

Реконфигурируемые вычислительные системы на основе полей ПЛИС



И.А. Каляев, И.И. Левин

Научно-исследовательский институт
многопроцессорных вычислительных систем
Южного федерального университета

Потоковая задача

Задача обработки больших массивов (потоков) данных по фиксированному алгоритму в темпе их поступления (в реальном времени)

Примеры потоковых задач

Радиолокация

Гидролокация

Молекулярное моделирование

Символьная обработка (криптография)

Кодирование и декодирование телевизионного сигнала
ультравысокой четкости

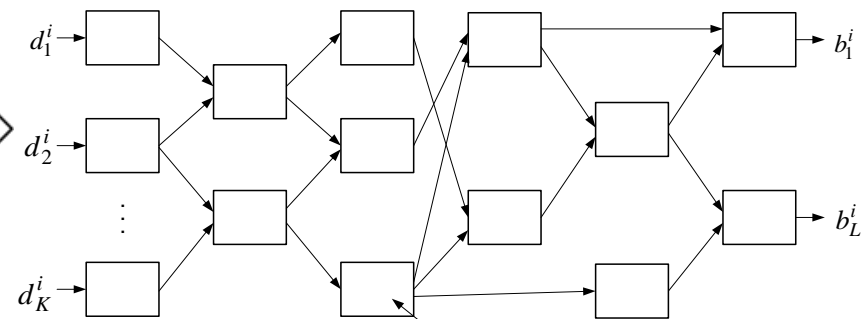
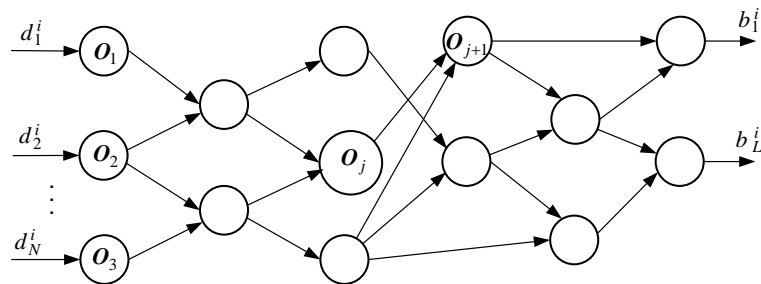
Дистанционное зондирование земли

Слежение за космическими объектами

Мониторинг компьютерных сетей

Способы решения потоковых задач

Специализированный вычислитель



Вычислительный элемент (ВЭ)

Способы решения потоковых задач

Специализированный вычислитель

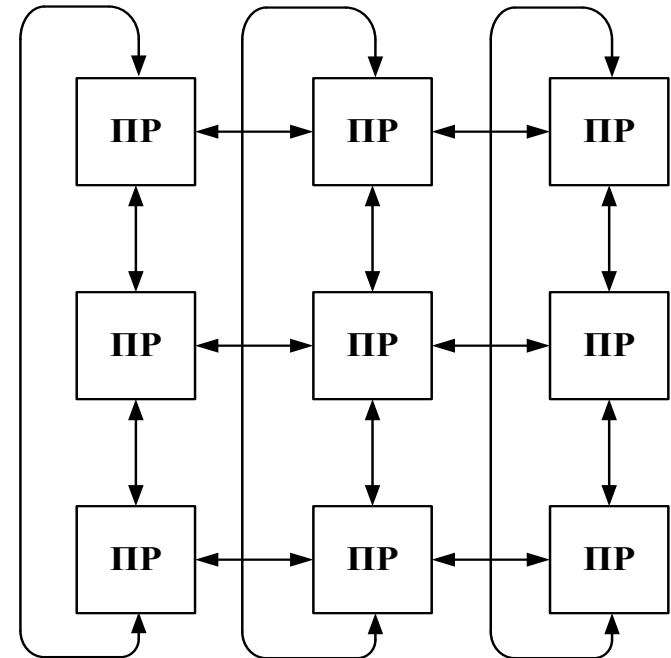
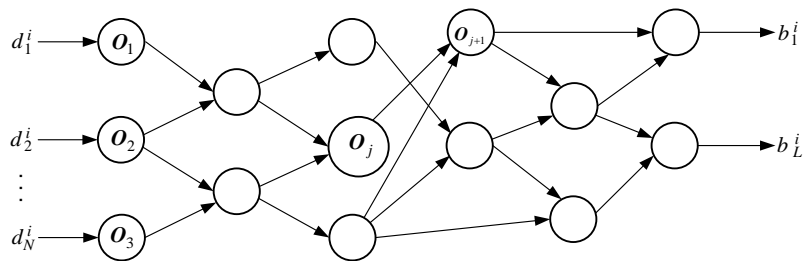
Преимущества:

- минимальное время решения;
- максимальная удельная производительность (соотношения: реальная производительность/пиковая производительность, реальная производительность/ватт, реальная производительность/объем).

Недостатки:

- создание спецвычислителя требует больших временных и финансовых затрат.

Способы решения потоковых задач МВС кластерного типа



Способы решения потоковых задач МВС кластерного типа

Преимущества:

-относительно небольшая стоимость кластерной МВС.

Недостатки:

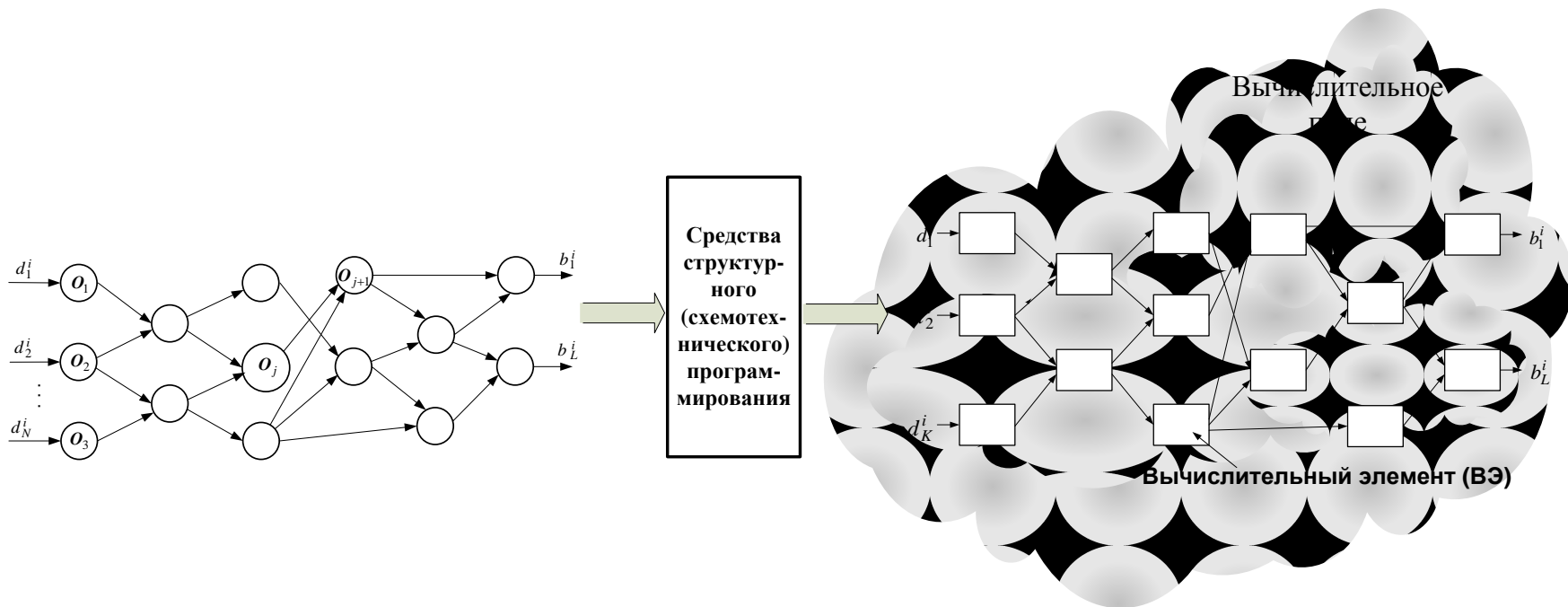
-большие непродуктивные временные расходы, направленные на организацию вычислительного процесса, а не на полезные вычисления;

-большое время решения потоковой задачи и низкая удельная производительность;

- снижение удельной производительности при увеличении числа задействованных процессорных узлов.

Способы решения потоковых задач

Реконфигурируемые МВС



Способы решения потоковых задач

Реконфигурируемые МВС

Преимущества:

- малое время решения потоковой задачи, сопоставимое с временем решения на спецвычислителе;
- высокая удельная производительность;
- повышение удельной производительности при увеличении размеров вычислительного поля.

Недостатки:

- сложность структурного (схемотехнического) программирования вычислительного поля.

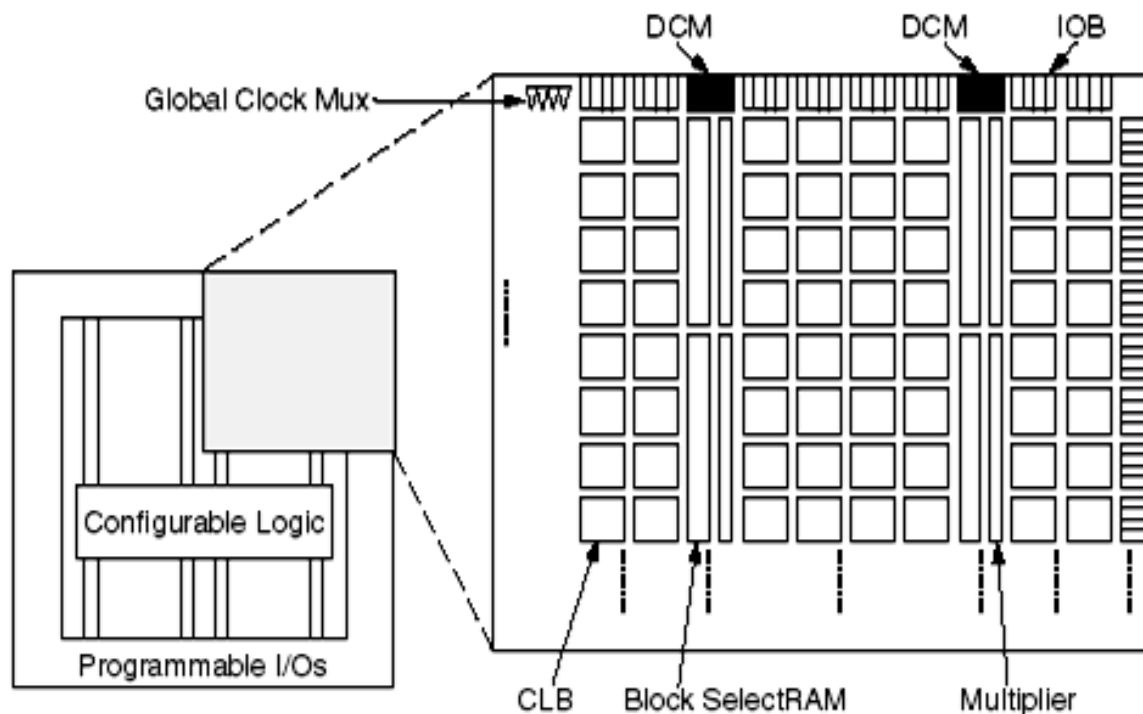
Эволюция развития реконфигурируемых вычислительных систем

- 1. Аналоговые вычислительные машины – 50-е–60-е годы XX века.**
- 2. Цифровые дифференциальные анализаторы – 60-е–70-е годы XX века.**
- 3. Однородные вычислительные среды – 70-е–80-е годы XX века.**
- 4. Многопроцессорные вычислительные системы с программируемой архитектурой – 80-е–90-е годы XX века.**



