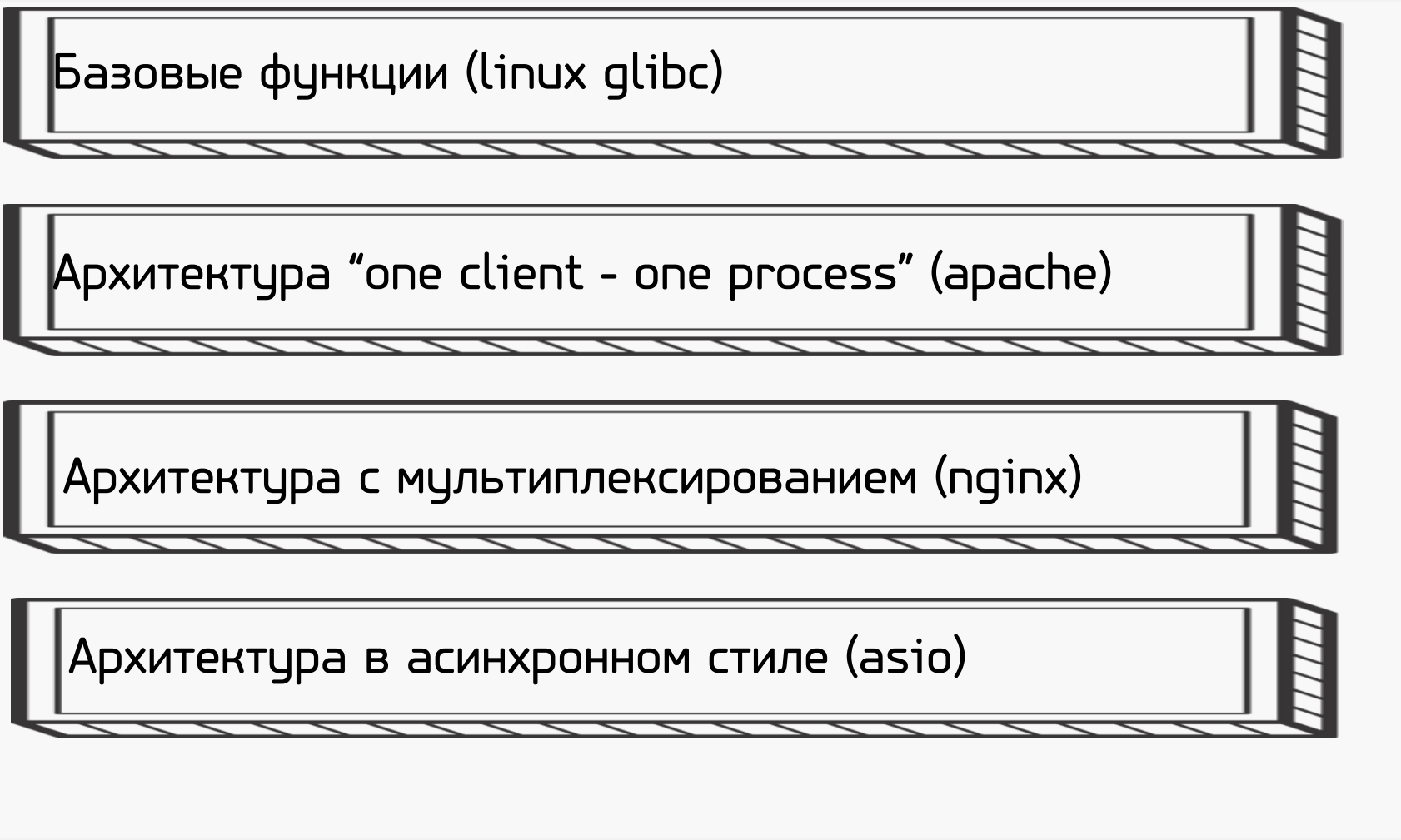
Углубленное программирование на C/C++

Лекция №5

Илья Санеев

Некоторые вопросы проектирования сетевых приложений



Где (используется сеть)?

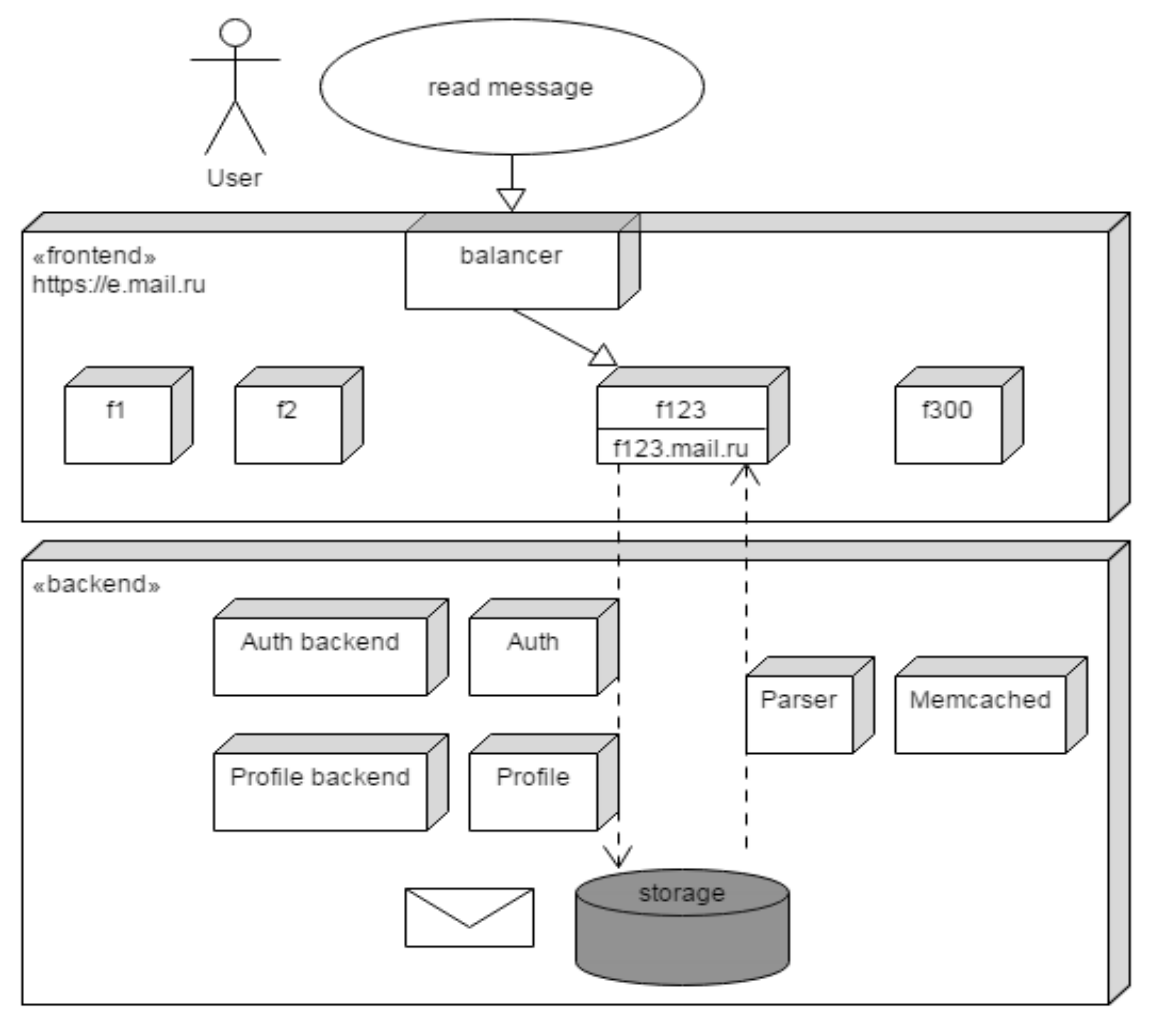
- браузер <---> http-сервер (соц сети, почта, вообще все)
- игровой клиент <---> игровой сервер (CS, SC, Q3 e.t.c.)
- база данных <---> клиент БД (интернет-магазин)

...

- поисковые роботы
- вирусы, антивирусы,...
- банкоматы, модемы ...

PS: прокси! нынче каждый инженер должен уметь написать http-прокси.

Пример: чтение письма в почте



Почему не сделать одну программу, которая примет запрос и в ответ отдаст письмо?

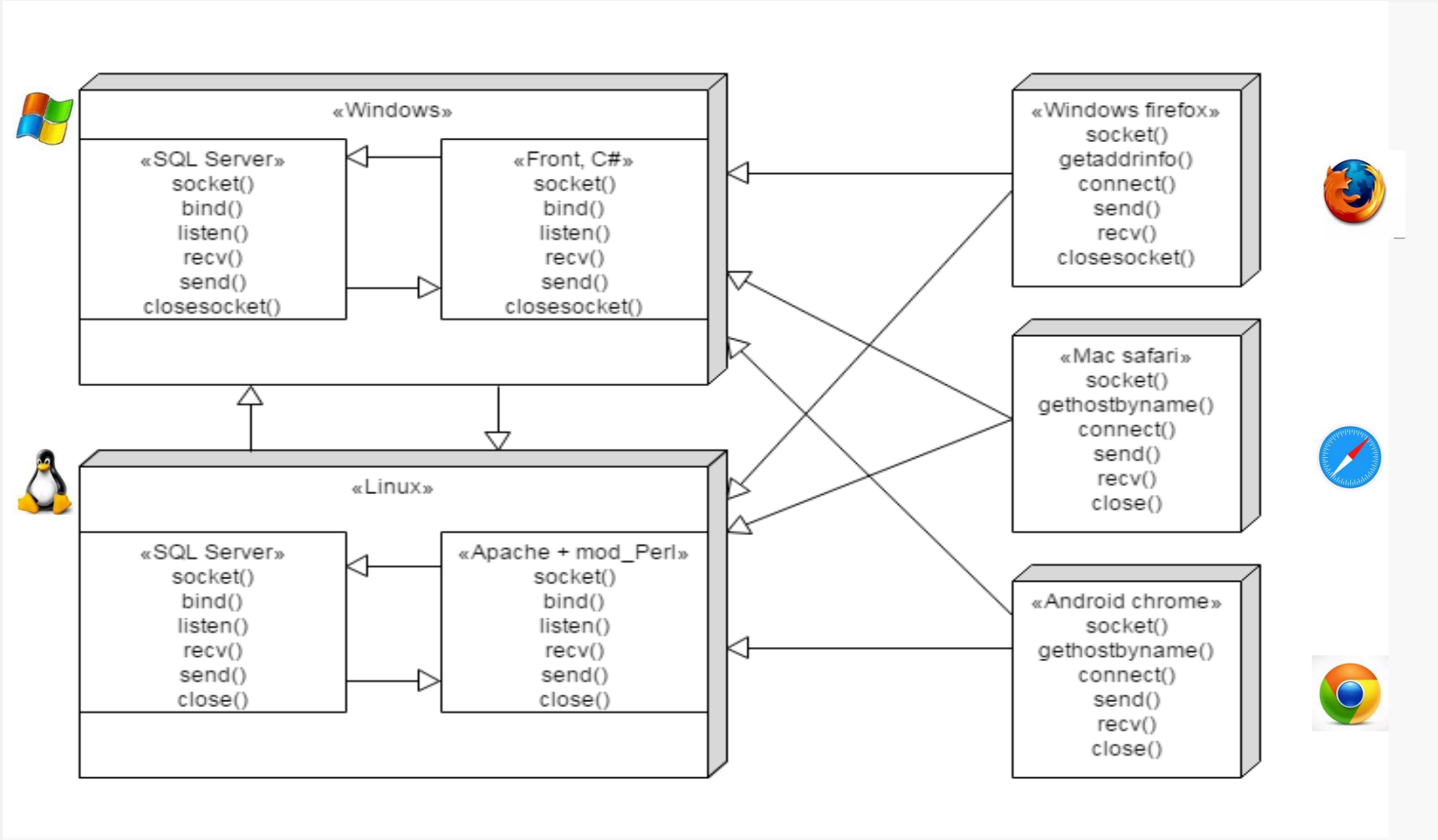
1) удобнее поддерживать (авторизация - отдельно, парсинг письма - отдельно)

2) уменьшение взаимного влияния

3) RAM для всех не хватит

Итог: внутри крупных сервисов реально много сети!

