

## Книга

**Шпаковский Г.И., Серикова Н.В.**

Программирование для многопроцессорных систем в стандарте MPI: Пособие / Мн.: БГУ, 2002. –323 с. ISBN 985-445-727-3

вышла в издательстве Белгосуниверситета (Минск) в сентябре 2002.

Настоящее пособие предназначено для практического обучения параллельному программированию в стандарте MPI (The Message Passing Interface). В пособии содержатся: общие сведения по параллельным системам и их программированию; полные справочные данные по библиотеке функций MPI; примеры программирования приложений (матричные задачи, решение ДУЧП, СЛАУ, криптоанализ); сведения по организации вычислений в различных исполнительных средах. Имеется большой объем приложений, включающий справочные материалы и примеры MPI программ.

Издание предназначено студентам естественнонаучных направлений, специалистам и научным работникам, заинтересованным в решении прикладных задач с большим объемом вычислений.

При создании пособия использовались следующие источники информации:

- Материалы сайта Аргоннской национальной лаборатории [1], где размещены: различные версии стандартов MPI-1 и MPI-2, доку



ментация и дистрибутивы для различных версий МРІСН, параллельные библиотеки и много других материалов справочного и учебного характера.

- Материалы сайта Научно-исследовательского вычислительного центра МГУ [3].
- Книги и руководства, авторами которых являются основные разработчики библиотеки интерфейса МРІ и его реализаций [4,5,6,7,8].
- Переводы, выполненные в 2001 году, в рамках программы Союзного государства СКИФ по разработке кластерных систем [9,10,11].

Предполагается, что на начальном уровне обучение будет проводиться на сетях персональных ЭВМ под управлением операционной системы Windows NT с использованием языка С, поэтому в приложении рассмотрены вопросы создания и настройки локальной сети на базе Windows NT (настройка сети, МРІСН, среды языка С) для написания приложений.

Настоящее пособие увидело свет благодаря помощи многих людей. Постоянную поддержку в издании пособия оказывали А. Н. Курбацкий и С. Г. Мулярчик, много советов по содержанию книги дал М. К. Буза. Практическая проверка некоторых примеров выполнена студентами А. Е. Верхотуровым, А. Н. Гришановичем и А. В. Орловым. Глава 10 написана с участием Г. Ф. Астапенко. В обсуждении работы принимали участие А. С. Липницкий, В. Ф. Ранчинский, Г. К. Афанасьев и многие другие сотрудники кафедры информатики.

Авторы будут признательны всем, кто поделится своими соображениями по совершенствованию данного пособия. Русскоязычная терминология по МРІ еще не устоялась, поэтому некоторые термины, использованные в пособии, могут оказаться не совсем удачными. Возможные предложения и замечания по этим и другим вопросам просим присылать по адресу:

*Республика Беларусь  
220050, Минск, проспект Франциска Скорины, 4  
Белорусский государственный университет  
Факультет радиофизики и электроники, кафедра информатики  
E-mail: [Serikova@bsu.by](mailto:Serikova@bsu.by), [Shpakovski@bsu.by](mailto:Shpakovski@bsu.by)*

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	7
<b>Раздел 1. ВВЕДЕНИЕ</b> .....	9
<b>Глава 1. Организация вычислений в многопроцессорных системах</b> ....	9
1.1. Классификация многопроцессорных систем .....	9
1.2. Сетевой закон Амдала .....	12
1.3. Техническая реализация многопроцессорных систем .....	14
1.4. Программирование для систем с разделяемой памятью .....	15
1.5. Программирование для систем с передачей сообщений .....	21
Контрольные вопросы и задания к главе 1 .....	27
<b>Глава 2. Реализации интерфейса программирования MPI</b> .....	28
2.1. MPICH – основная реализация MPI .....	28
2.2. Способы запуска приложений в MPICH .....	33
2.2.1. Запуск с помощью MPIRun.exe .....	33
2.2.2. Процедура MPIConfig.exe .....	34
2.2.3. Процедура MPIRegister.exe .....	35
2.3. Библиотека MPE и логфайлы .....	36
2.4. Средства просмотра логфайлов .....	42
Контрольные вопросы и задания к главе 2 .....	43
<b>Раздел 2. БИБЛИОТЕКА ФУНКЦИЙ MPI</b> .....	45
<b>Глава 3. Парные межпроцессные обмены</b> .....	45
3.1. Введение .....	45
3.2. Операции блокирующей передачи и блокирующего приема .....	46
3.2.1. Блокирующая передача .....	46
3.2.2. Данные в сообщении .....	47
3.2.3. Атрибуты сообщения .....	48
3.2.4. Блокирующий прием .....	48
3.2.5. Возвращаемая статусная информация .....	50
3.3. Соответствие типов данных и преобразование данных .....	51
3.3.1. Правила соответствия типов данных .....	51
3.3.2. Преобразование данных .....	53
3.4. Коммуникационные режимы .....	54
3.5. Семантика парного обмена между процессами .....	58
3.6. Распределение и использование буферов .....	62
3.7. Неблокирующий обмен .....	63
3.7.1. Коммуникационные объекты .....	64
3.7.2. Инициация обмена .....	65
3.7.3. Завершение обмена .....	67
3.7.4. Семантика неблокирующих коммуникаций .....	69
3.7.5. Множественные завершения .....	71
3.8. Проба и отмена .....	77

3.9.	Совмещенные прием и передача сообщений .....	81
3.10.	Производные типы данных .....	84
3.10.1.	Конструкторы типа данных .....	85
3.10.2.	Адресные функции и функции экстенстов .....	88
3.10.3.	Маркеры нижней и верхней границ .....	89
3.10.4.	Объявление и удаление объектов типа данных .....	90
3.10.5.	Использование универсальных типов данных .....	91
3.10.6.	Примеры .....	93
3.11.	Упаковка и распаковка .....	96
	Контрольные вопросы и задания к главе 3 .....	101
<b>Глава 4.</b>	<b>Коллективные взаимодействия процессов .....</b>	<b>107</b>
4.1.	Введение .....	107
4.2.	Коллективные операции .....	109
4.2.1.	Барьерная синхронизация .....	109
4.2.2.	Широковещательный обмен .....	109
4.2.3.	Сбор данных .....	110
4.2.4.	Рассылка .....	119
4.2.5.	Сбор для всех процессов .....	124
4.2.6.	Функция <i>all-to-all Scatter/Gather</i> .....	126
4.3.	Глобальные операции редукции .....	128
4.3.1.	Функция <i>Reduce</i> .....	128
4.3.2.	Предопределенные операции редукции .....	129
4.3.3.	<i>MINLOC</i> и <i>MAXLOC</i> .....	131
4.3.4.	Функция <i>All-Reduce</i> .....	133
4.3.5.	Функция <i>Reduce-Scatter</i> .....	134
4.3.6.	Функция <i>Scap</i> .....	135
4.4.	Корректность .....	136
	Контрольные вопросы и задания к главе 4 .....	138
<b>Глава 5.</b>	<b>Группы и коммутаторы .....</b>	<b>143</b>
5.1.	Введение .....	143
5.2.	Базовые концепции .....	144
5.3.	Управление группой .....	145
5.3.1.	Средства доступа в группу .....	145
5.3.2.	Конструкторы групп .....	147
5.3.3.	Деструкторы групп .....	150
5.4.	Управление коммутаторами .....	150
5.4.1.	Доступ к коммутаторам .....	150
5.4.2.	Конструкторы коммутаторов .....	151
5.4.3.	Деструкторы коммутаторов .....	153
5.5.	Примеры .....	154
	Контрольные вопросы и задания к главе 5 .....	155
<b>Глава 6.</b>	<b>Топологии процессов .....</b>	<b>158</b>
6.1.	Виртуальная топология .....	158
6.2.	Топологические конструкторы .....	160
6.2.1.	Конструктор декартовой топологии .....	160