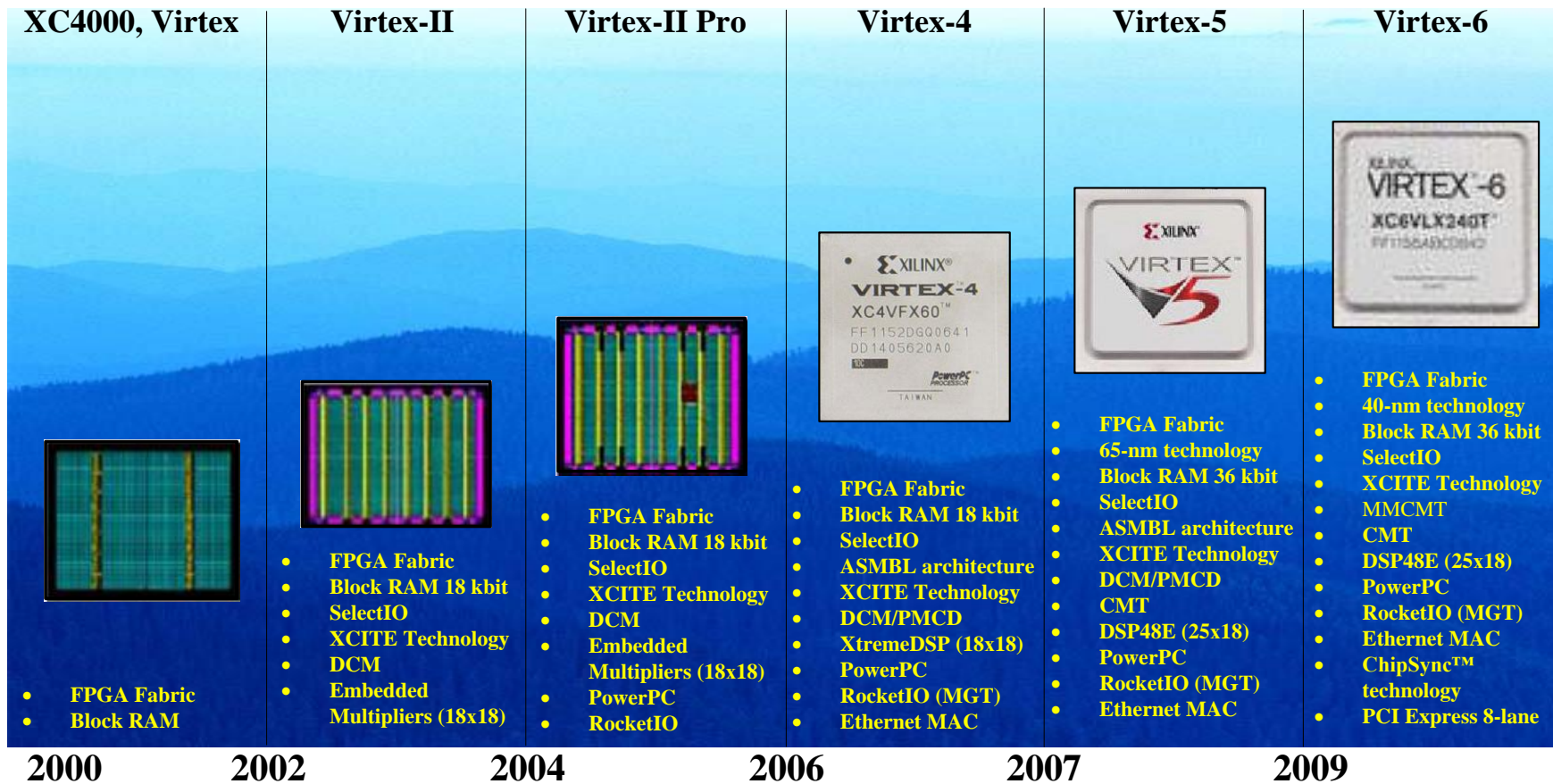
**Принципы создания
реконфигурируемых вычислительных
систем на основе полей ПЛИС**

Организация FPGA (ПЛИС)

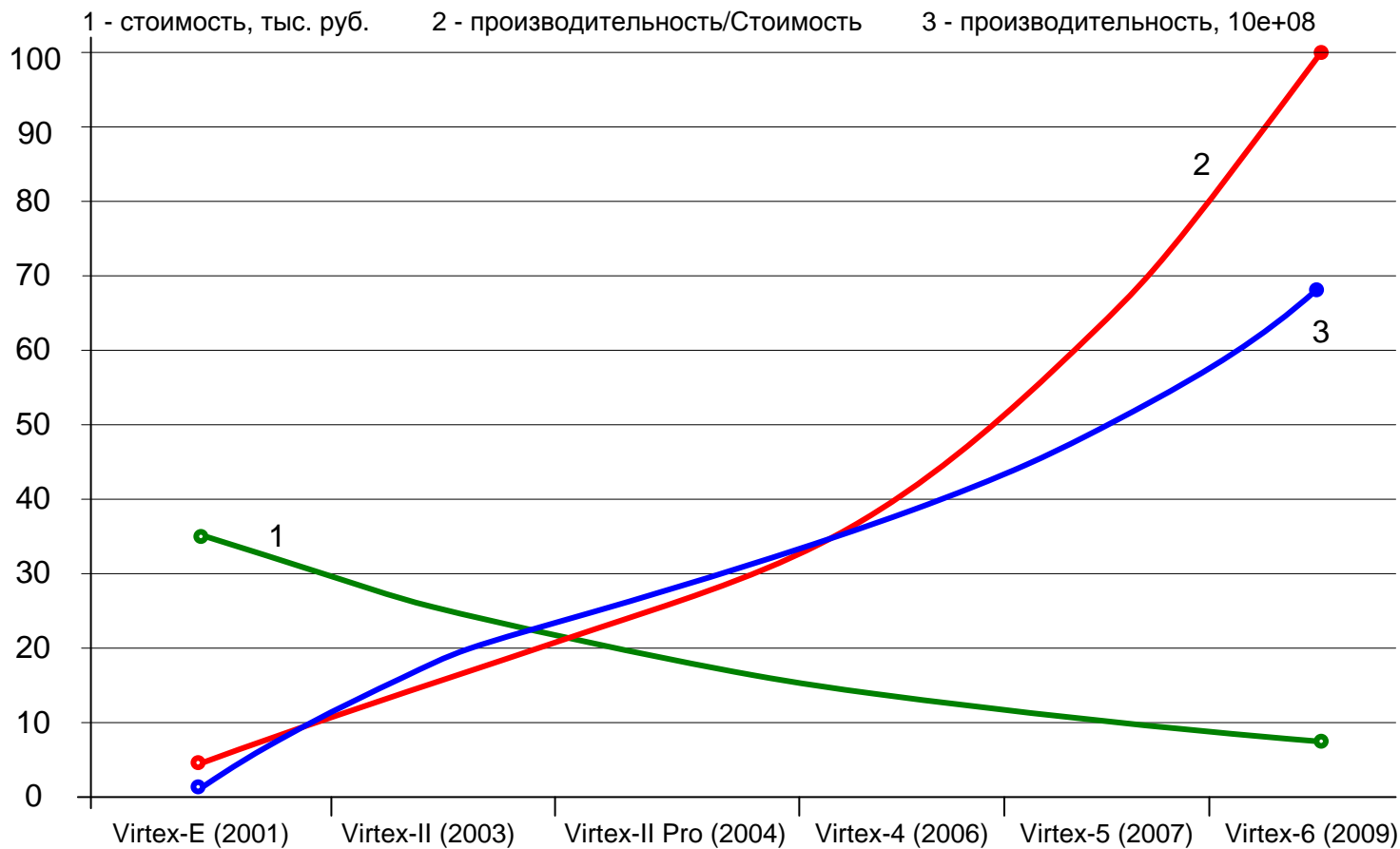


- блоки ввода/вывода IOB; - конфигурируемые логические блоки CLB;
- секции блочной памяти Block SelectRAM; - блоки аппаратных умножителей;
- цифровые модули управления синхронизацией DCM; - трассировочные ресурсы.

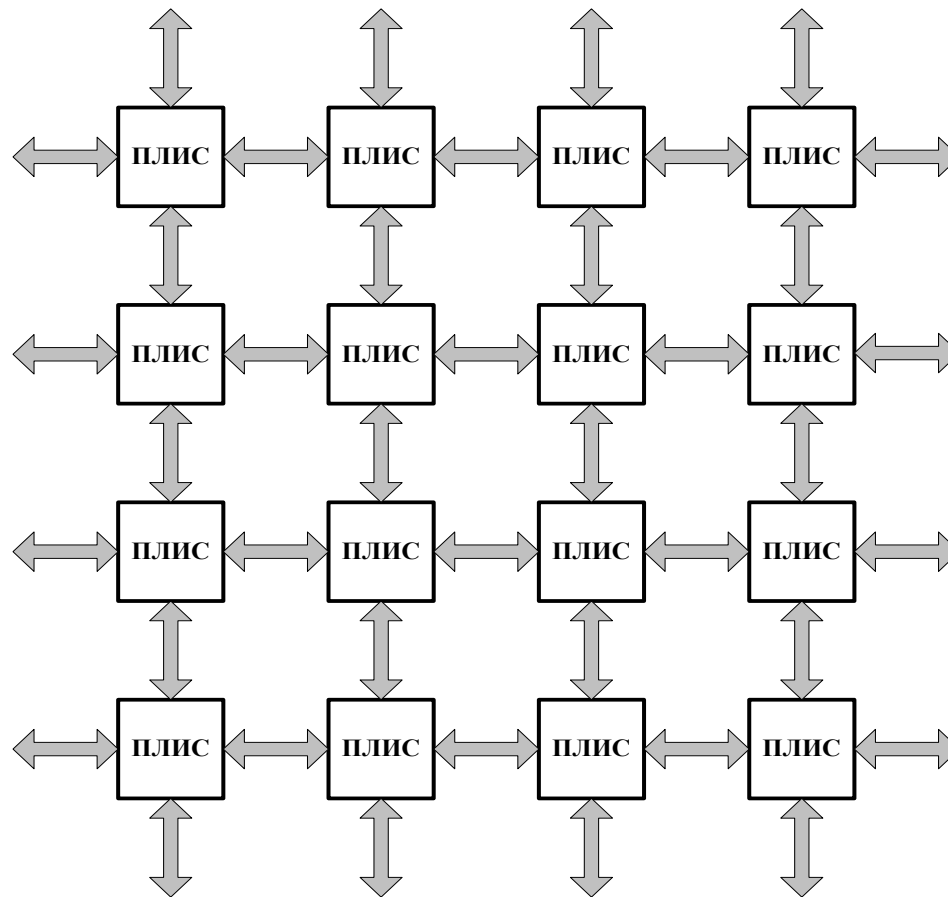
Эволюция ПЛИС



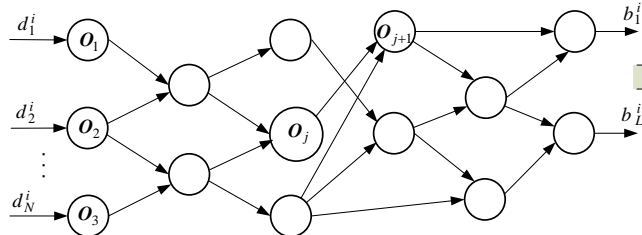
Эволюция технических характеристик ПЛИС



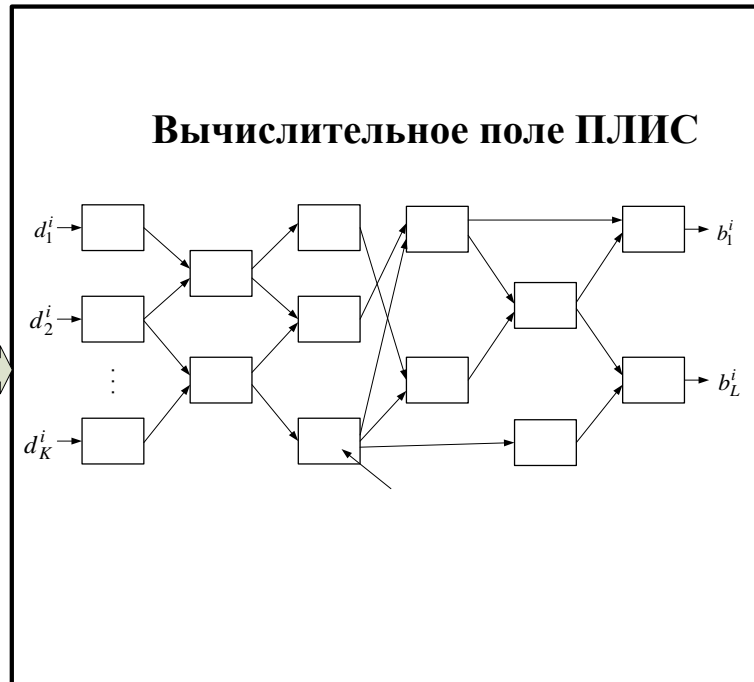
Организация реконфигурируемого вычислительного поля на основе ПЛИС



