

**This slide is intentionally
left blank**

There is nothing to read here

Этюды о буферизации

Вадим Винник

Мотивация

- Задачи взяты из практики.

Мотивация

- Задачи взяты из практики.
- Получившийся код применён в реальных проектах.

Мотивация

- Задачи взяты из практики.
- Получившийся код применён в реальных проектах.
- **Задачи достаточно общие.**

Мотивация

- Задачи взяты из практики.
- Получившийся код применён в реальных проектах.
- Задачи достаточно общие.
- Решения пригодны для многократного использования.

Мотивация

- Задачи взяты из практики.
- Получившийся код применён в реальных проектах.
- Задачи достаточно общие.
- Решения пригодны для многократного использования.
- Условия формулируются кратко и выглядят простыми.

Мотивация

- Задачи взяты из практики.
- Получившийся код применён в реальных проектах.
- Задачи достаточно общие.
- Решения пригодны для многократного использования.
- Условия формулируются кратко и выглядят простыми.
- **Анализ выявляет неожиданные сложности.**

Мотивация

- Задачи взяты из практики.
- Получившийся код применён в реальных проектах.
- Задачи достаточно общие.
- Решения пригодны для многократного использования.
- Условия формулируются кратко и выглядят простыми.
- Анализ выявляет неожиданные сложности.
- **Хорошее поле для применения средств C++ 11 / 14 / 17...**

Мотивация

- Задачи взяты из практики.
- Получившийся код применён в реальных проектах.
- Задачи достаточно общие.
- Решения пригодны для многократного использования.
- Условия формулируются кратко и выглядят простыми.
- Анализ выявляет неожиданные сложности.
- Хорошее поле для применения средств C++ 11 / 14 / 17...
- ...до сих пор не общеизвестных.

Мотивация

- Задачи взяты из практики.
- Получившийся код применён в реальных проектах.
- Задачи достаточно общие.
- Решения пригодны для многократного использования.
- Условия формулируются кратко и выглядят простыми.
- Анализ выявляет неожиданные сложности.
- Хорошее поле для применения средств C++ 11 / 14 / 17...
- ...до сих пор не общеизвестных.
- **Хорошо подходит для собеседований.**

Мотивация

- Задачи взяты из практики.
- Получившийся код применён в реальных проектах.
- Задачи достаточно общие.
- Решения пригодны для многократного использования.
- Условия формулируются кратко и выглядят простыми.
- Анализ выявляет неожиданные сложности.
- Хорошее поле для применения средств C++ 11 / 14 / 17...
- ...до сих пор не общеизвестных.
- Хорошо подходит для собеседований.

Задачи

- Асинхронный оповещатель.
- Репликатор обновлений.
- Объединитель запросов.

Задачи

- Асинхронный оповещатель.
- Репликатор обновлений.
- Объединитель запросов.

Инструменты

- Поток, семафор, переменная условия, атомарная переменная.
- Перемещение, ссылка rvalue, умный указатель.
- Вариадический шаблон, метапрограммирование, класс свойств (traits).

Асинхронный оповещатель

Исходные условия

- Пусть приложение делится на два слоя:
 - верхний: интерфейс пользователя, журнал событий;
 - нижний: вычисления, интерфейс с аппаратурой или ОС.

Исходные условия

- Пусть приложение делится на два слоя:
 - верхний: интерфейс пользователя, журнал событий;
 - нижний: вычисления, интерфейс с аппаратурой или ОС.
- Нижний слой посылает оповещения верхнему:
 - количество сделанной работы;
 - вычисленные результаты;
 - диагностические сообщения.

Исходные условия

- Пусть приложение делится на два слоя:
 - верхний: интерфейс пользователя, журнал событий;
 - нижний: вычисления, интерфейс с аппаратурой или ОС.
- Нижний слой посылает оповещения верхнему:
 - количество сделанной работы;
 - вычисленные результаты;
 - диагностические сообщения.
- Обработчик оповещений передаётся с верхнего слоя:
 - указатель на функцию;
 - функциональный объект.