6.2.2.	<i>Декартова функция MPI_DIMS_CREATE</i> .....	161
6.2.3.	<i>Конструктор универсальной (графовой) топологии</i> .....	162
6.2.4.	<i>Топологические функции запроса</i> .....	163
6.2.5.	<i>Сдвиг в декартовых координатах</i> .....	168
6.2.6.	<i>Декомпозиция декартовых структур</i> .....	169
	Контрольные вопросы к главе 6 .....	171
<b>Раздел 3. ПРОГРАММИРОВАНИЕ ПРИЛОЖЕНИЙ</b> .....		173
<b>Глава 7. Матричные задачи</b> .....		173
7.1.	Самопланирующий алгоритм умножения матриц .....	173
7.2.	Клеточный алгоритм умножения матриц .....	179
7.2.1.	Клеточный алгоритм .....	179
7.2.2.	Способы создания коммутаторов .....	181
7.2.3.	Параллельная программа для клеточного алгоритма .....	184
	Контрольные вопросы и задания к главе 7 .....	186
<b>Глава 8. Решение дифференциальных уравнений в частных производных</b> .....		187
8.1.	Задача Пуассона .....	187
8.2.	Параллельные алгоритмы для метода итераций Якоби .....	188
8.2.1.	<i>Параллельный алгоритм для 1D композиции</i> .....	188
8.2.2.	<i>Параллельный алгоритм для 2D композиции</i> .....	192
8.2.3.	<i>Способы межпроцессного обмена</i> .....	194
	Контрольные вопросы и задания к главе 8 .....	200
<b>Глава 9. Параллелизм в решении задач криптоанализа</b> .....		201
9.1.	Криптология и криптоанализ .....	201
9.2.	Криптосистема DES .....	203
9.3.	Параллельная реализация DES алгоритма .....	207
	Контрольные вопросы к главе 9 .....	212
<b>Глава 10. Системы линейных алгебраических уравнений</b> .....		213
10.1.	Методы решения СЛАУ .....	213
10.2.	Параллельные алгоритмы решения СЛАУ .....	216
10.2.1.	<i>Последовательный алгоритм метода простой итерации</i> .....	216
10.2.2.	<i>Параллельный алгоритм метода простой итерации</i> .....	217
10.2.3.	<i>Параллельный алгоритм метода Гаусса-Зейделя</i> .....	222
	Контрольные вопросы и задания к главе 10 .....	224
<b>Раздел 4. ОРГАНИЗАЦИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ</b> .....		225
<b>Глава 11. Обработка исключений и отладка</b> .....		225
11.1.	Обработка исключений .....	225
11.2.	Отладка параллельных приложений .....	229
11.2.1.	<i>Трассировка</i> .....	230
11.2.2.	<i>Использование последовательных отладчиков</i> .....	231
11.2.3.	<i>Псевдопараллельный отладчик</i> .....	232
11.2.3.	<i>Отладка программ MPI с помощью TotalView</i> .....	234
	Контрольные вопросы к главе 11 .....	235
<b>Глава 12. Эффективность параллельных вычислений</b> .....		236
12.1.	Аналитическая оценка эффективности вычислений .....	236

12.2.	Способы измерения эффективности вычислений .....	240
12.3.	Интерфейс профилирования .....	241
	Контрольные вопросы к главе 12 .....	244
<b>Глава 13.</b>	<b>Параллельные библиотеки .....</b>	<b>245</b>
13.1.	Библиотека ScaLAPACK .....	245
13.2.	Библиотека PETSc .....	251
13.3.	Примеры .....	258
	Контрольные вопросы к главе 13 .....	268
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b>	<b>.....</b>	<b>269</b>
<i>Приложение 1.</i>	<i>Константы для языков C и Fortran .....</i>	<i>269</i>
<i>Приложение 2.</i>	<i>Перечень функций MPI-1.1 .....</i>	<i>272</i>
<i>Приложение 3.</i>	<i>Организации параллельных вычислений в сети под управлением Windows NT .....</i>	<i>277</i>
<i>Приложение 4.</i>	<i>Характеристики коммуникационных сетей для кластеров .....</i>	<i>282</i>
<i>Приложение 5.</i>	<i>Варианты решения заданий для самостоятельной работы .....</i>	<i>284</i>
<b>ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ</b>	<b>.....</b>	<b>319</b>
<b>ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ</b>	<b>.....</b>	<b>321</b>
<b>УКАЗАТЕЛЬ ФУНКЦИЙ</b>	<b>.....</b>	<b>323</b>