Отображение графа задачи в вычислительное поле ПЛИС



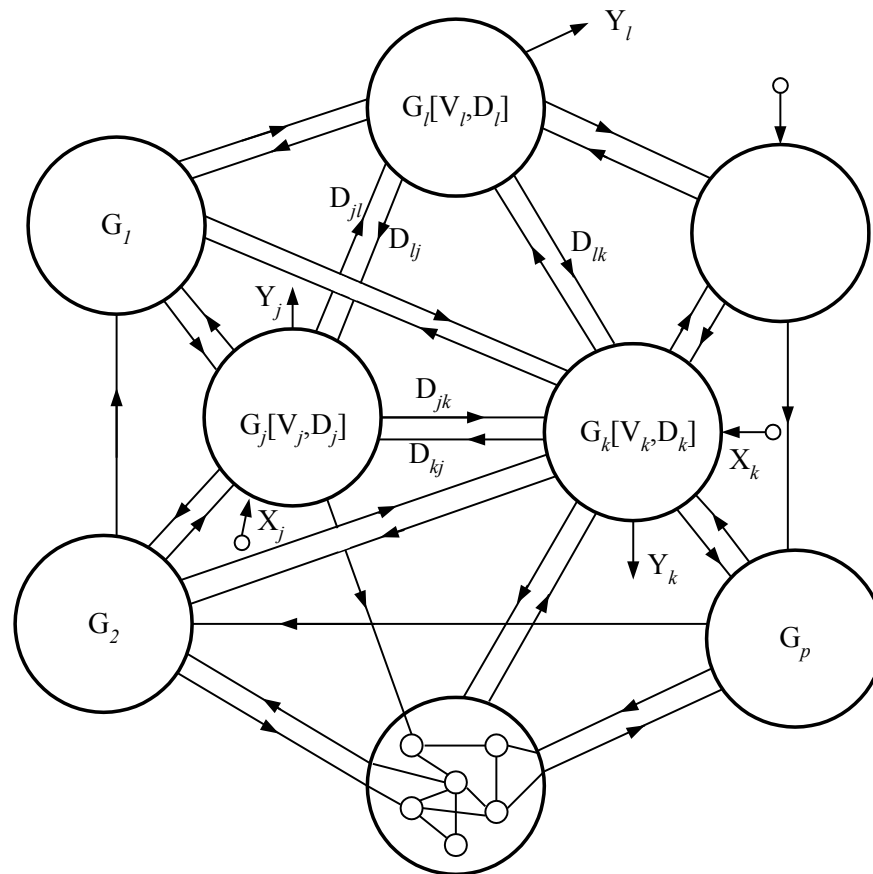
Средства
схемотех-
нического
проекти-
рования
ПЛИС



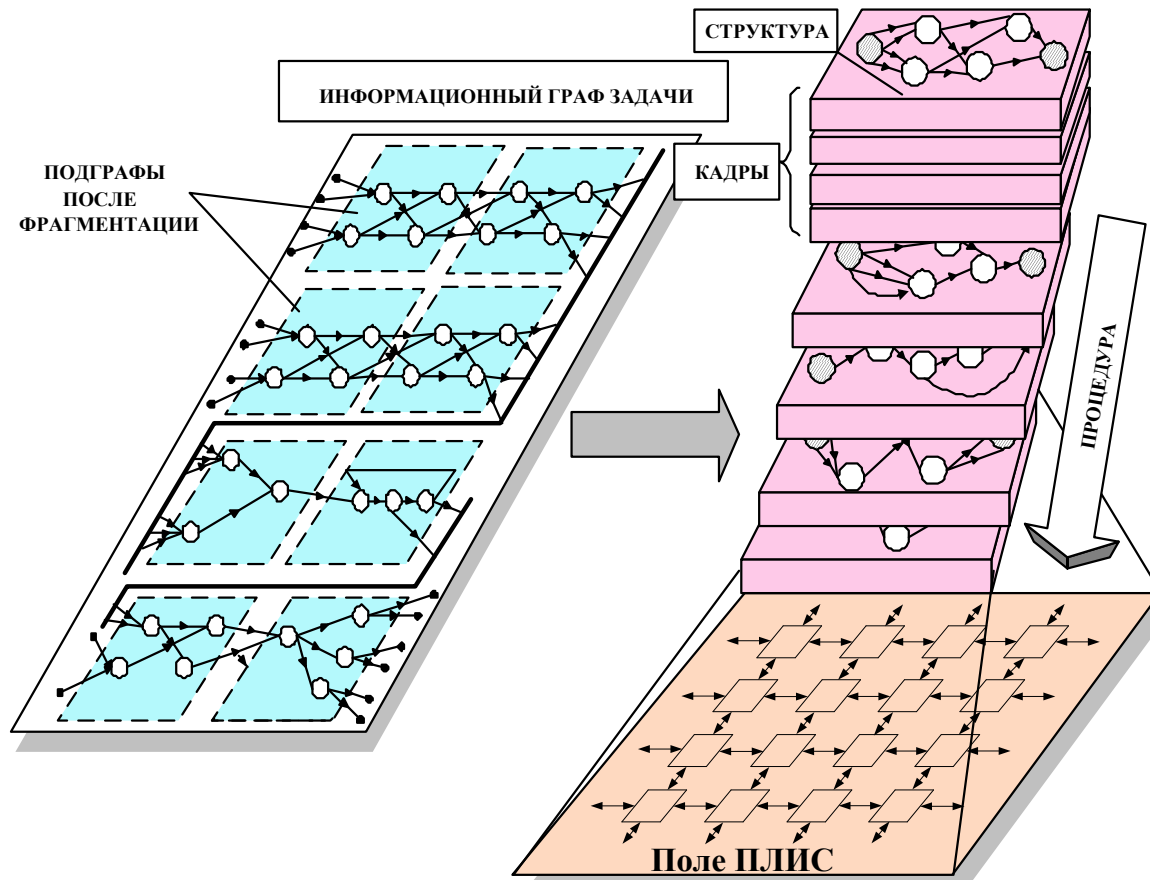
Проблема 1

**Физические ограничения поля ПЛИС
(невозможность отображения всего
информационного графа задачи в поле
ПЛИС)**

Разрезание информационного графа на подграфы



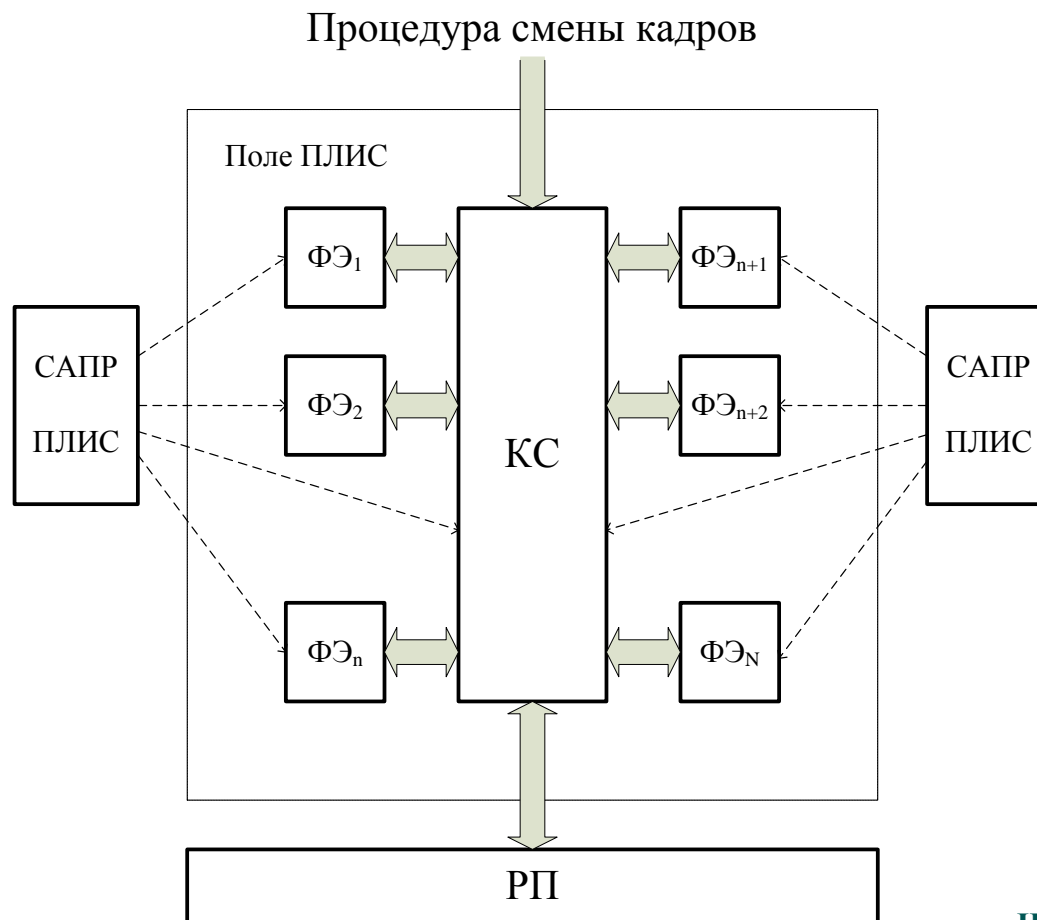
Структурно-процедурная организация вычислений в поле ПЛИС



Проблема 2

**Длительное время загрузки файла
конфигурации ПЛИС**

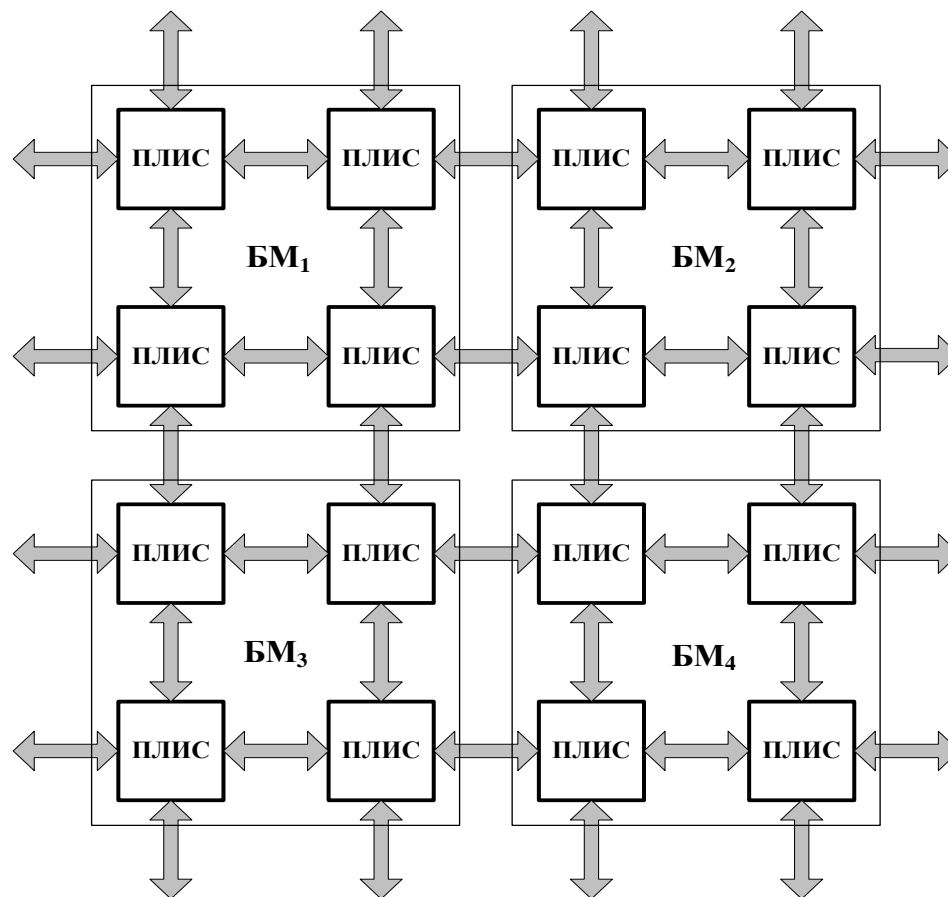
Двухуровневое программирование вычислительного поля ПЛИС