Почему (используется сеть)? Универсальность и “простота”



Базовые функции: socket()


```
#include <sys/socket.h>
int socket(int domain, int type, int protocol);
```

domain - Protocol Family - набор протоколов (сетевой уровень)

- PF_UNIX // unix-сокеты, локальный ipc внутри системы
- PF_INET/PF_INET6 // IPv4/IPv6 сокет
- PF_PACKET // низкоуровненвый интерфейс (linux only)

type - тип коммуникации

- SOCK_STREAM // гарантирует доставку, последовательный протокол
- SOCK_DGRAM // UDP
- SOCK_RAW // Raw-сокеты, низкий уровень (доступ к tcp/ip-пакетам)

protocol - конкретный протокол (транспортный уровень)

- /etc/protocols // список возможных
- 0 // использовать протокол по умолчанию для выбранного семейства
- IPPROTO_TCP // можно задать явно

Базовые функции: socket()


```
// TCP
int sd = socket( /*Protocol Family*/ PF_INET, SOCK_STREAM, IPPROTO_TCP);
if (sd <= 0)
    throw std::runtime_error(std::string(strerror(errno)));


// UDP
int sd = socket( /*Protocol Family*/ PF_INET, SOCK_DGRAM, IPPROTO_TCP);
if (sd <= 0)
    throw std::runtime_error(std::string(strerror(errno)));
```

Базовые функции: connect()

Создали сокет, теперь можно “коннектиться”. Но куда?
Утилиты: ping, host, dig, nslookup, telnet

e.mail.ru vs e.mail.ri

```
host e.mail.ru
        e.mail.ru has address 94.100.180.215
        e.mail.ru has address 94.100.180.216

telnet e.mail.ru 443                    # OK!

host e.mail.ri
        Host e.mail.ri not found: 3(NXDOMAIN)

telnet e.mail.ri 443                    # telnet: e.mail.ri: Name or service not known
```

Базовые функции: connect()


```c
#include <sys/socket.h>  // connect, AF_INET
#include <netdb.h>       // gethostbyname
#include <netinet/in.h>  // struct sockaddr_in

// STREAM and DGRAM
int connect(int sockfd,
            const struct sockaddr *serv_addr,
            socklen_t addrlen);

struct hostent *gethostbyname(const char *name);
```

Базовые функции: connect()


```
void Client::connect(const std::string &host /*e.mail.ru*/, int port) {
    int sd = socket(PF_INET, SOCK_STREAM, 0);
    struct hostent* hp = gethostbyname(host.c_str());

    struct sockaddr_in addr;            // КУДА ИДЕМ?

    addr.sin_family = AF_INET;          // Address Family only AF_INET !
    addr.sin_port = htons(port);        // big/little endian
    memcpy(&addr.sin_addr, hp->h_addr, hp->h_length);
    int connected = connect(sd, (struct sockaddr*)&addr, sizeof(addr));
    if (connected != 0)
        throw runtime_error(std::string(strerror(errno)));
}
```

Базовые функции: send()


```
#include <sys/socket.h>
ssize_t send(int sd, const void *msg, size_t len, int flags);

ssize_t sendto(int sd,
               const void *msg,
               size_t len,
               int flags,
               struct sockaddr *to,
               socklen_t elen);

ssize_t sendmsg(int sd, const struct msghdr *msg, int flags);
```

Базовые функции: send()


```
// плохо!
std::string msg = "hello!";
ssize_t n = send(sd, msg.data(), msg.size(), 0);


// хорошо!
void Client::send(int sd, const std::string &msg) {
    size_t left = msg.size();
    ssize_t sent = 0;
    while (left > 0) {
        sent = ::send(sd, msg.data() + sent, msg.size() - sent, flags);
        if (-1 == sent)
            throw std::runtime_error(std::string(strerror(errno)));
        left -= sent;
    }
}
```

Базовые функции: recv()


```c
#include <sys/socket.h>

int recv(int sd, void *buf, size_t len, int flags);
```

Базовые функции: recv()


```
std::string Client::recv(int sd) {
    char buf[128]; // Почему именно 128?

    int n = ::recv(sd, buf, sizeof(buf), /*flags*/0);
    if (-1 == n)
        throw runtime_error(std::string(strerror(errno)));

    return std::string(ret, ret + n);
}
```

Проблема: как узнать, сколько байт нужно читать?
Данные есть в ядре, но их надо доставить в клиентский код.
Решение: зависит от ситуации (от протокола).

Базовые функции: close()


```c
#include <unistd.h>     // закрывает и файлы, и сокеты...
int close(int sd);
```

class Client (tcp client)


```
class Client {
        int m_Sd;
public:
        Client() : m_Sd(-1) {}
        ~Client()           { if (m_Sd > 0) close(m_Sd); }
public:
    void connect(const std::string &host, int port) throw (exception);
    void send(const std::string &s)                 throw (exception);
    std::string recv()                              throw (exception);
};
```

Пример использования: telnet

```
telnet park.mail.ru 80

Trying 185.5.138.251…                                  // resolv
Connected to park.mail.ru.                             // connect
Escape character is '^]'.
123                                                    // send
HTTP/1.1 400 Bad Request                       // recv
Server: nginx
Content-Type: text/html
Content-Length: 166

<html>
<head><title>400 Bad Request</title></head>
</html>
Connection closed by foreign host.             // close
```

Пример использования: http-запрос

Http-клиент: query


```
GET /people/?q=i.saneev HTTP/1.1\r\n
Host: park.mail.ru\r\n
\r\n
```

Или:

```
std::string q =
    “GET /people/?q=i.saneev HTTP/1.1\r\nHost: park.mail.ru\r\n\r\n”;
```

Http-клиент: query подробно (curl)


```
curl -v http://park.mail.ru/feed
* Connected to park.mail.ru (185.5.138.251) port 80 (#0)
> GET /feed HTTP/1.1
> User-Agent: curl/7.35.0
> Host: park.mail.ru
>
< HTTP/1.1 302 Moved Temporarily
< Date: Sun, 27 Mar 2016 19:43:12 GMT
< Content-Type: text/html
< Content-Length: 154
< Location: https://park.mail.ru/feed
<
<html>
<head><title>302 Found</title></head>
<body><h1>302 Found</h1><hr>nginx</body></html>
```

Http-клиент: неудачная попытка


```
Client http_client;
http_client.connect("e.mail.ru", 80);
http_client.send("GET /inbox HTTP/1.1\r\nHost: e.mail.ru\r\n\r\n");
std::string response = http_client.recv();
```

#Приняли не все, 128 байт - мало!

Http-клиент: удачная попытка

Попробуем пофиксить:

```
std::string Client::recv() throw (std::exception)
{
    char buf[1024];          // было 128 байт
    ...
}
```

Теперь ОК! Но правильно ли это?
Клиент может:

- прислать еще больше данных
- прислать ответ в 2 пакетах (нужно 2 вызова recv())

Http-клиент: нужен цикл!


```
std::string Client::recv() throw (std::exception) {
    std::string ret;
    char buf[1024];
    while (true) {
        int n = ::recv(m_Sd, buf, sizeof(buf), /*flags*/0);
        if (-1 == n) handle_error();
        if (0 == n) break;
        ret.append(buf, n);
    }
    return ret;
}
```

#...oooops! Программа заблокировалась!
оказывается, есть блокирующие и неблокирующие сокеты

recv() на блокирующем сокете


```
int n = ::recv(m_Sd, buf, sizeof(buf), /*flags*/0);
```

1. n > 0, есть данные;
2. n = -1, ошибка чтения;
3. n = 0, endpoint закрылся - можно делать close() и все сначала.

Следствие: если данных нет и ошибок нет и сервер не закрывает соединение - recv() “висит” бесконечно.

Как боротся с “блокированием”?

setsockopt(): свойства сокета, пример с установкой таймаута


```
#include <sys/socket.h>

int getsockopt(int s, int level, int optname, void *val, socklen_t *len);
int setsockopt(int s, int level, int name, const void *v, socklen_t len);

level: SOL_SOCKET - уровень сокета, TCP - уровень tcp, ...

void Client::setRcvTimeout(int sec, int microsec) throw (std::exception) {
    struct timeval tv;
    tv.tv_sec = sec;
    tv.tv_usec = microsec;
    if (setsockopt(m_Sd, SOL_SOCKET, SO_RCVTIMEO, &tv, sizeof(tv)) != 0)
        throw runtime_error("rcvtimeout: " + string(strerror(errno)));
}
```

Http-клиент: установим таймаут в блокирующий сокет


```
Client http_client;
http_client.connect("e.mail.ru", 80);

// Теперь, если n == -1 && errno == EAGAIN,
// значит за отведенный таймаут данные не поступили
http_client.setRcvTimeout(/*sec*/1, /*microsec*/0);
http_client.send("GET /inbox HTTP/1.1\r\nHost: e.mail.ru\r\n\r\n");
std::string response = http_client.recv();
```

OK! Теперь recv() не заблокируется, но осталась одна проблема:
как определить, что сервер отдал все, что хотел?
ведь сервер может "тормозить" больше 1 секунды!

Http-клиент: как правильно?

Используем длину контента + таймауты!

Прикладной протокол содержит длину сообщения:
В http - “Content-Length: 10385”
В memcached - количество “\r\n”

Для реализации нам понадобятся:
1. парсер протокола (получаем длину);
2. сокет с таймаутом.

