

Создание класса GEOM

Ivan Voras <ivoras@FreeBSD.org >

Издание: 45050

FreeBSD это зарегистрированная торговая марка FreeBSD Foundation.

Intel, Celeron, EtherExpress, i386, i486, Itanium, Pentium и Xeon это торговые марки или зарегистрированные торговые марки Intel Corporation или ее дочерних компаний в Соединенных Штатах и других странах.

Многие из обозначений, используемые производителями и продавцами для обозначения своих продуктов, заявляются в качестве торговых марок. Когда такие обозначения появляются в этом документе, и Проекту FreeBSD известно о торговой марке, к обозначению добавляется знак «TM» или «(R)».

2014-06-13 taras.

Аннотация

Эта статья документирует некоторые начальные выкладки в разработке GEOM-классов, а также модулей ядра в общем. Предполагается, что читатель близко знаком с программированием на Си в контексте пространства пользовательских процессов (userland).

Содержание

1. Вступление	1
2. Подготовка	2
3. Программирование в ядре FreeBSD	5
4. Программирование в системе GEOM	6

1. Вступление

1.1. Документация

Документация по программированию для ядра скудная, это одна из немногих областей программирования, где почти нет хороших учебных пособий, и совет «чи-

тай исходники!» - сохраняет свою справедливость. Однако, существует несколько статей и книг разной актуальности, которые рекомендуются к изучению перед тем, как начать программировать:

- [Руководство FreeBSD для разработчиков](#) - часть Проекта Документации FreeBSD, ничего специфичного о программировании ядра в нем нет, зато есть немного общей полезной информации.
- [Руководство по Архитектуре FreeBSD](#) - также является частью Проекта Документации FreeBSD, содержит описания некоторых низкоуровневых средств и процедур. Уделите внимание разделу номер 13 - [Написание драйверов устройств для FreeBSD](#).
- Несколько интересных статей об устройстве ядра можно найти на сайте [FreeBSD Diary](#).
- Страницы из раздела номер 9 системного справочника, содержат важную документацию по функциям ядра.
- Страница справочника [geom\(4\)](#), а также [слайды Пола-Хеннинга Кампа](#) - общее представление о подсистеме GEOM.
- Страницы справочника [g_bio\(9\)](#), [g_event\(9\)](#), [g_data\(9\)](#), [g_geom\(9\)](#), [g_provider\(9\)](#), [g_consumer\(9\)](#), [g_access\(9\)](#), а также другие, связанные с вышеупомянутыми и раскрывающие специфический функционал подсистемы GEOM.
- Страница справочника [style\(9\)](#) - документирует соглашения о стиле оформления кода, которые обязаны быть соблюдены если вы планируете передать ваш код в Subversion репозиторий FreeBSD.

2. Подготовка

Для того, чтоб заниматься разработками для ядра, желательно иметь два отдельных компьютера. Один из них предназначен для среды разработки и исходных кодов, а второй - для запуска тестов отлаживаемого кода. Второму компьютеру для работы достаточно иметь возможность выполнять начальную загрузку по сети и монтирование файловых систем по сети. В этой ситуации, если отлаживаемый код содержит ошибки и вызовет аварийную остановку системы, то это не повлечет порчу или утерю исходного кода. Второму компьютеру даже не потребуется иметь свой монитор, достаточно будет соединения асинхронных портов кабелем RS-232 или соединения при помощи KVM-устройства.

Но так как далеко не у каждого есть два или более компьютеров под рукой, есть пара способов подготовить иную «живую» систему для разработки кода для ядра. Один из них - это разработка в [VMWare](#) или [QEmu](#) виртуальной машине (это лучшее из доступного, после, конечно-же, выделенного для тестов компьютера).

2.1. Настройка системы для разработки

Прежде всего необходимо иметь в ядре поддержку `INVARIENTS` . Добавьте следующие строки в файл конфигурации ядра:

```
options INARIANT_SUPPORT
options INVARIENTS
```

Для большей информативности при отладке включите поддержку `WITNESS`, которая будет предупреждать вас в случае возникновения взаимоблокировок:

```
options WITNESS_SUPPORT
options WITNESS
```

Также включите отладочные символы, если планируете выполнять отладку по дампам аварийных отказов

```
makeoptions      DEBUG=-g
```

Установка отладочного ядра обычным способом (`make installkernel`) не даст привычного результата: файл ядра будет называться `kernel.debug` и будет находиться в `/usr/obj/usr/src/sys/KERNELNAME/` . Для удобства, отладочное ядро необходимо скопировать в `/boot/kernel/` .

Также удобно иметь включенный отладчик ядра, так вы сможете исследовать паники сразу-же после их возникновения. Для включения отладчика добавьте следующие строки в файл конфигурации ядра:

```
options KDB
options DDB
options KDB_TRACE
```

Для автоматического запуска отладчика ядра после возникновения паники может понадобиться установить переменную `sysctl`:

```
debug.debugger_on_panic=1
```

Паники системы будут происходить, поэтому уделите внимание кэшу файловой системы. Обычно, при включенном механизме `softupdates`, последняя версия файла может быть утеряна если паника произошла раньше сбрасывания кэша на устройство хранения. Выключение механизма `softupdates` (посредством монтирования файловой системы с опцией «`sync`») значительно сказывается на производительности и, опять-же, не гарантирует целостности данных. Как компромисс, можно сократить задержки сбрасывания кэша механизма `softupdates`. Есть три переменных `sysctl`, значения которых необходимо изменить (лучше всего - прописав их в `/etc/sysctl.conf`):

```
kern.filedelay=5
kern.dirdelay=4
kern.metadelat=3
```

Значения этих переменных - секунды.

Для отладки паник ядра необходимы дампы памяти. Так как паника ядра может «сломать» файловую систему, дамп сначала сохраняется в «сырой» раздел. Обычно, это своп-раздел. Поэтому, размер своп-раздела должен быть не меньше размера ОЗУ компьютера. При последующей загрузке дамп копируется в обычный файл. Это происходит сразу-же после проверки и монтирования файловых систем, но перед активированием раздела свопа. Такое поведение контролируется следующими переменными `/etc/rc.conf` :

```
dumpdev="/dev/ad0s4b"  
dumpdir="/usr/core"
```

Переменная `dumpdev` указывает на раздел подкачки, а `dumpdir` сообщает системе куда перемещать дамп ядра при следующей загрузке.

Сохранение дампа ядра - процесс медленный, и, если у вашего компьютера много оперативной памяти (>256М) и если паники случаются часто, то ожидание сохранения дампов может начать раздражать (вспомним, что над дампом происходит две операции: сохранение в своп-файл и перемещение на файловую систему). В таком случае может оказаться удобным ограничение объема используемой системой памяти путем установки переменной в `/boot/loader.conf` :

```
hw.physmem="256M"
```

Если паники случаются часто и размер файловых систем большой (или же вы просто не доверяете `softupdates` и фоновой проверке файловых систем), рекомендуется отключить фоновую проверку файловых систем посредством установки переменной в `/etc/rc.conf` :

```
background_fsck="NO"
```

В этом случае файловые системы будут проверяться только при необходимости. Также заметьте, что в случае использования фоновой проверки, новая паника может случиться в то время, когда проверяются диски. Другими словами, наиболее безопасный способ - не иметь много локальных файловых систем, а использовать второй компьютер в качестве NFS-сервера.

2.2. Начало проекта

Для написания нового класса GEOM необходимо создать поддиректорию в любой доступной пользователю директории. Совсем не обязательно, чтоб ваш модуль изначально размещался в `/usr/src` .

2.3. Makefile

Правилом хорошего тона является создание `Makefile` -ов для каждого нетривиального проекта, примером которого конечно-же является создание модулей ядра.

Создание Makefile - дело не сложное благодаря исчерпывающему набору вспомогательных средств, предоставляемых системой. Вкратце, вот как должен выглядеть Makefile для модуля ядра:

```
SRCS=g_journal.c
KMOD=geom_journal

.include <bsd.kmod.mk>
```

Этот Makefile (с измененными именами файлов) подойдет к любому модулю ядра. Класс GEOM может размещаться в одном единственном модуле ядра. Если для сборки вашего модуля требуется больше, чем один файл, то перечислите их имена, разделенные пробельными символами, в переменной SRCS.

3. Программирование в ядре FreeBSD

3.1. Выделение памяти

Прочитайте [malloc\(9\)](#) - выделение памяти лишь немного отличается от своего эквивалента, используемого в пространстве пользовательских процессов (userland). Наиболее приметно то, что malloc() и free() принимают дополнительные параметры, которые описаны в странице справочника.

Тип «malloc_type» необходимо объявить в секции деклараций файла с исходным кодом, например:

```
static MALLOC_DEFINE(M_GJOURNAL, "gjournal data", "GEOM_JOURNAL ⚡ Data");
```

Для того, чтобы можно было использовать этот макрос, необходимо включить следующие заголовочные файлы: sys/param.h, sys/kernel.h и sys/malloc.h

Существует еще один механизм выделения памяти - UMA (Universal Memory Allocator), описанный в [uma\(9\)](#). Это специфический метод, преимущественно предназначенный для быстрого выделения памяти под списки, состоящие из элементов одинакового размера (например, динамические массивы структур).

3.2. Очереди и списки

Ознакомьтесь с [queue\(3\)](#) Во множестве случаев вам необходимо будет организовывать и управлять такой структурой данных, как списки. К счастью, эта структура данных реализована несколькими способами в виде макросов на Си, а также включена в систему. Наиболее гибкий и часто употребляемый тип списка - TAILQ. Этот тип списка также один из наиболее требовательных к памяти (его элементы - с двойными связями), а также - наиболее медленный (однако счет идет на несколь-

ко инструкций ЦПУ, поэтому последнее утверждение не следует воспринимать в серьез).

Если важна скорость получения данных, то возьмите на вооружение [tree\(3\)](#) и [hashinit\(9\)](#).

3.3. BIOs

Структура `bio` используется для всех операций ввода/вывода, касающихся GEOM. Она содержит информацию о том, какое устройство ('поставщик geom') должно ответить на запрос, тип запроса, смещение, длину и указатель на буфер, а также набор «определенных пользователем» флагов и полей.

Важным моментом является то, что `bio` обрабатываются асинхронно. Это значит, что во многих частях кода нет аналога к [read\(2\)](#) и [write\(2\)](#) функциям из пространства пользовательских процессов, которые не возвращают управление пока не выполнится системный вызов. Скорее, по завершении обработки запроса (или в случае ошибки при обработке) как извещение вызывается определенная пользователем функция.

Асинхронная модель программирования в чем-то сложнее, нежели чаще используемая императивная модель, используемая в пространстве пользовательских процессов; в любом случае, привыкание займет некоторое время. В некоторых случаях могут быть использованы вспомогательные функции `g_write_data()` и `g_read_data()`, но далеко не всегда. В частности, эти функции не могут использоваться когда захвачен мьютекс; например, мьютекс GEOM-топологии или внутренний мьютекс, удерживаемый в ходе выполнения `.start()` или `.stop()`.

4. Программирование в системе GEOM

4.1. Ggate

Если максимальная производительность не требуется, то более простой способ совершать преобразования данных - это выполнять их в пространстве пользовательских процессов посредством `ggate` (GEOM gate). К недостаткам следует отнести невозможность простого переноса кода в ядро.

4.2. Класс GEOM

Класс GEOM выполняет преобразования данных. Эти преобразования могут быть скомпонованы друг с другом в виде дерева. Экземпляр класса GEOM называют *geom*.

В каждом классе GEOM есть несколько «методов класса», которые вызываются когда экземпляра класса нет в наличии (или же они не привязаны к конкретному экземпляру класса).

- `.init` вызывается тогда, когда системе GEOM становится известно о классе GEOM (например, когда загружается модуль ядра).
- `.fini` будет вызван в случае отказа GEOM системы от класса (например, при выгрузке модуля).
- `.taste` вызывается, когда в системе появляется новый класс или поставщик `geom` («provider»). Если соответствие найдено, то эта функция обычно создает и запускает экземпляр `geom`.
- `.destroy_geom` вызывается при необходимости разрушить экземпляр `geom`.
- `.ctlconf` будет вызван, когда пользователь запросит изменение конфигурации существующего экземпляра `geom`

Также определены функции событий GEOM, которые копируются в экземпляр `geom`.

Поле `.geom` в структуре `g_class` - это список (LIST) экземпляров `geom`, реализованных из класса.

Эти функции вызываются из `g_event` потока ядра.

4.3. Softc

«softc» - это устаревший термин для «приватных данных драйвера» («driver private data»). Название вероятней всего происходит от устаревшего термина «software control block». В системе GEOM softc это структура (точнее: указатель на структуру) которая может быть присоединена к экземпляру `geom` и может содержать приватные данные экземпляра. У большинства классов GEOM есть следующие члены:

- `struct g_provider *provider` : «поставщик `geom`» предоставляемый данным экземпляром `geom`
- `uint16_t n_disks` : Количество потребителей `geom` («consumer»), обслуживаемых данным экземпляром `geom`
- `struct g_consumer **disks` : Массив `struct g_consumer*` . (Невозможно обойтись одинарным указателем, потому что система GEOM создает для нас структуры `struct g_consumer*`)

Структура `softc` содержит состояние экземпляра `geom`. У каждого экземпляра есть свой `softc`.

4.4. Метаданные

Формат метаданных в той или иной мере зависит от конкретного класса, но обязан начинаться с:

- 16-байтного буфера для подписи - строки с завершающим нулем (обычно это имя класса)
- uint32 идентификатора версии

Подразумевается, что классы geom знают как обращаться с метаданными с идентификаторами версий ниже, чем их собственные.

Метаданные размещаются в последнем секторе поставщика geom (поэтому обязаны целиком уместиться в нем).

(Все это зависит от реализации, но весь существующий код работает подобно описанному и поддерживается библиотеками.)

4.5. Маркирование/создание экземпляра geom

Последовательность событий следующая:

- пользователь запускает служебную программу `geom(8)`
- программа решает каким классом geom ей придется управлять и ищет библиотеку `geom_CLASSNAME.so` (которая обычно находится в `/lib/geom`).
- она открывает библиотеку при помощи `dlopen(3)`, извлекает вспомогательные функции и определения параметров командной строки.

Вот так происходит создание/маркирование нового экземпляра geom:

- `geom(8)` ищет команду в аргументах командной строки (обычно это `label`) и вызывает вспомогательную функцию.
- Вспомогательная функция проверяет параметры и собирает метаданные, которые записываются во все вовлеченные поставщики geom.
- Это «повреждает (spoil)» существующие экземпляры geom (если они были) и порождает новый виток «тестирования» поставщиков geom. Целевой класс geom опознает метаданные и активирует экземпляр geom.

(Приведенная выше последовательность событий зависит от конкретной реализации, но весь существующий код работает подобно описанному и поддерживается библиотеками.)

4.6. Структура команд geom

Вспомогательная библиотека `geom_CLASSNAME.so` экспортирует структуру `class_commands`, которая является массивом элементов `struct g_command`. Эти команды одинакового формата и выглядят следующим образом:


```
команда [-опции] имя_geom [другие]
```

Общими командами являются:

- `label` - записать метаданные в устройства, чтобы они могли быть опознаны в процессе тестирования и использованы в соответствующих экземплярах `geom`
- `destroy` - разрушить метаданные, за которым следует разрушение экземпляров `geom`

Общие опции:

- `-v` : детальный вывод
- `-f` : принудить

Некоторые операции, к примеру маркирование метаданными и разрушение метаданных могут быть выполнены из пространства пользовательских процессов. Для этого, структура `g_command` содержит поле `gc_func`, которое может быть установлено на функцию (в том-же `.so`), которая будет вызвана для обработки команды. В случае, когда `gc_func` равно `NULL`, команда будет передана модулю ядра: функции `.ctlreq` класса `GEOM`.

4.7. Экземпляры `geom`

У экземпляров классов `GEOM` есть внутренние данные, которые хранятся в структурах `softc`, а также есть некоторые функции, посредством которых они реагируют на внешние события.

Функции событий:

- `.access` : просчитывает права доступа (чтение/запись/исключительный доступ)
- `.dumpconf` : возвращает информацию о экземпляре `geom`; формат XML
- `.orphan` : вызывается, когда отсоединяется любой из низлежащих поставщиков `geom`
- `.spoiled` : вызывается, когда производится запись в низлежащий поставщик `geom`
- `.start` : обрабатывает ввод/вывод

Эти функции вызываются из ядерного потока `g_down` и в этом контексте не может быть блокировок (поищите определение «блокировка» в других источниках), что немного ограничивает свободу действий, но способствует скорости обработки.

Из вышеупомянутых, наиболее важной и выполняющей полезную работу функцией является `.start()`, которая вызывается всякий раз, когда поставщику geom, управляемому экземпляром класса, приходит запрос BIO.

4.8. Потоки выполнения системы geom

Системой GEOM в ядре ОС создаются и используются три потока выполнения (kernel threads):

- `g_down` : Обработывает запросы, приходящие от высокоуровневых сущностей (таких, как запросы из пространства пользовательских процессов) на пути к физическим устройствам
- `g_up` : Обработывает ответы от драйверов устройств на запросы, выполненные высокоуровневыми сущностями
- `g_event` : Отрабатывает в остальных случаях, как-то создание экземпляра geom, просчитывание прав доступа, события «повреждения» и т.п.

Когда пользовательский процесс запрашивает «прочитать данные X по смещению Y файла», происходит следующее:

- Файловая система преобразует запрос в экземпляр структуры `bio` и передает его системе GEOM. Файловая система «знает», что экземпляр geom должен обработать запрос, так как файловые системы размещаются непосредственно над экземпляром geom.
- Запрос завершается вызовом функции `.start()` в потоке `g_down` и достигает верхнего экземпляра geom.
- Верхний экземпляр geom (например, это секционировщик разделов (partition slicer)) определяет, что запрос должен быть переадресован нижестоящему экземпляру geom (к примеру, драйверу диска). Вышестоящий экземпляр geom создает копию запроса `bio` (запросы `bio` ВСЕГДА копируются при передаче между экземплярами geom при помощи `g_clone_bio()`!), изменяет поля смещения и целевого поставщика geom и запускает на обработку копию при помощи функции `g_io_request()`
- Драйвер диска также получает запрос `bio`, как вызов функции `.start()` в потоке `g_down`. Драйвер обращается к контроллеру диска, получает блок данных и вызывает функцию `g_io_deliver()` используя копию запроса `bio`
- Теперь, извещение о завершении `bio` «всплывает» в потоке `g_up`. Сначала в потоке `g_up` вызывается функция `.done()` секционировщика разделов, последний использует полученную информацию, разрушает клонированный экземпляр структуры `bio` посредством `g_destroy_bio()` и вызывает `g_io_deliver()` используя первоначальный запрос

- Файловая система получает данные и передает их пользовательскому процессу

За информацией о том, как данные передаются в структуре `bio` между экземплярами `geom`, смотрите [g_bio\(9\)](#) (обратите внимание на использование полей `bio_parent` и `bio_children`).

Важный момент в том, что *НЕЛЬЗЯ ДОПУСКАТЬ БЛОКИРОВОК В ПОТОКАХ G_UP И G_DOWN*. Вот неполный перечень того, что нельзя делать в этих потоках:

- Вызывать функции `msleep()` или `tsleep()`.
- Использовать функции `g_write_data()` и `g_read_data()`, так как они блокируются в момент обмена данными с потребителями `geom`.
- Ожидать ввод/вывод.
- Вызывать [malloc\(9\)](#) и `uma_zalloc()` с установленным флагом `M_WAITOK`.
- Использовать [sx\(9\)](#)

Это ограничение на код GEOM призвано избежать от «засорения» пути запроса ввода/вывода, так как блокировки обычно не имеют четких временных границ, и нет гарантий на занимаемое время (также на то есть и другие технические причины). Это также значит, что в вышеупомянутых потоках сколь-нибудь сложные операции выполнить нельзя, например: любое сложное преобразование требует выделения памяти. К счастью решение есть: создание дополнительных ядерных потоков.

4.9. Ядерные потоки выполнения, предназначенные для использования в коде `geom`

Ядерные потоки выполнения создаются функцией [kthread_create\(9\)](#), в своем поведении они схожи с потоками, созданными в пространстве пользовательских процессов, но есть одно отличие: они не могут известить вызвавший их поток о своем завершении; по завершению - необходимо вызывать [kthread_exit\(9\)](#)

В коде GEOM обычное назначение этих потоков - разгрузить поток `g_down` (функцию `.start()`) от обработки запросов. Эти потоки подобны «обработчикам событий» («event handlers»): у них есть очередь событий (которая наполняется событиями от разных функций из разных потоков; очередь необходимо защищать мьютексом), события из очереди выбираются одно за другим и обрабатываются в большом блоке `switch()`.

Основное преимущество использования отдельного потока, который обрабатывает запросы ввода/вывода, то, что он может блокироваться по мере необходимости. Это, несомненно, привлекательно, но должно быть хорошо обдумано. Блокирование - хорошо и удобно, но может существенно снизить производительность преобразований данных в системе GEOM. Особо требовательные к производительности

Ядерные потоки выполнения, предназначенные для использования в коде классов могут делать всю работу в функции `.start()`, уделяя особое внимание ^{geom}ошибкам при работе с памятью.

Еще одно преимущество потока «обработчика событий» это сериализация всех запросов и ответов, приходящих с разных потоков `geom` в один поток. Это также удобно, но может быть медленным. В большинстве случаев, обработка запросов функцией `.done()` может быть оставлена потоку `g_up`.

У мьютексов в ядре FreeBSD ([mutex\(9\)](#)) есть одно различие с их аналогами из пространства пользовательских процессов - во время удержания мьютекса в коде не должно быть блокировки. Если в коде необходимо блокирование, то лучше использовать [sx\(9\)](#). С другой стороны, если вся ваша работа выполняется в одном потоке, вы можете обойтись вообще без мьютексов.