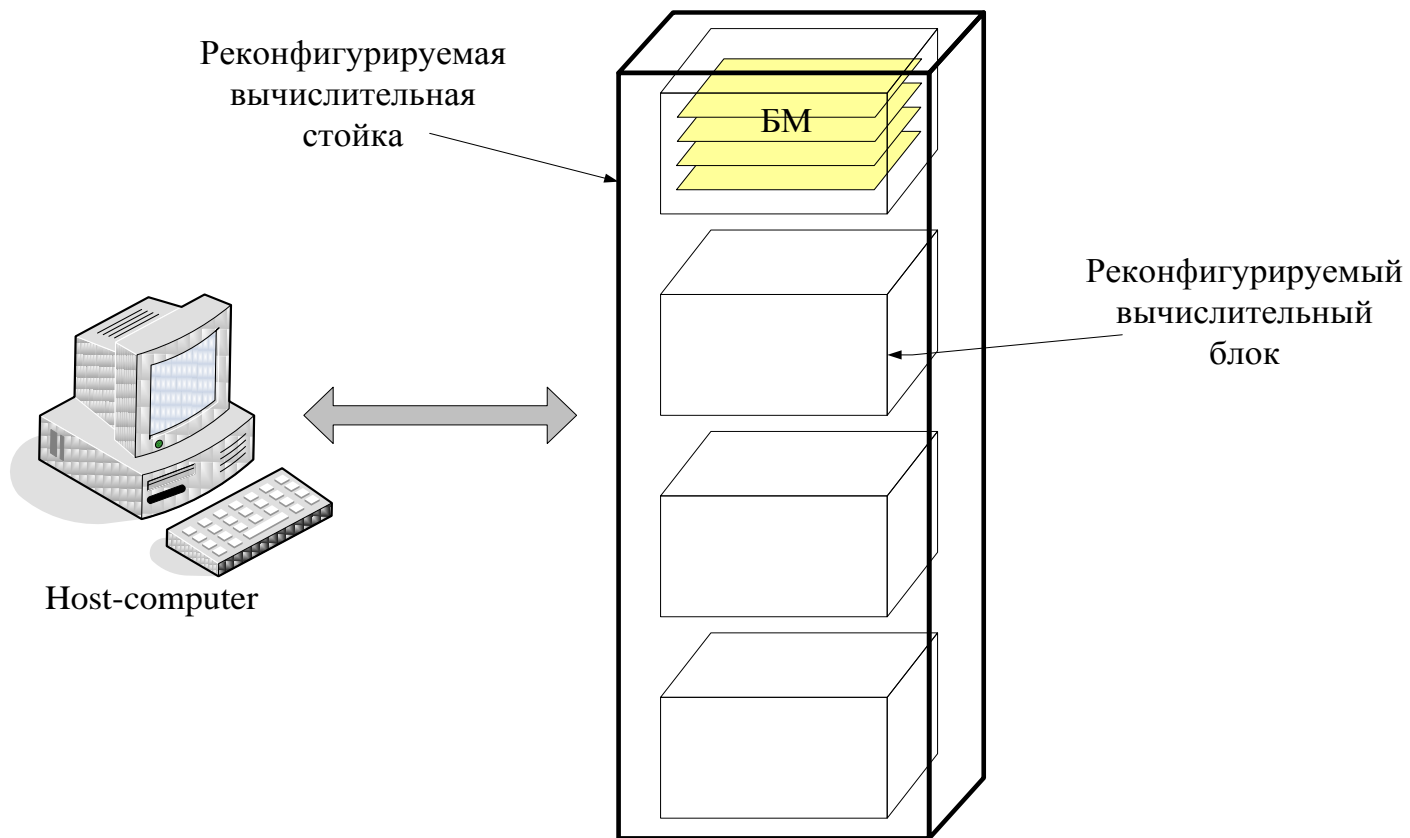
Проблема 3

**Ограничения по количеству ПЛИС,
физически располагаемой на одной
плате**

Разбиение вычислительного поля ПЛИС на базовые модули



Конструктивное исполнение реконфигурируемых МВС





Базовые модули реконфигурируемых вычислительных систем

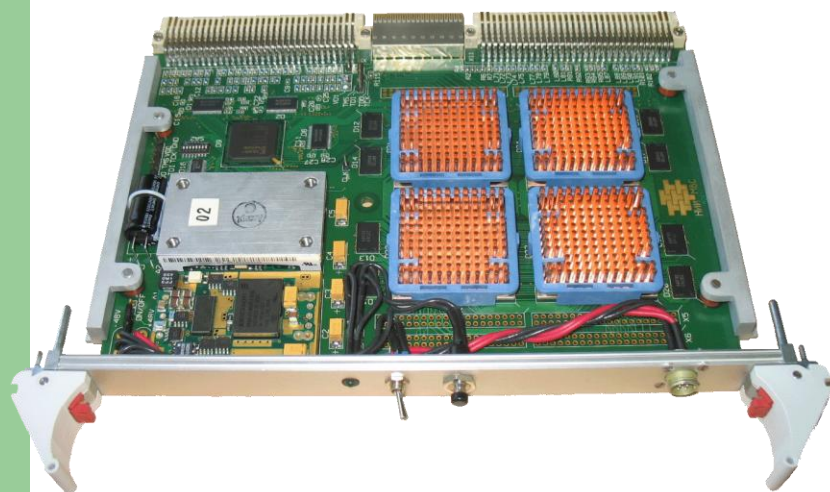
Базовый модуль РМВС-01, 2001 год



Технические характеристики БМ

Число ПЛИС Virtex E-300, шт.	33
Объем памяти, Мбайт	128
Число макропроцессоров	16
Число элементарных процессоров	64
Число каналов распределенной памяти	32
Производительность, Гфлопс	8
Частота ПЛИС, МГц	50
Частота платы, МГц	50
Объем , дм ³	330x260x21
Потребляемая мощность, Вт	85
Производительность/объем	4,44 Gflops/дм ³
Производительность/Ватт	0,094 Gflops/Вт

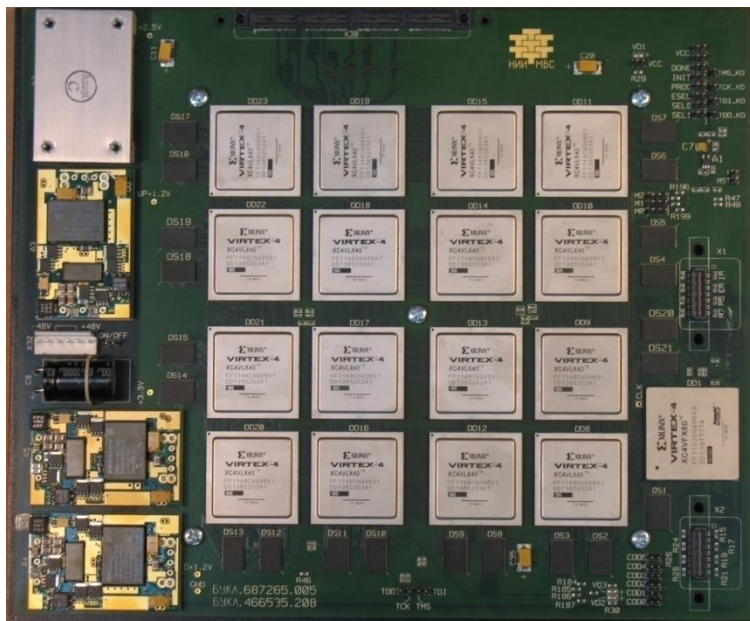
Базовый модуль РМВС «4К32», 2004 год



Характеристики базового модуля «4К32»

Число ПЛИС Virtex II Pro, шт.	4
Объем памяти, Мбайт	256
Производительность, Гфлопс	32
Рабочая частота, МГц	200
Потребляемая мощность, Вт	86
Количество каналов LVDS, шт.	100
Скорость обмена, Гбит/сек	20
Максимальный размер БПФ	132072
Число эквивалентных вентилей, млн.	40
Объем, дм ³	228,35x167,3x20,2 267,1x207x4x20,2
Производительность/объем	32,8 Gflops/дм ³
Производительность/Ватт	0,37 Gflops/Вт

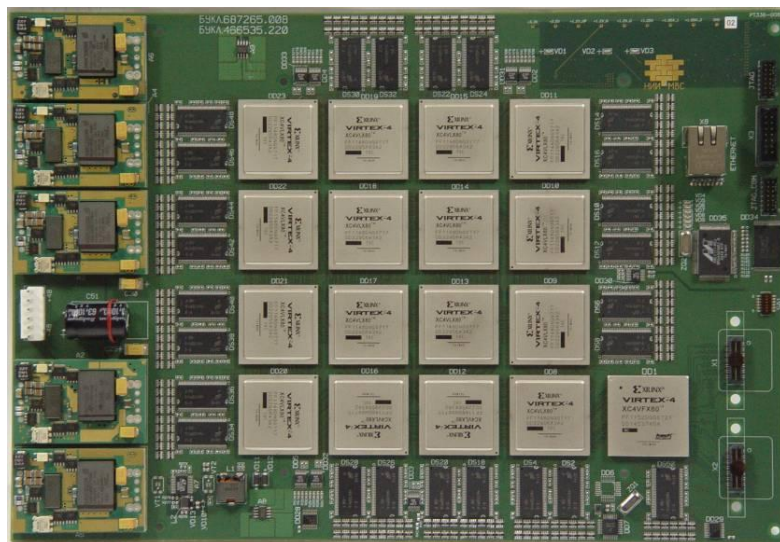
Базовый модуль РМВС «16М50-М», 2006 год



Характеристики базового модуля «16М50-М»

Число ПЛИС Virtex IV, шт.	16
Число эквивалентных вентилях в каждой ПЛИС, млн.	4
Объем памяти, Гбайт	1,3
Производительность, Гфлопс	50
Рабочая частота, МГц	160
Скоростной информационный канал	гипертранспорт
Потребляемая мощность, кВт	0,4
Габариты, мм	233,35x280x28
Общее число эквивалентных вентилях, млн.	64
Производительность/объем	18,52 Gflops/дм ³
Производительность/Ватт	0,125 Gflops/Вт

Базовый модуль РМВС «16ТР75», 2007 год



Характеристики базового модуля «16ТР75»

Число ПЛИС Virtex-4,	16
Число элементарных процессоров	256(512)
Объем памяти, Гбайт	2
Производительность, Гфлопс	64(128)
Частота ПЛИС, МГц	250
Частота платы, МГц	250
Габариты, мм	259x379x41
Общее число эквивалентных вентилей, млн.	128
Потребляемая мощность, кВт	0,5
Производительность/объем	16,0 Gflops/дм ³
Производительность/Ватт	0,128 Gflops/Вт