Http-клиент: длина контента + таймауты - итог


```
std::string Client::recv() throw (std::exception) {
    std::string ret;
    char buf[128];
    while (true) {
        int n = ::recv(m_Sd, buf, sizeof(buf), 0);
        if (-1 == n && errno != EAGAIN) throw runtime_error("read");
        if (0 == n || -1 == n) break;
        ret.append(buf, n);
        size_t bytes_left = get_length_with_protocol_http(ret);
        if (bytes_left == ret.size())    // OK!
            break;
    }
    return ret;
}
```

Http-клиент: неблокирующий recv()

Иногда лучше использовать неблокирующие сокеты.
Пример: таймаут на connect() - будет дальше.

recv() на неблокирующем сокете:

1. n > 0, есть данные;
2. n = 0, endpoint закрылся, можно делать close();
3. n = -1 && errno == EAGAIN, пока что нет данных, но может будут;
4. n = -1 && errno != EAGAIN, ошибка;

Не блокируются:

- connect (возвратит -1)
- recv/send
- accept (будет позже, для сервера)

fcntl() - обычный способ сделать сокет неблокирующим (linux only)


```
#include <fcntl.h>
#include <unistd.h>

int fcntl(int fd, int cmd, long arg);



void Client::setNonBlocked(bool opt) throw (std::exception) {
    int flags = fcntl(m_Sd, F_GETFL, 0);
    int new_flags = (opt)? (flags | O_NONBLOCK) : (flags & ~O_NONBLOCK);
    if (fcntl(m_Sd, F_SETFL, new_flags) == -1)
        throw runtime_error("nonblocked: " + string(strerror(errno)));
}
```

Базовые функции: bind()


```
#include <sys/socket.h>
int bind(int sockfd, struct sockaddr *my_addr, socklen_t addrlen);

struct sockaddr_in serv_addr;
memset(&serv_addr, 0, sizeof(serv_addr));

serv_addr.sin_family = AF_INET;
serv_addr.sin_port = htons(port);
serv_addr.sin_addr.s_addr = htonl(INADDR_ANY);

if (bind(sd, (struct sockaddr*)&serv_addr, sizeof(serv_addr)) < 0)
    throw std::runtime_error("bind: " + std::string(strerror(errno)));
```

Теперь у сокета есть адрес!

Базовые функции: bind() - что такое INADDR_ANY?

./simple_server --port 7777

```
1. serv_addr.sin_addr.s_addr = htonl(INADDR_ANY);

 -  telnet localhost 7777                                  # OK
 -  telnet 127.0.0.1 777                                   # OK
 -  telnet 192.168.70.129 7777                             # OK

2. serv_addr.sin_addr.s_addr = htonl(INADDR_LOOPBACK);

 -  telnet localhost 7777                                  #Connection
    refused
 -  telnet 127.0.0.1 777                                   # OK
 -  telnet 192.168.70.129 7777                             # Connection
    refused

3. serv_addr.sin_addr.s_addr = inet_addr("192.168.70.129");

 -  telnet localhost 7777                                  # Connection
    refused
 -  telnet 127.0.0.1 777                                   # Connection
    refused
 -  telnet 192.168.70.129 7777                             # OK
```

Базовые функции: listen()


```
#include <sys/socket.h>
int listen(int sd, int backlog);  // backlog - используется ядром

void Server::createServerSocket(uint32_t port, uint32_t queue_size) {
    int sd = socket(PF_INET, SOCK_STREAM, IPPROTO_TCP);

    struct sockaddr_in serv_addr;
    serv_addr.sin_family = AF_INET;
    serv_addr.sin_addr.s_addr = htonl(INADDR_ANY);
    serv_addr.sin_port = htons(port);

    bind(sd, (struct sockaddr*)&serv_addr, sizeof(serv_addr));
    ::listen(sd, listen_queue_size);
    m_Sd = sd;
}
```

Базовые функции: listen()


```
# Теперь к сокету можно сделать connect!
./simple_server --port 7777

Linux:
me@ubuntu:$ netstat -antp | fgrep simple_server
      tcp 0 0.0.0.0:7777 0.0.0.0:* LISTEN 15884/simple_server

MacOS:
netstat -antp tcp | grep LISTEN
            tcp4       0      0  *.7777                 *.*                    LISTEN
            tcp6       0      0  *.63957                *.*                    LISTEN

lsof -nP -i4TCP:7777  или lsof -i :7777
            simple_se 78289 isaneev    3u  IPv4 0x7d47332cda97a0d3      0t0  TCP
*:7777 (LISTEN)
```

Позволяет просматривать список и состояние сокетов в системе:

- TCP/UDP/Unix
- LISTEN, ESTABLISHED, TIMEWAIT e.t.c.

Базовые функции: accept()


```
#include <sys/socket.h>


// sd = bind() + listen()
int accept(int sd, struct sockaddr *addr, socklen_t *addrlen);
```

Самый важный вызов для tcp сервера:

- Извлекает первый запрос на соединение из очереди listen;
- Создает новый сокет, возвращает его дескриптор;
- Заполняет информацию о клиенте и кладет ее в addr (с какого порта и адреса пришел клиент?).

Наконец клиент и сервер могут общаться!

Базовые функции: accept()


```
// m_Sd = слушающий сокет, bind() + listen()

std::shared_ptr<Client> Server::accept() throw (std::exception) {
    struct sockaddr_in client;              // Откуда клиент?
    socklen_t cli_len = sizeof(client);

    int cli_sd = ::accept(m_Sd, (struct sockaddr*)&client, &cli_len);

    std::cout << "+client: " << cli_sd
              << ", from: " << int2ipv4(client.sin_addr.s_addr)
              << std::endl;
    return std::make_shared<Client>(cli_sd);
}
```

```
+client: 4, from: 127.0.0.1
```

class Server


```
class Server {
    public:
        Server()  : m_Sd(-1) {}
        ~Server()             { if (m_Sd > 0) close(m_Sd); }

        void createServerSocket(uint32_t port, uint32_t queue_size);

        std::shared_ptr<Client> accept()       throw (std::exception);

        void setNonBlocked(bool opt)           throw (std::exception);
    private:
        int m_Sd;
};
```

echo-сервер для одного клиента


```
Server serv;
serv.createServerSocket(/*port*/7777, /*backlog*/25);
while(true) {
    std::shared_ptr<Client> client = serv.accept();
    client_work(client);
}

void client_work(std::shared_ptr<Client> client) {
    client->setRcvTimeout(/*sec*/30, /*microsec*/0);
    while (true) try {
        std::string line = client->recv();
        client->send("echo: " + line + "\n");
    }
    catch(const std::exception &e) { return; }
}
```

Клиентский и серверный код: рекомендации

Сеть - это нюансы использования конкретного протокола:

- знать протокол, уметь считать длину сообщения для recv

Сеть - медленная:

- таймауты - это наше все
- сжатие (gzip в HTTP, меньше данных - больше скорость)

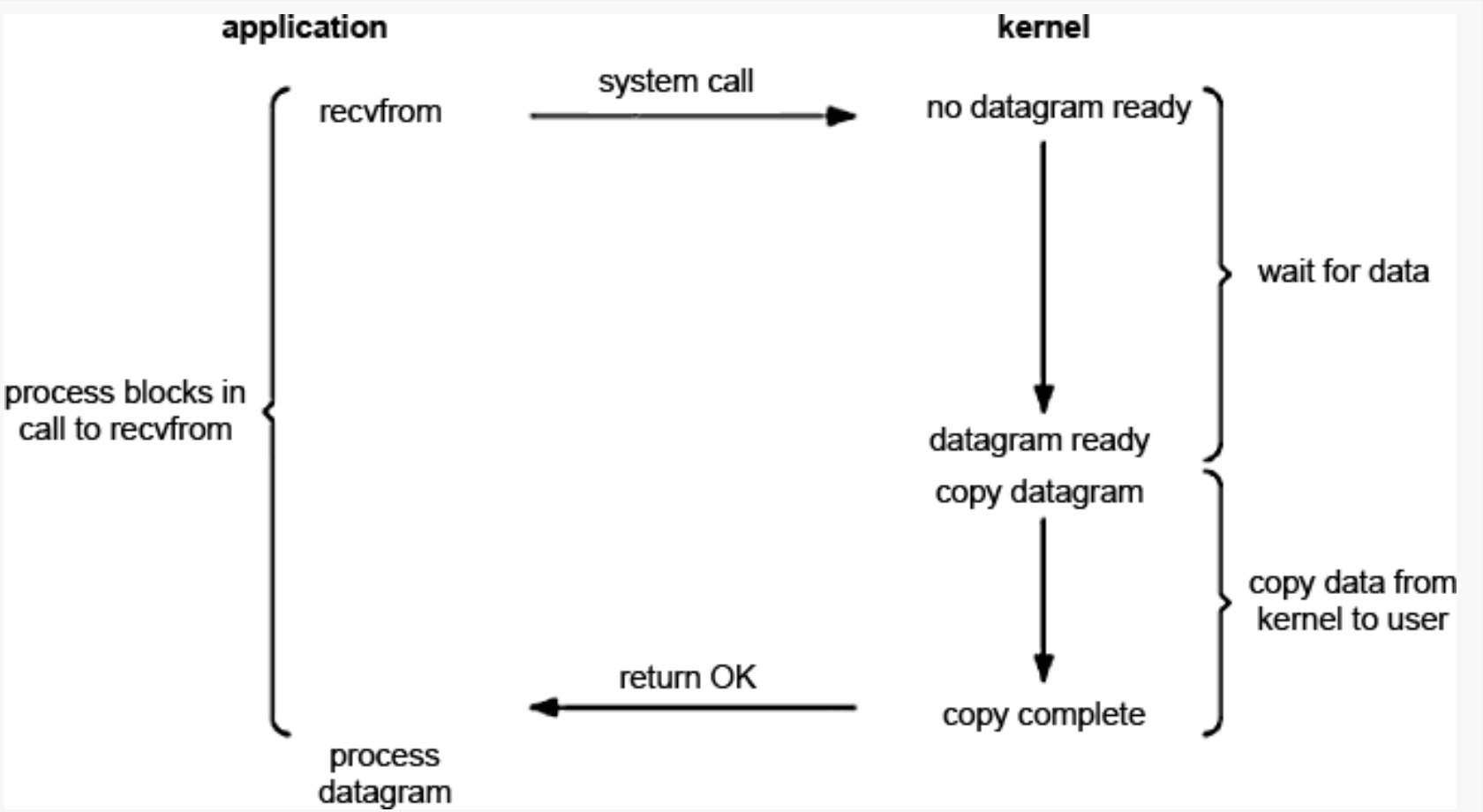
Сеть - ненадежная:

- обязательна проверка ret-кодов функций и errno

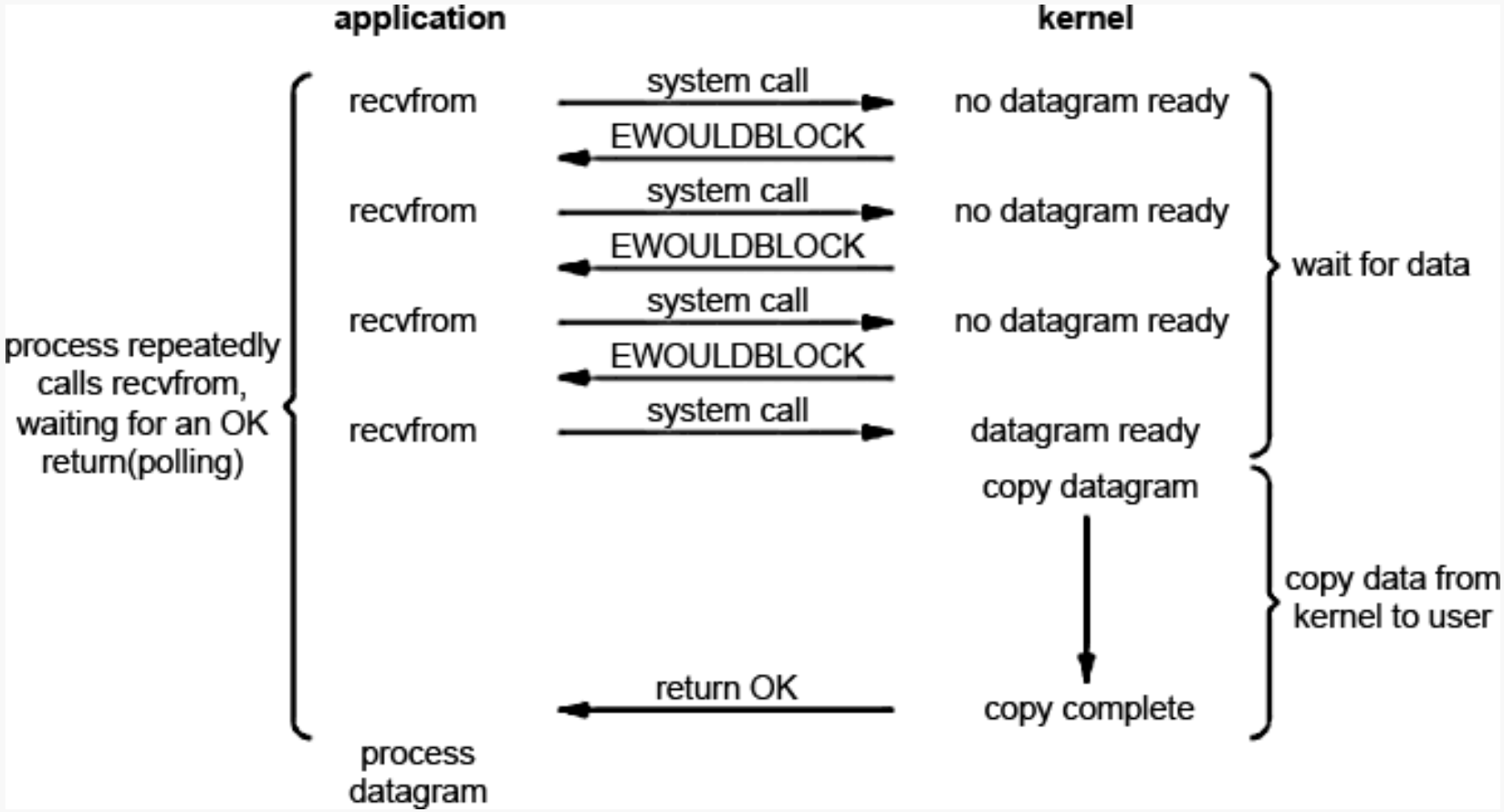
Сеть - сильно подвержена влиянию системы:

- не забываем close(), free(), delete()
- держим в уме: нагружая систему по cpu, проседает производительность сетевого сервера

Модели ввода-вывода. Блокирующий I/O



Модели ввода-вывода. Неблокирующий I/O



Архитектура: как обрабатывать нескольких клиентов одновременно?

fork()

- копирует процесс, включая таблицу дескрипторов;
- ОС решает, в какой принимать данные (accept);
- ОС решает, в какой принимать данные (recv);
- писать можно в оба дескриптора после форка;
- закрытие в одном оставляет в другом живым!

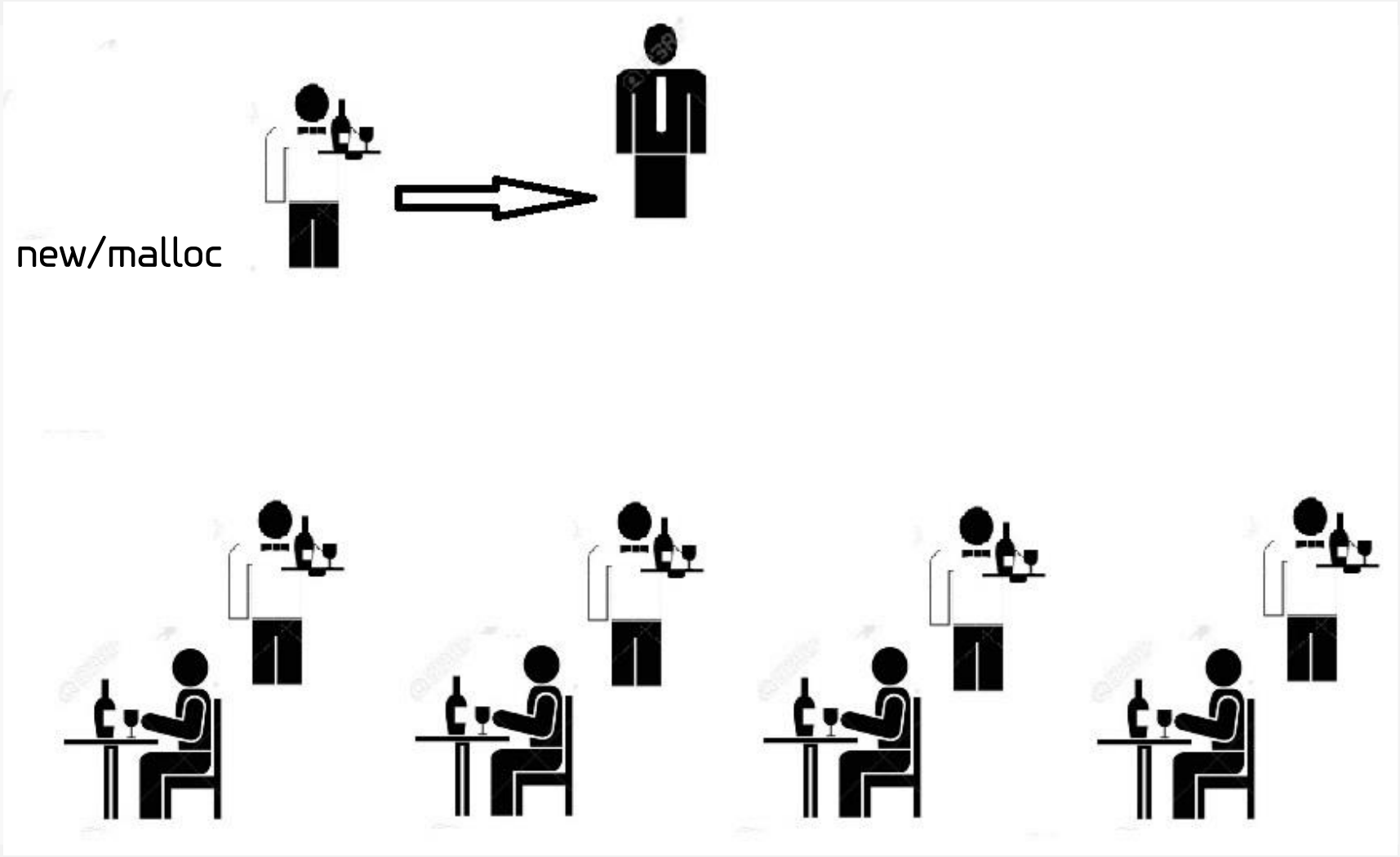
thread()

- копирует лишь часть процесса;
- дескрипторы остаются общими.

multiplexing

- ничего не копирует, работает в ядре.

one client - one process



Простой вариант: fork/thread на каждое соединение


```
Server serv;
serv.createServerSocket(port, 25);

while(true)
{
    std::shared_ptr<Client> client = serv.accept();

    std::thread t (client_work(client));  // или fork() + client_work()
}
```

+ Суперпросто реализовать.
- Рост потребления ресурсов не контролируется (fork-бомба).

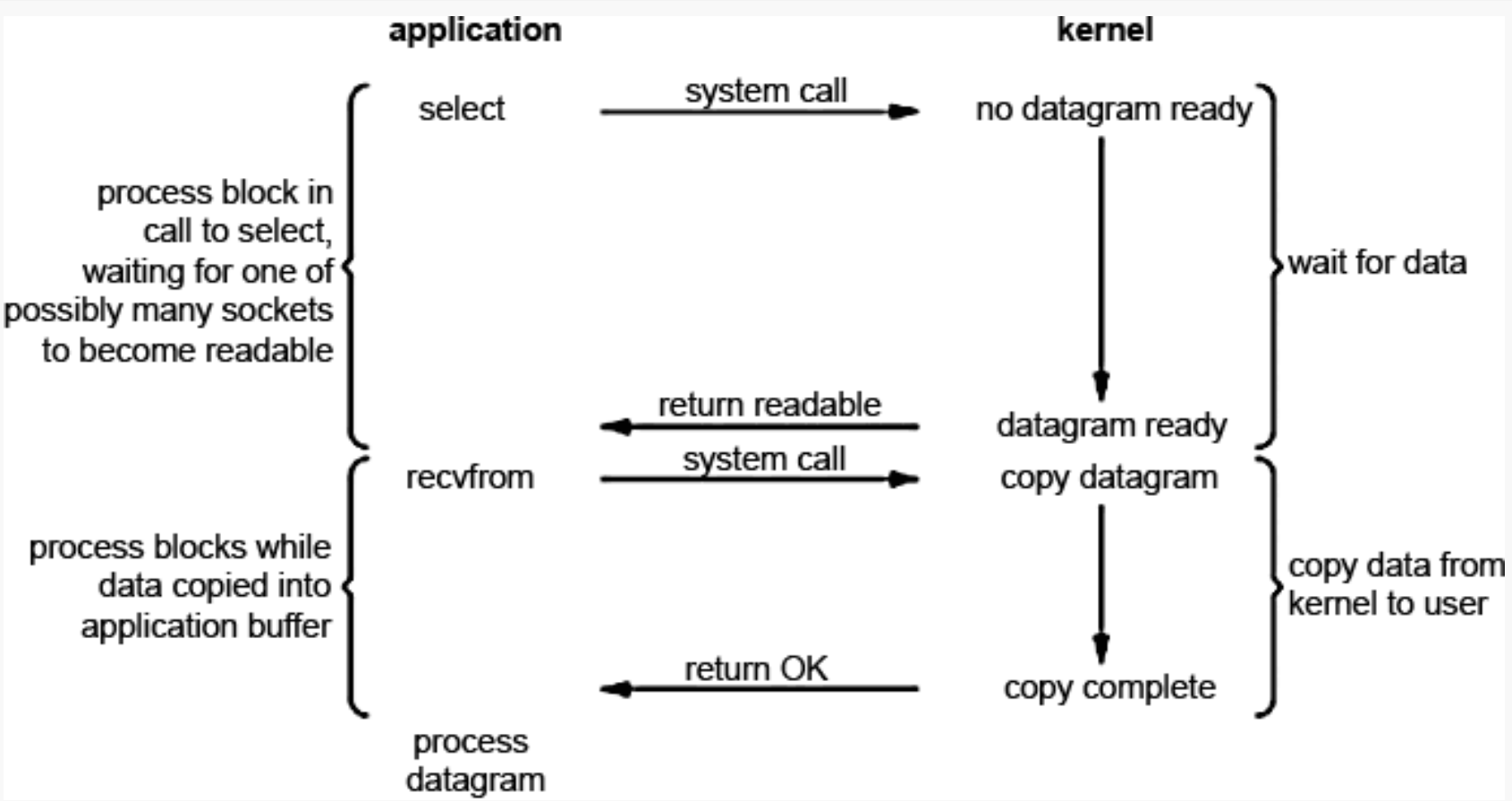
Prefork


```
Socket serv;
serv.createServerSocket(port, 25);

pid_t pid = fork();          // N раз форкаемся
if (pid > 0) std::cerr << "parent: " << getpid() << std::endl;
else std::cerr << "child: " << getpid() << std::endl;

while(true) {
    std::shared_ptr<Client> client = serv.accept();
    client_work(client);
}
```

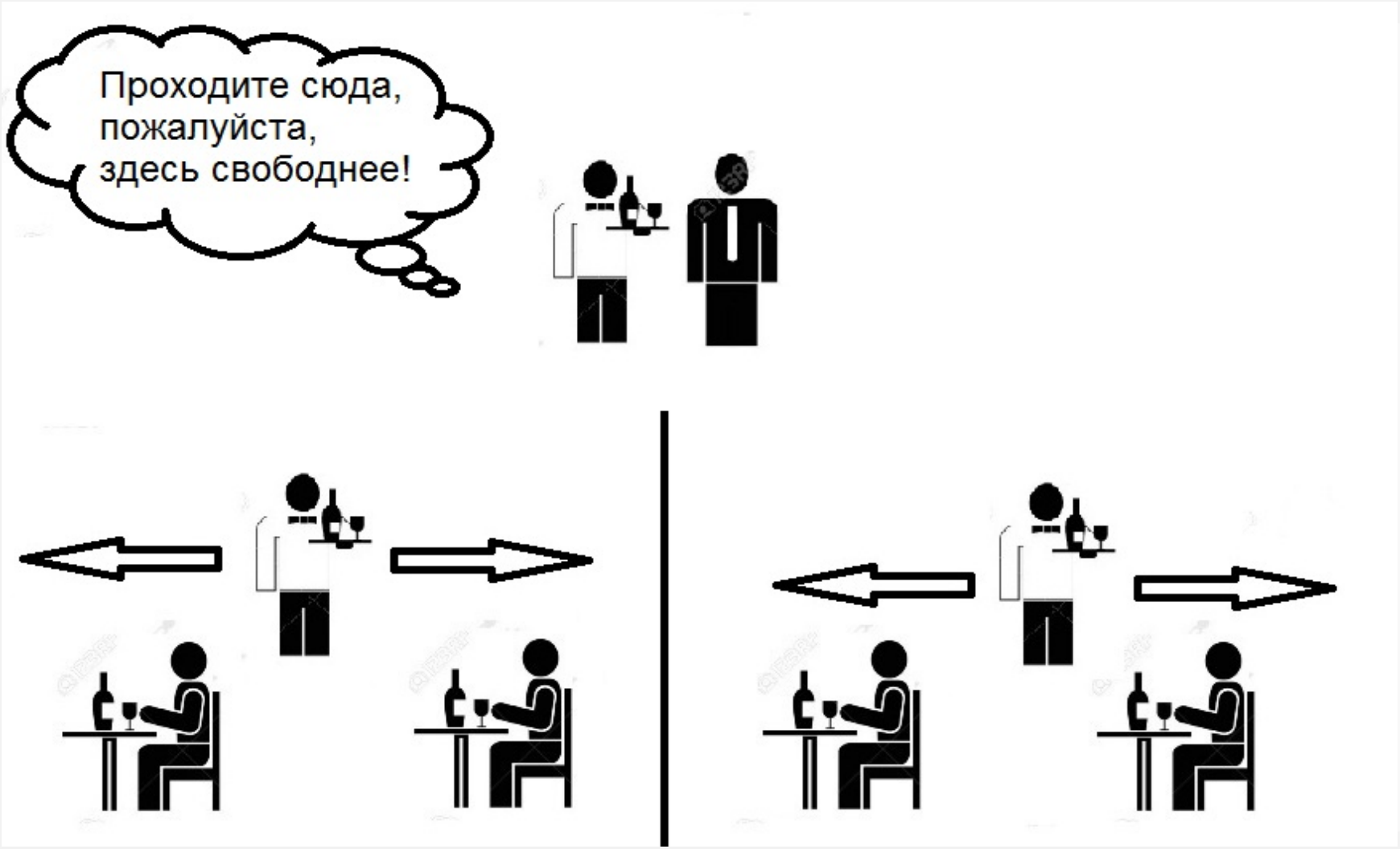
Apache = этот_пример + master-process.

+ Надежно: у каждого воркера - свое адресное пространство;
+ Просто программировать
- Два медленных клиента “убивают” сервер; плюс ресурсы

Модели ввода-вывода. Мультиплексирование I/O



Мультиплексирование



Мультиплексирование

Это возможность одним потоком обслуживать десятки тысяч клиентов.

Для этого необходимо уметь (быстро) понимать, доступны ли данные.
(Как официант понимает, что клиент готов сделать заказ).

Представим, что у нас есть такая НЕБЛОКИРУЮЩАЯ функция:

```
bool Client::dataAvailable() throw (std::exception)
{
    // мгновенно возвращает true, если в ядре есть данные для Client
    // иначе return false;
}
```

Мультиплексирование: псевдо реализация


```
std::vector<std::shared_ptr<Client>> clients;
Server serv;
serv.createServerSocket(port, 25);
serv.setNonBlocked(true);

while(true) {
    usleep(100);
    while (auto client = serv.accecpt()) {
        client->setNonBlocked(true);
        clients.push_back(client);
    }
    std::for_each(clients.begin(), clients.end(), [](shared_ptr<Client> s){
        if (s->dataAvailable()) s->onRead();
    });
}
```

Мультиплексирование: каждый сервер делает это


```
Server serv;
serv.createServerSocket(port, 25);


while(true) {
    res = multiplex_method(clients, timeout);
    for(client : res)
    {
        client_work(client);
    });
}
```

nginx = этот_пример ^ количество_ядер + master-process.

\+ одновременная обработка 100К клиентов

\+ при малом количестве затраченных ресурсов

\- нельзя делать “тяжелые” синхронные операции

Мультиплексирование: select


```
#include <sys/select.h>
int select(int n, fd_set *readfds, fd_set *writefds,
           fd_set *exceptfds, struct timeval *timeout);

FD_CLR(int fd, fd_set *set);
FD_ISSET(int fd, fd_set *set);
FD_SET(int fd, fd_set *set);
FD_ZERO(fd_set *set);
```

\+ достаточно эффективен
\+ супер-портабелен

\- макс 1024 дескриптора
\- максимальный fd должен быть < 1024
\- fd_set – модифицируется после каждого вызова
\- нужно вычислять максимальный дескриптор
\- ограниченное количество событий

Мультиплексирование: select, вспомогательные классы


```
// Базовый движок, реализует слушающий сокет
class Engine {
        int m_Listener;
        int createServerSocket(uint32_t port, uint32_t listen_queue_size);
    public:
        explicit Engine(int port);
        virtual void run() =0;
        int listener() const { return m_Listener; }
};

// Просто оболочка для сокета
struct Client {
        explicit Client(int _sd) : sd(_sd) {}
        int sd;
};
```

Мультиплексирование: select


```
class SelectEngine: public Engine {
    public:
        explicit SelectEngine(int port): Engine(port) {}
        virtual void run() override;
    private:
        int prepare(fd_set *read_fds);
        void eventLoop();
        std::vector<Client> m_Clients;                  // Здесь храним
клиентов
};
```

Мультиплексирование: select


```
int SelectEngine::prepare(fd_set *read_fds) {

        // Инициализация структур для вызова select()

    FD_ZERO(read_fds);
    FD_SET(listener(), read_fds);
    int fdmax = listener();
    for (auto c: m_Clients) {
        if (c.sd > fdmax) fdmax = c.sd;
        FD_SET(c.sd, &read_fds);
    }
    return fdmax;
}
```

Мультиплексирование: select event loop


```
while (true) {
    fd_set read_fds;
    int fd_max = prepare(&read_fds);
    int sel = select(fdmax + 1, &read_fds, NULL, NULL, /*timeout*/NULL);
    for (size_t i = 0; i < m_Clients.size(); ++i) {
        if (!FD_ISSET(m_Clients[i].sd, &read_fds)) continue;
        if (m_Clients[i].sd == listener()) {
            m_Clients.push_back(Client(cli_sd));
        }
        else {
            recv(m_Clients[i].sd, buf, sizeof(buf));
            send(m_Clients[i].sd, “hello!”, sizeof(“hello!”));
        }
    }
}
```

Мультиплексирование: poll


```
#include <sys/poll.h>
int poll(struct pollfd *ufds, unsigned int nfds, int timeout);
```

+ нет ограничения на макс кол-во дескрипторов
+ достаточно широко портабелен (но уже внутри linux, bsd, solaris)
+ есть список наблюдаемых событий – удобно для детектирования отключения клиентов (нет необходимости в операции чтения и сравнения с 0)

- чуть менее эффективен, чем select (8-16 байт на сокет)

Мультиплексирование: poll


```
enum class client_state_t: uint8_t { WANT_READ, WANT_WRITE };

struct Client {
    explicit Client(int _sd): sd(_sd), state(client_state_t::WANT_READ) {}
    Client(int _sd, client_state_t _state) : sd(_sd), state(_state) {}
    int sd;
    client_state_t state;
};
class PollEngine: public Engine {
    std::vector<Client> m_Clients;
    void eventLoop();
public:
    explicit PollEngine(int port): Engine(port) {}
    virtual void run() override;
};
```

Мультиплексирование: poll


```
int PollEngine::prepare(struct pollfd *fds) {
    for (size_t i = 0; i < m_Clients.size(); ++i) {
        fds[i].fd = m_Clients[i].sd;
        if (m_Clients[i].state == client_state_t::WANT_READ)
            fds[i].events = POLLIN;
        else
            fds[i].events = POLLOUT;
    }
}
```

Мультиплексирование: poll event loop


```
struct pollfd fds[32768];
while (true) {
    prepare(fds);
    poll(fds, m_Clients.size(), /* timeout in msec */ 0);
    for (size_t i = 0; i < m_Clients.size(); ++i) {
        if (fds[i].revents & POLLIN) {
            recv(m_Clients[i]);
            m_Clients[i].state = client_state_t::WANT_WRITE;
        }
        else if (fds[i].revents & POLLOUT) {
            send(fds[i].fd, "hello", sizeof("hello"));
            m_Clients[i].state = client_state_t::WANT_READ;
        }
    }
}
```

Мультиплексирование: epoll


```
#include <sys/epoll.h>
int epoll_create(int size);
int epoll_ctl(int epfd, int op, int fd, struct epoll_event *event);
int epoll_wait(int epfd, struct epoll_event * events,
               int maxevents, int timeout);
```

+ позволяет добавлять, удалять, модифицировать дескрипторы и события
+ эффективен (лучше чем poll) при > 1K клиентов
+ возвращает только сокеты, на которых есть события
+ можно хранить “клиентов” прямо “внутри“ epoll
+ нет ограничения на макс кол-во дескрипторов

- не портабелен - только linux после 2.5

Мультиплексирование: epoll, event loop


```
int epfd = epoll_create(max_clients);
struct epoll_event *events = malloc(max_clients*sizeof(struct epoll_event));
int epoll_ret = epoll_wait (epfd, events, max_clients, -1);
for (int i = 0; i < epoll_ret; ++i) {
    if (events[i].data.fd == listener()) {
        struct epoll_event cli_ev;
        cli_ev.data.ptr = new Client(::accept(listener()...));
        cli_ev.events = EPOLLIN;
        epoll_ctl(epfd, EPOLL_CTL_ADD, cli_sd, &cli_ev);
    }
    else if (events[i].events & EPOLLIN) {
        Client *cs = static_cast<Client*>(events[i].data.ptr);
        cs->doRead();
    }
}
```

Коннект с таймаутом (connect != recv) с помощью select


```
int sd = socket(/*Protocol Family*/PF_INET, SOCK_STREAM, IPPROTO_TCP);
set_non_blocked(sd, true);
int connected = ::connect(sd, (struct sockaddr*)&addr, sizeof(addr));
// errno == EINPROGRESS

fd_set write_fds;
FD_ZERO(&write_fds);
FD_SET(sd, &write_fds);
struct timeval tm {.tv_sec = timeout, .tv_usec = 0};

int sel = select(sd + 1, NULL, &write_fds, /*except*/NULL, &tm);
if (sel != 1)
{
    throw std::runtime_error("connect timeout");
}
```

Пример: коннект с таймаутом

1. Коннект на обычный хост:
./client_timeout google.com 80 # OK!

*Можно использовать эти адреса для тестов NOROUTE:
192.168.0.0, 10.255.255.*, 192.168.255.255...

2. Коннект на “медленный” хост без таймаута:
telnet google.com 81 # long hang
Connection refused

3. Коннект на “медленный” хост с таймаутом:
./client_timeout google.com 81 # hang 5 sec
connect timeout

Чтение с таймаутом с помощью select (just in case)


```
std::string Client::recvTimed(int timeout) throw (std::exception) {
    fd_set read_fds;
    FD_ZERO(&read_fds);
    FD_SET(m_Sd, &read_fds);

    struct timeval tm;
    tm.tv_sec = timeout;
    tm.tv_usec = 0;

   int sel = select(m_Sd+1, &read_fds, /*w*/NULL, /*except*/NULL, &tm);
    if (sel != 1)
        throw std::runtime_error("read timeout");

    return recv();
}
```

Мультиплексирование: библиотеки

Самые известные: libevent (http://libevent.org/), libev, libuv

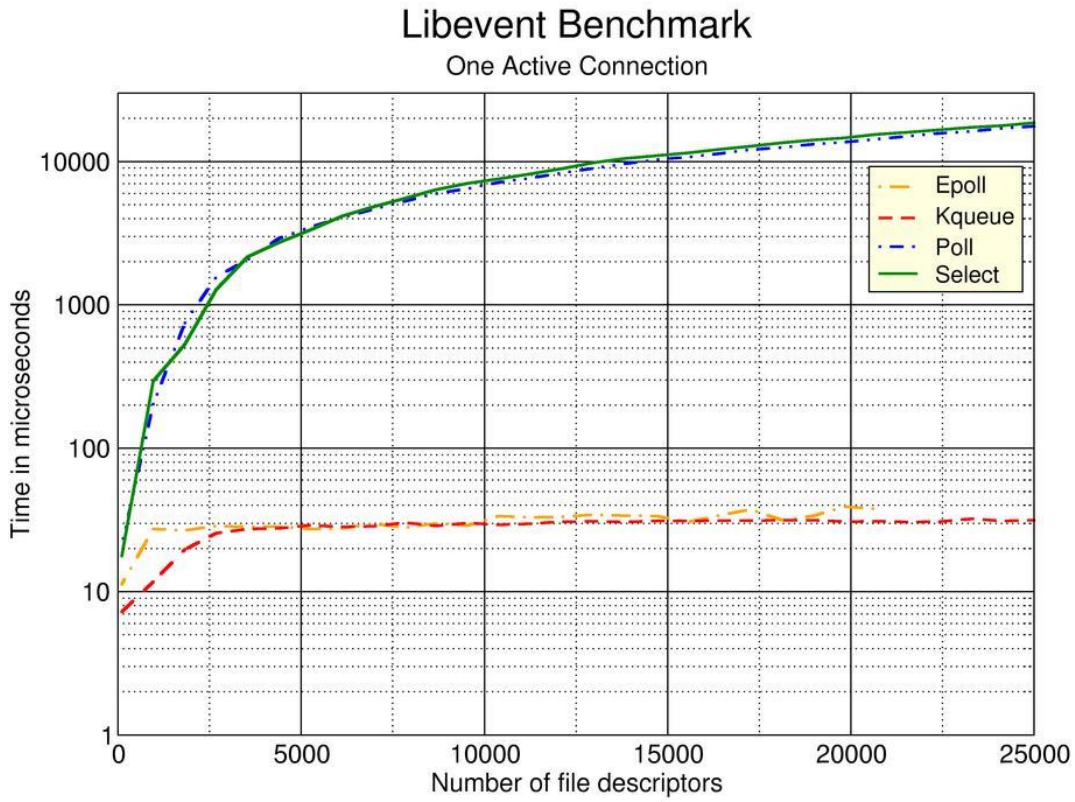
- кроссплатформенные
- умеют select, poll, epoll, kqueue, /dev/poll и даже windows
- имеют “биндинги” к другим языкам (к примеру, Event::Lib для perl)

Простой echo-сервер, select, poll, epoll:
https://github.com/o2gy84/misc/tree/master/texnopark/libevent

Http прокси-сервер:
https://github.com/o2gy84/o2proxy

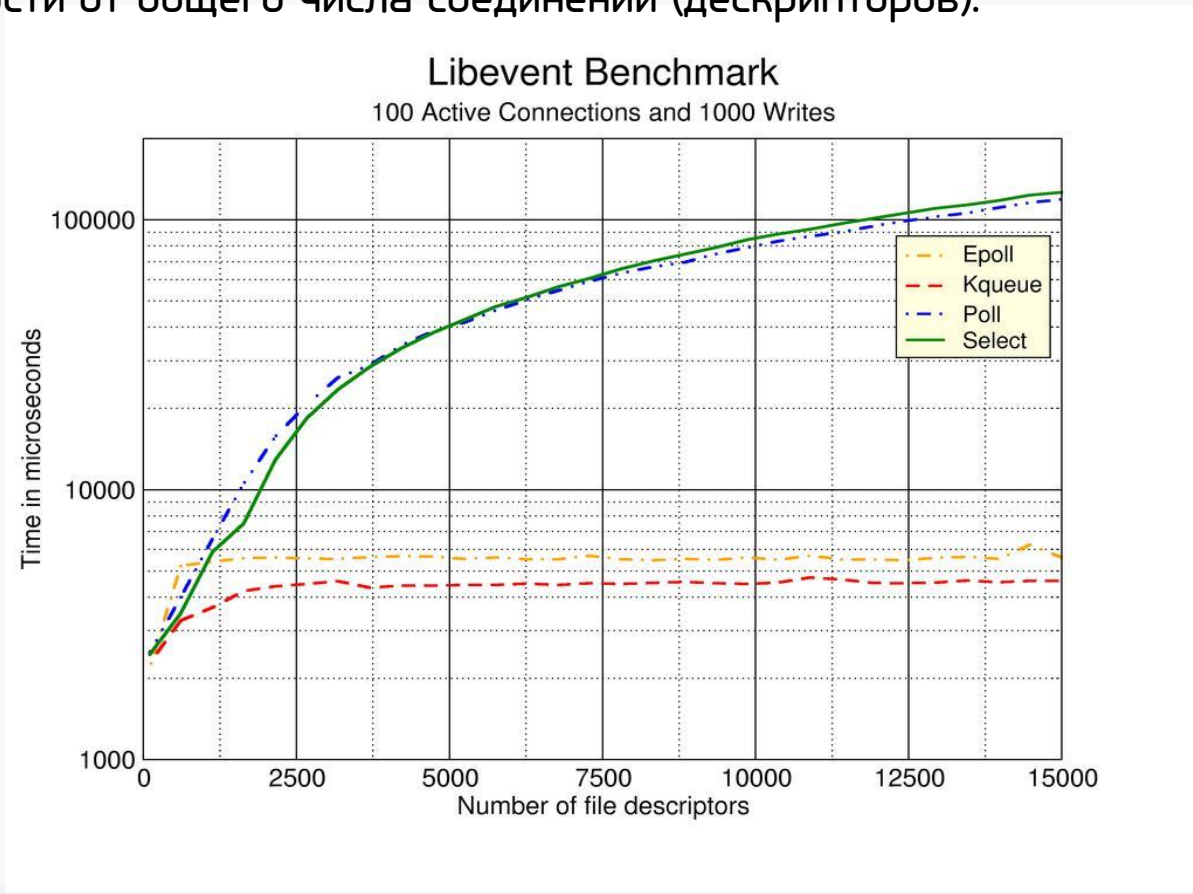
Мультиплексирование.

Время на обработку события в зависимости от числа соединений

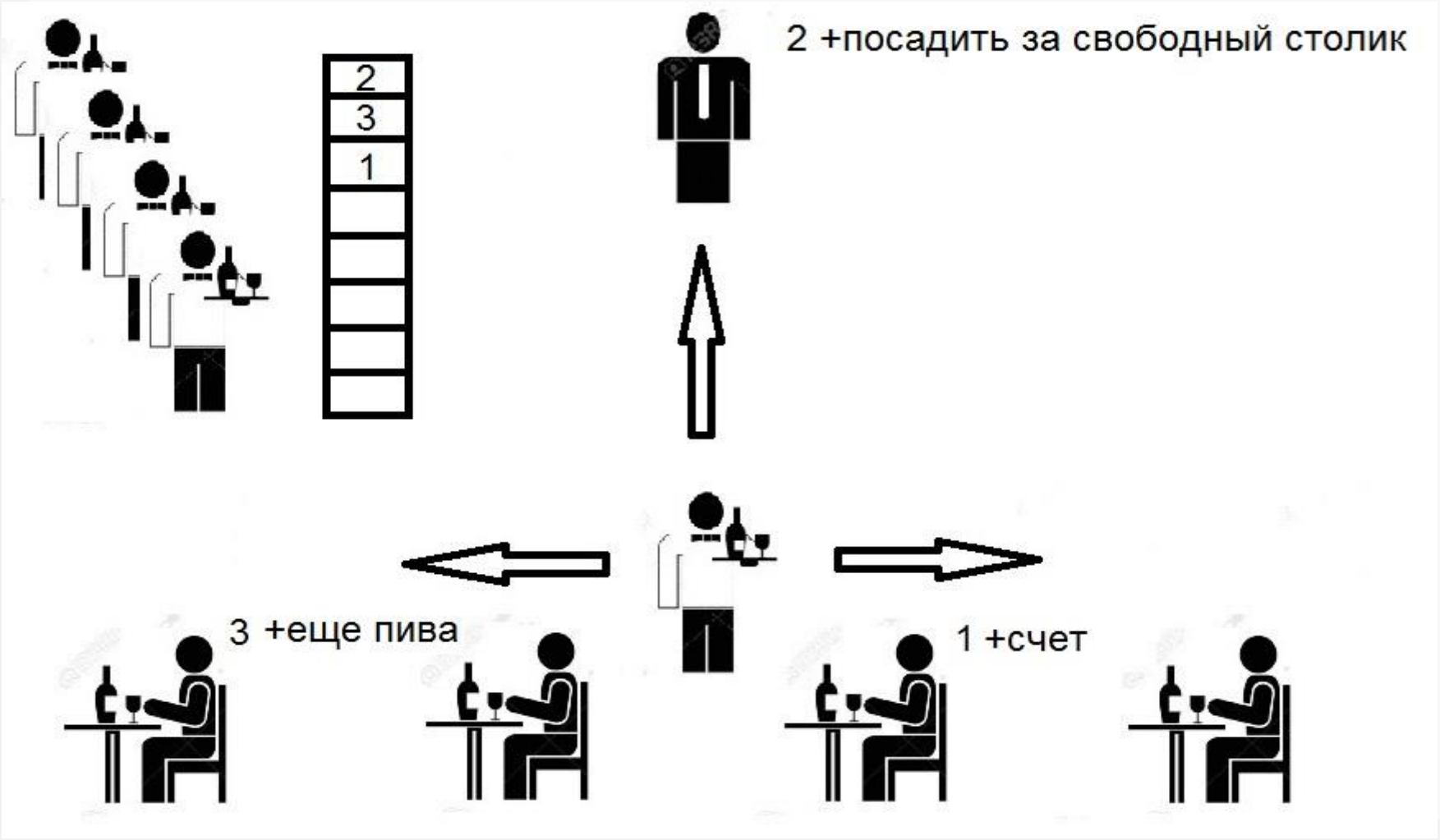


Мультиплексирование. Время на обработку события

Время на обработку 1000 операций записи/чтения в 100 активных соединений в зависимости от общего числа соединений (дескрипторов).



Асинхронная очередь



Асинхронная модель: мультиплексирование + очередь

Плюс и минус:

- мультиплексирует, но за счет очереди чуть менее эффективный
- не “складывается” из-за нескольких “тяжелых” операций

Для асинхронной модели нам понадобятся:

- очередь ← **где** сохраняем события?
- bind + shared_ptr ← **как** храним обработчики события?
- пулл потоков ← **чем** вызываем обработчики?

Асинхронная модель: bind + shared_ptr - объект живи!


```
#include <functional>
class Class : public std::enable_shared_from_this<Class> {
public:
    void funcB(int arg1, const std::string &arg2) {}
};

std::vector<std::function<void (int)>> Queue;

{   // c будет уничтожен при выходе за scope
    Class c;
        Queue.push_back(bind(&Class::funcB, &c, _1, _2));     // f(4,
"str")
}

{   //c2 будет жить!
    std::shared_ptr<Class> c2 = std::make_shared<Class>();
    Queue.push_back(bind(&Class::funcB, c2->shared_from_this(), _1, _2));
}
```

Асинхронная модель: объекты


```
struct Event {
    Event(Client c, std::string &data): _client(c), _data(data)   {}
    Client _client;
         // WANT_READ, WANT_WRITE
    std::function<void(int)> _callback;
    std::reference_wrapper<std::string> _data;  // read or write buffer
};
class EventLoop {                               // SINGLETON
    std::vector<Event> m_Clients;               // все клиенты
    std::queue<Event> m_ClientsHaveWork;    // клиенты с событиями
    // Очереди, мьютексы и т.п.
public:
    void run();
    void asyncRead(int sd, std::string &str, std::function<void(int)> cb);
};
```

Асинхронная модель: объекты


```
// Connection - это объект, представляющий соединение

class Connection: public std::enable_shared_from_this<Connection> {
public:
    Connection(int sd, EventLoop *loop) : m_Sd(sd), m_EventLoop(loop) {}
    void read();
private:
    void readHandler(int error);     // Обработчик чтения
    int m_Sd;
    EventLoop *m_EventLoop;
    std::string m_ReadBuf;           // Сюда помещаем результат чтения
};
```

Асинхронная модель: read()


```
void EventLoop::asyncRead(int sd, std::string &str,
                          std::function<void(int)> cb)
{
        Event e (Client(sd, client_state_t::WANT_READ), str);
        e._callback = cb;
    std::unique_lock<std::mutex> lock(m_WantWorkQueueMutex);
    m_Clients.emplace_back(e);
}

void Connection::read()
{
    m_EventLoop->asyncRead(m_Sd, m_ReadBuf,
        std::bind(&Connection::readHandler, shared_from_this(), _1)
    );
}
```

Асинхронная модель: поток - producer, наполнение очереди


```
poll(fds, m_Clients.size(), /* timeout in msec */ 10);

for (size_t i = 0; i < m_Clients.size(); ++i) {
    if (fds[i].revents & POLLIN) {          // DON'T READ, JUST PUSH QUEUE!
        m_ClientsHaveWork.push(m_Clients[i]);
        remove_from_poll(m_Clients[i]);
    }
    else if (fds[i].revents & POLLOUT) { // DON'T WRITE, JUST PUSH QUEUE!
        m_ClientsHaveWork.push(m_Clients[i]);
    ...
}
```

- m_Clients[i] - уже содержит state: READ или WRITE, в зависимости от того, был ли вызов Connection::read() или Connection::write()

Асинхронная модель: run - обработка очереди


```
void EventLoop::run() {
    while (true) {
        // критическая секция!
        Event event = m_ClientsHaveWork.front();
        m_ClientsHaveWork.pop();

        if (event._client.state == client_state_t::WANT_READ) {
            event._data.get() = recv(event._client.sd, ...);  // READ
            event._callback(errno);
        }
        ...
}

thread_group group(N, &EventLoop::run);
group.join();
```

Асинхронная модель: примерный main


```
EventLoop &ev = EventLoop::eventLoop();                    // SINGLETON
std::vector<std::thread> event_loop_threads;

for (int i = 0; i < 4; ++i) {
        event_loop_threads.push_back(thread(bind(&EventLoop::run, &ev)));
        usleep(1000);
}

while (true) {
    std::shared_ptr<Connection> conn = accept_work(listener(), &ev);
        if (conn) {
        conn->read();
        }
}
```

Асинхронная модель: проблемы реализации

- Синхронизация - два потока выполняют один и тот же handler или разные handler'ы одного объекта (этого надо избегать)
- Эффективная постановка в очередь (mutex? spinlock? lockfree?)
- Эффективный забор из очереди
- Сборка мусора (зависшие, отвалившиеся клиенты)
- Программирование callback-ами, непоследовательный код
- Обеспечение "живучести" объектов (классический пример - асинхронная запись):

```
{
    std::string s = "hello!";  // s будет "мертв"!
    async_write(s);
}
```

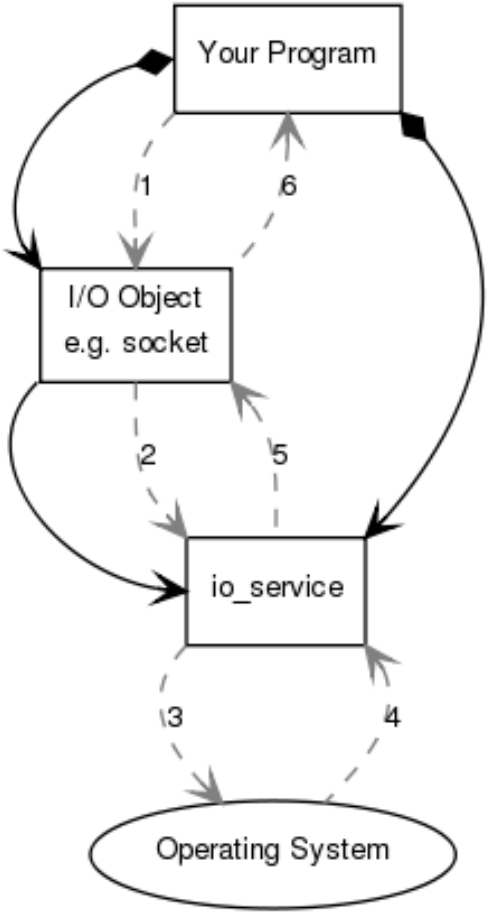
boost::asio: общие сведения

- хорошая реализация асинхронной модели;
- открытый исходный код;
- кроссплатформенность;
- максимальная производительность для каждой платформы;
- позволяет писать синхронный и асинхронный код;
- обработка ошибок;
- легко интегрируется с ssl;
- хорошо документирован.

