

Operating Systems

Memory Allocation

Me

February 16, 2016

- 1 Классы памяти и кто за них отвечает.
- 2 Простые аллокаторы памяти (SLOB) и Border Tags.
- 3 Аллокация больших блоков памяти.
- 4 Кеширующие аллокаторы (SLAB).

По привилегиям доступа:

- 1 привилегированная (kernel space)
- 2 не привилегированная (user space)

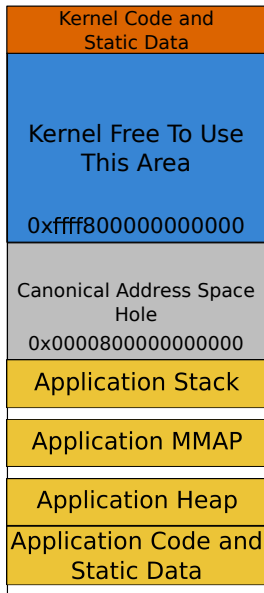
По привилегиям доступа:

- 1 привилегированная (kernel space)
- 2 не привилегированная (user space)

По способу аллокации:

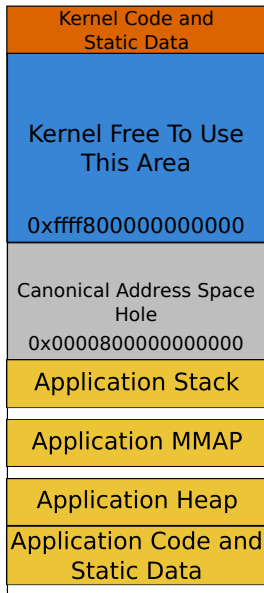
- 1 статическая память (код, глобальные переменные - размер известен заранее)
- 2 динамическая память (куча, free store и тд - размер не известен заранее)

Карта памяти



- Kernel Code and Static Data - привилегированная статическая память (System V ABI amd64, 3.5.1 Architectural Constraints, Kernel code model)
- Canonical Address Space Hole - недопустимые адреса памяти (Intel[®] 64 and IA-32 Architectures Software Developer's Manual, 3.3.7.1 Canonical Addressing)

Карта памяти



- Application Stack -
аллоцируется ОС при старте программы
- Application MMAP -
разделяемые библиотеки, mmap/munmap
- Application Heap - malloc берет память отсюда, изменяется системным вызовом sbrk
- Application Code and Static Data - статическая не привилегированная память

Простые алгоритмы аллокации памяти

Постановка задачи

Чего мы хотим:

Простые алгоритмы аллокации памяти

Постановка задачи

Чего мы хотим:

- реализовать malloc и free

Простые алгоритмы аллокации памяти

Постановка задачи

Чего мы хотим:

- реализовать malloc и free
- чем быстрее тем лучше

Простые алгоритмы аллокации памяти

Постановка задачи

Чего мы хотим:

- реализовать malloc и free
- чем быстрее тем лучше
- избежать фрагментации памяти, если получится

Простые алгоритмы аллокации памяти

Постановка задачи

Исходные данные - участок памяти:

N bytes of memory

Простые алгоритмы аллокации памяти

Постановка задачи

Исходные данные - участок памяти:

N bytes of memory

и, для удобства, какая-то память константного размера:

$O(1)$

N bytes of memory

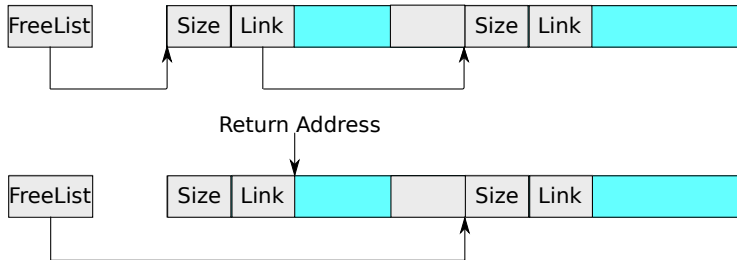
Простые алгоритмы аллокации памяти

Аллокация

Построим в памяти связный список свободных участков:

Busy

Free



Простые алгоритмы аллокации памяти

Аллокация

При аллокации проходим список свободных участков и выбираем подходящий.

Простые алгоритмы аллокации памяти

Аллокация

При аллокации проходим список свободных участков и выбираем подходящий.