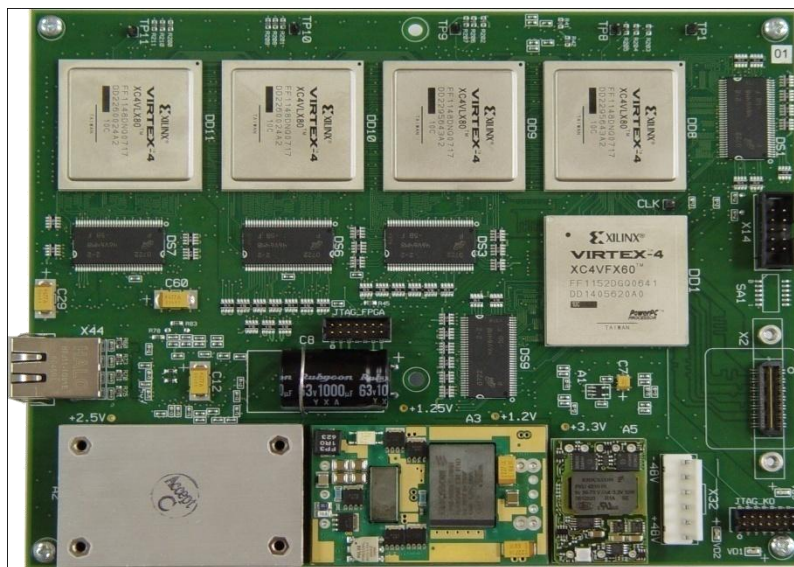
Базовый модуль РМВС «8ТО50», 2007 год



Характеристики базового модуля «8ТО50»

Число ПЛИС, шт.	8
Число элементарных процессоров, шт.	256
Объем статической памяти, Мбайт	80
Частота, МГц	160
Потребляемая мощность, кВт	0,16
Габариты ВМ, мм	74x258x245 220x233,35x41
Производительность, Гфлопс	50
Общее число эквивалентных вентиляй, млн. шт.	64
Производительность/объем	23,8 Gflops/дм ³
Производительность/Ватт	0,31 Gflops/Вт

Базовый модуль РМВС «4V4-25», 2008 год

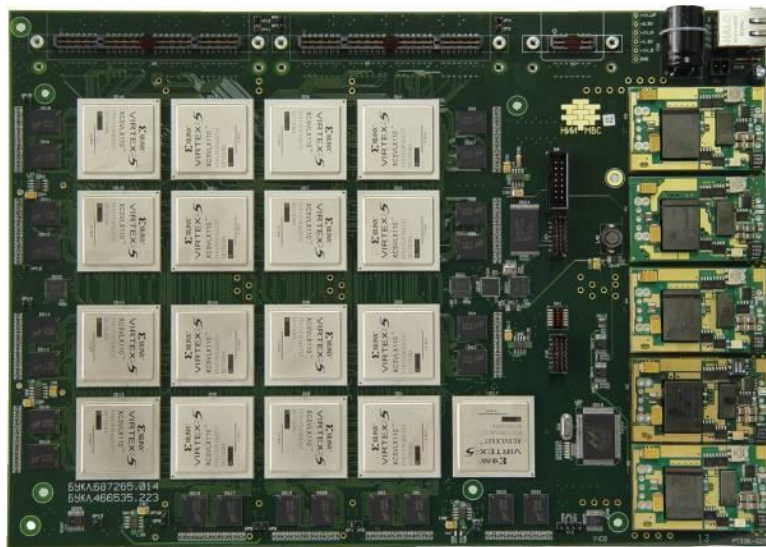


Характеристики базового модуля «4V4-25»

Количество ПЛИС Virtex 4, шт.	4
Объем динамической памяти, Мбайт	576
Производительность, Гфлопс	25
Частота платы модуля, МГц	160
Скорость обмена данными по каналу Ethernet, Гбит/с	1
Потребляемая мощность, Вт	145
Размеры базового модуля, мм	150×190×38,6
Общее число эквивалентных вентиляей, млн. шт.	32
Производительность/объем	21,37 Gflops/дм ³
Производительность/Ватт	0,172 Gflops/Вт

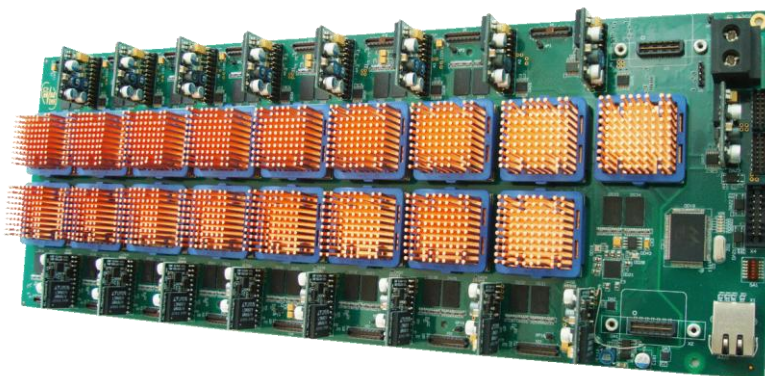
Базовый модуль «16V5-75», 2008 год

Характеристики базового модуля «16V5-75»



ПЛИС Virtex-5, 11 млн. вентилей, шт.	16
Число элементарных процессоров (IEEE-754), шт.	256
Тактовая частота, МГц	330
Обработка 64-разрядных данных с плавающей запятой	
Производительность, ГФлопс (двойная точность)	85
Частота обмена между ПЛИС до 1,2 ГГц (LVDS)	
Потребляемый ток до 200 А	
Печатная плата 20 слоев	
Класс точности 5+	
Внешние интерфейсы LVDS. Gigabit Ethernet	
Потребляемая мощность	190 Вт
Габариты, мм	233x320x41
Производительность/объем	27,4 Gflops/дм ³
Производительность/мощность	0,425 Gflops/Вт

Базовый модуль «16V5-1250P», 2009 год



Характеристики базового модуля «16V5-1250P»

Число ПЛИС Virtex V,	
11 млн. вентилей, шт.	16
Число элементарных	
Процессоров, шт.	512
Производительность, Гфлопс	200(100)
Частота платы, МГц	330
Частота информационных	
обменов, МГц	1200
Габариты, мм	106x500
Максимальная потребляемая	
мощность, Вт	200



**Реконфигурируемые вычислительные
системы на основе полей ПЛИС**

Вычислительная система РВС-01, 2003 год



Характеристики вычислительной системы с реконфигурируемой архитектурой

Количество базовых модулей	8
Количество макропроцессоров	128
Количество элементарных процессоров	512
Количество каналов распределенной памяти	256
Производительность, оп./с	$2 \cdot 10^{11}$
Тактовая частота, МГц	50
Потребляемая мощность, Вт	240
Габариты, мм	480x430x170 (35 дм ³)
Производительность/объем	5,71 Gmips/дм ³
Производительность/Ватт	0,83 Gmips/Вт

РВС «Рысь-ЯТ», 2006 год

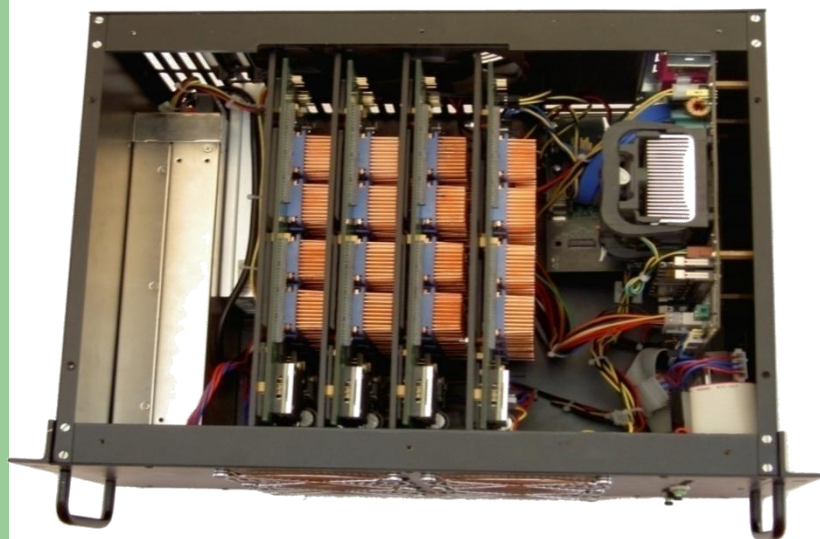
Характеристики РВС «Рысь-ЯТ»



Число макропроцессоров, шт.	32
Число элементарных процессоров, шт.	512
Число каналов распределенной памяти, шт.	512
Объем памяти, Гбайт,	1
Производительность, оп\с	5·10 ¹¹
Частота ПЛИС, МГц	100
Частота платы, МГц	100
Потребляемая мощность, кВт	0,44
Габариты,	484x666x266
Производительность/объем	5,83 Gmips/дм ³
Производительность/Ватт	1,136 Gmips/Вт

РВС «МЕДВЕДЬ», 2006 год

Технические характеристики РВС «МЕДВЕДЬ»



Количество унифицированных базовых модулей	4
Число ПЛИС Virtex-4, шт.	64
Объем памяти, Гбайт	4
Производительность пиковая, ГФлопс	200
Потребляемая мощность, кВт	0,9
Объем, м.куб.	0,39
Общее число эквивалентных вентилях, млн.	256
Габариты, мм	482,6x412,56x266
Производительность/объем	5,13 Gflops/дм ³
Производительность/Ватт	0,22 Gflops/Вт

РВС «ТРИАДА», 2007 год



Технические характеристики РВС «ТРИАДА»

Производительность, Гфлопс	64(128)
Потребляемая мощность, кВт	0,6
Габариты, мм	482x408x266
Объем, л	53
Производительность/объем	1,23 Gflops/дм ³
Производительность/Ватт	0,106 Gflops/Вт

РВС «ТОР», 2007 год



Технические характеристики блока РВС на основе 4-х БМ 8Т050

Количество базовых модулей	4
Общее число ПЛИС, шт.	32
Производительность, оп/с, не менее	$4 \cdot 10^{12}$
Объем статической памяти, Мбайт	320
Тактовая частота, МГц	160
Потребляемая мощность, кВт	0,9
Габариты, мм	482x266x675
Общее число эквивалентных вентилей, млн.	256
Производительность/объем	75,47 Gmips/дм ³
Производительность/Ватт	4,44 Gmips/Вт

Реконфигурируемый ускоритель «МАНГУСТ», 2007 год

Характеристики реконфигурируемого вычислителя «МАНГУСТ»



Число ПЛИС Virtex-4,	
8 млн. вентилях, шт.	4
Объем памяти, Гбайт	0,5
Производительность, Гфлопс	25
Частота ПЛИС, МГц	200
Габариты, мм	330x263x55
Пропускная способность Интерфейса Ethernet, Гбит/сек	1
Общее число эквивалентных вентилей, млн.	32
Производительность/объем	6,25 Gflops/дм ³
Производительность/Ватт	0,172 Gflops/Вт

Реконфигурируемый ускоритель «СВЕРТОК», 2007 год



Характеристики реконфигурируемого ускорителя «СВЕРТОК»

Количество ПЛИС Virtex-4, шт.	4	Потребляемая мощность, кВт	0,145
Объем статической памяти, Мбайт	144	Габариты, мм	300×263x55
Производительность, оп/с	5*10 ¹¹	Общее число эквивалентных вентиляей, млн.	32
Тактовая частота, МГц	160	Производительность/объем	125 Gmips/дм ³
Скорость обмена данными по каналу Ethernet, Гбит/с	1	Производительность/Ватт	3,45 Gmips/Вт

Реконфигурируемая вычислительная система РВС-1, 2008 год



Технические характеристики РВС-1

Количество базовых модулей	24
Общее число ПЛИС, шт.	384
Производительность, оп/с, не менее	$2,4 \cdot 10^{13}$
Объем статической памяти, Мбайт	1920
Тактовая частота, МГц	160
Потребляемая мощность, кВт	5,4
Габариты, мм	610x2300x1000
Общее число эквивалентных вентилей, млн.	1536
Производительность/объем	17,14 Gmips/дм ³
Производительность/Ватт	4,44 Gmips/Вт

Реконфигурируемая вычислительная система PBC-1P, 2009 год

Характеристики PBC-1P

- 4 вычислительных блока PBC-0,2ВБ;
- 16 базовых модулей 16V5-75;
- 4096 элементарных процессоров (IEEE-754);
- тактовая частота 330 МГц;
- обработка 64-разрядных данных IEEE-754;
- производительность более 1200 Гфлопс.

