

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования

«Московский физико-технический институт (национальный исследовательский  
университет)»

Факультет управления и прикладной математики

Кафедра теоретической и прикладной информатики

**Направление подготовки:** 03.04.01 Прикладные математика и физика

**Направленность (профиль) подготовки:** Математические и информационные техно-  
логии

**ПЕРЕХВАТ ФАЙЛОВЫХ ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ  
ВИРТУАЛЬНЫХ SPARSE-ФАЙЛОВ С УДАЛЕННЫМ  
ХРАНИЛИЩЕМ В ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ MACOS**  
(магистерская диссертация)

**Студент:**

Копырин Денис Валерьевич

---

*(подпись студента)*

**Научный Руководитель:**

д-р физ.-мат. наук, профессор

Тормасов Александр Геннадьевич

---

*(подпись научного руководителя)*

Москва 2019

# Оглавление

<b>Введение</b>	4
<b>Глава 1. Файловые операции</b>	5
1.1. Файловая Система	5
1.2. Структура vnode	6
1.3. Операции над vnode	8
1.4. Операция mmap: файловый кэш	10
1.4.1. Unified Buffer Cache как часть vnode	10
1.4.2. Memory Objects	11
1.4.3. Виртуальная память процесса	13
<b>Глава 2. Перехват VFS операций</b>	16
2.1. Описание перехватов	16
2.2. Vnode перехваты	17
2.2.1. Способы перехвата	17
2.2.2. Поиск полей vnode	18
2.3. KAUTH авторизация	25
<b>Глава 3. Представление виртуального файла</b>	30
3.1. Карта регионов	30
3.2. Список непересекающихся регионов	32
3.2.1. Термины	33
3.2.2. Метод merge	34
3.2.3. Метод add	35
3.2.4. Метод checkAndRemove	37
3.3. Использование	42

<b>Глава 4. Структура UserSpace клиента . . . . .</b>	<b>44</b>
4.1. Транспорт Kernel - User . . . . .	44
4.1.1. IOUserClient . . . . .	44
4.1.2. IOSharedDataQueue . . . . .	46
4.1.3. Синхронный транспорт . . . . .	48
4.2. Схема запросов/ответов . . . . .	50
<b>Глава 5. Имплементация и производительность . . . . .</b>	<b>52</b>
5.1. Связи объектов . . . . .	52
5.2. Защита от фиктивного чтения . . . . .	53
5.2.1. Списки фильтрации приложений . . . . .	53
5.2.2. Проверка запущенных процессов . . . . .	54
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>57</b>
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>58</b>
<b>Приложение А. Ассемблерные листинги функций XNU . . . . .</b>	<b>59</b>

## Введение

В данной работе рассматривается способ работы с файлами, находящимися на удаленном хранилище, доступ к которым требуется осуществлять при помощи локальных средств работы с файлами (POSIX API). Подобная задача появляется при синхронизации пользовательских изменений с облаком, а также при работе с общими файлами многими пользователями.

Сформулируем задачу в виде требований к продукту.

1. Стриминг - возможность поблочного скачивания файла
2. Консистентность - после скачивания части файла, данные должны быть кэшированы локально

Классическое решение данной проблемы подразумевает использование виртуальной файловой системы таких как *smbfs* или *nfs* и их монтирование в папку - новый корень файловой системы. Такой подход удовлетворяет первому свойству, однако для обеспечения сохранения данных необходимо производить существенные изменения в протокол или добавлять новый уровень абстракции персистентного кэша.

В дипломе будет рассмотрено другое решение, не требующее создания искусственной файловой системы, для работы достаточно загрузки расширения ядра операционной системы macOS, *Kernel Extension (kext)*. В системе будут создаваться *обычные* sparse-файлы, не хранящие по умолчанию данных, а *kext* будет скачивать данные на операции чтения. Такой подход будет удовлетворять требованию 1 и 2.

Первая глава диплома описывает общую структуру работы файлов в ядре. В главах 2-4 приводятся разработанные методы и алгоритмы, которые необходимы для перехватов. В последней главе представлены схемы связей компонентов вместе и измерения характеристик продукта.

## Глава 1

## Файловые операции

## 1.1. Файловая Система

*Виртуальная Файловая Система (Virtual File System/VFS)* - подсистема, которая отвечает за работу с различными *Файловыми Системами (ФС/FS)* и находится между специфичной для FS и независимой от FS кодом, таким образом абстрагируя любые различия между внутренним устройством FS и остальной частью ядра. Ядро использует VFS для осуществления *ввода/вывода (I/O)* через *inode*, которые являются обобщением файла в ядре и хранилищем метаданных.

Рассмотрим принципиальную схему работы VFS. В данной работе нас не интересует схема регистрации новых устройств и точек монтирования, но внутреннее устройство VFS по созданию и удалению новых *inode*, а также передача данных от слоя к слою.

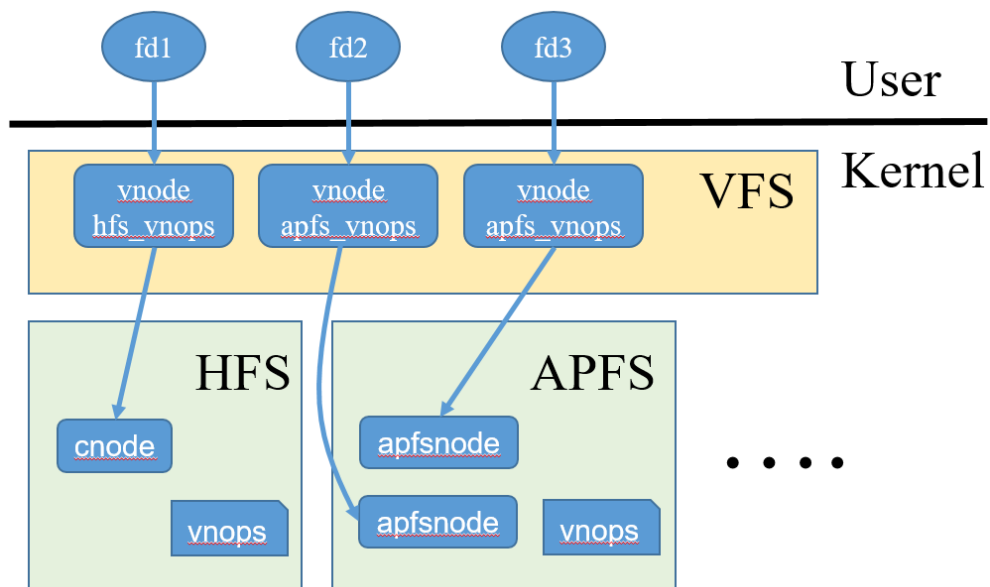


Рис. 1.1. Принципиальная схема работы VFS.

Рассмотрим 1.1. Каждая файловая система имеет в себе *единственный экземпляр* таблицы *vnops*, которая отвечает за работу с конкретной файловой системой. Приложение в UserSpace работает с файловыми дескрипторами (fd1-fd3 на рисунке), через которые производится доступ к vnode в VFS. Операции над файлами транслируется в один из вызовов VFS, который использует соответствующую функцию из таблицы vnops.

## 1.2. Структура vnode

vnode в системе может представлять из себя множество различных данных, как хранимых локально на диске, так и в памяти. Ограничим круг рассматриваемых vnode.

В таблице 1.2 перечислены возможные типы vnode в операционной системе macOS. Несмотря на некоторое сходство с FreeBSD, ядро XNU имеет некоторые отличия.

VREG; VDIR	Регулярный (обычный) файл; Директория
VBLK; VCHR	Блочное/Символьное устройство
VLNK	Символическая ссылка на файл
VSOCK; VFIFO	Сокет/Именованный pipe
VSTR; VCPLX	Специальные типы

Рис. 1.2. Типы vnode в VFS.

Для нашего рассмотрения ограничимся VREG и VDIR, однако можно включить в рассмотрение и VSTR, которые могут иметь под собой пользовательские данные.

Структура данных, описывающую vnode представлена в 1.1. Из определения удалены поля, которые не нужны для дальнейшего рассмотрения. Заметим, что данная структура также не является постоянной и меняется от

версии к версии в macOS. В данной работе будет использоваться ядро версии xnu-4903.221.2 [1], предложенные методы были протестированы на версиях macOS начиная с 10.10. В последующих главах будут предложены способы предсказания изменений структуры ядра, смотреть ??.

```
typedef struct vnode {
...
    int32_t v_kusecount;           /* count of in-kernel refs */
    int32_t v_usecount;           /* reference count of users */
    int32_t v_iocount;           /* iocounters */
...
    uint32_t v_id;                /* identity of vnode contents */
    union {
        struct mount    *vu_mountedhere; /* ptr to mounted vfs (VDIR) */
        struct ubc_info *vu_ubcinfo;     /* valid for (VREG) */
    } v_un;
...
    int (**v_op)(void *);        /* vnode operations vector */
    mount_t v_mount;             /* ptr to vfs we are in */
    void* v_data;                /* private data for fs */
} *vnode_t;
```

Листинг 1.1. Структура vnode в ядре, краткое содержание

У каждой *vnode* существуют два счетчика, которые отвечают за время жизни *vnode* в памяти. *usecount* - счетчик, обеспечивающий слабое наличие *vnode* в системе: *vnode* с положительным *usecount* не может быть переиспользована для другого файла. Слабое наличие файла не гарантирует наличие данных, если файловая система должна быть отмонтирована, например *vnode* может быть прописано состояние VNON и данные *vnode* не могут быть

больше использованы. *iocount* гарантирует, что *vnode* не только обязана соответствовать файлу, но и запрещено отмонтирование ФС пока *iocount* не будет равен 0. Отсюда требование VFS заключается в том, что *iocount* на *vnode* может быть взят только на короткое время операций, такие как чтение или запись блока данных. Кехт обязан опускать *iocount* как только операции закончились, в противном случае система не может быть остановлена валидно. Для проверки переиспользования *vnode* используется *v\_id*, уникальный для данной *vnode* как указателя id, при изменении содержимого *vnode* счетчик поднимается.

*v\_mount* и *v\_data* отвечают за *mount*, к которому относится данная *vnode* и для расширения ядра являются непрозрачными(opaque) указателями. В данной работе особый интерес составляет поле *v\_op*, которое отвечает за доступ к функциям работы с *vnode*, принадлежащей к ядру. Как уже было замечено раньше, указатель *v\_op* является постоянным для всех *vnode* принадлежащих одной файловой системе. Для всех версий ядра от macOS 10.10 до macOS 10.14 сохраняется свойство последовательности полей  $v\_op \rightarrow v\_mount \rightarrow v\_data$ , которое может быть использовано для нахождения смещения *v\_op* в памяти. Более подробно поле *v\_op* изучено в главе 1.3.

В объединении *v\_un* находятся указатели, являющиеся прозрачными для *vnode*. Содержимое указателя зависит от типа *vnode*, в данном дипломе будет рассмотрено содержимое указателя *vu\_ubcinfo*, которое отвечает за кэширование данных *vnode*, смотреть 1.4.1.

### 1.3. Операции над *vnode*

Рассмотрим функция *VNOP\_READ*, которая осуществляет чтение из файла. Остальные функции вида *VNOP\_\** работают аналогично. В листинге



1.2 представлена упрощенная функция [1].

Обратим внимание, что для доступа к операции в функции используется структура *vnop\_read\_desc*, ее сокращенное описание приведено в 1.3. Эта структура доступна публично в *KPI*.

```
errno_t VNOP_READ(...args...)
{
    int _err;
    struct vnop_read_args a;

    a.a_desc = &vnop_read_desc;
    a.a_vp = vp;
    ...other inits...

    _err = (*vp->v_op[vnop_read_desc.vdesc_offset])(&a);

    return (_err);
}
```

Листинг 1.2. Упрощенная функция *VNOP\_READ*

```
struct vnodeop_desc {
    int vdesc_offset;          /* offset in vector */
    const char *vdesc_name;    /* a readable name for debugging */
    int vdesc_flags;           /* VDESC_* flags */

    int *vdesc_vp_offsets;     /* list ended by VDESC_NO_OFFSET */
    int vdesc_vpp_offset;      /* return vpp location */
    ...
}
```

```
};
```

Листинг 1.3. Структура *vnodeop\_desc*

Видно, что используя соответствующую структуру вида *vnop\_func\_desc*, где *func* является именем необходимой структуры, можно найти смещение в таблице функций *v\_op*. Таким образом, для того чтобы переопределить операцию над *vnode* необходимо подменить функцию в таблице *v\_op* найденную через структуру *vnop\_func\_desc*.

## 1.4. Операция *mmap*: файловый кэш

В данной секции будет рассмотрена имплементация *memory – mapped* - доступ к файлу как к страницам в виртуальной памяти. У *vnode* вызываются методы *pagein* для первого чтения, результат сохраняется в кэше; далее используется скаченная страницы на каждого последующего побайтового чтениях. Таким образом осуществляется оптимизация доступа к дисковому хранилищу через страницы памяти, организация *readahead* и *writebehind* политик.

Для обеспечения такой подгрузки данных файла в страницы, *Mach* часть ядра *xnu* предоставляет подсистему кэширования данных файла *UBC* и подсистему виртуальной памяти *vm\_map*. Это рассмотрение будет необходимо для осуществления фильтрации пустых страниц, см 4.2.

### 1.4.1. Unified Buffer Cache как часть *vnode*

При открытии *vnode* осуществляется аллокация структуры *vu\_abcinfo* (1.1). В 1.4 приведено описание полей данной структуры [1].

```
typedef struct abc_info {
    memory_object_t ui_pager;          /* pager */
```

```

memory_object_control_t ui_control; /* VM control for the pager */

vnode_t ui_vnode;      /* vnode for this ubc_info */
kauth_cred_t ui_ucred; /* holds credentials for NFS paging */
off_t ui_size;         /* file size for the vnode */
uint32_t ui_flags;     /* flags */
uint32_t cs_add_gen;    /* generation count when
                        csblob was validated */

...
} *ubc_info_t;

```

Листинг 1.4. Структура *ubc\_info*

Часть *UBC*, отвечающая за работу с памятью, находится в Mach части ядра, а именно в полях *ui\_pager* и *ui\_control*. При помощи операций над файлом *pagein* и *pageout* осуществляется чтения и запись файла на диска с использованием указанных полей.

*UBC* имеет доступные методы в *KPI*, которые позволяют регулировать кэширование. Самый важным методом является *ubc\_msync*, отправка всех "грязных" страниц на диск. Если кэш был умышленно заполнен неверными страницами, то при помощи *ubc\_msync* можно сделать кэш снова валидным. Стоит заметить, что при таком подходе, количество операций чтения с диска становится порядка  $O(n^2)$  в виду того, что каждое чтение *байта* порождает чтение *всей страницы*. Отсюда при чтении страницы размером *pagesize* байт, с диска будет считано  $pagesize^2$  байт.

### 1.4.2. Memory Objects

Реализация VFS в операционной системе macOS очень близка к FreeBSD, но существует множество изменений, связанных в первую очередь с наличием

подсистемы Mach, отвечающей за работу с памятью.

Тип *memory\_object\_t* является *обобщенным (unified)* типом для любых обращений к памяти, в том числе к диску, далее *Memory Object*. В *KPI Memory Object* является прозрачным указателем на структуру *memory\_object*.

Работа с *Memory Object* подразделена на 2 независимые компоненты, зависящие от источника данных, *memory\_object* и *memory\_object\_control*. Поля *mo\_ikot* оставлены в структуре для поддержки работы с *UserSpace* клиентами. В объекте *memory\_object\_control* поле *moc\_object* отвечает за выделение памяти в ядре и не зависит от операций над  *vnode*. Объект *memory\_object* является зависимым от источника данных, управление ими осуществляется при помощи аналогичных коллбэков.

```
typedef struct    memory_object {
    mo_ipc_object_bits_t    mo_ikot;
    const struct memory_object_pager_ops *mo_pager_ops;
    struct memory_object_control *mo_control;
} *memory_object_t;

typedef struct memory_object_control {
    mo_ipc_object_bits_t moc_ikot;
    struct vm_object *moc_object;
} *memory_object_control_t;
```

Листинг 1.5. Структура Memory Object

Для данной работы, достаточно рассмотреть структуру, отвечающую за получения данных из источника  *vnode* -  *vnode\_pager*. Заметим, что у структуры присутствует заголовок, отвечающий за общую для всех *Memory Object* и частный для самого  *vnode\_pager* указатель на  *vnode*.

```
typedef struct vnode_pager {
```

```

/* mandatory generic header */
struct memory_object vn_pgr_hdr;

/* pager-specific */
unsigned int    ref_count;      /* reference count */
struct vnode    *vnode_handle; /* vnode handle */
} *vnode_pager_t;

```

Листинг 1.6. Структура *vnode\_pager*

TODO привести крутую картинку

### 1.4.3. Виртуальная память процесса

В этой секции будет рассмотрена часть реализации виртуальной памяти, относящейся к *mmap* файлам. Для работы с файлами в удаленном хранилище необходимо предоставлять некоторым процессам доступ к файлам, но не подгружать данные. В виду кэширования страниц в *vm\_object* нельзя отдавать невалидные страницы (смотреть 1.4.1), поэтому было выбрано решение *подмены* *vm\_object* файла на *vm\_object* с пустыми страницами.

Приложения для доступа к этому кэшу используют виртуальную память, адреса в которой отображаются на *vm\_object\_t* через *карту виртуальной памяти* (*vm\_map\_t*). Схема карты показана на рисунке (1.3).

Карта состоит из списка записей. Запись определяет участок виртуальной памяти, к которому относятся адреса и указывает или на *vm\_object* с страницами, или на другую *vm\_map* - *подкарта* (*submap*). При использовании функции *fork* для обеспечения *copy-on-write* страниц виртуальной памяти используются *объекты с тенью*. Тень объекта - другой *vm\_object*, который дает страницы для данного объекта при доступе.

Для получения карты *vm\_map* используем функцию *current\_map* и

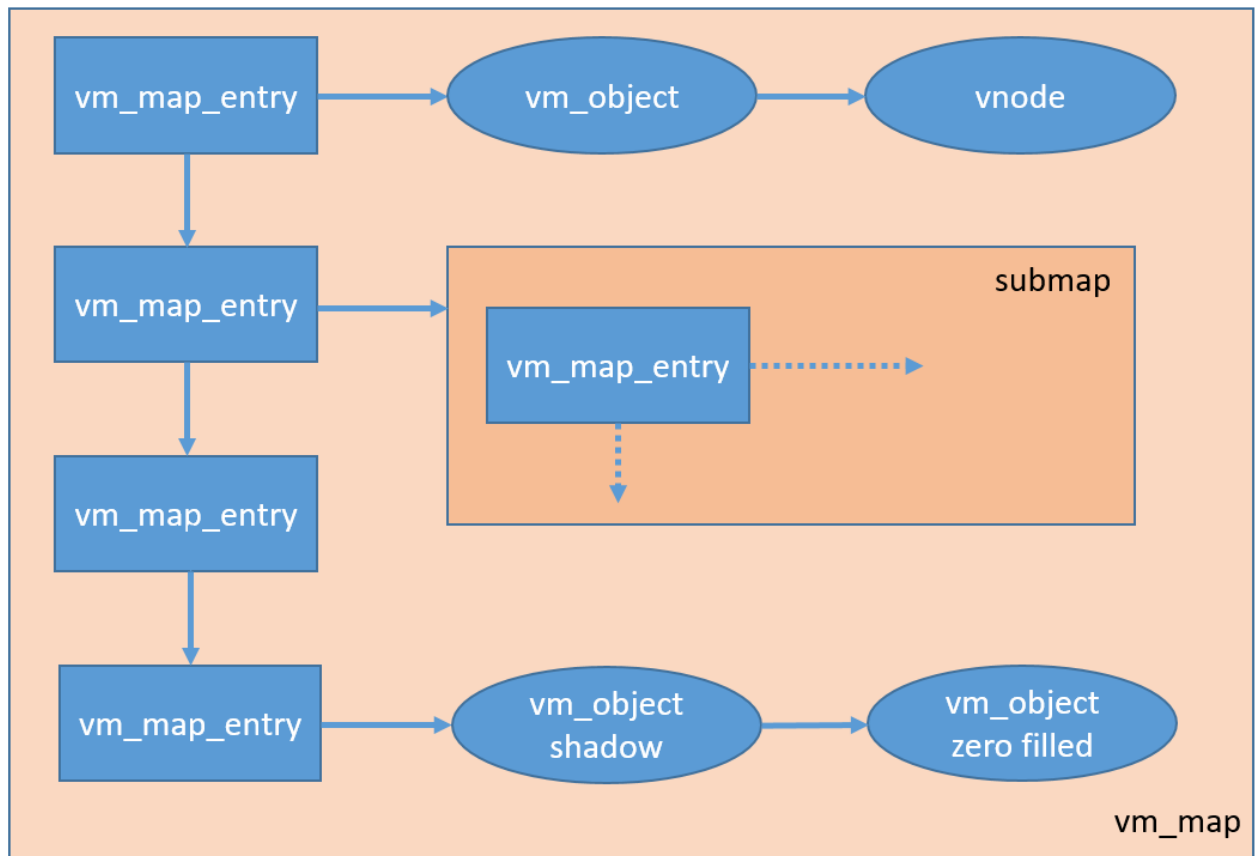


Рис. 1.3. Карта виртуальной памяти процесса

производим ее парсинг. В заголовке карты находится первый элемент списка записи. Для каждой записи ищем объект и проверяем принадлежит ли он к файлу с удаленным хранилищем. При нахождении объекта подменяем указатель на новый *vm\_object* с пустыми страницами. Структуры данных представлены в листинге 1.7.

```

struct _vm_map {
    lck_rw_t lock;
    struct vm_map_header hdr;
    ...
}

```

```

struct vm_map_header {

```

```

struct vm_map_links links; /* first, last, min, max */
int      nentries; /* Number of entries */
...
};

struct vm_map_links {
    struct vm_map_entry *prev;    /* previous entry */
    struct vm_map_entry *next;    /* next entry */
    vm_map_offset_t    start;    /* start address */
    vm_map_offset_t    end;      /* end address */
};

struct vm_map_entry {
    struct vm_map_links links;    /* links to other entries */

    struct vm_map_store store;

    union vm_map_object vme_object; /* object I point to */
    vm_object_offset_t  vme_offset; /* offset into object */
    ...
}

typedef union vm_map_object {
    vm_object_t    vmo_object; /* object object */
    vm_map_t       vmo_submap; /* belongs to another map */
} vm_map_object_t;

```

Листинг 1.7. Структуры данных *vm\_map*

## Глава 2

## Перехват VFS операций

## 2.1. Описание перехватов

*Перехват/Перенаправление (Hook, Interception)* - способ вставки собственных обработчиков до и после вызова функции. Псевдокод представлен на рисунке 2.1. Заметим, что в данном примере функция *BEFORE* может осуществлять фильтрацию вызова оригинальной функции при возврате ненулевого значения. Такой подход может понадобиться при блокировании доступа к файлу и возвращения *EPERM* на открытии.

```
int HOOK_FUNC(params)
{
    int ret = 0;
    ret = BEFORE(params);
    if (!ret)
        int ret = ORIGINAL(params);

    AFTER(params, ret);
    return ret;
}
```

Листинг 2.1. Псевдокод перехвата



## 2.2. Vnode перехваты

### 2.2.1. Способы перехвата

Для создания файлов с виртуальным хранилищем нужны перехваты многих *VNOP* функций у *vnode*. Рассмотрим возможные варианты вставки *hook* функции в *VNOP* функцию и их сравнение в таблице 2.1.

Сравнение	<i>v_op</i> in <i>vnode</i>	<i>func</i> in <i>mount v_op</i>
Перезаписи	$O(vnode)$	$O(mount * func)$
Аллокации	$O(mount * v_op)$	$O(1)$
Защита	отсутствует	Read Only
Производительность	перехват нужных <i>vnode</i>	перехват всех <i>vnode</i>

Рис. 2.1. Таблица способов перехвата

В таблице приведено 2 вида перехватов: перезапись всей таблицы *v\_op* в нужной *vnode* и перезапись необходимой функции *VNOP* в таблице, хранящейся в *mount*.

Перезапись всей таблицы требует создание *полной копии v\_op* и последующей вставки нового указателя в *каждую нужную vnode*. В копии *v\_op* производится подмена указателей необходимых функций на *hook*. В альтернативном варианте *hook* вставляется непосредственно в таблицу, что не требует аллокации данных, но таблица в *mount* является защищенной с правами *ReadOnly* как статические данные в *kext*, отвечающий за работу с *FS*.

При перезаписи *v\_op* только в нужных *vnode* можно обеспечить лучшую гранулярность и производительность. В случае перезаписи всей функции в таблице, необходимо производить фильтрацию операций для *vnode*, наблюдение за которыми не нужно. Подобную фильтрацию возможно осуществить при помощи *hashtable* в *kext* или *per vnode хранилища*.

Прямая запись в таблицу требует аккуратной работы при отгрузке *kext*. Драйвер, который имеет в себе необходимую таблицу может быть отгружен и указатели в его статические данные будет некорректным. В первом варианте подобная проблема не может возникнуть, так как память таблицы принадлежит *kext*, который осуществляет подмену указателей и при отгрузке достаточно пройти по всем *vnode* и произвести обратную запись оригинального указателя. Однако, при подмене *v\_op* в *vnode* нужно следить за временем жизни *vnode*, при переиспользовании нужно восстановить оригинальный указатель на таблицу.

Последнее замечания накладывает существенные ограничения на второй вариант *hook*, поэтому в этой работе будет использована перезапись *v\_op* в *vnode*, но с помощью дополнительных проверок можно использовать и второй вариант.

### 2.2.2. Поиск полей *vnode*

#### Эвристический метод

Поля структуры *struct vnode* не являются открытыми в *KPI*, так как поля *vnode* могут изменяться при смене версии ядра, но расширения ядра *XNU* должны работать на любой версии системы. Поэтому в *KPI* существуют обертки над полями структуры, такие как *vnode\_parent* для получения *v\_parent*, *vnode\_tag* для получения *v\_tag*, *vnode\_setparent* для записи в *v\_parent* и т.п. Не ко всем полям структуры есть доступ через *KPI*, в частности невозможно получить доступ к полю *v\_op*. В этой секции будут рассмотрены способы нахождения смещения *v\_op* в структуре *struct vnode*.

Рассмотрим сначала простой вариант. В приватной структуре *struct vnode* (1.1) можно увидеть, что поля *v\_op* и *v\_mount* находятся на расстоянии 8 байт. Поле *v\_mount* можно получить через функцию в *KPI* *vnode\_mount*.

Производим поиск значения, которое возвращается в функции *vnode\_mount* и находим его смещение в структуре. Далее вычитаем из сдвига 8 и получаем итоговое смещение поля *v\_op*. Пример функции, делающий поиск приведен в 2.2.

Заметим, что такое расположение полей в структуре *vnode* не является гарантированным и может измениться в следующих версиях системы.

```
// Requires fixed struct vnode

...

int (**v_op)(void*);

mount_t v_mount;

...

int find_vop_offset(vnode_t vp)
{
    void* needle = vnode_mount(vp);
    void** haystack = (void**) vp;
    int i;
    for (i = 0; ; i++)
    {
        if (haystack[i] == needle)
            break;
    }

    return (i - 1) * sizeof(void*);
}

VOPFUNC* get_vop(vnode_t vp)
```

```

{
    return (VOPFUNC*)((char*)vp + find_vop_offset(vp));
}

```

Листинг 2.2. Нахождение смещение поля *v\_or*

## Динамическое дизассемблирование

Более надежный способ нахождения смещений полей в структуре - использование динамического дизассемблера в ядре, например *distorm3*. Для этого рассматривается скомпилированный код функции, осуществляющей доступ к нужному полю через операции разыменования, такие как *mov...* и *lea*. Будем такой парсинг функции называть *эмуляцией*.

Рассмотрим скомпилированный код функции *VNOP\_CREATE* в различных вариантах ядра *xnu*. В *release* 10.14.2 версии *amd64* код ассемблера приведен в листинге A.1.

Функций *VNOP\_CREATE* получает информацию о таблице *v\_or* через первый аргумент функции *dvp*. В соглашении о вызовах *System V AMD64 ABI* принято передавать первый аргумент через параметр *rdi*. Будем следить за регистрами в которые будет перемещено значение *rdi*. Легко увидеть, что такими регистрами являются только *r13* и *rdi*. Далее для получения значения *v\_or* используется инструкция *mov rax, [r13+0xD0]* и искомое значения смещения является *0xD0*. Отсюда требуется найти инструкцию вида *mov REG0, [REG1+OFFSET]*, где *REG1* - регистр, за которым производится наблюдение. Далее по коду можно увидеть вызов функции *create* из таблицы *call qword ptr [rax+rcx\*8]*, что является подтверждением корректности.

Теперь рассмотрим ту же функцию *VNOP\_CREATE* в ядре *debug* 10.13.6. *Debug* версии *xnu* имеют существенное большее число проверок и являются менее оптимизированными, но подобный код упрощает отладку ядра с сим-

волами. Листинг приведен в А.2.

Для сохранения отладочной информации данные сохраняются не только в регистрах, но и на стеке, поэтому необходимо следить за перемещениями переменной *rdi* на стеке тоже. Будем обозначать переменные на стеке как  $rdp + OFFSET$ . Легко увидеть, что используемые переменные будут *rdi*,  $rbp + 0x18$ , *rcx* (временно),  $rbp + 0x68$ , *rcx*. Искомая инструкция аналогична *release* случаю. Также заметим, что подтверждающая инструкция требует поддержки загрузки эффективного указателя *lea*, которая используется для загрузки *vnop\_create\_desc*.

Опишем методы использования дизассемблера *distorm3* для эмуляции функций. Будем называть *уровнем* количество разыменований переменной. Считаем, что поле без разыменований находится на нулевом уровне.

Рассмотрим двумерный массив, индексируемый по регистрам/смещениям стека и уровню, хранящий смещение на текущем уровне и смещение предыдущего уровня. Изначально заполним всю таблицу значением -1, что будет соответствовать неиспользованной переменной.

Ассемблерные инструкции производят сдвиги полей в таблице аналогично динамическому программированию. Любые операции, имеющие в качестве цели регистр выставляют -1 в смещение данного уровня, так как значение регистра перезаписано. Далее для каждого уровня производим сдвиг, зависящий от инструкции, смотреть таблицы 2.1, 2.2, 2.3. Эмуляция останавливается по условию, например вызов функции с параметрами. Пользователь считывает поля таблицы для требуемого регистра и получает смещение в структуре.

В примерах приняты обозначение смещений  $\frac{A}{B}$ , *A* - текущий уровень, *B* - предыдущий уровень.

Подобный способ является более надежным, чем предположение о фиксированности поля *v\_mount*, однако требует эмуляции функции и расчи-

## MOV RBX, RDI

deref	<i>rax</i>	<i>rbx</i>	<i>rcx</i>	<i>rdx</i>	<i>rdi</i>	<i>rsi</i>	...
0		$\frac{18}{8}$ ←			$\frac{18}{8}$		...
1		$\frac{28}{0}$ ←			$\frac{28}{0}$		...
2		$\frac{-1}{-1}$			$\frac{-1}{-1}$		...
3		$\frac{-1}{38}$			$\frac{-1}{-1}$		...

Таблица 2.1. Сдвиги полей при перемещении

## LEA RBX, [RSI + o]

deref	<i>rax</i>	<i>rbx</i>	<i>rcx</i>	<i>rdx</i>	<i>rdi</i>	<i>rsi</i>	...
0		$\frac{8+o}{8}$ ←			$\frac{8}{8}$		...
1		$\frac{-1}{0}$			$\frac{-1}{18}$		...
2		$\frac{-1}{-1}$			$\frac{-1}{-1}$		...
3		$\frac{10+o}{0}$ ←			$\frac{10}{0}$		...

Таблица 2.2. Сдвиги полей при перемещении с смещением

## MOV RAX, [RDI + o]

deref	<i>rax</i>	<i>rbx</i>	<i>rcx</i>	<i>rdx</i>	<i>rdi</i>	<i>rsi</i>	...
0	$\frac{-1}{8}$				$\frac{-1}{8}$		...
1	$\frac{-1}{0}$				$\frac{0}{18}$		...
2	$\frac{0}{0+o}$ ←				$\frac{10}{0}$		...
3	$\frac{0}{10+o}$ ←				$\frac{-1}{-1}$		...

Таблица 2.3. Сдвиги полей при разыменовании

тывает на ограниченный круг используемых функций *mov* и *lea* в данном случае. Расширение поддерживаемых инструкций эмуляции, например обнуление регистра при помощи *xor*, может дать более точные результаты. Пример реализации эмуляции функции приведен в листинге 2.3.

```
void EmulateFunction(void* code, int codeLen, int depth,
    void* ctx, EAINitCallback init, EAStepCallback step)
{
    _CodeInfo ci = {
        .code = (unsigned char*) code, .codeOffset = (_OffsetType) code,
        .codeLen = codeLen, .dt = Decode64Bits, .features = DF_NONE,
    };

    EmulateDerefs* derefs = new EmulateDerefs[depth];
    for (int i = 0; i < depth; i++) for (int j = 0; j < 16; j++)
        derefs[i][j] = { -1 };

    init(&ci, ctx, derefs); // Setup derefs like derefs[0][R_RDI] = 0;

    while (ci.codeLen != 0) {
        _DInst inst; unsigned int count = 0;
        _DecodeResult res = distorm_decompose(&ci, &inst, 1, &count);
        if (res != DECRES_SUCCESS && res != DECRES_MEMORYERR) break;
        if (count == 0 || inst.flags == FLAG_NOT_DECODABLE) break;

        switch (inst.opcode) {
            // Only one example - MOV RAX, RDI
            case I_MOV: {
```

```

_Operand op0 = inst.ops[0]; _Operand op1 = inst.ops[1];
if (op0.type == O_NONE || op1.type == O_NONE) break;

if (op0.type == O_REG && op1.type == O_REG) {
    // Only 64-bit
    if (op0.index > R_R15 || op1.index > R_R15) break;
    // Setup dynprog table shift
    for (int i = 0; i < depth; i++) {
        if (derefs[i][op1.index].localOffset != -1)
            derefs[i][op0.index] = derefs[i][op1.index];
        else
            derefs[i][op0.index].localOffset = -1;
    }
}

// Might be check like inst.opcode == I_CALL to STOP
if (step(&ci, &inst, ctx, derefs) == EA_STOP) break;
_OffsetType o = ci.nextOffset - ci.codeOffset;
ci.code += o; ci.codeLen -= o; ci.codeOffset = ci.nextOffset;
}

delete[] derefs;
}

```

Листинг 2.3. Пример эмуляции функции при помощи `distorm3`



## 2.3. KAUTH авторизация

*KAUTH* авторизация позволяет *kext* ограничивать доступ в определенным *vnode* в системе, осуществлять мониторинг операций, происходящих в системе и, существенно для данной работы, получать первичные сведения о *vnode* в системе. [2]

*KAUTH* предоставляет слушателям (*listener*) области (*scope*) наблюдения, в которых функции ядра отправляют запросы на авторизацию события. Клиент для принятия решения получает *vnode*, полномочия (*credentials*) и действие (*action*). *Credentials* позволяют получить информацию о *UserSpace* приложении, производящем действие. Функция авторизации *listener* возвращает одно из трех решений, перечисленных в таблице 2.2, префикс опущен.

DEFER	Решение не принято, передать следующему <i>listener</i>
ALLOW	Разрешить операцию, других <i>listener</i> не вызывать
DENY	Запретить операцию, других <i>listener</i> не вызывать

Рис. 2.2. Коды возврата *listener*

Функции регистрации на событие и обработчика событий *listener* описаны в 2.4.

```
// Register for events from scope
kauth_listener_t kauth_listen_scope(
    const char* identifier,
    kauth_scope_callback_t callback,
    void* idata);

// Unregister listener from events
void kauth_unlisten_scope(
    kauth_listener_t listener);
```

```
typedef int (*kauth_scope_callback_t)(
    kauth_scope_t    scope,
    kauth_cred_t     credential,
    kauth_action_t   action,
    uintptr_t        arg0,
    uintptr_t        arg1,
    uintptr_t        arg2,
    uintptr_t        arg3
);
```

Листинг 2.4. Функции регистрации *KAUTH*

Ядро *XNU* предоставляет два стандартных *scope* для работы с файлами: *FileOp scope* и *Vnode scope*. *FileOp* формально не является областью наблюдения для авторизации, но только предоставляет сведения об операциях, происходящих в системе. *Vnode scope* дает контроль над авторизацией и позволяет запрещать операции, но слушатели *Vnode scope* вызывается на порядок чаще *FileOp scope*.

В таблицах 2.3 и 2.4 представлены все , которые необходимо обработать функции авторизации. Операции из *Vnode scope* могут быть совмещены вместе в битовой маске *action*. Снова обратим внимание, что *FileOp scope* вызовы осуществляются *после* события, поэтому возврат *listener* функции будет проигнорирован. Однако во время *FileOp* вызовов все данные уже проинициализированы, поэтому можно осуществить in-мемогу сканирование.

При работе с *Kauth* необходимо помнить о фильтрации собственных запросов, в противном случае произойдет deadlock при попытке авторизовать действие под блокировкой. Простейшим решением проблемы является фильтрация путей *vnode*. Подобное решения является допустимым, но имеет ряд

OPEN	Файл $(vnode\_t)arg0$ был открыт по пути $(char*)arg1$
CLOSE	Файл $(vnode\_t)arg0$ по пути $(char*)arg1$ был закрыт
RENAME	Файл по пути $(char*)arg0$ переименован в $(char*)arg1$
EXCHANGE	Был произведен обмен данных файлов (exchangedata) по путям $(char*)arg0$ , $(char*)arg1$
LINK	Была создана жесткая ссылка ( <i>Hard Link</i> ) к файлу по пути $(char*)arg0$ по пути $(char*)arg1$
EXEC	Запущена программа с $vnode\_t(arg0)$ по пути $(char*)arg1$

Рис. 2.3. *FileOp* действия

очевидных недостатков. Во-первых, пути фильтрации могут пересекаться с другими файлами, например при фильтрации доступа к файлу `/var/db/data` необходимо отсекают аутентификацию папки `/var/db`, что недопустимо в общем случае. Во-вторых, тривиальное решение имеет плохую расширяемость, если пути прописаны в исходном коде.

Универсальное решение данной проблемы может быть использование новых *credential*, созданных *kext* из существующих *kauth\_cred* и *vfs\_context*: будем называть такие контексты *чистыми* (*Clean*). Получить *vfs\_context* можно из функции *vfs\_kernel\_context* и *kauth\_cred* из *vfs\_context\_ucred* для *vfs\_kernel\_context*. Доступ через полученные *credentials* нужно фильтровать для защиты от deadlock. Пример фильтрации представлен в листинге 2.5. Заметим, что подобный подход может быть применен только для запросов к локальному файловому хранилищу: для удаленных дисков (smbfs например) *root* может иметь недостаточно прав для записи, в таком случае необходимо создавать множество чистых контекстов для разных точек монтирования.

```
typedef vfs_context {
    thread_t thread;
```

В таблице используются обозначения

$vp = (vnode\_t)arg1$ ,  $dvp = (vnode\_t)arg2$ .

$arg0$  - *VFS context*, *credential* при авторизации.

$arg3$  - код ошибки при *KAUTH\_RESULT\_DENY*.

READ_DATA	Будет прочитано содержимое файла <i>vp</i>
WRITE_DATA	Будет записано содержимое файла <i>vp</i>
EXECUTE	Будет запущен файл <i>vp</i>
DELETE	Файл <i>vp</i> в папке <i>dvp</i> будет удален
READ_ATTRIBUTES	Будет прочитаны атрибуты файла <i>vp</i>
WRITE_ATTRIBUTES	Будет записаны атрибуты файла <i>vp</i>
READ_EXTATTRIBUTES	Будет прочитаны расширенные атрибуты (xattr) файла <i>vp</i>
WRITE_EXTATTRIBUTES	Будет записаны расширенные атрибуты (xattr) файла <i>vp</i>
READ_SECURITY	Будет прочитаны Access Control List (ACL) файла <i>vp</i>
WRITE_SECURITY	Будет записаны Access Control List (ACL) файла <i>vp</i>
TAKE_OWNERSHIP	Будет изменен владелец файла <i>vp</i>
LINKTARGET	Будет создан <i>Hard Link</i> файла <i>vp</i>
ACCESS	Специальный флаг для запроса возможности действия над файлом

Рис. 2.4. *Vnode* действия для *регулярных* файлов

```
kauth_cred_t cred;
} vfs_context_t;
```

```

void Prepare(vfs_context_t parent) {
    vfs_context_t CleanCtx = vfs_context_create(parent);
    kauth_cred_t CleanCred = kauth_cred_create(vfs_context_ucred(
        parent->cred));
    CleanCtx->cred = CleanCred;
}

bool ShouldSkip(vfs_context_t ctx, kauth_cred_t cred) {
    return ctx == CleanCtx || cred == CleanCred;
}

```

Листинг 2.5. Фильтрация Kauth запросов

## Использование Kauth

Из описания Kauth было показано, что *до* чтения файла, необходимо произвести авторизацию, поэтому *Vnode Scope Listener* может быть использован для получения *vnode*, в которую нужно произвести вставку *VOP*. Этот же *listener* может ограничивать доступ к файлу для нежелательный процесса, смотреть секцию 5.2.

## Глава 3

## Представление виртуального файла

## 3.1. Карта регионов

Для представления полученных данных на диске необходимо хранить карту блоков, которые можно отдать на чтения. В данном разделе будет рассмотрен структура данных, позволяющая работать с такой картой.

Рассмотрим действия над двумя картами  $A$  и  $B$ . *Объединение* ( $A \cup B$ ) двух карт есть новая карта, которая содержит блоки обеих карт. *Разность* ( $A \setminus B$ ) двух карт будем называть функцию, которая возвращает карту, которая содержит все блоки карты  $A$  за исключением блоков карты  $B$ . Действия *пересечение* является действие вида  $A \setminus (A \setminus B)$ .

Для имплементация класса *BlockRegions* введем рассматривать действия, которые будут изменять сам объект, но не возвращать новый экземпляр. Интерфейс представлен в листинге 3.1.

```
struct BlockRegion
{
    UInt64 start;
    UInt64 length;
};

class BlockRegionsIterator
{
public:
    virtual ~BlockRegionsIterator() {};
```

```

    virtual BlockRegion* getNext() = 0;
    virtual void reset() = 0;
};

class BlockRegions
{
public:
    virtual ~BlockRegions() {};

    virtual int add(BlockRegion) = 0;
    virtual bool checkAndRemove(BlockRegion) = 0;

    virtual BlockRegionsIterator* getIterator() const = 0;

    virtual bool isEmpty() const = 0;
    virtual void clear() = 0;
    virtual int getCount();
};

```

Листинг 3.1. Интерфейс класса *BlockRegions*

Блоки представлены в виде полуотрезков вида  $[start, end)$ ,  $start < end$ ,  $length = start - end$ , указывающие на часть файла, которая была скачена. Такой полуотрезок будем называть *регион* (*BlockRegion*).

*BlockRegions* дает интерфейс для работы с картой блоков регионов. Действия *объединение* и *разность* представлены в виде функций *add* и *checkAndRemove*. *checkAndRemove* также возвращает информация о существовании пересечения между регионом и картой.

*BlockRegionsIterator* предоставляет интерфейс для получения списка

регионов, хранящихся в *BlockRegions*. *Iterator* можно использовать для удобного расширения методов *add* и *checkAndRemove* до *...(BlockRegions\*)*, смотреть листинг 3.2.

```
void BlockRegions::FUNC(BlockRegions* regions)
{
    BlockRegionsIterator* it = regions->getIterator();
    BlockRegion* region;
    while ((region = it->getNext()))
        FUNC(*region);

    delete it;
}
```

Листинг 3.2. Удобное расширение FUNC до списка регионов

## 3.2. Список непересекающихся регионов

*BlockRegions* никак не ограничивает тип хранимых блоков. Для данной работы необходимо, чтобы блоки не пересекались, в противном случае нельзя понять каких блоков не хватает для чтения из файла. Рассмотрим реализацию интерфейса *BlockRegions\_Disjoint*, который хранит упорядоченные непересекающиеся регионы. Будем представлять набор регионов в виде односвязного списка, отсортированного по возрастанию *start*. Список организован через дополнительное хранимое поле в структуре (3.3). В классе добавим *sentinel* поле *Head*, которое будет отвечать за голову списка и будет пустым *BlockRegion\_DisjointElem*. Новый метод *merge* будет "склеивать" пересекающиеся элементы списка и будет показан позже.

```
class BlockRegions_Disjoint : public BlockRegions
```



```

{
...
protected:
    BlockRegion_DisjointElem* Head;
    virtual int merge(BlockRegion_DisjointElem* merge);
};

struct BlockRegion_DisjointElem
{
    UInt64 start;
    UInt64 length;
    BlockRegion_DisjointElem* next;
};

```

Листинг 3.3. Расширение структуры *BlockRegion*

### 3.2.1. Термины

Введем отношение порядка на регионах *BlockRegion\_DisjointElem* по полю *start*: элемент *a* меньше элемента *b*, если  $a.start < b.start$ , аналогично для меньше или равно. *Sentinel* регион меньше любого другого региона.

Назовем состояние объекта *BlockRegions\_Disjoint* валидным, если выполнены 3 условия:

1. Нет пересечений регионов,
2. Регионы в списке отсортированы по возрастанию,
3. Отсутствуют регионы нулевой длины.

Тогда можно представить наборы блоков валидного объекта в виде отрезков на оси (рис. 3.3).

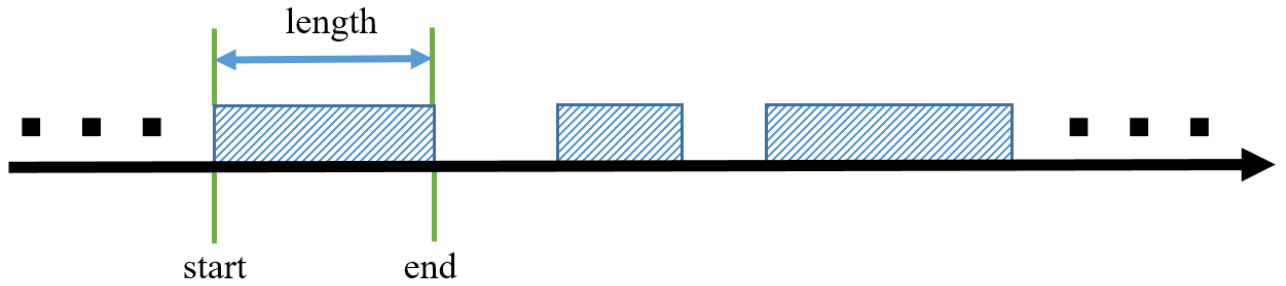


Рис. 3.1. Обозначения для регионов на оси

Будем считать, что объект *BlockRegions\_Disjoint* обязан быть в валидном состоянии после выполнения любого метода класса.

В листингах для удобства будут использованы макросы *START* и *END*, определенные в 3.4.

```
#define START(reg) ((reg)->start)
#define END(reg) ((reg)->stat + (reg)->length)
```

Листинг 3.4. Макросы доступа в *BlockRegion*

### 3.2.2. Метод *merge*

Метод *merge* является защищенным методом и помогает восстановить список из невалидного состояния при нарушении свойства 1: наличие пересекающихся регионов, при этом будем требовать выполнения свойств 2 и 3. Аргумент функции *merge* - регион *victim*, после которого происходит нарушение свойства 1, то есть регионы *victim* и *victim*  $\rightarrow$  *next* пересекаются. Псевдокод метода *merge* приведен в листинге 3.5.

```
void merge(BlockRegion* victim)
{
    if (victim == sentinel) return;

    // Find if next is intersecting
```

```

while (victim->next != NULL && END(victim) >= START(victim->next))
{
    // Merge the region and adjust victim
    merged = region->next;
    if (END(victim) < END(victim->next))
        victim->length = END(victim->next) - START(victim);

    victim->next = merged->next;
    delete merged;
}
}

```

Листинг 3.5. Псевдокод функции *merge*

Метод *merge* проверяет, что следующий регион  $victim \rightarrow next$  пересекается с  $next$  и изменяет размер  $victim$ , если требуется. Так как выполнено регионы отсортированы (свойство 2), то *while loop* достаточно для проверки всех необходимых регионов. Заметим, что не всегда необходимо изменять длину региона  $victim$ :  $victim \rightarrow next$  находится полностью внутри  $victim$  не требует изменения длины.

### 3.2.3. Метод *add*

Пусть метод *add* при вставке региона  $new$  будет находить такой наибольший элемент в списке, что его значение  $start$  меньше или равно  $start$  вставляемого региона. Обозначим найденный регион  $last$ . Заметим, что в виду существования *sentinel* региона,  $last$  всегда будет найден. Тогда возможно два варианта расположения нового региона, показанных на рисунке (3.2):  $end(last) > start(new)$  или  $end(last) \leq start(new)$ . Эти два случая соответствуют наличию или отсутствию пересечения  $last$  и  $new$ .

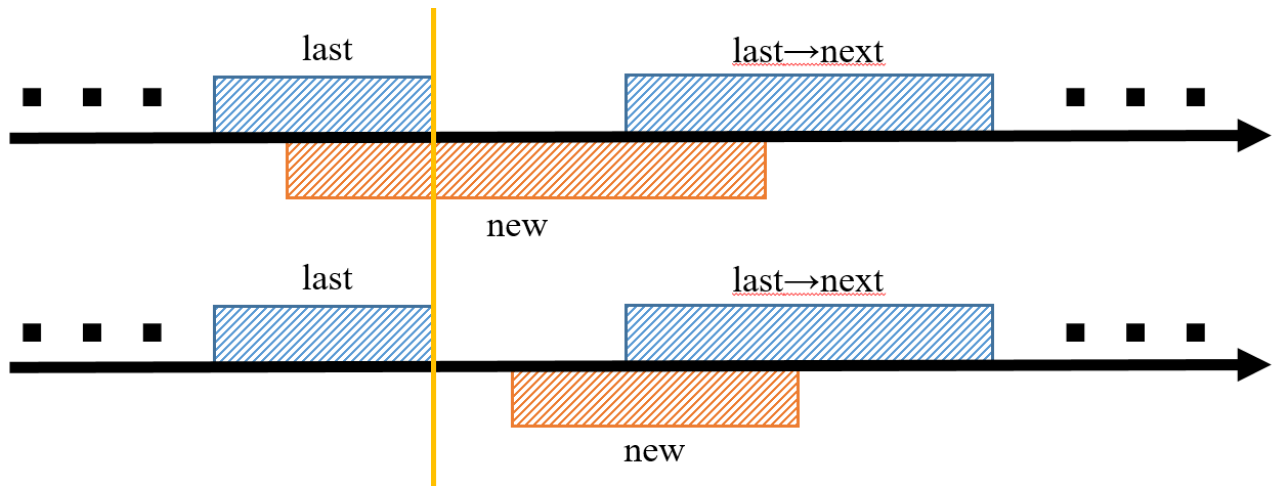


Рис. 3.2. Варианты добавления нового региона

Из рисунка можно увидеть, что данное состояние списка является невалидным, так как свойство 1 валидности не выполнено. При вставке после элемента *last* другие свойства остаются выполненными, поэтому достаточно функцию *merge* с правильным регионом, *next* которого пересекается с собой: *last* в первом случае, *new* во втором случае.

Так получаем итоговый псевдокод функции *add* (листинг 3.6). Дополнительная проверка в начале была добавлена для гарантии свойства отсутствия нулевых регионов.

```
void add(BlockRegion new)
    if (new->length == 0)
        return;

    // Find last region
    BlockRegion_DisjointElem* last = Head;
    while (last->next != NULL && START(last->next) < START(new))
        last = last->next;

    // Insert in list and do merge
```

```

new->next = last->next;
last->next = new;

if (START(new) <= END(last))
    merge(last);
else
    merge(new);
}

```

Листинг 3.6. Псевдокод функции *add*

### 3.2.4. Метод `checkAndRemove`

Для имплементации *checkAndRemove(remove)* будем идти по списку регионов и сравнивать его с *remove* регионом. Рассмотрим всевозможные способы пересечения двух регионов. Будем считать, что регион над осью - регион из списка, регион под осью - *remove* регион.

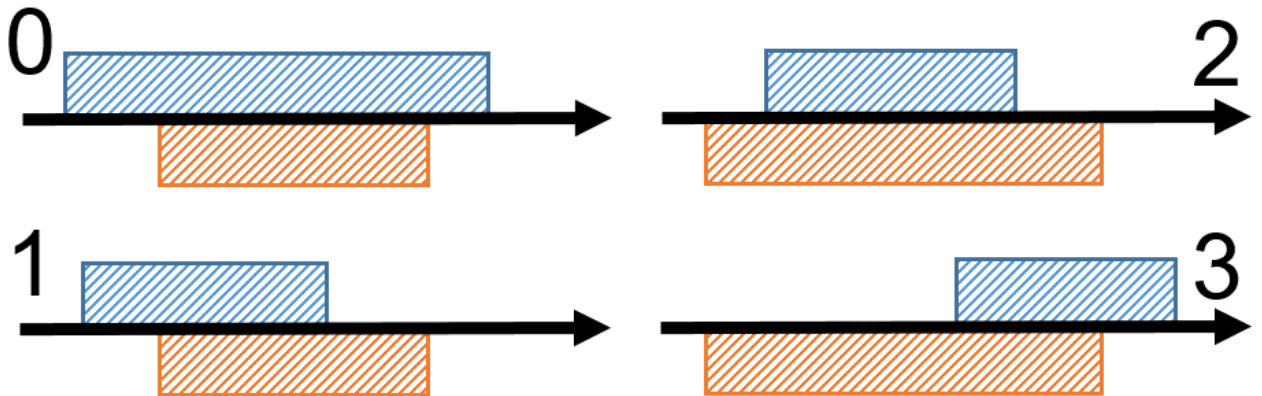


Рис. 3.3. Способы пересечения двух регионов

Заметим, что при удалении из валидного списка не может нарушиться свойства 1 и 2 валидности, так как новые регионы не создаются и сортировка оставшихся регионов не нарушена.

Рассмотрим варианты пересечения регионов и распишем как создать новую карту. Будем использовать обозначение *region* для текущего региона из списка.

$$0. \text{start}(\text{region}) \leq \text{start}(\text{remove}) \ \& \ \text{end}(\text{remove}) \leq \text{end}(\text{region}).$$

Регион *remove* лежит внутри *region*. Итоговый список теперь должен иметь 2 региона: до *remove* и после *remove*. Заметим, что данная операция требует создания нового региона, а регион *region* можно переиспользовать для обозначения региона до *remove*. Подобная процедура переиспользования будет применена в следующих случаях аналогично.

$$1. \text{start}(\text{region}) < \text{start}(\text{remove}) < \text{end}(\text{region}) < \text{end}(\text{remove}).$$

Конец *region* находится в *remove*. В этом случае достаточно лишь поменять длину региона *region*. Так как условия строгие, то региона нулевой длины получиться не может.

$$2. \text{start}(\text{remove}) \leq \text{start}(\text{region}) \ \& \ \text{end}(\text{region}) \leq \text{end}(\text{remove}).$$

Регион *region* полностью находится внутри региона *remove*. Достаточно удалить такой регион из списка. Обратим внимание, что данный случай покрывает краевые случаи равенства одного или двух концов.

$$3. \text{start}(\text{remove}) < \text{start}(\text{region}) < \text{end}(\text{remove}) < \text{end}(\text{region}).$$

Начало *region* находится в *remove*. В этом случае меняем начало региона *region* на значения конца региона *remove*. Так как условия строгие, то региона нулевой длины получиться не может.

Понятно, что данная процедура является корректной: всевозможные случаи расположения двух регионов, включая краевые случаи, рассмотрены. Также предположим, что случай равенства и начала, и конца регионов

*region* и *remove* есть случай 3. Тогда, никакой регион не может удовлетворять одновременно двум случаям: если один из концов равен другому, то это может быть только вариант 0 для другого конца снаружи или вариант 2 для другого конца внутри. Если равенство отсутствует, то из-за строгих сравнений может быть выполнен лишь один случай. При этом легко убедиться в том, что если регионы не пересекаются, то есть  $end(remove) \leq start(region)$  или  $end(region) \leq start(remove)$ , они не удовлетворяют ни одному из представленных условий.

Приведем псевдокод для данных условий в листинге 3.7. В цикле проходятся все регионы до конца *remove* и для каждого из них проверяются условия. Обратим внимание, на способ получения следующего региона: сохраняется значение *previousRegion*, через *next* которого получаем следующий в списке регион. Во время проверки условий *region* может быть удален, тогда выставляется новое значение *next* для *previousRegion*. Также заметим, что важно выставлять корректно новые *start* и *length* для переиспользованных регионов, *length* должен быть записан раньше, чем *start* из-за метода определения макросов *START* и *END*.

```
bool checkAndRemove(BlockRegion remove)
{
    // Do not try to remove empty region
    if (remove.length == 0)
        return false;

    bool isInRegions = false;

    BlockRegion region = Head->next;
    BlockRegion previousRegion = Head;
```

```

// Optimization for definite not intersecting region
while (region != NULL && START(region) < END(remove)) {
    // Condition 0: Split existing region
    if (START(region) <= START(remove) && END(remove) <= END(region))
    {
        // Leftover region from right
        if (END(region) - END(remove) != 0) {
            BlockRegion leftoverRegion = new BlockRegion;
            leftoverRegion->start = END(remove);
            leftoverRegion->length = END(region) - END(remove);
            leftoverRegion->next = region->next;
            region->next = leftoverRegion;
        }

        // Leftover region from left is reused from region
        region->length = START(remove) - START(region);
        if (region->length == 0) {
            // This is set to make "region = previousRegion->next" command
            // be universal
            previousRegion->next = region->next;
            delete region;
            region = previousRegion;
        }

        isInRegions = true;
    }
}

```



```

// Condition 1: End is in check region -> move end
if (START(region) < START(remove) && START(remove) < END(region)
    && END(region) < END(remove)) {
    region->length = START(remove) - START(region);
    isInRegions = true;
}

// Condition 2: Current region is INSIDE check region -> delete,
// fix current region
if (START(remove) <= START(region) && END(region) <= END(remove))
{
    // Should be done before delete
    previousRegion->next = region->next;
    delete region;

    region = previousRegion;
    isInRegions = true;
}

// Condition 3: Current region is intersecting with check region
// -> move start
if (START(remove) < START(region) && START(region) < END(remove)
    && END(remove) < END(region)) {
    // Order is important!
    region->length = END(region) - END(remove);
    region->start = END(remove);
}

```

```

        isInRegions = true;
    }

    previousRegion = region;
    region = previousRegion->next;
}

return isInRegions;
}

```

Листинг 3.7. Псевдокод функции *checkAndRemove*

### 3.3. Использование

Список регионов *BlockRegion\_Disjoint* можно хранить для каждого виртуального файла в *расширенном атрибуте (xattr)*. При попытке чтения из файла производится чтение данных из регионов, которые до этого были еще не считаны. Псевдокод получения несчитанных регионов приведен в листинге 3.8. Если количество отсутствующих регионов равно нулю, то запрос клиенту можно не производить и так оптимизировать работу.

```

BlockRegions getUnreadRegions(vnode_t vp, BlockRegion regToRead)
{
    BlockRegions presentedRegions = REGIONS(vp);
    BlockRegions unreadRegions;
    unreadRegions.add(regToRead);
    foreach (Region reg in presentedRegions)
    {

```

```
unreadRegions.checkAndRemove(reg);  
}  
  
return unreadRegions;  
}
```

Листинг 3.8. Псевдокод функции *checkAndRemove*

## Глава 4

## Структура UserSpace клиента

## 4.1. Транспорт Kernel - User

Для работы виртуальных файлов нужен UserSpace клиент, который будет предоставлять содержимое удаленных документов. В этой главе будет рассмотрен транспорт, который позволит получать данные, само устройство клиента может быть любым и зависит от применения виртуальных файлов, это может быть облако или архив. [3]

*Kext* для пользователей в *UserSpace* является сервисом, предоставляющим информацию. Время жизни клиента должно определять поведение *kext*, например смерть клиента не должна приводить к ошибкам в ядре.

## 4.1.1. IOUserClient

При регистрации создается объект наследника класса *IOUserClient*. В листинге 4.1 приведен пример кода, который позволяет найти в дереве *IOKit kext*. Объект *io\_connect* может быть использован для организации транспорта.

```
io_connect_t open_connection(char* driverName)
{
    kern_return_t ret = KERN_SUCCESS;
    CFDictionaryRef classToMatch = NULL;
    io_service_t serviceObject;
    io_connect_t connection;
    kern_return_t kr;
```

```

classToMatch = IOServiceMatching(driverName);
serviceObject = IOServiceGetMatchingService(
    kIOMasterPortDefault, classToMatch);
IOServiceOpen(serviceObject, mach_task_self(), type, &connection);
IOObjectRelease(serviceObject);
return connection;
}

```

Листинг 4.1. Нахождения *kext* в *IOKit* дереве

Для вызова методов ядра используется функция *IOConnectCallMethod*, которая копирует данные клиента и вызывает функцию *externalMethod* в *kext*. Клиент может передать и получить 2 типа данных, числа *uint64* или структуру, они упаковываются в объект *IOExternalMethodArguments*. *Kext* переопределяет функцию *IOUserClient :: externalMethod* и передает управление в зависимости от селектора (*selector*), заменяя статический экземпляр объекта *IOExternalMethodDispatch*. *IOUserClient :: externalMethod* проверяет валидность размеров переданных клиентом данных и вызывает функцию, указанную в *IOExternalMethodDispatch*. Заметим, что допустима передача данных в структуре переменной длины, для этого необходимо указать размер -1 в поле *check...*. В листинге 4.2 приведены прототипы функций в *Kernel* и *UserSpace*.

```

kern_return_t IOConnectCallMethod(mach_port_t connection, uint32_t
    selector,
    const uint64_t* input, uint32_t inputCnt,
    const void* inputStruct, size_t inputStructCnt,
    uint64_t* output, uint32_t* outputCnt,
    void* outputStruct, size_t* outputStructCnt);

```

```

IOReturn IOUserClient::externalMethod(
    uint32_t selector, IOExternalMethodArguments* args,
    IOExternalMethodDispatch* dispatch,
    OSObject* target, void* reference);

struct IOExternalMethodDispatch
{
    IOExternalMethodAction function;
    uint32_t checkScalarInputCount;
    uint32_t checkStructureInputSize;
    uint32_t checkScalarOutputCount;
    uint32_t checkStructureOutputSize;
};

typedef IOReturn (*IOExternalMethodAction)(
    OSObject* target, void* reference,
    IOExternalMethodArguments * arguments);

```

Листинг 4.2. Прототипы структур и функций транспорта  $kext \rightarrow user$

#### 4.1.2. IOSharedDataQueue

При существующей связи  $user \rightarrow kext$  организация обратной связи  $kext \rightarrow user$  возможно многими способами. В данной работе будет рассмотрена очередь сообщения *IOSharedDataQueue* как транспорт  $kext \rightarrow user$ .

*Kext* создает экземпляр очереди с указанием размер, например, во время присоединении клиента. Клиент после инициализации создает порт для передачи данных через *IODataQueueAllocateNotificationPort*, вызывает функцию *IOConnectMapMemory* и получает указатель на разделенную память

*IODataQueueMemory* для работы с очередью. Далее клиент ждет событий о добавлении новых данных при помощи *DataAvailable* и получает их при поступлении через *Dequeue*. Пример кода клиента представлен в листинге 4.3.

```
void ListenToEvents(io_connection_t connection)
{
    mach_port_t port = IODataQueueAllocateNotificationPort();
    IOConnectSetNotificationPort(connection, 0, port, 0);

    mach_vm_address_t address = 0;
    mach_vm_size_t size = 0;
    IOConnectMapMemory(connection, 0, mach_task_self(), &address, &
        size, kIOMapAnywhere);

    IODataQueueMemory *queueMemory = (IODataQueueMemory *)address;
    do {
        while (IODataQueueDataAvailable(queueMemory)) {
            void* msg = malloc(entry->size);
            kr = IODataQueueDequeue(queueMemory, msg, &entry->size);
            { /* Parse message here */ }
            free(msg);
        }
    }
    while (IODataQueueWaitForAvailableData(queueMemory, port) ==
        kIOReturnSuccess);

    IOConnectUnmapMemory(connection, 0, mach_task_self(), address);
}
```

}

Листинг 4.3. *UserSpace* код для работы с *IOSharedDataQueue*

Со стороны *Kernel kext* должен предоставить зарегистрировать порт, переопределяя метод *IOUserClient :: registerNotificationPort* и устанавливая его в созданную очередь при помощи метода *IOSharedDataQueue :: setNotificationPort*. Для отправки сообщений *kext* должен использовать метод *IOSharedDataQueue :: enqueue*, который *асинхронно* добавляет новый элемент в очередь.

#### 4.1.3. Синхронный транспорт

Для работы виртуальных файлов на операции *Read* должна происходить *синхронная* загрузка данных, в противном случае *Read* считает невалидное содержимое файла. Сформулируем требования для транспорта, достаточные для организации виртуальных файлов.

1. Синхронность. *Kext* на операции чтения должен ожидать пока сервис не загрузит корректные данные файл,
2. Наличие тайм-аута (*timeout*). Иметь *timeout* удобно для отладки и уменьшения нагрузки на приложение, предоставляющее данные (режим *Passthrough*),
3. Очистка аллоцированных объектов. Все объекты должны быть освобождены после использования.

Ожидаемые прототипы функций представлены в листинге 4.4.

```
/// Sync header
struct SyncMsg {
```



```

uintptr_t ptrSelf;
uintptr_t mutex;
uintptr_t time;
};

/// Sends msg to userspace and waits for UnlockSyncMsg
/// ptr & time in SyncMsg should not be filled
bool SendSyncMsg(struct SyncMsg* msg, UInt32 msgSize);

// Callback to unlock waiting sync msg
// Ptr should be the one filled in struct SyncMsg
bool UnlockSyncMsg(uintptr_t ptrSelf, uintptr_t time);

```

Листинг 4.4. Прототипы функций синхронного транспорта

Заметим, что очередь является асинхронной: метод *enqueue* не ждет пока клиент вызовет функцию *Dequeue*. Рассмотрим способ сделать синхронный транспорт из асинхронной очереди. Будем при отправке создавать *conditional variable* и *mutex*, которые будем разблокировать при получении нотификации об обработке. Функция *msleep* позволяет ожидать событие на *conditional variable*, заданной как произвольный указатель (*msleep channel*). Для простоты достаточно использовать сам указатель на аллоцированный *mutex* или указатель на сообщение, которое нужно отправить.

Для требования очистки будет предполагать, что функция, создавшая *mutex* должна его и очистить. В таком предположении получаем схему работы синхронного интерфейса с тайм-аутами, представленную на рисунке 4.1. Нормальный режим работы представлен в первой временной секции: *kext* инициализирует сообщение обфусцированным указателем на *SyncMsg*, отправляет сообщение в очередь, *msleep* ожидает событие от *UnlockMsg*, кли-

ент обрабатывает сообщение и вызывает *UnlockMsg*, *kext* очищает аллоцированные данные. Множественные *msleep* нужны для обнаружения смерти клиента, если никто не сможет вызвать *UnlockMsg*, то ожидание можно остановить.

При первом тайм-ауте, после  $MsleepCount * Repeat$  секунд, берется последний *msleep* на время *Unlock Timeout* секунд. В это время у клиента есть последний шанс разблокировать *kext*. После *Unlock Timeout* секунд клиент больше не должен доступаться к аллоцированной памяти. *kext* при этом сам разблокирует *mutex* и ждет еще *Mutex Free Timeout*. Этот тайм-аут нужен для случая, когда *UnlockMsg* уже начал доступ к функции, а *Unlock Timeout* уже прошел. После окончания *Mutex Free Timeout* данные очищаются.

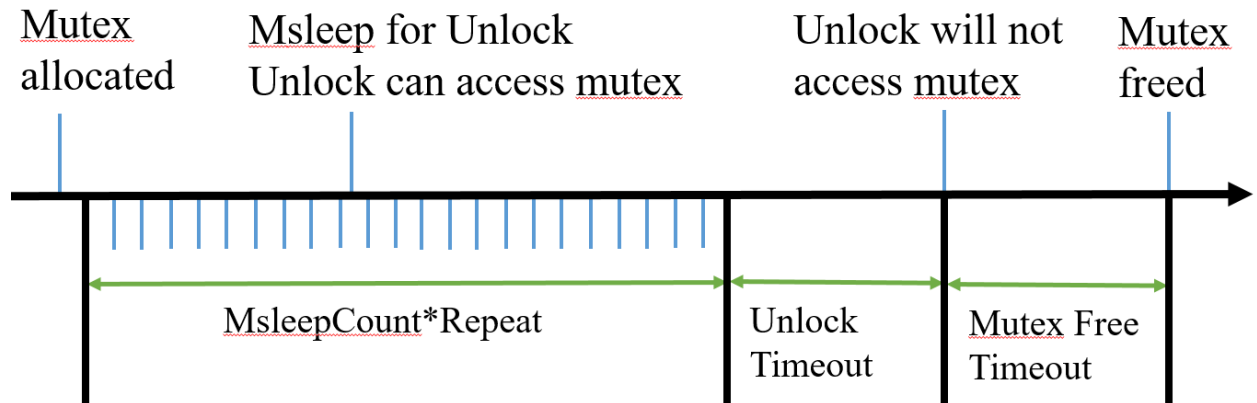


Рис. 4.1. Схема работы синхронного интерфейса

## 4.2. Схема запросов/ответов

Рассмотрим схему запросов и ответов для клиента и *kext*. Рабочий режим начинается при установке путей за которым необходимо следить. *Kext* перехватывает операции записи и при вызове *VNOP\_WRITE* отправляет сообщение клиенту с регионами, которые нужно скачать. Будем считать, что количество регионов ограничено восемью, при необходимости сообщение

будет отправлено несколько раз. Также заметим, что для открытия файла достаточно знать его *vnode\_id* и *dev\_id*, однако путь является более переносимым. Структура сообщения представлена в листинге 4.5.

```
struct DownloadRequestMsg
{
    struct SyncMsg header;
#ifdef COMPAT
    const char path[MAXPATHLEN];
#else
    uint64_t vnodeId;
    uint64_t devId;
#endif
    BlockRegion[MAX_COUNT];
};
```

Листинг 4.5. Синхронное сообщение для загрузки регионов в файл

Клиент в ответ вызывает метод *kext* для разблокирования синхронного сообщения, *kext* разрешает чтения файла.

Опишем дополнительные методы управления *kext*. Для сохранения информации о регионах файла добавим функции для доступа в расширенным атрибутам или к *per vnode* хранилищу. *Kext* также будет кэшировать информацию о статусе файла, обеспечим доступ к кэшу через функции *addToCache* и *removeFromCache*. Для изменения содержимого файла со стороны клиента дадим функции блокировки операций чтения и записи *lockFileRead* и *lockFileWrite*. Для очистки кэша после дегидратации, введем метод для удаления *UBC* кэша *invalidateVnodeCache*.

## Глава 5

## Имплементация и производительность

## 5.1. Связи объектов

В данной работе *userspace* процесс не будет рассматриваться конкретно в виду его сложности с точки зрения работы с данными. *Next* будет состоять из нескольких классов и их отношениях. Схема связей классов представлена на рисунке 5.1.

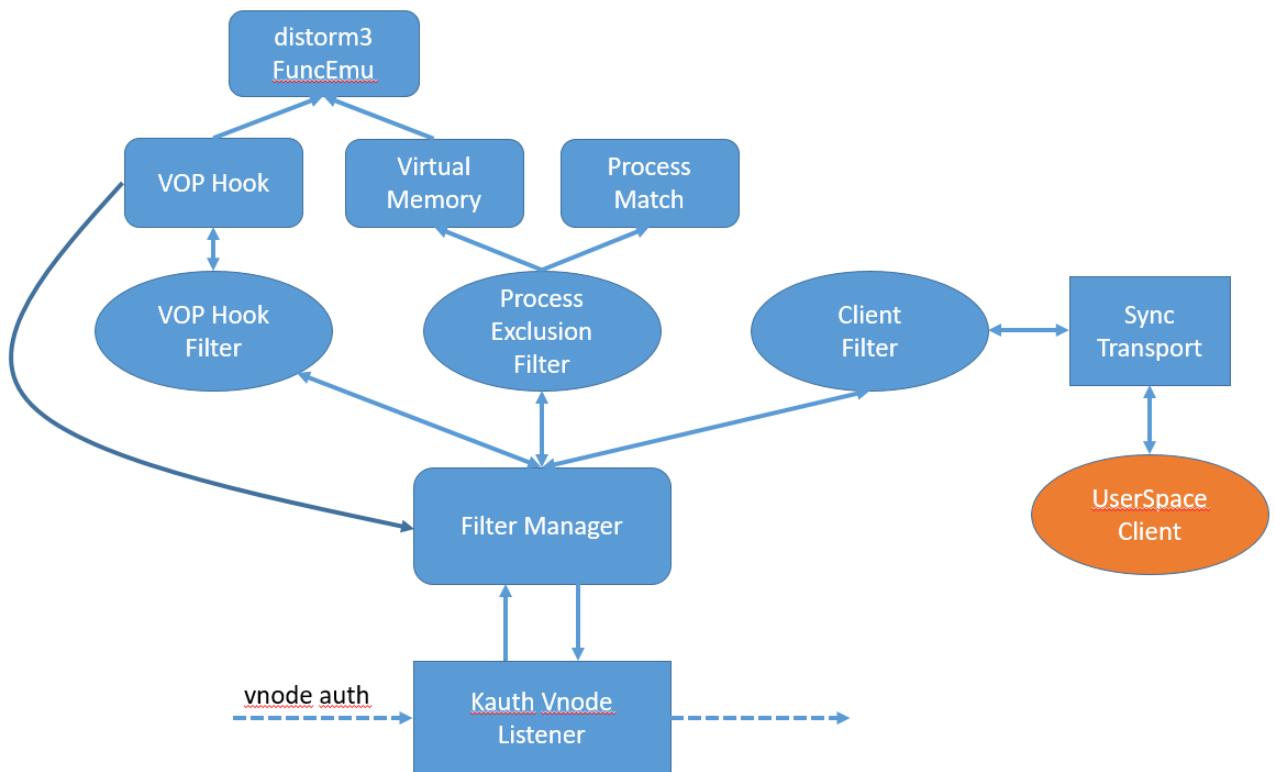


Рис. 5.1. Схема классов

При авторизации чтения из файла на *VnodeOp* коллбэке в *KauthFilter* производится проверка является ли файл виртуальным. Если файл виртуальный, запрос отправляется в *Filter Manager*, который в порядке приоритетов вызывает фильтры. *VOP Hook Filter* проверяет перехвачена ли таблица *VOP*

и производит ее перехват. *Process Exclusion Filter* проверять может ли процесс производить чтение файла и может заблокировать доступ нежелательных процессов. На операции *pagein* в случае необходимости производится итерация по списку записей карты виртуальной памяти и подменяется *vm\_object*. *Client* при помощи методов *Block Region* находится та часть файла, которую необходимо скачать с удаленного хранилища. Если пересечение не пусто, отправляется синхронный запрос *UserSpace* клиенту и ожидается пока в файл не будут записаны данные.

## 5.2. Защита от фиктивного чтения

Наибольшая проблема наличия виртуальных файлов в системе - их *фиктивное чтение*. Процессы, которые производят индексацию локальных файлов рассчитывают, что содержимое любых файлов является постоянным и чтение безопасно. Для виртуальных файлов подобное чтение является недопустимым, так как оно порождает полную выгрузку файла с удаленного хранилища.

### 5.2.1. Списки фильтрации приложений

Для разрешения данной проблемы будем производить изменение поведения чтения по *спискам фильтрации* двух категорий:

1. Запрет чтения файла процессам,
2. Отдача "пустых" данных.

При полном запрете чтения данных приложение никогда не будет получать некорректные данные, однако подобное поведение может породить некорректную работу. Так, при работе с *файлом, отображенным в память*

(*memory-mapped file*) при запрете чтения приложение войдет в *deadlock* состояние на чтении байта или приведет к его падению.

При отдаче пустых данных файловая система может закэшировать фиктивные страницы и в последствии не вызывать функции чтения данных для других процессов. *UBC* при получении пустых страниц на операции *pagein* произведет их кэширование и тем самым будет требоваться последующая очистка кэша при помощи функции *ubc\_msync*.

В операционной системе macOS приложения, отвечающие за кэширование являются *mds* и *mdworker*. Их можно безопасно включить во список фильтрации 1. *Finder* и *quicklookd* производят отрисовку иконок и предварительного просмотра изображений и видеоматериалов. Заметим, что *Finder* не даст пользователю открыть файл, если он сам не может его открыть с правами пользователя, поэтому *Finder* должен находиться во втором списке фильтрации.

### 5.2.2. Проверка запущенных процессов

Рассмотрим часть структуре процесса *struct proc*.

```
struct proc {
    ...
    char p_comm[MAXCOMLEN+1]; /* Process Command Name */
    ...
    struct vnode *p_textvp;    /* Vnode of executable. */
    off_t p_textoff;          /* offset in executable vnode */
    ...
}
```

Листинг 5.1. Структура процесса

Начальную фильтрацию можно производить при помощи *имени* процесса *p\_comm*, но в системе может быть запускаемый файл с таким же именем, что будет порождать *false positive*. В структуре процесса также записана *vnode*, которая имеет в себе данные о запущенном приложении. Фильтрация по имени является достаточным признаком процесса, но является дорогостоящей операцией. Для уменьшения нагрузки можно использовать свойство уникальности файла в системе по 64-битному полю *vnode id* и 32-битному *device id*, вместе образующие 96-битный уникальный ключ *file id*.

Для нахождения *file id* в ядре достаточно открыть файл с необходимым именем, например */System/Library/.../mdworker*, и получить его атрибуты, смотреть (5.2).

```
struct FileId
{
    uint32_t devId;
    uint64_t vnodeId;
};

FileId getFileId(vnode_t vp, vfs_context_t ctx)
{
    struct vnode_attr va;

    vnode_getwithref(vp);

    VATTR_INIT(&va);
    VATTR_WANTED(&va, va_fileid);
    VATTR_WANTED(&va, va_fsid);
```

```
vnode_getattr(vp, &va, ctx);  
vnode_put(vp);  
  
return { va.va_fsid, va.va_fileid };  
}
```

Листинг 5.2. Метод получения *FileId*



## Заключение

В результате исследования было написано расширение ядра macOS, осуществляющее создание виртуальных файлов с удаленным хранилищем. При помощи перехватов операций *vnode* остается поддержка *POSIX API*, а файлы при скачивании остаются локально. Парсинг виртуальной памяти отфильтрованных процессов позволяет тонко контролировать доступ к невалидным страницам файла. Описанный синхронный протокол дает возможность гибкого соединения с *UserSpace* клиентом, при сбоях возможно использование тайм-аута и более простой проверки работоспособности.

Предложенные методы используются в Acronis для продуктов Acronis File Protect и Acronis Sync & Share для macOS.

## Список литературы

1. Apple. macos xnu source code. — Access mode: <https://github.com/apple/darwin-xnu>.
2. Apple. Technical note tn2127: Kernel authorization. — Access mode: [https://developer.apple.com/library/archive/technotes/tn2127/\\_index.html](https://developer.apple.com/library/archive/technotes/tn2127/_index.html).
3. Singh A. Mac OS X Internals: A Systems Approach. — Addison Wesley Professional, June 19, 2006.

## Приложение А

## Ассемблерные листинги функций XNU

```
mov     rbp, rsp
push    rbp
...
push    rbx
sub     rsp, 48h
lea     rax, __stack_chk_guard
mov     rax, [rax]
mov     [rbp+__dtrace_args], rax
mov     r15, r8
mov     r12, rdx
mov     rbx, rsi
mov     r13, rdi
lea     rax, vnop_create_desc kernels
mov     [rbp+var_70], rax
mov     [rbp+var_68], r13
mov     [rbp+var_60], rbx
mov     [rbp+var_58], r12
mov     [rbp+var_50], rcx
mov     [rbp+var_48], r15
mov     rax, [r13+0xD0]
movsxd  rcx, cs:vnop_create_desc.vdesc_offset
lea     rdi, [rbp+var_7]
call    qword ptr [rax+rcx*8]
```

Листинг А.1. Дизассемблированный код *VNOP\_CREATE*, *release* версия ядра

```

mov     rbp, rsp
push    rbp
...
push    rbx
sub     rsp, 48h
lea     rax, __stack_chk_guard
mov     rax, [rax]
mov     [rbp+__dtrace_args], rax
mov     r15, r8
mov     r12, rdx
mov     rbx, rsi
mov     r13, rdi
lea     rax, vnop_create_desc kernels
mov     [rbp+var_70], rax
mov     [rbp+var_68], r13
mov     [rbp+var_60], rbx
mov     [rbp+var_58], r12
mov     [rbp+var_50], rcx
mov     [rbp+var_48], r15
mov     rax, [r13+0xD0]
movsxd  rcx, cs:vnop_create_desc.vdesc_offset
lea     rdi, [rbp+var_7]
call    qword ptr [rax+rcx*8]

```

Листинг А.2. Дизассемблированный код *VNOP\_CREATE*, *debug* версия ядра