Как выбрать подходящий?

Простые алгоритмы аллокации памяти

Аллокация

При аллокации проходим список свободных участков и выбираем подходящий.

Как выбрать подходящий?

- Best Fit - проходим весь список, выбираем наименьший из подходящих

Простые алгоритмы аллокации памяти

Аллокация

При аллокации проходим список свободных участков и выбираем подходящий.

Как выбрать подходящий?

- Best Fit - проходим весь список, выбираем наименьший из подходящих
- First Fit - выбираем из списка первый подходящий

Простые алгоритмы аллокации памяти

Аллокация

При аллокации проходим список свободных участков и выбираем подходящий.

Как выбрать подходящий?

- Best Fit - проходим весь список, выбираем наименьший из подходящих
- First Fit - выбираем из списка первый подходящий

Какая стратегия лучше?

Простые алгоритмы аллокации памяти

Аллокация

При аллокации проходим список свободных участков и выбираем подходящий.

Как выбрать подходящий?

- Best Fit - проходим весь список, выбираем наименьший из подходящих
- First Fit - выбираем из списка первый подходящий

Какая стратегия лучше?

- 1 науке это не известно - разные приложения используют память по разному

Простые алгоритмы аллокации памяти

Аллокация

При аллокации проходим список свободных участков и выбираем подходящий.

Как выбрать подходящий?

- Best Fit - проходим весь список, выбираем наименьший из подходящих
- First Fit - выбираем из списка первый подходящий

Какая стратегия лучше?

- 1 науке это не известно - разные приложения используют память по разному
- 2 зачастую First Fit лучше - не нужно проходить весь список при прочих равных (неизвестных)

Простые алгоритмы аллокации памяти

Аллокация

При аллокации проходим список свободных участков и выбираем подходящий.

Как выбрать подходящий?

- Best Fit - проходим весь список, выбираем наименьший из подходящих
- First Fit - выбираем из списка первый подходящий

Какая стратегия лучше?

- 1 науке это не известно - разные приложения используют память по разному
- 2 зачастую First Fit лучше - не нужно проходить весь список при прочих равных (неизвестных)
- 3 простые алгоритмы редко используются на практике - есть лучшие подходы

Простые алгоритмы аллокации памяти

Аллокация

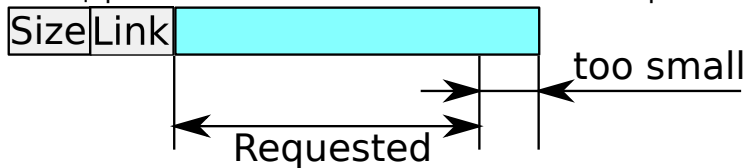
Почему бы пользователю не запоминать размер аллоцируемого блока? В простых случаях это будет работать хорошо:

- часто размер известен в момент компиляции (`sizeof(...)`)
- часто размер объекта вам нужен сам по себе - можно избежать дублирования
- пользователь сам определяет, где и как хранить размер

Простые алгоритмы аллокации памяти

Аллокация

Однако в нашем случае это не будет работать -
аллоцированный блок может быть больше запрошенного:



Простые алгоритмы аллокации памяти

Освобождение

Функция освобождения принимает указатель как аргумент, нам так же нужен размер участка памяти:

`free(ptr)`



Простые алгоритмы аллокации памяти

Освобождение

Функция освобождения принимает указатель как аргумент, нам так же нужен размер участка памяти:

`free(ptr)`



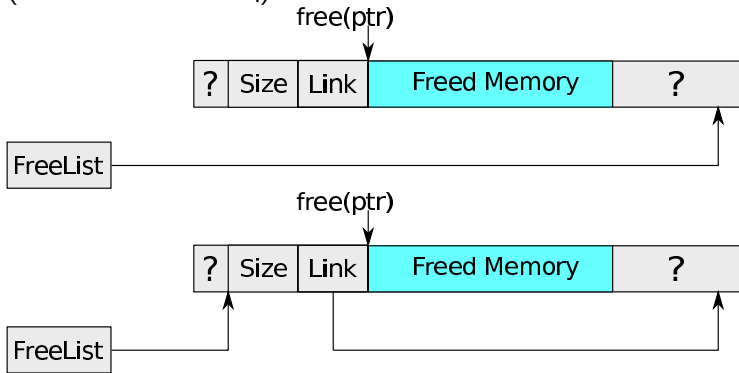
`free(ptr)`



Простые алгоритмы аллокации памяти

Освобождение

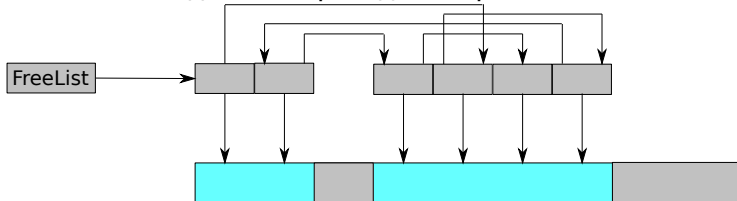
Самый простой вариант, просто добавить элемент в список (начало или конец):



Простые алгоритмы аллокации памяти

Освобождение

Рано или поздно это приведет к проблеме:



Простые алгоритмы аллокации памяти

Освобождение

При освобождении необходимо объединять соседние свободные блоки:

Простые алгоритмы аллокации памяти

Освобождение

При освобождении необходимо объединять соседние свободные блоки:

- чтобы не фрагментировать память, иначе мы не сможем аллоцировать большие участки памяти

Простые алгоритмы аллокации памяти

Освобождение

При освобождении необходимо объединять соседние свободные блоки:

- чтобы не фрагментировать память, иначе мы не сможем аллоцировать большие участки памяти
- чтобы список свободных блоков не разрастался - плохо влияет на время аллокации памяти

Простые алгоритмы аллокации памяти

Освобождение

Как объединять соседние свободные блоки:

Простые алгоритмы аллокации памяти

Освобождение

Как объединять соседние свободные блоки:

- мы можем поддерживать список отсортированным по адресу (классический версия malloc в UNIX, aka SLOB, описана в The C Programming Language)

Простые алгоритмы аллокации памяти

Освобождение

Как объединять соседние свободные блоки:

- мы можем поддерживать список отсортированным по адресу (классический версия malloc в UNIX, aka SLOB, описана в The C Programming Language)
- вместо списка можно использовать дерево - жертвуем памятью в обмен на производительность

Простые алгоритмы аллокации памяти

Освобождение

Как объединять соседние свободные блоки:

- мы можем поддерживать список отсортированным по адресу (классический версия malloc в UNIX, aka SLOB, описана в The C Programming Language)
- вместо списка можно использовать дерево - жертвуем памятью в обмен на производительность
- можно использовать Border Tags (авторство приписывают Кнуту, но идея очень очевидная)

Простые алгоритмы аллокации памяти

Освобождение

Мы уже храним служебную информацию в начале блока, давайте добавим еще и в конец:



Простые алгоритмы аллокации памяти

Освобождение

Мы уже храним служебную информацию в начале блока, давайте добавим еще и в конец:



- TAG - индикатор свободности/занятости блока (это и есть Border Tag)

Простые алгоритмы аллокации памяти

Освобождение

Мы уже храним служебную информацию в начале блока, давайте добавим еще и в конец:

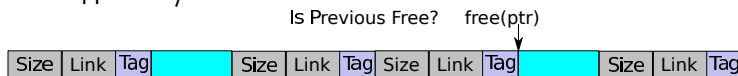


- TAG - индикатор свободности/занятости блока (это и есть Border Tag)
- Link-и в начале и в конце можно использовать как ссылки на следующий и ссылки на предыдущий блоки (просто для экономии памяти)

Простые алгоритмы аллокации памяти

Освобождение

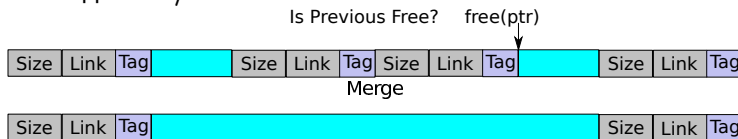
Мы знаем где находится Border Tag предыдущего (следующего) блока и можем легко проверять свободу/занятость:



Простые алгоритмы аллокации памяти

Освобождение

Мы знаем где находится Border Tag предыдущего (следующего) блока и можем легко проверять свободу/занятость:



При объединении сразу трех блоков нужно удалить один из двусвязного списка - $O(1)$.

Продвинутые алгоритмы аллокации памяти

Аллокация в несколько этапов

Современные аллокаторы памяти выделяют две стадии:

Продвинутые алгоритмы аллокации памяти

Аллокация в несколько этапов

Современные аллокаторы памяти выделяют две стадии:

- аллокация больших блоков (Buddy Allocator и Ко.):
 - аллокации происходят нечасто, большие объекты живут долго
 - чем больше блок тем меньше накладные расходы на служебные структуры аллокатора - можем хранить больше информации

Продвинутые алгоритмы аллокации памяти

Аллокация в несколько этапов

Современные аллокаторы памяти выделяют две стадии:

- аллокация больших блоков (Buddy Allocator и Co.):
 - аллокации происходят нечасто, большие объекты живут долго
 - чем больше блок тем меньше накладные расходы на служебные структуры аллокатора - можем хранить больше информации
- аллокация маленьких блоков фиксированного размера (SLAB и Co.):
 - блоки фиксированного размера проще аллоцировать
 - блоки фиксированного размера требуют меньше служебной информации
 - блоки имеют одинаковый размер не случайно - часто это объекты одного типа и это можно использовать

Buddy Allocator

Вводные положения

- вся аллоцируемая память разбита на большие блоки фиксированного размера (будем называть их PAGE)
- каждому PAGE поставлен в соответствие дескриптор (мы легко можем получить дескриптор по номеру PAGE и наоборот, считайте, что у нас есть массив таких дескрипторов), хранящий служебную информацию (свободен/занят, порядок свободного блока)
- память аллоцируется и освобождается блоками по $2^i \times PAGE$, i будем называть порядком блока
- порядок блока хранит пользователь и передает его в как функцию аллокации, так и в функцию освобождения

Ключевой концепцией для Buddy Allocator-а является понятие Buddy:

- Buddy Allocator хранит блоки в отдельных списках для каждого порядка (т. е. для каждого возможного порядка блока есть свой список), элементом списка является дескриптор первого PAGE в этом блоке;
- смежные (в памяти, а не в списке) блоки одного порядка называются Buddies (plural for buddy);
- два смежных блока (Buddies) в объединении дают один блок большего порядка, и наоборот из одного блока можно получить два Buddies меньшего порядка.

Buddy Allocator

Buddies

Order 2

Buddies

Order 1

Order 1 Block Order 1 Block

Order 0

PAGE PAGE PAGE PAGE

Buddies

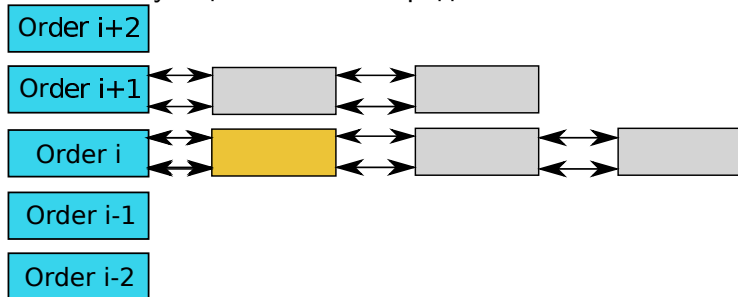
Buddies

Not Buddies

Buddy Allocator

Аллокация

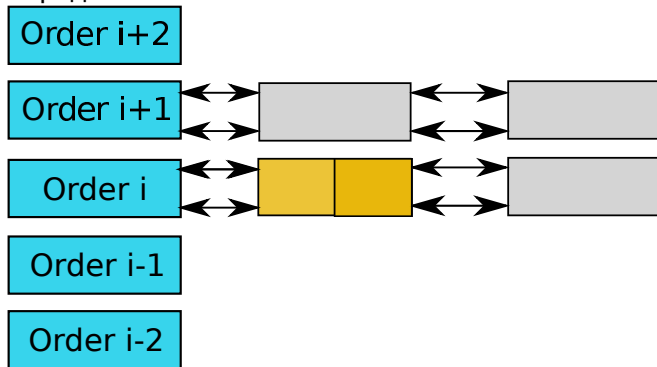
Аллокация блока порядка i происходит из списка соответствующего блокам порядка i :



Buddy Allocator

Аллокация

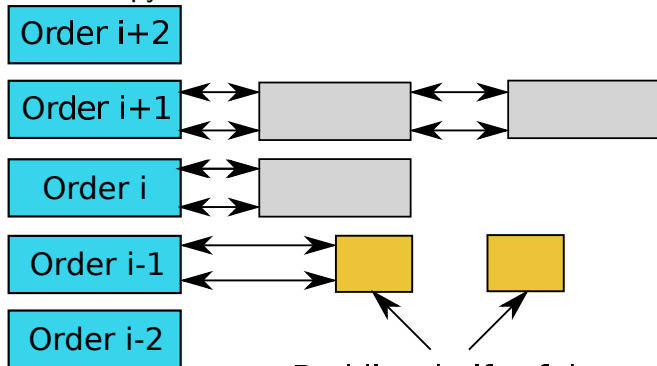
Если список пуст, ищем не пустой список большего порядка и аллоцируем из него, например, аллоцируем блок порядка $i - 2$:



Buddy Allocator

Аллокация

Блок порядка i слишком большой, поэтому делим его на две части порядка $i - 1$ и одну из частей возвращаем аллокатору:

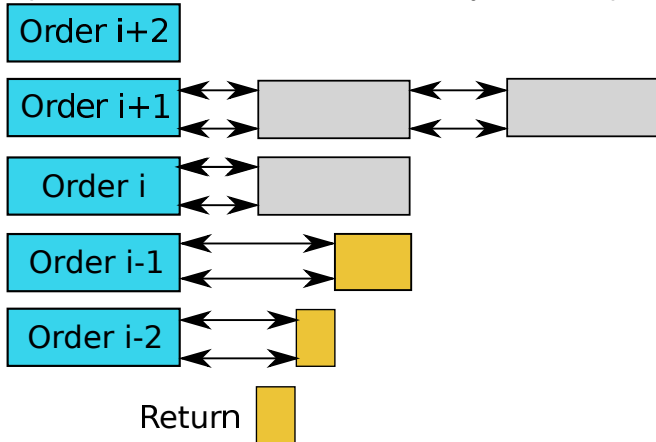


Buddies, halves of the original i order block

Buddy Allocator

Аллокация

Продолжаем пока не дойдем до нужного порядка:



Каждый свободный блок, как отмечалось выше представляется дескриптором первого PAGE, дескриптор должен хранить:

- признак занятости и свободности блока;
- порядок блока, "головой" которого является данный PAGE.

Эта информация не нужна для аллокации, но понадобится для освобождения, поэтому при разделении блока необходимо обновить дескрипторы обеих половин.

При освобождении необходимо объединять смежные блоки (Buddies), чтобы избежать фрагментации. Найти "голову" смежного блока легко:

$$Buddy_{No} = Head_{No}^{(1 \ll i)}$$

где

- $Buddy_{No}$ - номер PAGE, являющегося "головой" смежного блока;
- $Head_{No}$ - номер PAGE, являющегося "головой" блока, с которым мы работаем;
- i - порядок блока;

Освобождаемый блок можно объединить со смежным (Buddy), только если смежный блок свободен. Смежный блок свободен если:

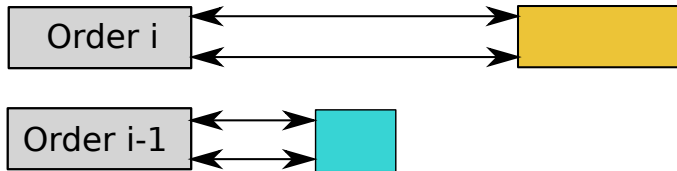
- в дескрипторе "головы" блока установлен признак свободы;
- порядок сохраненный в дескрипторе "головы" блока совпадает с порядком освобождаемого блока.

Buddy Allocator

Освобождение

Прядок блоков важен при объединении:

Free order i block

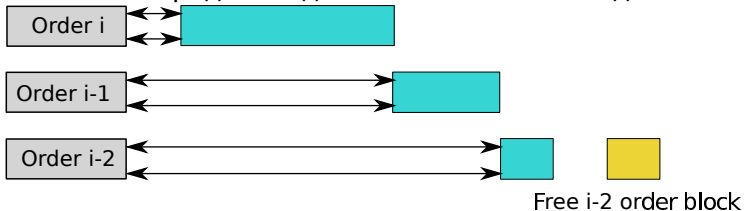


Buddy "Head" is free, but
order is different - can't merge

Buddy Allocator

Освобождение

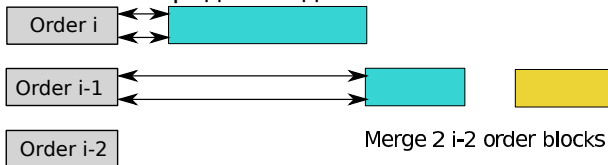
Возможно придется сделать несколько объединений:



Buddy Allocator

Освобождение

Возможно придется сделать несколько объединений:

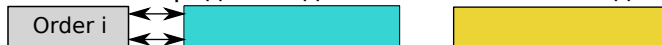


Merge 2 i-2 order blocks and continue

Buddy Allocator

Освобождение

Возможно придется сделать несколько объединений:



Order i-1

Merge 2 i-1 order blocks and continue

Order i-2

Buddy Allocator

Освобождение

Продолжаем пока можем объединять смежные блоки или не дойдем до последнего уровня:



Order i-1

Order i-2

Max order? Just insert block in the list

Buddy Allocator

Аллокация блоков произвольного размера

Аллокация блоков только по степеням 2 может быть затратной - в неудачных случаях мы аллоцируем почти в 2 раза больше чем нужно. Есть как минимум 2 решения этой проблемы:

- пожертвовать интерфейсом - разложить количество блоков на сумму степеней 2 и аллоцировать каждый блок размера 2^i отдельно и возвращать массив блоков;
- поправить алгоритм для аллокация блоков произвольного размера;

Buddy Allocator

Аллокация блоков произвольного размера

Buddy Allocator легко изменить для аллокации блоков произвольного размера пожертвовав (совсем немного) памятью:

- вместо порядка блока в дескрипторе PAGE храним размер (очевидно);
- храним признак занятости/свободности и размер как в дескрипторе первого PAGE блока, так и в дескрипторе последнего (Border Tags);
- каждый список хранит блоки размеров $[2^i; 2^{i+1})$, кроме последнего - для него нет верхней границы.

SLAB Allocator

Аллокация маленьких объектов фиксированного размера

Теперь решаем еще более простую задачу - аллокацию "маленьких" объектов фиксированного размера:

- мы умеем аллоцировать большие блоки - будем использовать их как пулы;
- аллоцируем блоки фиксированного размера из пула - тривиально;
- объекты одного размера уменьшают вероятность фрагментации;
- как на этом построить универсальный аллокатор (malloc/free)?

SLAB Allocator

Базовым понятием для SLAB аллокатора является (неожиданно) SLAB:

- SLAB - это пул объектов одинакового размера;
- аллокатор может иметь в распоряжении несколько SLAB-ов - при необходимости аллоцируются новые SLAB-ы;
- каждому объекту в SLAB-е соответствует дескриптор (по сути, нужен, чтобы связать объекты в список);

SLAB Allocator

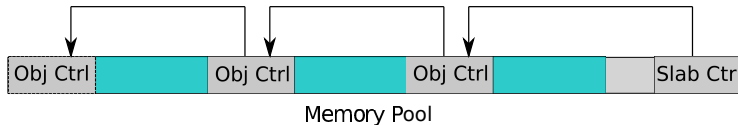
Разделение на большие и маленькие объекты

SLAB аллокатор делит объекты далее на большие и маленькие, и использует для них разную структуру SLAB-ов:

- разделение нужно чтобы уменьшить потери памяти для больших объектов;
- нет четкой границы, что считать большим объектом, а что маленьким;
- обычно маленькими объектами считают объекты меньше $1/8$ размера PAGE (минимального размера пула).

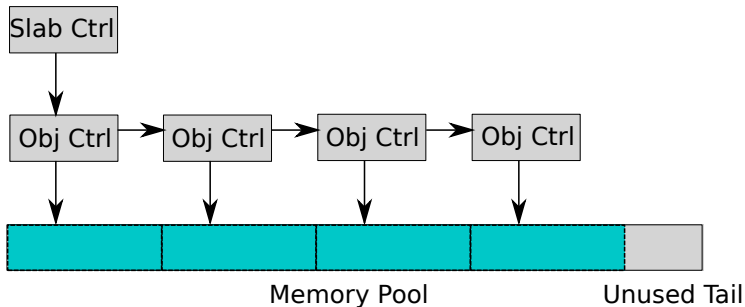
SLAB Allocator

Организация SLAB-а маленьких объектов



SLAB Allocator

Организация SLAB-а больших объектов объектов



SLAB Allocator

Детали реализации

- Для SLAB-ов больших объектов управляющие структуры нужно аллоцировать отдельно - используя SLAB-ы маленьких объектов.
- При освобождении объекта нам нужно найти SLAB из которого он аллоцирован, это можно делать используя словарь (dict, map) или (гораздо проще) используя дескриптор PAGE.
- Для SLAB-ов больших объектов ObjCtrl необходим только когда объект свободен, когда объект объект был аллоцирован ObjCtrl больше не нужен.

SLAB Allocator

malloc/free

Используя Buddy Allocator и Slab Allocator можно создать аллокатор общего назначения (malloc/free):

- Buddy Allocator - для аллокации пулов памяти для SLAB-ов и для аллокации памяти для больших объектов;
- набор предварительно созданных SLAB Allocator-ов с разными размерами объектов - для аллокации маленьких объектов;

SLAB Allocator

Объекты одного типа

Мы можем создавать SLAB Allocator-ы под специфичные нужды и не использовать аллокатор общего назначения:

- можно повысить надежность - уменьшив вероятность, что кто-то, по ошибке, испортит нашу память, или, наоборот, что мы испортим чужую;
- меньше конкуренция за ресурсы - аллокатором общего назначения пользуются все, а специальным аллокатором только мы;
- можно сэкономить на инициализации (далее подробнее);

Многие поля объекта естественным образом оказываются в "инициализированном" состоянии при освобождении объекта:

- если объект хранит mutex или spinlock (или какой-то другой примитив синхронизации), то перед освобождением он должен быть отпущен;
- если объект хранит счетчик ссылок, то перед освобождением он, зачастую, равен нулю;
- если объект хранит список или корень дерева, то перед освобождением они, зачастую, будут пустыми;

Такие поля достаточно инициализировать один раз – экономия на инициализации.

SLAB Allocator

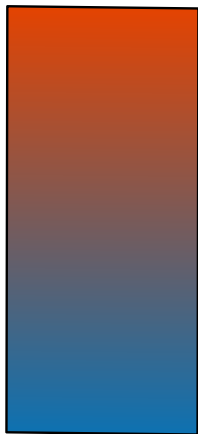
Cache Coloring

Иногда, при использовании SLAB Allocator-а для достаточно больших объектов, в пуле памяти могут быть неиспользуемые "хвосты" - размер пула не делится нацело на размер объекта.

Этим неиспользуемым хвостам можно найти полезное применение - Cache Coloring.

SLAB Allocator

Cache Coloring



- "горячие" поля, обычно, в начале:
 - указатели
(следующий/предыдущий,
левый/правый)
 - ключи для поиска (обычно
короткие)
 - флаги и примитивы
синхронизации
- "холодные" поля, обычно, в конце:
 - значения, которые мы ищем
(могут быть большими)

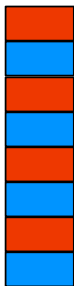
SLAB Allocator

Cache Coloring

Slab0



Slab1



- "горячие" поля объектов в Slab0 конкурируют с "горячими" полями объектов в Slab1 за место в процессорном кеше
- "холодные" поля конкурируют с "холодными" полями
- "холодные" поля используются редко - растрата кеша, лучше поделить его между "горячими" полями

SLAB Allocator

Cache Coloring

Slab0



Slab1



- "горячие" поля объектов в Slab0 и Slab1 занимают весь кеш
- "холодные" поля поднимаются в кеш, только когда они нужны

- The Art of Computer Programming. Volume 1, 2.5. Donald Knuth - обзор простых алгоритмов аллокации и их поведения;
- The Slab Allocator: An Object-Caching Kernel Memory Allocator. Jeff Bonwick - описание классического SLAB Allocator-a;
- Magazines and Vmem: Extending the Slab Allocator to Many CPUs and Arbitraray Resources. Jeff Bonwick, Jonathan Adams - продолжение истории SLAB Allocator-a;
- Slab allocators in the Linux Kernel: SLAB, SLOB, SLUB. Christoph Lameter - о реализации кеширующих аллокаторов в ядре Linux.