Вычислительный блок PBC-0.2-ВБ

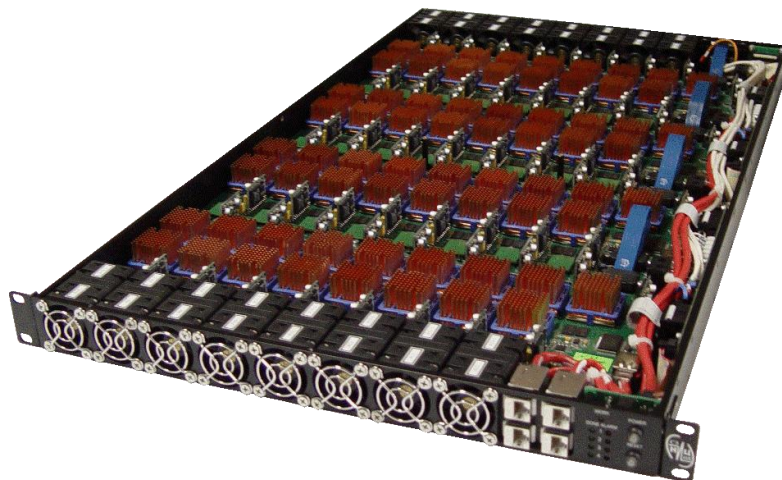
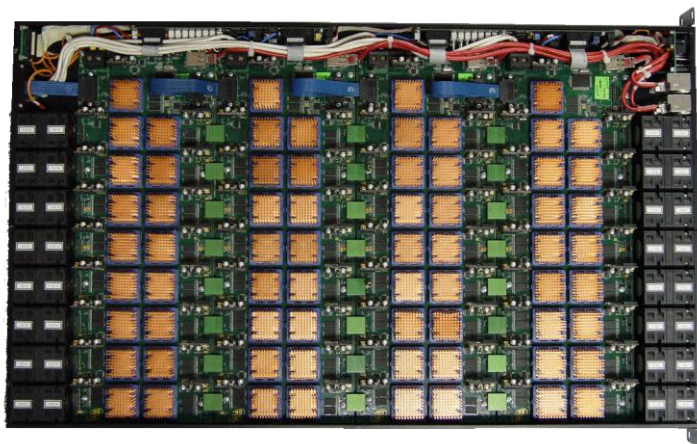


Реконфигурируемая вычислительная система РВС-5 в машинном зале НИВЦ МГУ, 2010 год

Количество ПЛИС Virtex-5 (11 млн. вентиляй), шт.	1360
Число базовых модулей, шт.	80
Общее число процессоров с плавающей запятой, шт.	25600
Производительность, Tflops	6
Общее число эквивалентных вентиляй (млн.), шт.	14960



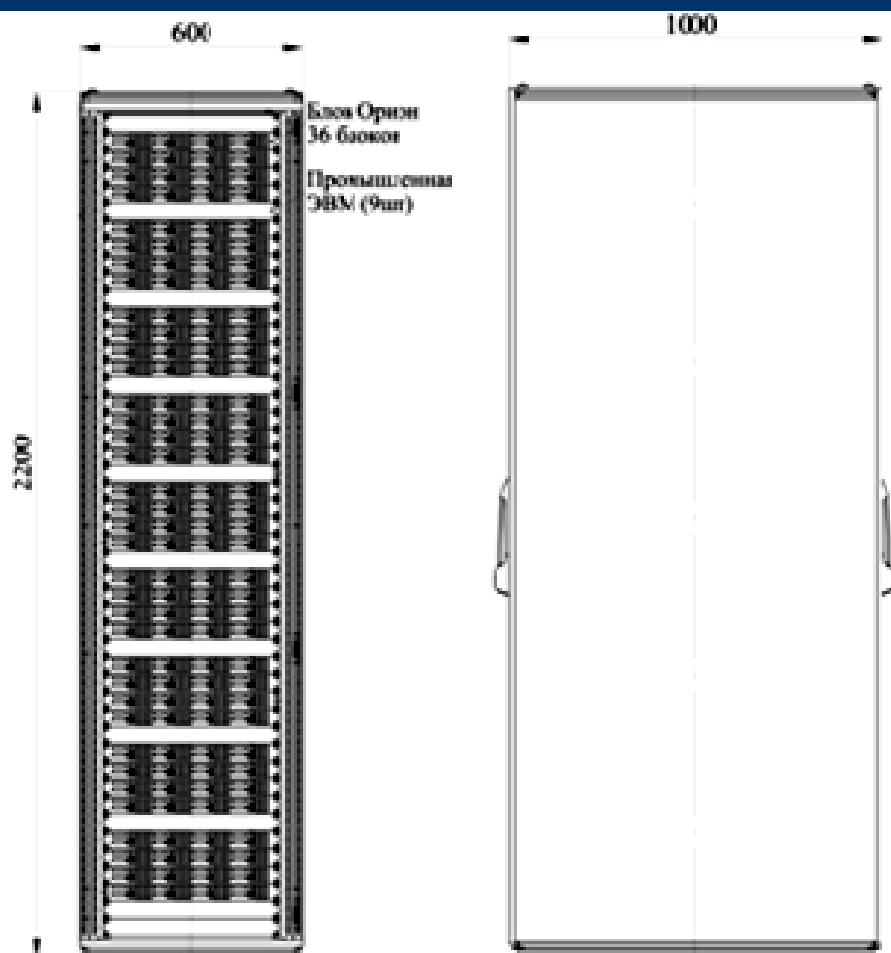
Вычислительный блок «Орион» 1U, 2010 год



Характеристики блока «Орион» 1U


Число базовых модулей	4
Количество ПЛИС Virtex-5, шт.	64
Число элементарных процессоров, шт.	2048
Производительность, Гфлопс	800
Частота платы, МГц	330
Частота информационных обменов, МГц	1200
Габариты	1U
Максимальная потребляемая Мощность, Вт	800
Общее число эквивалентных вентиляей, млн. шт.	704

Вычислительная стойка «Плеяда», 2012-2013 гг.



Технические характеристики

Число блоков 1U	24
Количество ПЛИС Virtex-7, шт.	768
Число элементарных процессоров	69120
Производительность, оп/с	10^{15}
Производительность, Тфлопс	74,4
Частота платы, МГц	400
Частота информационных обменов, МГц	1200
Максимальная потребляемая мощность, кВт	36
Общее число эквивалентных вентиляей, млн. шт.	36864



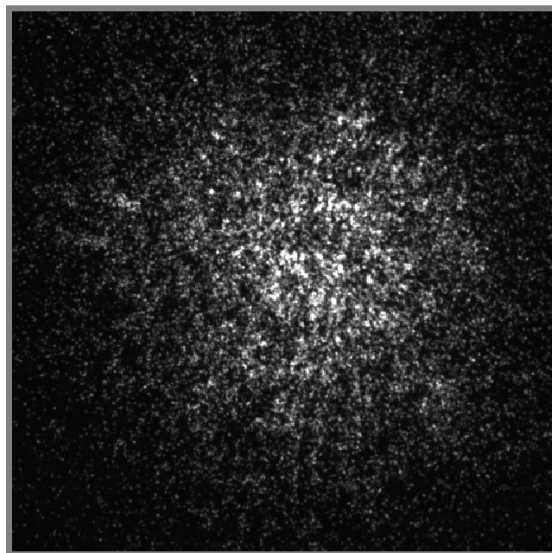
**Примеры применения реконфигурируемых
вычислительных систем для решения
поточковых задач**

Корректировка атмосферных искажений оптических изображений телескопа БТА

$$\langle \tilde{S}^{(2)}(\vec{\nu}) \rangle = \tilde{T}_0^{(2)}(\vec{\nu}) e^{-6.88(\lambda \nu F / r_0)^{\frac{5}{3}} \left[1 - (\lambda \nu F / D)^{\frac{1}{3}} \right]} + 0.435(r_0 / D)^2 \tilde{T}_0(\vec{\nu}).$$

Спекл-интерферограмма
звезды

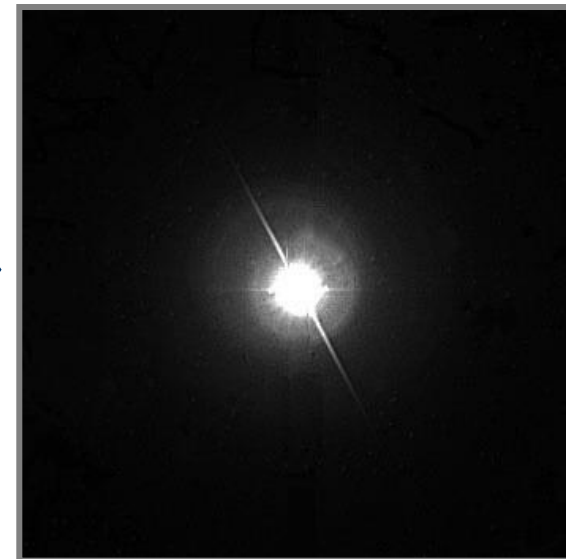
Восстановленное
изображение звезды



РУПК-50 «ФЕКДА»



Ускорение по сравнению с
ПК — 142 раза



Диагностика дорожных покрытий и аэродромных взлетно-посадочных полос

Георадар



Передвижной комплекс
радарного зондирования

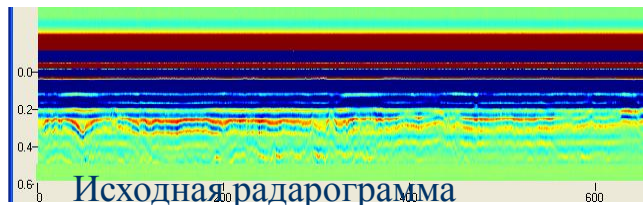
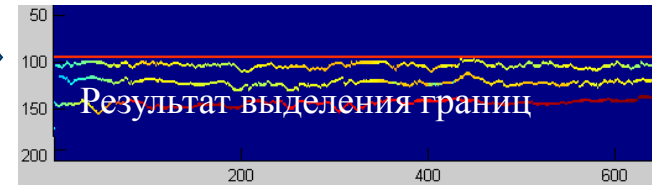


Диагностика дорожных покрытий и аэродромных взлетно-посадочных полос

$$\zeta_{k+1} = \zeta_k - \mu \sum \left(\omega_1^2 u_p^t \left\langle \mathfrak{I}^{-1} (\mathfrak{I}(A^{t*} \oplus B^{t*}) (\mathfrak{I}(-\psi_k^t \oplus U^t) + \omega_1^2 \mathfrak{I}(A^t \oplus B^t) \mathfrak{I} \chi_k^t) \right|_R \right)$$

$$w_{k+1}^t = w_k^t - \mu \left(\psi_k^t - \omega_1^2 \left\langle \mathfrak{I}^{-1} (\mathfrak{I}(A^t \oplus B^t) \mathfrak{I} \chi_k^t) \right|_R \right) -$$

$$- \mu \left(\omega_1^2 \xi_p^t \left\langle \mathfrak{I}^{-1} (\mathfrak{I}(A^{t*} \oplus B^{t*}) (\mathfrak{I}(-\psi_k^t \oplus U^t) + \omega_1^2 \mathfrak{I}(A^t \oplus B^t) \mathfrak{I} \chi_k^t) \right|_R \right)$$