http://www.boost.org/ → Documentation → asio

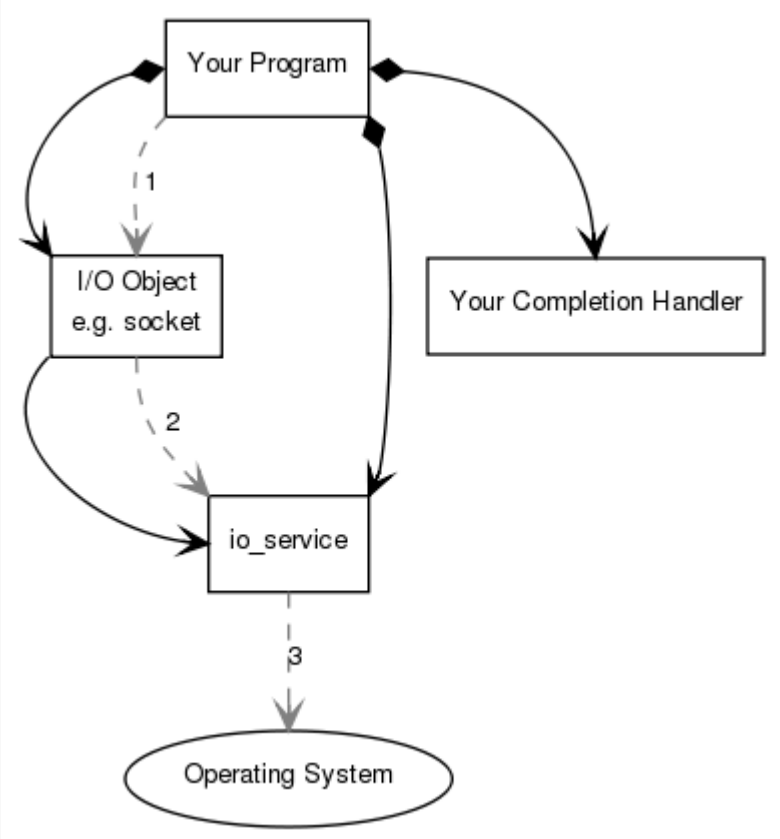
boost::asio: анатомия синхронных операций

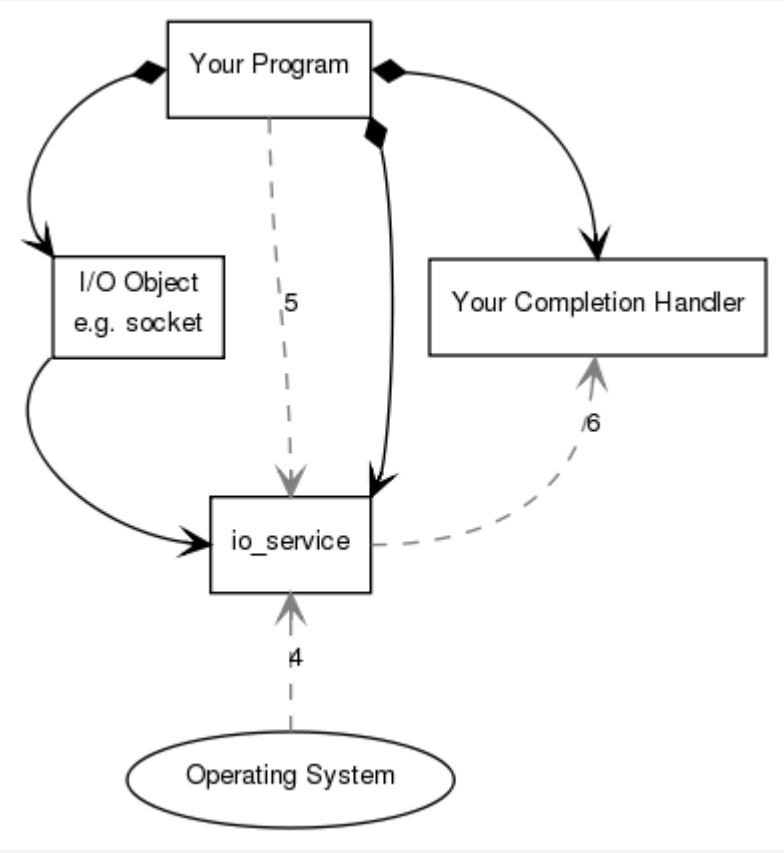
```
typedef io_context io_service;


// io_service как минимум один в программе
boost::asio::io_service io_service;
boost::asio::ip::tcp::socket socket(io_service);
boost::system::error_code ec;
socket.connect(server_endpoint, ec);
if(ec)
    throw std::runtime_error(ec.message());
```



boost::asio: анатомия асинхронных операций


```
- socket.async_connect(server_endpoint, your_completion_handler);
- void your_completion_handler(const boost::system::error_code& ec);
- io_service::run()
```





boost::asio: общие сведения

boost::asio:: - это namespace, содержащий все классы, функции и т.п.
boost::asio::io_service io_service; - должен быть в каждой программе

Есть аналоги для всех “нативных” функций:
connect() => boost::asio::ip::tcp::socket::connect()
read() => boost::asio::ip::tcp::socket::read_some()
и т.д.

Есть асинхронные аналоги для всех “нативных” функций:
async_connect()/async_read() => отправить в очередь + callback

Есть таймеры, ICMP, RS232 и т.д.

“Не умеет” работать с std::string, в целях эффективности использует:
- boost::asio::streambuf (async_read_until(m_socket, stream, “\r\n”))
- boost::asio::buffer (async_read_some(asio::buffer(data, length)))

boost::asio: зависимости

Пример: https://github.com/o2gy84/misc/tree/master/texnopark/asio

В коде:

```
#include <boost/asio.hpp>
#include <boost/bind.hpp>
```

При сборке:

```
g++ -I/usr/boost156 -L/usr/boost156 -o app -std=c++14 main.cpp -lboost_system -lpthread
```

boost::asio: пример синхронной работы, клиент


```
boost::asio::io_service io_service;
boost::asio::ip::tcp::socket s(io_service);
boost::asio::ip::tcp::resolver resolver(io_service);
boost::asio::ip::tcp::resolver::query query("localhost", "7789");

boost::system::error_code ec;
auto endpoint = resolver.resolve(query, ec);
if (ec) throw std::runtime_error(ec.message());

boost::asio::connect(s, endpoint, ec);
if (ec) throw std::runtime_error(ec.message());

boost::asio::write(s, boost::asio::buffer("LOGIN\r\n", 7), ec);
if (ec) throw std::runtime_error(ec.message());

char reply[max_len];
s.read_some(boost::asio::buffer(reply, max_len), ec);
```

boost::asio: пример синхронной работы, нужно больше C++!


```
ip::tcp::iostream stream;
stream.expires_from_now(boost::posix_time::seconds(60));
stream.connect("www.boost.org", "http");
stream << "GET /LICENSE_1_0.txt HTTP/1.0\r\n";
stream << "Host: www.boost.org\r\n";
stream << "Accept: */*\r\n";
stream << "Connection: close\r\n\r\n";
stream.flush();
std::cout << stream.rdbuf();
```

boost::asio: можно считать очередью


```
void func() { std::cerr << "func" << std::endl; }
struct Struct { void operator()() {cerr << "operator()" << std::endl; }};

boost::asio::io_service io;
io.post(func);
io.post(Struct());
io.post([]()->void { std::cerr << "lambda" << std::endl; });

std::shared_ptr<Class> c = std::make_shared<Class>();
io.post(std::bind(&Class::funcC, c->shared_from_this()));

io.run_one();  // func
io.run_one();  // lambda
io.run_one();  // Struct::operator()
io.run_one();  // Class...

io.run();  // ИЛИ ТАК: func + lambda + Struct::operator() + Class + ...
```

boost::asio: пример многопоточного асинхронного echo-сервера


```
// Класс, представляющий клиентское соединение

class Client: public std::enable_shared_from_this<Client> {
public:
    Client(boost::asio::io_service &io) : m_Sock(io) {}
    boost::asio::ip::tcp::socket& sock()              { return m_Sock; }
    void read();
    void handleRead(const boost::system::error_code& e, size_t bytes);

private:
    boost::asio::ip::tcp::socket m_Sock;
    char m_Buf[1024];
};
```

boost::asio: пример многопоточного асинхронного echo-сервера


```
void Client::read() {
    m_Sock.async_read_some(boost::asio::buffer(m_Buf),
                           bind(&Client::handleRead, shared_from_this(),
                                boost::asio::placeholders::error,
                                ::placeholders::bytes_transferred));
    }

void Client::handleRead(const boost::system::error_code& e, size_t bytes) {
    if (e) return;
    m_Sock.async_write_some(boost::asio::buffer(m_Buf),
        [self = shared_from_this()](const error_code& e, size_t bytes) {
            // После того, как запишем ответ, можно снова читать
            self->read();
        });
    }
};
```

boost::asio: пример многопоточного асинхронного echo-сервера


```
class Server {
    boost::asio::io_service m_Service;
    boost::asio::ip::tcp::acceptor m_Acceptor;
    void onAccept(std::shared_ptr<Client> c, const error_code& e) {
        if (e) return;
        c->read();
        startAccept();
    }
    void startAccept() {
        std::shared_ptr<Client> c(new Client(m_Service));
        m_Acceptor.async_accept(c->sock(),
            bind(&Server::onAccept, this, c, asio::placeholders::error));
    }
public:
    Server() : m_Acceptor(m_Service)    {}
    void startServer();
};
```

boost::asio: пример многопоточного асинхронного echo-сервера


```
void Server::startServer() {
    boost::asio::ip::tcp::endpoint endpoint(asio::ip::tcp::v4(), 5001);
    m_Acceptor.open(endpoint.protocol());
    m_Acceptor.bind(endpoint);
    m_Acceptor.listen(1024);
    startAccept();

    std::vector<std::thread> threads;
    for (int i = 0; i < 4; ++i)
        threads.push_back(thread(bind(&io_service::run, &m_Service)));
    for (auto &thread: threads)
        thread.join();
}
int main(int argc, char *argv[]) {
    Server().startServer();
    return 0;
}
```

Итоги: какая архитектура лучше?

1. fork/thread per connection - “домашние” проекты, прототипы
2. prefork - если не критично количество ресурсов, или заранее известно, что будет небольшое количество клиентов
3. multiplexing - мало бизнес логики (прокси, балансеры и т.п.);
4. prefork + multiplexing - годится для “большого” прода, но может быть дорого (один httpd может “кушать” и гигабайт), а делать prefork на тредах - уменьшается надежность, уж лучше тогда asio;
5. asio - годится для “большого” прода, требует меньше памяти, но сильно сложнее в реализации.

Примеры кода

https://github.com/o2gy84/misc/tree/master/texnopark

- common - общий класс для работы с сетью
- simple-server - работа только с одним клиентом
- client_connect_timout - клиент, умеющий таймауты на соединение
- client_read_timout - клиент, умеющий таймауты на чтение
- http_client - пример выполнения http-запроса
- multiplexing - “примитивное” мультиплексирование
- prefork - форкающийся сервер

- libevent - echo-сервер на libevent
- asio - echo-сервер на boost::asio

- libtpevent - сервер, в котором можно выбирать несколько вариантов event_loop’ов, в том числе реализован асинхронный движок на poll