Процессоры с регуляризацией решений обеспечивают устойчивость решения в условиях априорной неопределенности параметров объектов в случаях, когда обратная задача разделения сигналов становится некорректной.
Регулярная однородная структура ФП удобна для реализации в виде интегральных схем.

7. Литература

[1] Засов, В.А. Алгоритмы и вычислительные устройства разделения и восстановления сигналов в многомерных динамических системах: монография. – Самара: Издательство Самарского университета путей сообщения, 2013. – 233 с.

[2] Гергель, В.П. Теория и практика параллельных вычислений: учебное пособие. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 423 с.

[3] Демьянович, Ю.К. Параллельные алгоритмы. Разработка и реализация: учебное пособие / Ю.К. Демьянович И.Г. Бурова, Т.О. Евдокимова, О.Н. Иванцова, И.Д. Мирошниченко. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 344 с.

[4] Митропольский, Ю.И. Вопросы соотношения универсальных и специализированных средств в вычислительных системах // Кибернетика и вычислительная техника. – 1985. – № 1. – С. 35-48.

[5] Засов, В.А. Параллельные вычисления в задаче разделения сигналов в многомерных динамических системах / В.А. Засов, М.В. Ромкин // Параллельные вычисления и задачи управления (PACO-12): труды 6-ой международн. конф. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2012. – С. 96-102.

[6] Засов, В.А. Модели параллельных вычислений для решения задачи разделения сигналов / В.А. Засов, М.В. Ромкин // Вестник транспорта Поволжья. – 2013. – Т. 6, № 42. – С. 77-86.

[7] Cichocki, A. Adaptive blind signal and image processing: Learning algorithms and applications / A. Cichocki, Sh. Amari. – John Wiley & Sons, Ltd, 2002. – 555 p.

[8] Кравченко, В.Ф. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях. – М.: Физматлит, 2007. – 544 с.

[9] Zasov, V.A. Modeling and Investigating the Stability of a Solution to the Inverse Problem of Signal Separation / V.A. Zasov, Ye.N. Nikonorov // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – Vol. 1904. – P. 78-84.
[10] Тихонов, А.Н. Методы решения некорректных задач: учебное пособие для вузов / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука,1986. – 288 с.
[11] Тыртышников, Е.Е. Матричный анализ и линейная алгебра. – М.: Физматлит, 2007. – 480 с.
[12] Стронгин, Р.Г. Параллельные вычисления в задачах глобальной оптимизации / Р.Г. Стронгин, В.П. Гергель, В.А. Гришагин, К.А. Баркалов. – М.: МГУ, 2013. – 285 с.
[13] Джиган, В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. – М.: Техносфера, 2013. – 528 с.

Models of Parallel Specialized Processors for Solution the problem of Signal Separation

V.A. Zasov[1]

[1]Samara State Transport University, Svobody Street 2B, Samara, Russia, 443066

Abstract. The paper discusses a models of high-performance specialized processors, the structures of which are focused for parallel processing of information for solution the problem of extracting of individual signals from an additive mixture of several signals. The proposed models of non-recursive, recursive and regularized solutions of parallel specialized processors are distinguished by their universality for solution s the problem of signal separation by various algorithms. The advantage of processors with regularization of solutions is to ensure the stability of the solution under conditions of a priori uncertainty of the parameters of objects in cases where the inverse problem of signal separation becomes ill-posed. The results of the asymptotic analysis of computational complexity, which determine the time for solving problems by specialized processors, are given, and the conditions for their effective use are determined.