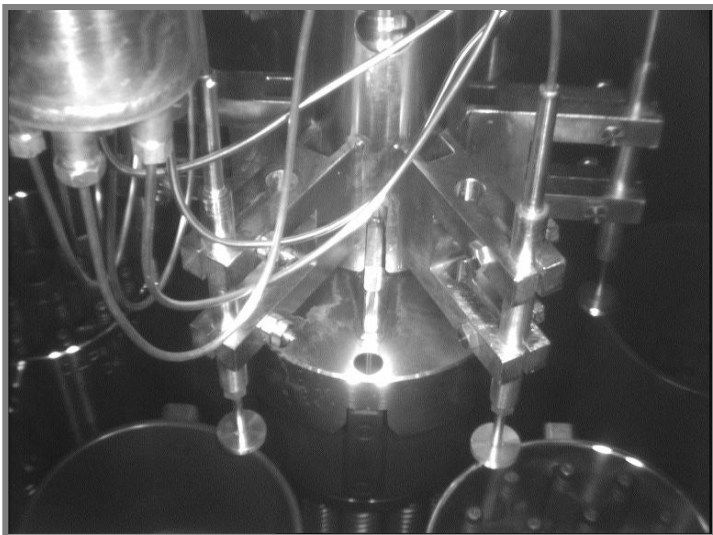


Количество трасс радарограммы	Время решения на ПК, сек	Время решения на БМ «Алькор-2», сек	Ускорение по сравнению с ПК
1000	2.0723	0.0122	169.86
8000	16.5541	0.0898	184.34
24000	49.498	0.2673	185.17

Характеристики ПК: Intel Pentium IV, 3.2 ГГц, 2.99 ГБ ОЗУ

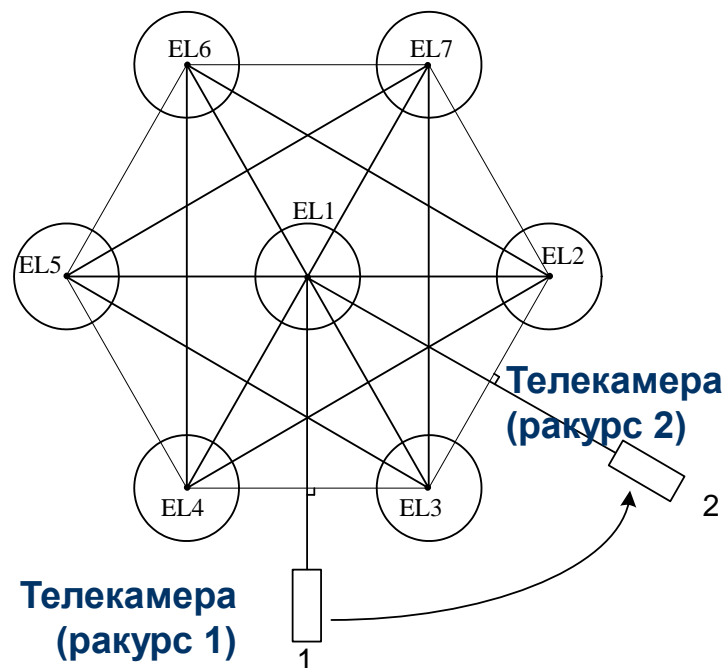
Контроль уровня установки ТВС в реакторе АЭС

Существующий (контактный) метод контроля уровня установки ТВС



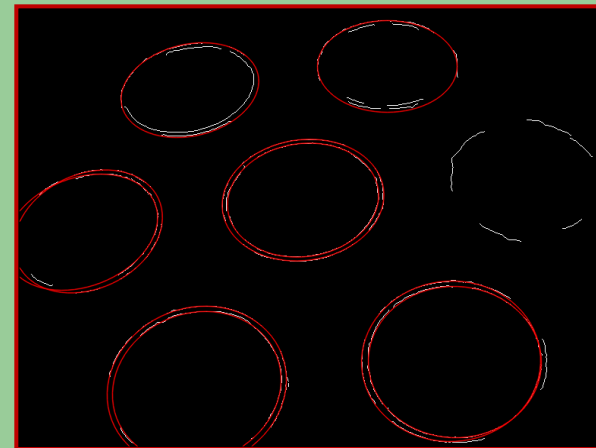
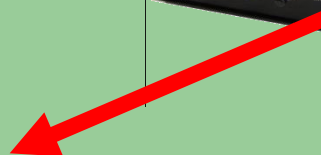
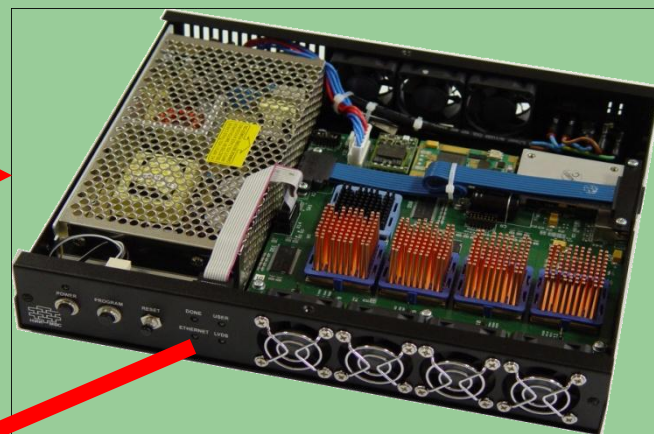
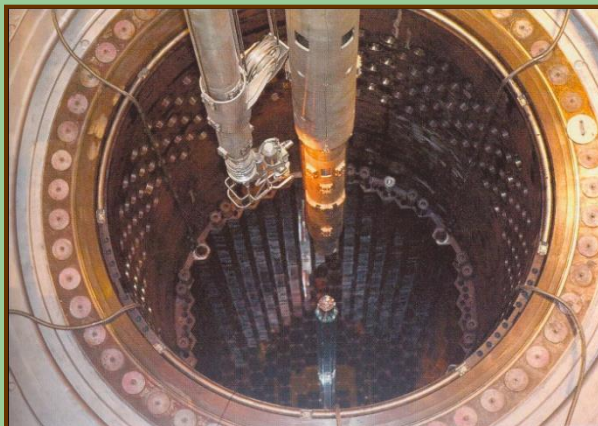
Недостаток - наличие механического контакта оборудования с ТВС. При этом возможно механическое повреждение ТВС. Затрачивается дополнительное время на работы в активной зоне реактора.

Бесконтактный метод контроля уровня установки ТВС



EL1-EL7 – центры верхних поверхностей головок ТВС

Контроль уровня установки ТВС в реакторе АЭС



Точность нахождения разности высот головок ТВС $\pm 2,3$ мм.

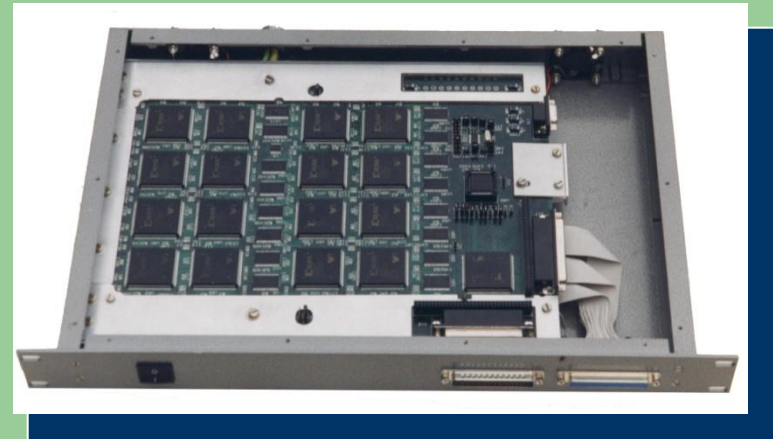
Время нахождения разности высот головок ТВС (для 163 шт.) не более 30 мин.

Телевизионный автомат сопровождения целей (ТАСЦ) на основе МВС с реконфигурируемой архитектурой в системе дистанционного управления объектом БТВТ

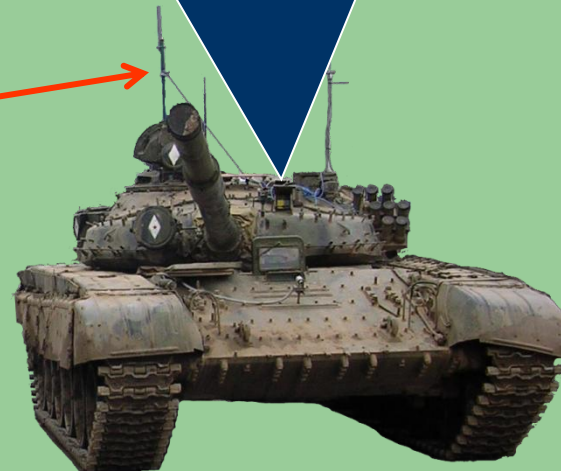
АРМ оператора-наводчика



ТАСЦ



Пункт дистанционного управления



Реконфигурируемый блок обработки тепловизионных сигналов



Сравнение производительности РМВС и кластерных МВС при решении типовых задач криптологии

**КЛАСТЕР НИЦЭВТ
СВК ЕС-1710.03**



Состав – 36 вычислительных узлов (72 процессора) + управляющая машина
Пиковая производительность, Гфлопс

403,2

**РМВС НА ОСНОВЕ
4-Х БМ 8Т050**



4 базовых модуля 8Т050
Тактовая частота, МГц 160
Производительность, оп/с $2,8 \cdot 10^{13}$
Ускорение при решении задачи криптологии составляет 12 300

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА РВС-1Р

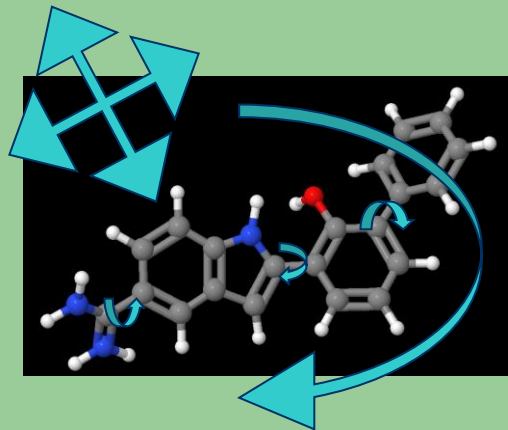


4 вычислительных блока РВС-0.2-ВБ;
16 базовых модулей 16V5-75;
Тактовая частота 200 МГц;
Производительность, оп/с $4,6 \cdot 10^{14}$
Ускорение при решении задачи криптологии составляет 202 000

Молекулярное моделирование лекарственных препаратов

Существующий подход

Массовый экспериментальный перебор
методом комбинаторного синтеза
на существующих системах
Время - 5 лет

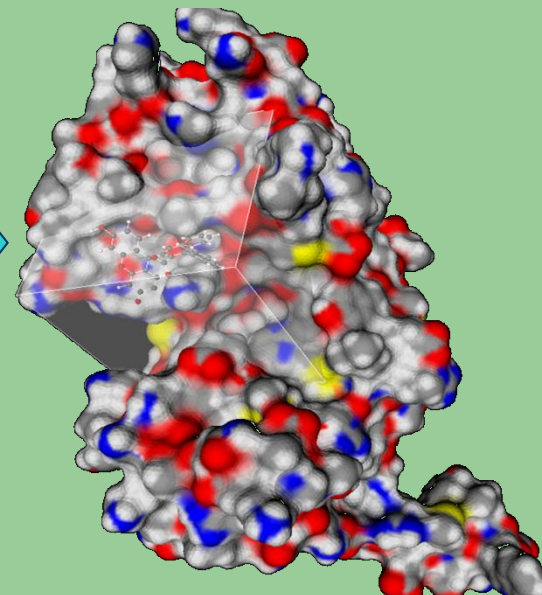


Докинг ингибиторов на РВС
осуществляется в 30-50 раз
быстрее по сравнению с
кластерной МВС