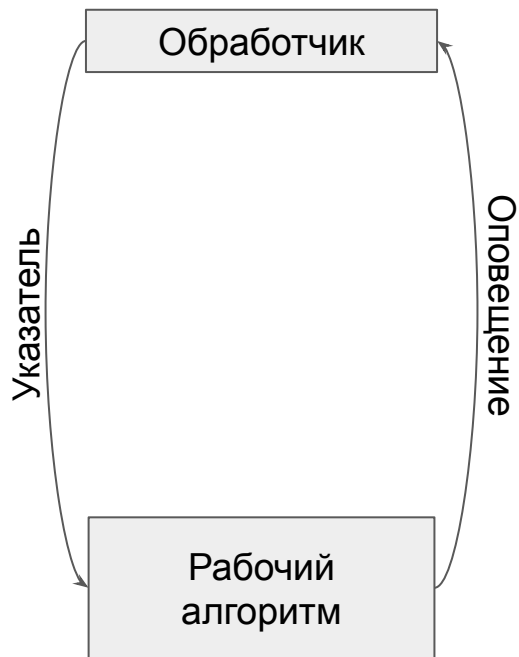
Наивный подход к реализации

```
void handle_message(std::string const& msg);

int main() {
    run_worker(&handle_message);
    wait_for_worker();
    return 0;
}
```

```
void run_worker(void (*notify)(std::string const&)) {
    while (!is_done()) {
        do_some_work();
        notify("one more iteration");
    }
}
```

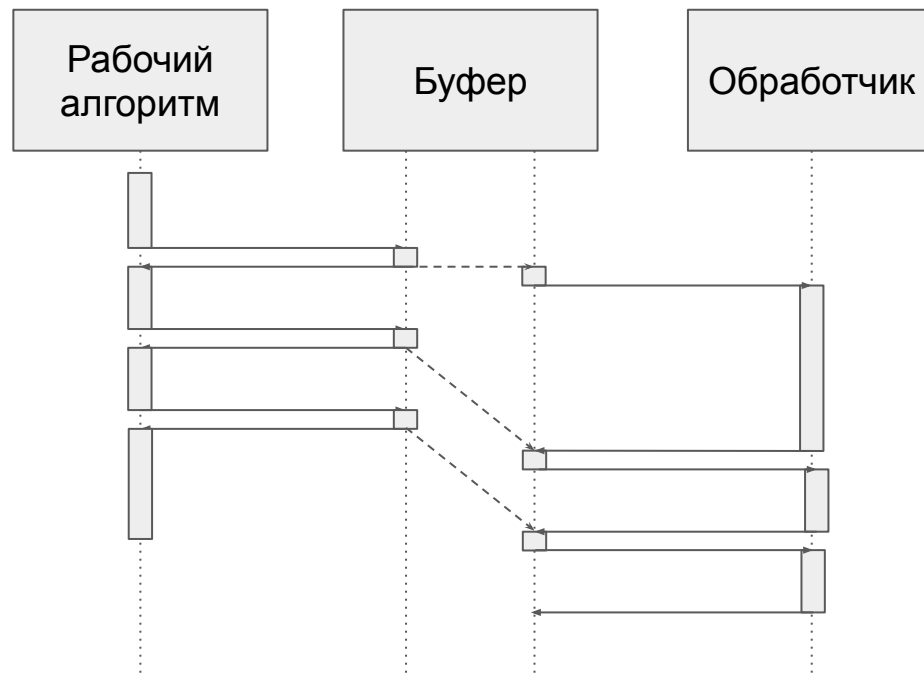
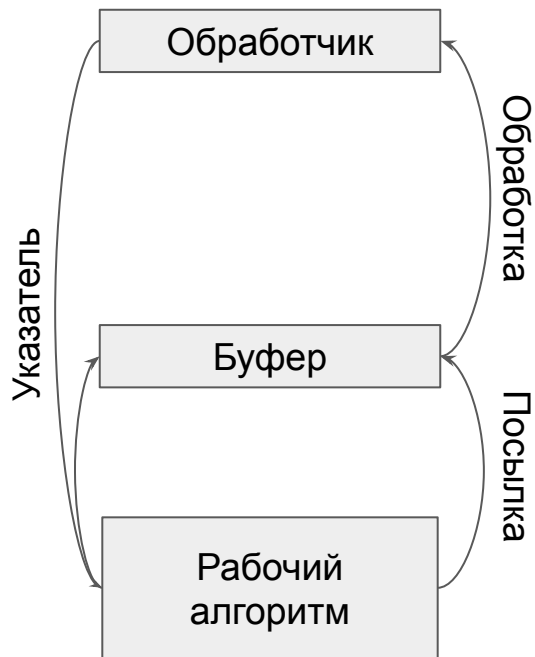
Синхронные оповещения



Буфер для развязки уровней

- Нижний уровень не может контролировать работу верхнего:
 - не властен над переданной сверху функцией-обработчиком.
- Производительность нижнего слоя не должна страдать:
 - нижний слой не должен ожидать обработки оповещения верхним;
 - рабочий алгоритм должен класть оповещения в буфер и продолжать работу;
 - оповещения из буфера должны доставляться вверх отдельным потоком;
 - потенциально медленный обработчик должен работать в этом потоке.

Асинхронная доставка оповещений



Дополнительное условие: стратегии обработки

- Обычная очередь:
 - все сообщения обрабатываются в порядке поступления;
 - примеры: диагностические сообщения; результаты вычислений.
- Важно только самое свежее:
 - верхний уровень не успел обработать сообщение;
 - в это время приходит новое;
 - старое сообщение можно и нужно игнорировать;
 - примеры: количество сделанной работы, текущая фаза работы.
- Очередь с приоритетами.
- Ограниченное время жизни сообщений.
- ...

Требования

- Разработать класс буфера оповещений.
 - Служит обёрткой над обработчиком.
- Буфер снимает зависимость скорости рабочего алгоритма от скорости обработчика.
 - Буфер быстро принимает новое сообщение и отпускает рабочий поток.
 - Буфер передаёт сообщения наверх, вызывая обработчик.
 - Передача и приём сообщений друг друга блокируют как можно меньше.
- Должен поддерживать два (по меньшей мере) режима работы:
 - все сообщения в порядке очереди;
 - только самое недавнее сообщение.

Общая идея реализации

- Объект-буфер содержит:
 - поток пересылки сообщений;
 - хранилище сообщений;
 - обработчик.
- Поток пересылки запускается конструктором...
- ...и останавливается деструктором.
- Поток пересылки работает в цикле:
 - ждёт появления сообщения в буфере;
 - вызывает обработчик.
- Единственный метод: добавить новое сообщение.

Черновик реализации

```
using lock_t =
    std::unique_lock<std::mutex>;

manager(Handler handler):
    handler_(handler),
    thread_(std::thread(&run, this))
{}

void post(message_t const& m) {
    lock_t l(mx_);
    q_.put(m);
    cv_.notify_one();
}
```

```
void run() {
    while (true) {
        message_t m;

        {
            lock_t l(mx_);
            cv_.wait(l, is_not_empty);
            m = q_.get_and_remove();
        }

        handler_(m);
    }
}
```

Diabolus in singulis est!

- Как минимизировать блокировки, если в очереди много сообщений?
 - Можно ли избежать блокировки на изъятие из очереди каждого сообщения?
- Как покрыть режимы очереди и единственного последнего?
- Можно ли учесть специфику разных типов данных?
 - “Лёгкие” сообщения (напр., целые числа).
 - Поддерживающие быстрое перемещение (напр., строки).
 - Тяжёлые, с глубоким копированием и без перемещения.
- Можно ли заложить резерв гибкости?
 - Очередь с приоритетами.
 - Очередь ограниченной ёмкости.
 - Очередь с ограниченным временем хранения.

Как улучшить производительность

- Под блокировкой быстро забирать всё содержимое буфера
 - и оставить его пустым.
- Вне критической секции вытаскивать элементы
 - и отправлять их обработчику.

```
buffer_t buffer {};  
{  
    lock_t l(mx_);  
    cv_.wait(l, is_not_empty);  
    std::swap(buffer, buffer_);  
}
```

```
// continued  
  
while (!buffer.empty()) {  
    handler(buffer.front());  
    buffer.pop();  
}
```

Да здравствуют абстракции!

- Ввести понятие абстрактного буфера, охватывающее все случаи:
 - буфер на один элемент;
 - очередь произвольной ёмкости;
 - с обёртыванием тяжёлого объекта в умный указатель;
- Интерфейс абстрактного буфера:
 - создать пустой буфер;
 - проверить на пустоту;
 - втолкнуть элемент;
 - ко всем имеющимся элементам применить функцию.
- Параметризовать на этапе выполнения или компиляции?
 - вспомогательным объектом-хранилищем сообщений?
 - ...или классом свойств (traits) хранилища сообщений?

Одно сообщение, общий случай

```
template <typename T>
struct optional {
    using message_t = T;
    using state_t = std::optional<T>;

    static constexpr std::nullopt_t
    make_empty_state() noexcept {
        return std::nullopt;
    }

    static constexpr bool
    is_empty_state(state_t const& state)
    noexcept {
        return !state.has_value();
    }
};
```

```
template <typename M>
static void
put(state_t& state, M&& message)
noexcept {
    state = std::forward<M>(message);
}

template <typename F>
static void
handle_and_destroy(F f, state_t& state) {
    f(std::move(*state));
    state.reset();
}
};
```

Одно сообщение, выделена константа “пусто”

```
template <typename T, T Empty>
struct simple_variable {
    using message_t = T;
    using state_t = T;

    static constexpr state_t
    make_empty_state() noexcept {
        return Empty;
    }

    static constexpr bool
    is_empty_state(state_t const& state)
    noexcept {
        return state == Empty;
    }
};
```

```
template <typename M>
static void
put(state_t& state, M&& message)
noexcept {
    state = std::forward<M>(message);
}

template <typename F>
static void
handle_and_destroy(F f, state_t& state) {
    f(std::move(state));
    state = Empty;
}
};
```

Одно сообщение, защита от копирования

```
template <typename T>
struct unique_ptr {
    using message_t = T;
    using state_t = std::unique_ptr<T>;

    static constexpr std::nullptr_t
    make_empty_state() noexcept {
        return nullptr;
    }

    static constexpr bool
    is_empty_state(state_t const& state)
    noexcept {
        return nullptr == state;
    }
};
```

```
template <typename M>
static void
put(state_t& state, M&& message)
noexcept {
    state = std::make_unique<T>(
        std::forward<M>(message));
}

template <typename F>
static void
handle_and_destroy(F f, state_t& state) {
    f(std::move(*state));
    state.reset();
}
};
```


Очередь сообщений

```
template <typename T>
struct queue {
    using message_t = T;
    using state_t = std::queue<T>;

    static state_t
    make_empty_state() noexcept {
        return {};
    }

    static bool
    is_empty_state(state_t const& state)
    noexcept {
        return state.empty();
    }
};
```

```
template <typename M>
static void
put(state_t& state, M&& message)
noexcept {
    state.push(std::forward<M>(message));
}

template <typename F>
static void
handle_and_destroy(F f, state_t& state) {
    while (!state.empty()) {
        f(std::move(state.front()));
        state.pop();
    }
};
```

Алгоритм универсального оповещателя

```
void run() {
    while (true) {
        state_t state { Buffer::make_empty_state() };
        {
            std::unique_lock<std::mutex> lock { mx_ };
            cv_.wait(
                lock,
                [this]() { return is_stopping_ || !Buffer::is_empty_state(state_); });
            if (is_stopping_) return;
            std::swap(state_, state);
        }
        assert(!Buffer::is_empty_state(state));
        Buffer::handle_and_destroy(handler_, state);
        assert(Buffer::is_empty_state(state));
    }
}
```

Репликатор обновлений

Исходные условия

- Несколько одинаковых потоков работают в цикле:
 - принять данные (например, из сети);
 - обработать данные (долгие вычисления);
 - отправить результат (например, в файл).

Исходные условия

- Несколько одинаковых потоков работают в цикле:
 - принять данные (например, из сети);
 - обработать данные (долгие вычисления);
 - отправить результат (например, в файл).
- Важна производительность потоков:
 - вычислительная часть алгоритма не должна тормозиться синхронизацией;
 - свести синхронизацию к минимуму: в начале и в конце итерации.

Исходные условия

- Несколько одинаковых потоков работают в цикле:
 - принять данные (например, из сети);
 - обработать данные (долгие вычисления);
 - отправить результат (например, в файл).
- Важна производительность потоков:
 - вычислительная часть алгоритма не должна тормозиться синхронизацией;
 - свести синхронизацию к минимуму: в начале и в конце итерации.
- Рабочие потоки зависят от глобальной конфигурации:
 - используется многократно на всём протяжении вычислительной части.

Исходные условия

- Несколько одинаковых потоков работают в цикле:
 - принять данные (например, из сети);
 - обработать данные (долгие вычисления);
 - отправить результат (например, в файл).
- Важна производительность потоков:
 - вычислительная часть алгоритма не должна тормозиться синхронизацией;
 - свести синхронизацию к минимуму: в начале и в конце итерации.
- Рабочие потоки зависят от глобальной конфигурации:
 - используется многократно на всём протяжении вычислительной части.
- Глобальная конфигурация обновляется редко.
 - Копирование конфигурации может быть медленным.
 - Проверка при отсутствии обновлений должна проходить быстро.

Общая идея

- Рабочий поток содержит локальную копию конфигурации:
 - быстрый доступ;
 - не требует синхронизации.

Общая идея

- Рабочий поток содержит локальную копию конфигурации:
 - быстрый доступ;
 - не требует синхронизации.
- Локальная копия поддерживается в актуальном состоянии:
 - обновляется из глобальной конфигурации;
 - наличие обновлений проверяется в начале каждой итерации;
 - если глобальная конфигурация изменилась, локальная копия обновляется;
 - в худшем случае поток выполнит одну итерацию на старой конфигурации.

Общая идея

- Рабочий поток содержит локальную копию конфигурации:
 - быстрый доступ;
 - не требует синхронизации.
- Локальная копия поддерживается в актуальном состоянии:
 - обновляется из глобальной конфигурации;
 - наличие обновлений проверяется в начале каждой итерации;
 - если глобальная конфигурация обновлена, локальная копия актуализируется;
 - в худшем случае поток выполнит одну итерацию на старой конфигурации.
- Для проверки актуальности - счётчики обновлений:
 - оригинала;
 - локальной копии.

Требования

- Разработать класс - репликатор объектов данных.
- Канал передачи данных с одним входом и множеством выходов.
- Операции на входном конце канала:
 - проинициализировать начальным значением;
 - установить новое значение;
- Операция на выходном конце:
 - проинициализировать, привязав к источнику;
 - обеспечить актуальность:
 - проверить, изменились ли данные на входе после последнего копирования;
 - если изменились, обновить копию.
 - взять значение-копию.

Пример использования

```
// main thread

source_t<config_t> source{ initial_config };
source_t<config_t>::replica replica { source };
start_worker_thread(replica);
source.set(new_config);
```

```
// worker thread

while (!is_finish) {
    replica.ensure_up_to_date();
    do_with_config(replica.const_get());
}
```

Дуальность с асинхронным оповещателем

Оповещатель	Репликатор
много издателей	один издатель
один подписчик	много подписчиков
семантика вталкивания	семантика втягивания

Дополнительные требования

- Данные могут не поддерживать присваивания:
 - неизменяемые объекты (immutable);
 - популярны в функциональном и реактивном программировании.
- Репликатор должен поддерживать два механизма обновления:
 - присваивание значения объекту с сохранением идентичности;
 - уничтожение старого объекта и создание нового.
- Репликатор должен быть абстрагирован от этого механизма.

Типы свойств (traits)

- Абстрагирование от механизма хранения значений:
 - переменная, допускающая присваивание;
 - умный указатель с замещением объекта.
- Тип свойств должен содержать:
 - тип `value_t`
 - для работы со значениями прикладного уровня;
 - тип `wrapped_t`
 - механизм хранения, обёртка над значением;
 - `static void set(wrapped_t& lhs, value_t const& rhs);`
 - обёртка над сохранением нового значения
 - `static value_t const& const_get(wrapped_t const& wrapped);`
 - обёртка над взятием значения из хранилища.

```
template <typename T>
struct id {
    using value_t = T;
    using wrapped_t = T;

    static wrapped_t
    construct(value_t const& x)
    { return x; }

    static void set(
        wrapped_t& lhs,
        value_t const& rhs)
    { lhs = rhs; }

    static T const& const_get(
        wrapped_t const& wrapped)
    { return wrapped; }
};
```

```
template <typename T>
struct unique_ptr {
    using value_t = T;
    using wrapped_t = std::unique_ptr<T>;

    static wrapped_t
    construct(value_t const& x)
    { return std::make_unique<value_t>(x); }

    static void set(
        wrapped_t& lhs,
        value_t const& rhs)
    { lhs = std::make_unique<value_t>(rhs); }

    static T const& const_get(
        wrapped_t const& wrapped)
    { return *wrapped; }
};
```


Устройство репликатора

- Объект-источник содержит:
 - реплицируемое значение;
 - счётчик обновлений (`std::atomic<int>`);
 - двоичный семафор (`std::mutex`).
- Объект-копия содержит:
 - ссылку на объект-источник;
 - значение-копию;
 - номер последнего обновления (достаточно неатомарного типа `int`).

```
template <typename T, template<typename> typename Traits>
void source_base<T, Traits>::replica::ensure_up_to_date() {
    if (version_ != source_.version_.load(std::memory_order_consume)) {
        std::lock_guard<std::mutex> lock{ source_.mutex_ };
        Traits::set(wrapped_, wrap_traits_t::const_get(source_.wrapped_));
        version_ = source_.version_;
    }
}
```

```
template <typename T, template<typename> typename Traits>
void source_base<T, Traits>::set(value_t const& value) {
    std::lock_guard<std::mutex> lock { mutex_ };
    version_.fetch_add(1, std::memory_order_release);
    Traits::set(wrapped_, value);
}
```

Ещё одна полезная функция

- Если модификация источника не сводится к присваиванию нового значения...
 - Пример: увеличить в конфигурации параметр “таймаут” на 50%.
- Втянуть модифицирующую функцию в источник
 - и выполнить в контексте объекта-источника;
 - в духе функционального программирования: *lifting*.

```
template <typename Func>
void source_base<T, Traits>::modify(Func func) {
    std::lock_guard<std::mutex> lock { mutex_ };
    version_.fetch_add(1, std::memory_order_release);
    func(wrap_traits_t::get(wrapped_));
}
```

Объединитель запросов

Требования

- Пусть есть функция f , которая выполняется долго (*сервер*).

Требования

- Пусть есть функция f , которая выполняется долго (сервер).
- Приложение из разных потоков (клиентов) вызывает f часто.

Требования

- Пусть есть функция f , которая выполняется долго (*сервер*).
- Приложение из разных потоков (*клиентов*) вызывает f часто.
- С большой вероятностью аргументы (*запросы*) совпадают.

Требования

- Пусть есть функция f , которая выполняется долго (*сервер*).
- Приложение из разных потоков (*клиентов*) вызывает f часто.
- С большой вероятностью аргументы (запросы) совпадают.
- **Разработать класс-обёртку, который объединяет одинаковые запросы.**

Требования

- Пусть есть функция f , которая выполняется долго (*сервер*).
- Приложение из разных потоков (*клиентов*) вызывает f часто.
- С большой вероятностью аргументы (запросы) совпадают.
- Разработать класс-обёртку, который объединяет одинаковые запросы.
- **Умеет распознавать совпадение запросов.**

Требования

- Пусть есть функция f , которая выполняется долго (*сервер*).
- Приложение из разных потоков (*клиентов*) вызывает f часто.
- С большой вероятностью аргументы (запросы) совпадают.
- Разработать класс-обёртку, который объединяет одинаковые запросы.
- Умеет распознавать совпадение запросов.
- При первом обращении с новым запросом x вызывает $f(x)$.

Требования

- Пусть есть функция f , которая выполняется долго (*сервер*).
- Приложение из разных потоков (*клиентов*) вызывает f часто.
- С большой вероятностью аргументы (запросы) совпадают.
- Разработать класс-обёртку, который объединяет одинаковые запросы.
- Умеет распознавать совпадение запросов.
- При первом обращении с новым запросом x вызывает $f(x)$.
- При обращении другого потока с тем же запросом x ставит в ожидание.

Требования

- Пусть есть функция f , которая выполняется долго (*сервер*).
- Приложение из разных потоков (*клиентов*) вызывает f часто.
- С большой вероятностью аргументы (запросы) совпадают.
- Разработать класс-обёртку, который объединяет одинаковые запросы.
- Умеет распознавать совпадение запросов.
- При первом обращении с новым запросом x вызывает $f(x)$.
- При обращении другого потока с тем же запросом x ставит в ожидание.
- **Результат единственного обращения $f(x)$ выдаёт ожидающим клиентам.**

Требования

- Пусть есть функция f , которая выполняется долго (*сервер*).
- Приложение из разных потоков (*клиентов*) вызывает f часто.
- С большой вероятностью аргументы (запросы) совпадают.
- Разработать класс-обёртку, который объединяет одинаковые запросы.
- Умеет распознавать совпадение запросов.
- При первом обращении с новым запросом x вызывает $f(x)$.
- При обращении другого потока с тем же запросом x ставит в ожидание.
- Результат единственного обращения $f(x)$ выдаёт ожидающим клиентам.
- **В том числе и исключение.**

Требования

- Пусть есть функция f , которая выполняется долго (*сервер*).
- Приложение из разных потоков (*клиентов*) вызывает f часто.
- С большой вероятностью аргументы (запросы) совпадают.
- Разработать класс-обёртку, который объединяет одинаковые запросы.
- Умеет распознавать совпадение запросов.
- При первом обращении с новым запросом x вызывает $f(x)$.
- При обращении другого потока с тем же запросом x ставит в ожидание.
- Результат единственного обращения $f(x)$ выдаёт ожидающим клиентам.
- В том числе и исключение.
- У потока-клиента создаёт иллюзию того, что он вызывает f .

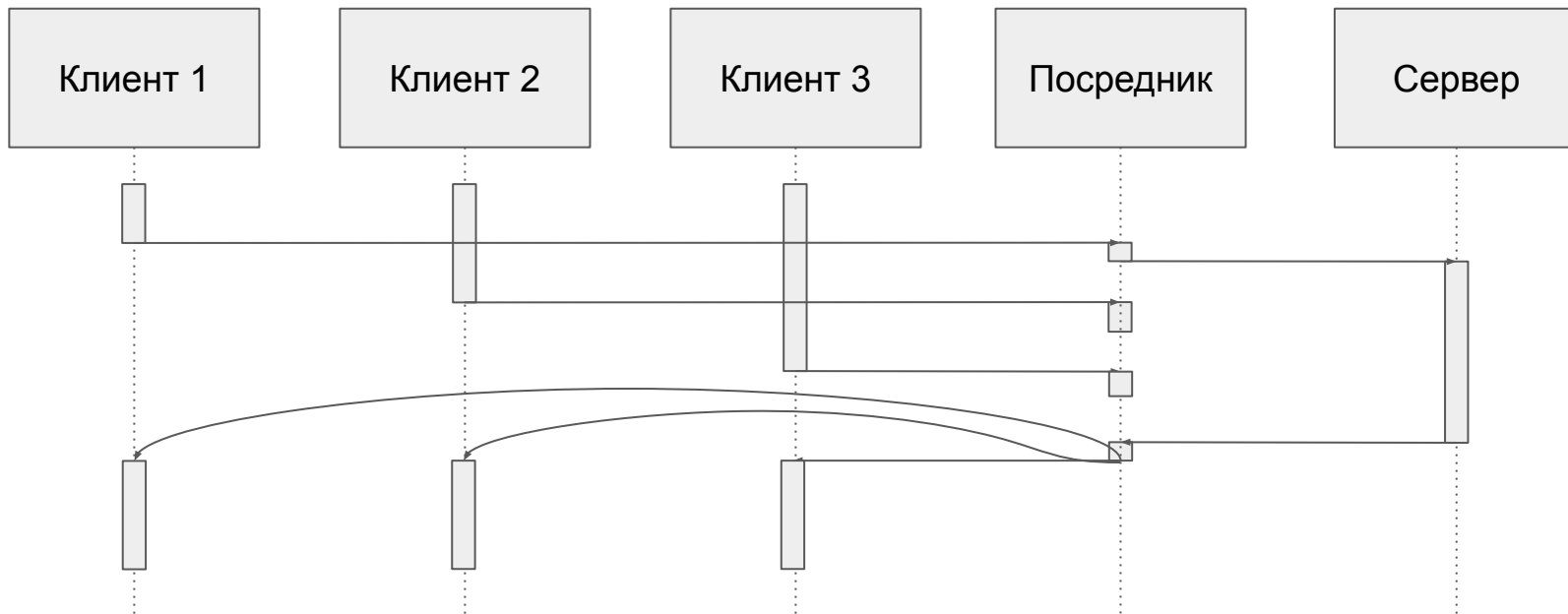
Требования

- Пусть есть функция f , которая выполняется долго (*сервер*).
- Приложение из разных потоков (*клиентов*) вызывает f часто.
- С большой вероятностью аргументы (запросы) совпадают.
- Разработать класс-обёртку, который объединяет одинаковые запросы.
- Умеет распознавать совпадение запросов.
- При первом обращении с новым запросом x вызывает $f(x)$.
- При обращении другого потока с тем же запросом x ставит в ожидание.
- Результат единственного обращения $f(x)$ выдаёт ожидающим клиентам.
- В том числе и исключение.
- У потока-клиента создаёт иллюзию того, что он вызывает f .
- При уходе последнего клиента, запросившего $f(x)$, результат забывает.

Требования

- Пусть есть функция f , которая выполняется долго (*сервер*).
- Приложение из разных потоков (*клиентов*) вызывает f часто.
- С большой вероятностью аргументы (запросы) совпадают.
- Разработать класс-обёртку, который объединяет одинаковые запросы.
- Умеет распознавать совпадение запросов.
- При первом обращении с новым запросом x вызывает $f(x)$.
- При обращении другого потока с тем же запросом x ставит в ожидание.
- Результат единственного обращения $f(x)$ выдаёт ожидающим клиентам.
- В том числе и исключение.
- У потока-клиента создаёт иллюзию того, что он вызывает f .
- При уходе последнего клиента, запросившего $f(x)$, результат забывает.

Асинхронная доставка оповещений



Идея решения

- В буфере хранить дескрипторы выполняющихся вызовов.
- Дескрипторы хранить в ассоциативном массиве:
 - ключ вычисляется на основе запроса;
 - запросы с совпадающими ключами отождествляются;
 - в пределе: ключ - весь запрос.
- Дескриптор содержит:
 - флаг “вызов сервера сделан”;
 - счётчик ожидающих клиентов (с этим ключом);
 - результат вызова (в т. ч. исключение) или признак его отсутствия;
 - двоичный семафор;
 - условная переменная: “результат получен”.

Алгоритм постановки запроса на выполнение

- В ассоциативном массиве найти дескриптор или создать пустой
 - нарастив в дескрипторе счётчик ожидающих клиентов;
 - под блокировкой всего ассоциативного массива дескрипторов.
- Взять блокировку дескриптора.
- Дождаться, когда истинным станет условие:
 - выполнение этого запроса ещё не начато или
 - выполнение запроса закончилось (возвратом значения или выбросом исключения).
- Если выполнение запроса не начато:
 - синхронным образом вызвать функцию-сервер с заданным запросом;
 - запомнить в дескрипторе её результат (возможно, исключение).
- Вернуть клиенту результат, сохранённый в дескрипторе.
- Уменьшить счётчик и, если он достиг 0, удалить дескриптор.

Фрагменты реализации

```
template <typename Result, typename Key, typename... Args>
class collator {
public:
    template <typename KeyExtractor, typename RequestExecutor>
    collator(KeyExtractor key_extractor, RequestExecutor request_executor);

    Result execute(Args... args);

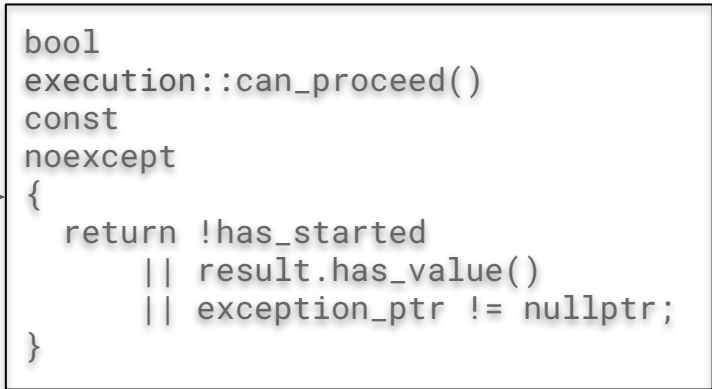
private:
    struct execution { /* see the next slide */ };
    std::map<Key, execution>::iterator find_or_create_execution(key_t const& key)

    std::function<Key(Args...)> key_extractor_;
    std::function<Result(Args...)> request_executor_;
    std::mutex mutex_;
    std::map<Key, execution> executions_cache_;
};
```

```
struct execution {
    execution() :
        has_started(false),
        ref_count(0),
        result(std::nullopt),
        exception_ptr(nullptr)
    {}

    bool can_proceed() const noexcept;

    std::mutex mutex;
    std::condition_variable cv_result_ready;
    bool has_started;
    int ref_count;
    std::optional<Result> result;
    std::exception_ptr exception_ptr;
};
```



```
bool
execution::can_proceed()
const
noexcept
{
    return !has_started
        || result.has_value()
        || exception_ptr != nullptr;
}
```

```
Result execute(Args... args) {
    key_t key = key_extractor_(args...);
    auto const execution_it = find_or_create_execution(key);
    auto& execution = execution_it->second;
    {
        std::unique_lock<std::mutex> execution_lock(execution.mutex);
        execution.cv_result_ready.wait(
            execution_lock, [&execution]() { return execution.can_proceed(); });
        if (!execution.has_started) {
            assert(!execution.result.has_value());
            assert(execution.exception_ptr == nullptr);
            execution.has_started = true;
            try {
                execution.result = request_executor_(args...);
            }
            catch (...) {
                execution.exception_ptr = std::current_exception();
            }
            execution.cv_result_ready.notify_all();
        }
    }
}
```

```
auto const result = execution.result;
auto const exception_ptr = execution.exception_ptr;

assert(result.has_value() || exception_ptr != nullptr);

{
    std::lock_guard<std::mutex> map_lock(mutex_);
    --execution.ref_count;
    if (execution.ref_count == 0) {
        executions_cache_.erase(execution_it);
    }
}

if (exception_ptr != nullptr) {
    assert(!execution.result.has_value());
    std::rethrow_exception(exception_ptr);
}

return *result;
}
```

<https://github.com/vadimvinnik/>

- replicable
- async_notification
- execution_collator


```
} // the talk
```