Альтернативное решение

Компьютерное молекулярное
моделирование
на суперкомпьютерах
Время – 1,5-2 года

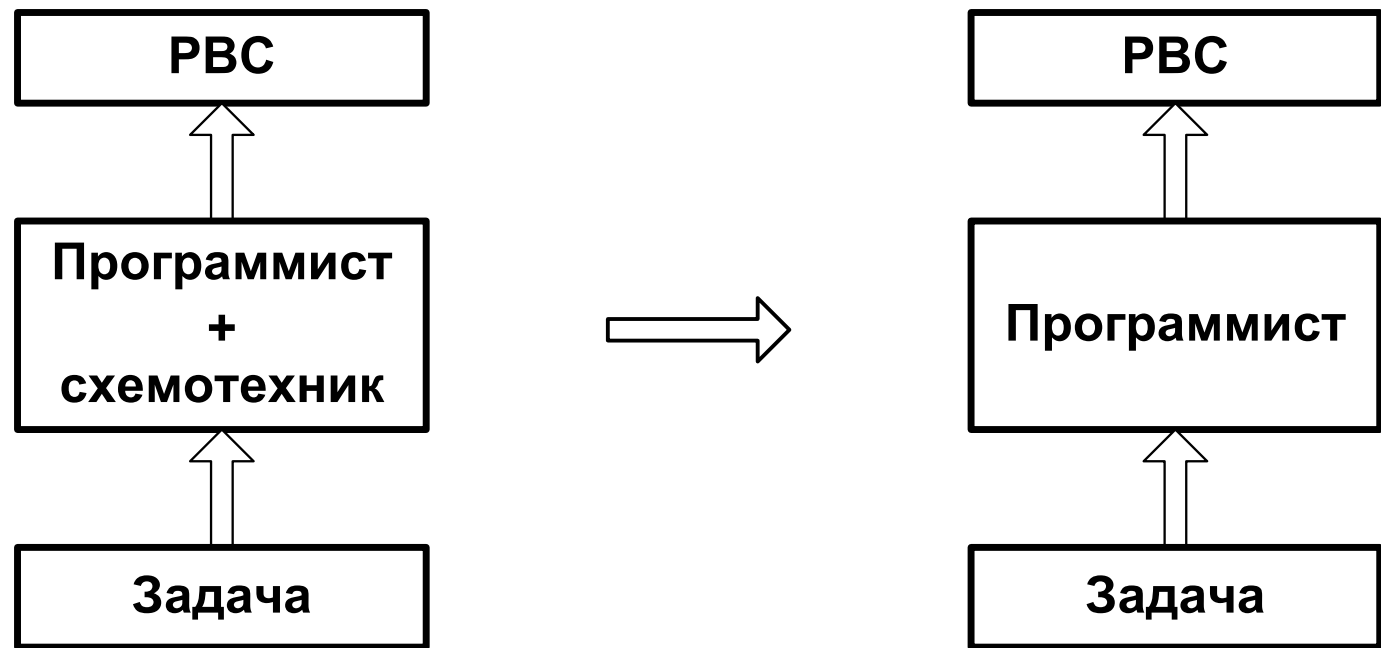


Использование РВС сокращает
время моделирования до
нескольких часов

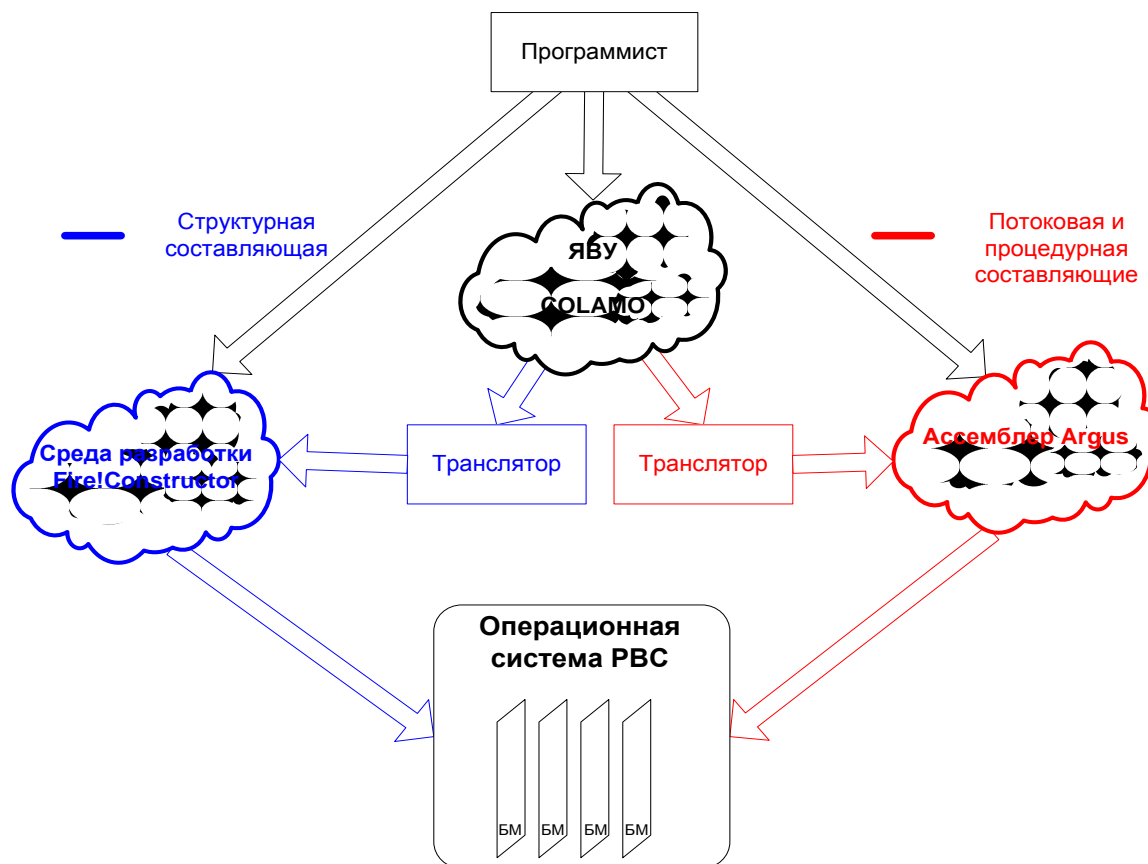


Программное обеспечение реконфигурируемых вычислительных систем

Создание прикладных программ для РВС

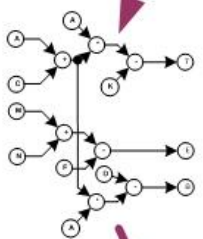
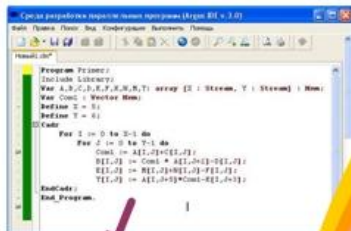


Создание прикладных программ для РВС



Создание структурной составляющей прикладной программы

Программа на COLAMO



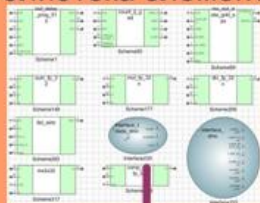
Описание архитектуры (паспорт PBC)

MentorGraphics

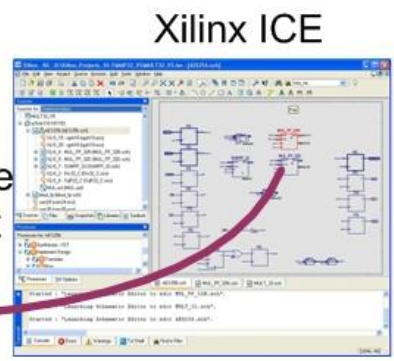


Fire!Constructor

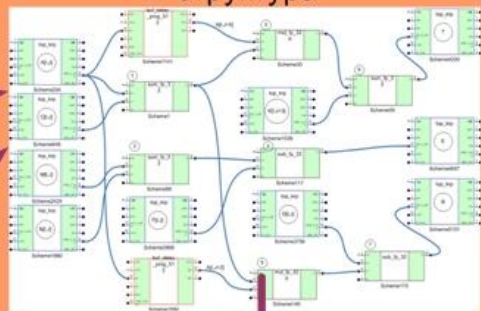
Библиотека элементов



VHDL описание библиотечных элементов



Сформированная вычислительная структура



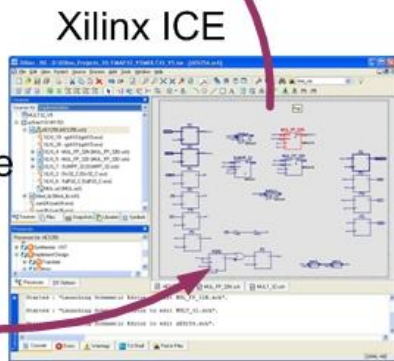
Результат работы Fire!Constructor

Загрузочные файлы для каждой ПЛИС

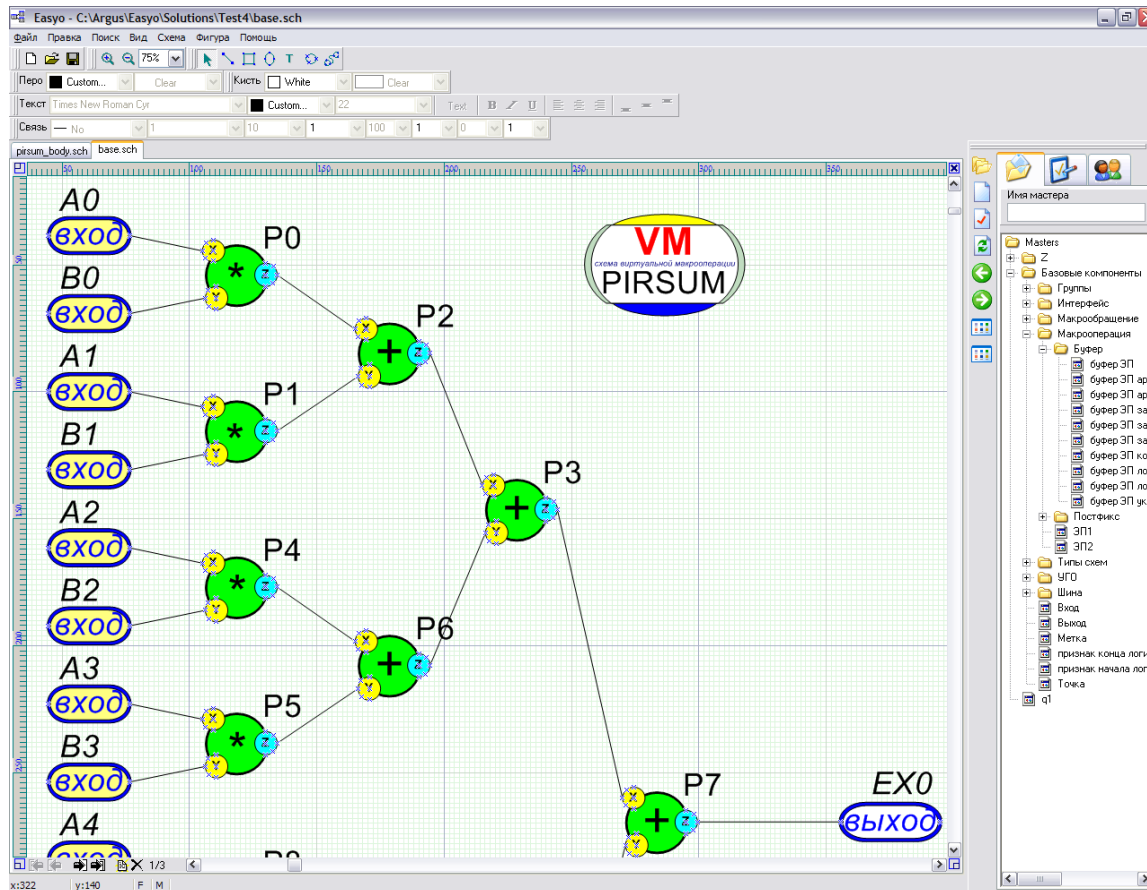
Распределение вычислительной структуры задачи на архитектуру PBC



VHDL описание для каждой ПЛИС



Интегрированная Среда разработки компонентов параллельных программ EASYO в виде граф-схем



Заключение

Реконфигурируемые вычислительные системы на основе полей ПЛИС являются перспективной аппаратной базой для решения вычислительно сложных потоковых задач обработки информации, принятия решения и управления в условиях ограниченного объема и энергопотребления.



БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ !