

Лекция 6. Синхронизация потоков

Операционные системы

25 марта 2016 г.

Задержка

Windows API Sleep()

```
VOID WINAPI Sleep(  
    _In_ DWORD dwMilliseconds           // 0, INFINITE, и т. д.  
);
```

POSIX sleep() (<unistd.h>)

```
unsigned sleep(unsigned seconds);
```

Задержка (окончание)

Пример (Windows API Sleep())

```
volatile bool g_vbWait = true;

DWORD WINAPI MyThreadProc(LPVOID pvData)
{
    // ...
    while (g_vbWait)
        Sleep(0);
    // ...
    return 0;
}
```

Событие

Windows API CreateEvent()

```
HANDLE WINAPI CreateEvent(  
    _In_opt_ LPSECURITY_ATTRIBUTES lpEventAttributes,  
    _In_     BOOL                  bManualReset,  
    _In_     BOOL                  bInitialState,  
    _In_opt_ LPCTSTR              lpctszName  
);
```

```
BOOL WINAPI SetEvent(  
    _In_     HANDLE                hEvent  
);
```

Событие (продолжение)

Пример

```
HANDLE g_hEventGo =  
    INVALID_HANDLE_VALUE;  
  
DWORD WINAPI MyThreadProc(  
    LPVOID pvData)  
{  
    // ...  
    WaitForSingleObject(  
        g_hEventGo, INFINITE);  
    // ...  
    return 0;  
}
```

Пример (окончание)

```
int main()  
{  
    HANDLE hThread;  
    g_hEventGo = CreateEvent(  
        NULL, FALSE, FALSE, NULL);  
    hThread = CreateThread(  
        NULL, 0, MyThreadProc,  
        NULL, 0, NULL);  
    // ...  
    SetEvent(g_hEventGo);  
    // ...  
    CloseHandle(g_hEventGo);  
}
```

Событие (продолжение)

Пример

```
DWORD WINAPI MyThreadProc(LPVOID)
{
    int n = 0;
    while (g_vbRun)
    {
        WaitForSingleObject(
            g_hEventGo, INFINITE);
        cout
            << "Ev. " << ++ n << endl;
    }
    return 0;
}
```

Пример (окончание)

```
int main()
{
    // ...
    for (int i = 0; i < 3; ++ i)
    {
        Sleep(500);
        SetEvent(g_hEventGo);
    }
    g_vbRun = false;
    // ...
}
```

Событие (продолжение)

Пример

```
DWORD WINAPI MyThreadProc(LPVOID)
{
    int n = 0;
    while (g_vbRun)
    {
        WaitForSingleObject(
            g_hEventGo, INFINITE);
        cout
            << "Ev. " << ++ n << endl;
    }
    return 0;
}
```

Пример (окончание)

```
int main()
{
    // ...
    for (int i = 0; i < 3; ++ i)
    {
        Sleep(0);
        SetEvent(g_hEventGo);
    }
    Sleep(500);
    g_vbRun = false;
    // ...
}
```

Событие (окончание)

Windows API ResetEvent(), PulseEvent()

```
BOOL WINAPI ResetEvent(  
    _In_ HANDLE hEvent  
);
```

```
BOOL WINAPI PulseEvent(  
    _In_ HANDLE hEvent  
);
```

Использование установки и сброса события

Пример (Windows API SetEvent())

```
DWORD WINAPI MyThreadProc(LPVOID pvData)
{
    // ...
    SetEvent(g_hEventAsk);
    WaitForSingleObject(g_hEventAnswer, INFINITE);
    // ...
}
```

Пример ситуации гонки

Пример (пополнение счёта)

входные данные: d

начало

- 1 Считать(x)
- 2 $x \leftarrow x + d$
- 3 Записать(x)

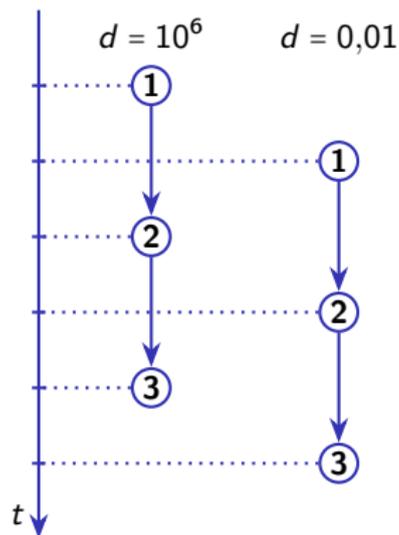


Рис. 1: последовательность исполнения алгоритма двумя процессами

Атомарность

Определения

Условие гонки: (*race condition*) — особенность функционирования системы, при которой её выходной сигнал непредсказуемо зависит от последовательности и/или временных задержек происходящих в ней событий.

Атомарность: (*atomicity*) — свойство операции в параллельной системе по отношению к набору ресурсов, определяющее невозможность одновременного доступа к ним до завершения операции (+ закрепление или откат).

Критическая секция: (*critical section*) — участок кода, исполняемый не более чем одним потоком из числа имеющих доступ к общему ресурсу синхронизации.

Взаимная блокировка: (*mutual exclusion, mutex*) — алгоритм обеспечения неодновременности использования общего ресурса разными потоками.

Атомарность

Определения

Условие гонки: (*race condition*) — особенность функционирования системы, при которой её выходной сигнал непредсказуемо зависит от последовательности и/или временных задержек происходящих в ней событий.

Атомарность: (*atomicity*) — свойство операции в параллельной системе по отношению к набору ресурсов, определяющее невозможность одновременного доступа к ним до завершения операции (+ закрепление или откат).

Критическая секция: (*critical section*) — участок кода, исполняемый не более чем одним потоком из числа имеющих доступ к общему ресурсу синхронизации.

Взаимная блокировка: (*mutual exclusion, mutex*) — алгоритм обеспечения неодновременности использования общего ресурса разными потоками.

Атомарность

Определения

Условие гонки: (*race condition*) — особенность функционирования системы, при которой её выходной сигнал непредсказуемо зависит от последовательности и/или временных задержек происходящих в ней событий.

Атомарность: (*atomicity*) — свойство операции в параллельной системе по отношению к набору ресурсов, определяющее невозможность одновременного доступа к ним до завершения операции (+ закрепление или откат).

Критическая секция: (*critical section*) — участок кода, исполняемый не более чем одним потоком из числа имеющих доступ к общему ресурсу синхронизации.

Взаимная блокировка: (*mutual exclusion, mutex*) — алгоритм обеспечения неодновременности использования общего ресурса разными потоками.

Атомарность

Определения

Условие гонки: (*race condition*) — особенность функционирования системы, при которой её выходной сигнал непредсказуемо зависит от последовательности и/или временных задержек происходящих в ней событий.

Атомарность: (*atomicity*) — свойство операции в параллельной системе по отношению к набору ресурсов, определяющее невозможность одновременного доступа к ним до завершения операции (+ закрепление или откат).

Критическая секция: (*critical section*) — участок кода, исполняемый не более чем одним потоком из числа имеющих доступ к общему ресурсу синхронизации.

Взаимная блокировка: (*mutual exclusion, mutex*) — алгоритм обеспечения неодновременности использования общего ресурса разными потоками.

Критическая секция

Windows API InitializeCriticalSection() и т. д.

```
void WINAPI InitializeCriticalSection(  
    _Out_   LPCRITICAL_SECTION lpCriticalSection  
);
```

```
void WINAPI DeleteCriticalSection(  
    _Inout_ LPCRITICAL_SECTION lpCriticalSection  
);
```

Критическая секция (продолжение)

Windows API EnterCriticalSection() и т. д.

```
void WINAPI EnterCriticalSection(  
    _Inout_ LPCRITICAL_SECTION lpCriticalSection  
);
```

```
void WINAPI LeaveCriticalSection(  
    _Inout_ LPCRITICAL_SECTION lpCriticalSection  
);
```

```
BOOL WINAPI TryEnterCriticalSection(  
    _Inout_ LPCRITICAL_SECTION lpCriticalSection  
);
```

Критическая секция (продолжение)

Пример

```
CRITICAL_SECTION g_CriticalS;  
std::list<int> g_Numbers;  
  
DWORD WINAPI MyThreadProc(LPVOID pvData)  
{  
    int n = 0;  
    // ...  
    EnterCriticalSection(&g_CriticalS);  
    g_Numbers.push_front(n);  
    LeaveCriticalSection(&g_CriticalS);  
    // ...  
    return 0;  
}
```

Критическая секция (окончание)

Пример (окончание)

```
int main()
{
    HANDLE hThread;
    InitializeCriticalSection(&g_CriticalS);
    hThread = CreateThread(
        NULL, 0, MyThreadProc, NULL, 0, NULL);
    // ...
    EnterCriticalSection(&g_CriticalS);
    print(g_Numbers);
    LeaveCriticalSection(&g_CriticalS);
    // ...
    DeleteCriticalSection(&g_CriticalS);
}
```

Мьютекс

Windows API CreateMutex(), ReleaseMutex()

```
HANDLE WINAPI CreateMutex(  
    _In_opt_ LPSECURITY_ATTRIBUTES lpMutexAttributes,  
    _In_     BOOL bInitialOwner,  
    _In_opt_ LPCTSTR lpctszName  
);  
  
BOOL WINAPI ReleaseMutex(  
    _In_     HANDLE hMutex  
);
```

Мьютекс (продолжение)

Пример

```
HANDLE g_hMutex = INVALID_HANDLE_VALUE;  
  
DWORD WINAPI MyThreadProc(LPVOID pvData)  
{  
    int n = 1;  
    // ...  
    WaitForSingleObject(g_hMutex, INFINITE);  
    g_Numbers.push_front(n);  
    ReleaseMutex(g_hMutex);  
    // ...  
    return 0;  
}
```

Мьютекс (продолжение)

Пример (окончание)

```
int main()
{
    HANDLE hThread;
    g_hMutex = CreateMutex(NULL, FALSE, NULL);
    hThread = CreateThread(
        NULL, 0, MyThreadProc, NULL, 0, NULL);
    // ...
    WaitForSingleObject(g_hMutex, INFINITE);
    print(g_Numbers);
    ReleaseMutex(g_hMutex);
    // ...
    CloseHandle(g_hMutex);
}
```

Мьютекс (продолжение)

POSIX `pthread_mutex_init()`, `pthread_mutex_destroy()` и т. д. (`<pthread.h>`)

```
int pthread_mutex_init(  
    pthread_mutex_t *restrict          pMutex,  
    const pthread_mutexattr_t *restrict pAttr);  
  
pthread_mutex_t mutex = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;  
  
int pthread_mutex_destroy(  
    pthread_mutex_t *          pMutex);
```

Мьютекс (продолжение)

POSIX `pthread_mutex_lock()`, `pthread_mutex_unlock()` и т. д.

```
int pthread_mutex_lock(  
    pthread_mutex_t *          pMutex);
```

```
int pthread_mutex_trylock(  
    pthread_mutex_t *          pMutex);
```

```
int pthread_mutex_unlock(  
    pthread_mutex_t *          pMutex);
```

Мьютекс (продолжение)

Пример

```
pthread_mutex_t g_Mutex = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;  
  
void *MyThreadProc(void *pvData)  
{  
    int n = 2;  
    // ...  
    pthread_mutex_lock(&g_Mutex);  
    g_Numbers.push_front(n);  
    pthread_mutex_unlock(&g_Mutex);  
    // ...  
    return 0;  
}
```

Мьютекс (окончание)

Пример (окончание)

```
int main()
{
    pthread_t hThread;
    int nRet = pthread_create(
        &hThread, NULL, MyThreadProc, NULL);
    // ...
    pthread_mutex_lock(&g_Mutex);
    print(g_Numbers);
    pthread_mutex_unlock(&g_Mutex);
    // ...
    pthread_join(hThread, NULL);
    pthread_mutex_destroy(&g_Mutex);
}
```

Блокировка с двойной проверкой

Пример (блокировка)

```
Data *get_data()
{
    // ...
    pthread_mutex_lock(&g_Mutex);
    if (!g_List.empty())
    {
        pData = g_List.back();
        g_List.pop_back();
    }
    pthread_mutex_unlock(&g_Mutex);
    // ...
}
```

Блокировка с двойной проверкой

Пример (блокировка)

```
Data *get_data()
{
    // ...
    if (!g_List.empty())
    {
        pthread_mutex_lock(&g_Mutex);
        pData = g_List.back();
        g_List.pop_back();
        pthread_mutex_unlock(&g_Mutex);
    }
    // ...
}
```

Блокировка с двойной проверкой

Пример (блокировка с двойной проверкой)

```
Data *get_data()
{
    // ...
    if (!g_List.empty())
    {
        pthread_mutex_lock(&g_Mutex);
        if (!g_List.empty())
        {
            pData = g_List.back();
            g_List.pop_back();
        }
        pthread_mutex_unlock(&g_Mutex);
    }
}
```

Барьер по памяти

Определение

Барьер по памяти: (*memory barrier, memory fence*) — точка в коде программы, для которой гарантируется, что все операции доступа к памяти, выполненные до неё, завершатся до начала операций с памятью после неё.

Пример (поток 0)

```
пока  $b$  = „ложь“, выполнять  
└ ; // пусто  
// барьер  
Напечатать( $x$ );
```

Пример (поток 1)

```
 $x \leftarrow 42$ ;  
// барьер  
 $b \leftarrow$  „истина“;
```

Семафор

Windows API CreateSemaphore(), ReleaseSemaphore()

```
HANDLE WINAPI CreateSemaphore(  
    _In_opt_ LPSECURITY_ATTRIBUTES lpSemaphoreAttributes,  
    _In_     LONG                   lInitialCount,  
    _In_     LONG                   lMaximumCount,  
    _In_opt_ LPCTSTR               lpctszName  
);  
  
BOOL WINAPI ReleaseSemaphore(  
    _In_     HANDLE                 hSemaphore,  
    _In_     LONG                   lReleaseCount,  
    _Out_opt_ LPLONG               lplPreviousCount  
);
```

Семафор (продолжение)

Пример

```
HANDLE g_hSemaphore = INVALID_HANDLE_VALUE;  
/* volatile */ LONG g_vlNum = 0;  
  
DWORD WINAPI MyThreadProc(LPVOID pvData)  
{  
    WaitForSingleObject(g_hSemaphore, INFINITE);  
    InterlockedIncrement(&g_vlNum);  
    cout << g_vlNum << " " << flush;  
    ReleaseSemaphore(g_hSemaphore, 1, NULL);  
    InterlockedDecrement(&g_vlNum);  
    return 0;  
}
```

Семафор (продолжение)

Пример (окончание)

```
int main()
{
    int i;
    HANDLE ahThreads[MY_NUM_THREADS];
    // ...
    g_hSemaphore = CreateSemaphore(
        NULL, MY_MAX_THREADS, MY_MAX_THREADS, NULL);
    for (i = 0; i < MY_NUM_THREADS; ++ i)
        ahThreads[i] = CreateThread(
            NULL, 0, MyThreadProc, NULL, CREATE_SUSPENDED, NULL);
    // ...
    CloseHandle(g_hSemaphore);
}
```

Семафор (продолжение)

POSIX `sem_init()` (<semaphore.h>)

```
int sem_init(
    sem_t * pSem,
    int     bShared,
    unsigned uValue);

int sem_destroy(
    sem_t * pSem);
```

POSIX `sem_wait()` и т. д.

```
int sem_wait(sem_t *pSem);

int sem_trywait(sem_t *pSem);

int sem_post(sem_t *pSem);
```

Семафор (продолжение)

Пример

```
#include <pthread.h>
#include <semaphore.h>

sem_t g_Semaphore;
pthread_mutex_t g_Mutex =
    PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;
volatile LONG g_vlNum = 0;

void *MyThreadProc(void *)
{
```

Пример (продолжение)

```
    sem_wait(&g_Semaphore);
    pthread_mutex_lock(&g_Mutex);
    ++ g_vlNum;
    pthread_mutex_unlock(&g_Mutex);
    cout << g_vlNum << " " << flush;
    sem_post(&g_Semaphore);
    pthread_mutex_lock(&g_Mutex);
    -- g_vlNum;
    pthread_mutex_unlock(&g_Mutex);
    return 0;
} // MyThreadProc()
```

Семафор (окончание)

Пример (окончание)

```
int main()
{
    int i;
    pthread_t ahThreads[MY_NUM_THREADS];
    sem_init(&g_Semaphore, 0, MY_MAX_THREADS);
    for (i = 0; i < MY_NUM_THREADS; ++ i)
        pthread_create(ahThreads[i], NULL, MyThreadProc, NULL);
    // ...
    sem_destroy(&g_Semaphore);
    pthread_mutex_destroy(&g_Mutex);
}
```

Кольцевой буфер

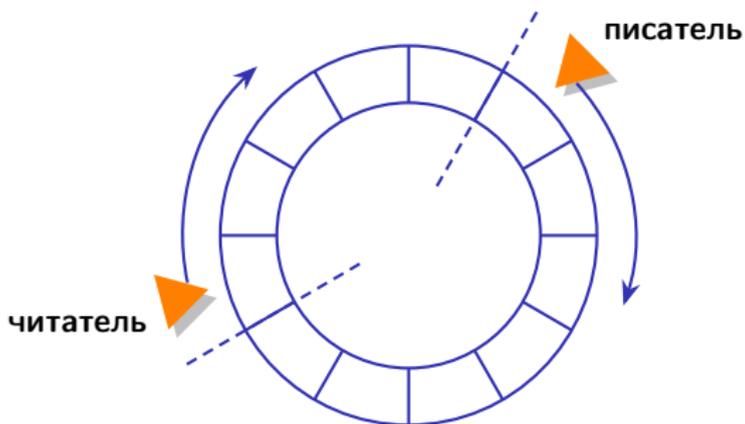


Рис. 2: концепция кольцевого буфера

Пример: кольцевой буфер POSIX

Пример

```
#include <pthread.h>
#include <semaphore.h>

#include <stdio.h>
#include <stddef.h>
#include <math.h>

#define NUM_BLOCKS 10
#define BLOCK_SIZE 8
#define AMPLITUDE 100
#define PERIOD 30
```

Пример (продолжение)

```
#define INTERVAL (3 * PERIOD)
#define BUFFER_SIZE \
    (NUM_BLOCKS * BLOCK_SIZE)

int g_anBuffer[BUFFER_SIZE];
sem_t g_FreeSpace, g_UsedSpace;

int divides(int n1, int n2)
{
    return (n1 % n2 == 0);
}
```

Пример: кольцевой буфер POSIX (продолжение)

Пример (продолжение)

```
void *thread_proc(void *pvData)
{
    int t;
    for (t = 0; t <= INTERVAL; ++ t)
    {
        int i = t % BUFFER_SIZE;
        if (divides(i, BLOCK_SIZE))
            sem_wait(&g_FreeSpace);
        //
```

Пример (продолжение)

```
        g_anBuffer[i] =
            t == INTERVAL ?
            AMPLITUDE + 1 :
            AMPLITUDE *
            sin(1.0 * t / PERIOD);
        //
        if (t == INTERVAL ||
            divides(i + 1, BLOCK_SIZE))
            sem_post(&g_UsedSpace);
    } // for (t = 0; ...)
} // thread_proc()
```

Пример: кольцевой буфер POSIX (продолжение)

Пример (продолжение)

```
int main()
{
    int i = 0, nData;
    pthread_t hThread;
    //
    sem_init(&g_FreeSpace, 0, NUM_BLOCKS);
    sem_init(&g_UsedSpace, 0, 0);
    //
    pthread_create(&hThread, NULL, &thread_proc, NULL);
    //
}
```

Пример: кольцевой буфер POSIX (продолжение)

Пример (продолжение)

```
do
{
    if (divides(i, BLOCK_SIZE))
        sem_wait(&g_UsedSpace);
    //
    nData = g_anBuffer[i];
    printf(" (%d, %d)", i, nData);
    fflush(stdout);
    //
    i = (i + 1) % BUFFER_SIZE;
```

Пример (продолжение)

```
//
if (nData > AMPLITUDE ||
    divides(i, BLOCK_SIZE))
{
    sem_post(&g_FreeSpace);
    printf(" |");
    fflush(stdout);
}
}
while (nData <= AMPLITUDE);
```

Пример: кольцевой буфер POSIX (окончание)

Пример (окончание)

```
//  
pthread_join(hThread, NULL);  
//  
printf("\n");  
//  
sem_destroy(&g_FreeSpace);  
sem_destroy(&g_UsedSpace);  
} // main()
```

Пример (сборка программы)

```
$ gcc -pthread sem_posix.c -lm
```

Барьер

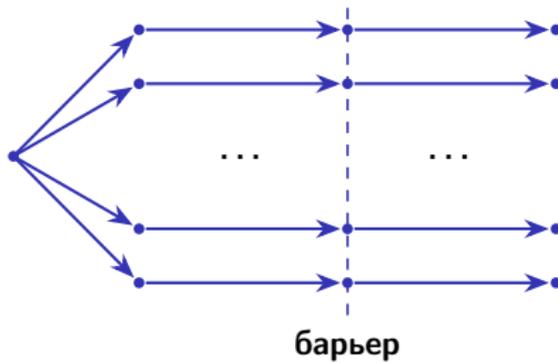


Рис. 3: концепция барьера

Барьер (продолжение)

POSIX `pthread_barrier_init()` и т. д. (`<pthread.h>`)

```
int pthread_barrier_init(  
    pthread_barrier_t *restrict          pBarrier,  
    const pthread_barrierattr_t *restrict pAttr,  
    unsigned                               uCount);  
  
int pthread_barrier_destroy(  
    pthread_barrier_t *                    pBarrier);  
  
int pthread_barrier_wait(  
    pthread_barrier_t *                    pBarrier);
```

Барьер (продолжение)

Пример

```
pthread_barrier_t g_Barrier;  
  
void *MyThreadProc(void *)  
{  
    // ...  
    pthread_barrier_wait(&g_Barrier);  
    // ...  
    return 0;  
}
```

Барьер (окончание)

Пример (окончание)

```
int main()
{
    int i;
    pthread_t ahThreads[MY_NUM_THREADS];
    pthread_barrier_init(&g_Barrier, NULL, MY_NUM_THREADS);
    for (i = 0; i < MY_NUM_THREADS; ++ i)
        pthread_create(
            &ahThreads[i], NULL, MyThreadProc, NULL);
    // ...
    pthread_barrier_destroy(&g_Barrier);
}
```

Задача о читателях и писателях

Постановка задачи

- Чтение данных возможно одновременно любым количеством читателей.
- Запись данных возможна одновременно только одним писателем.
- Во время записи ни один читатель не имеет доступа к данным.

Дополнение к условию

- Чтение данных невозможно, если хотя бы один писатель изъявил о намерении записи.

Задача о читателях и писателях

Постановка задачи

- Чтение данных возможно **одновременно любым** количеством читателей.
- Запись данных возможна **одновременно только одним** писателем.
- Во время **записи ни один читатель** не имеет доступа к данным.

Дополнение к условию

- Чтение данных **невозможно**, если хотя бы один писатель изъявил о намерении **записи**.

Блокировка чтения/записи

Windows API InitializeSRWLock()

```
VOID WINAPI InitializeSRWLock(  
    _Out_ PSRWLOCK pSRWLock  
);
```

```
VOID WINAPI AcquireSRWLockShared(  
    _Inout_ PSRWLOCK pSRWLock  
);
```

```
VOID WINAPI ReleaseSRWLockShared(  
    _Inout_ PSRWLOCK pSRWLock  
);
```

Windows API SRWLOCK_INIT и т. д.

```
SRWLOCK rwlock = SRWLOCK_INIT;
```

```
VOID WINAPI AcquireSRWLockExclusive(  
    _Inout_ PSRWLOCK pSRWLock  
);
```

```
VOID WINAPI ReleaseSRWLockExclusive(  
    _Inout_ PSRWLOCK pSRWLock  
);
```

Блокировка чтения/записи (продолжение)

POSIX `pthread_rwlock_init()` и т. д. (`<pthread.h>`)

```
int pthread_rwlock_init(  
    pthread_rwlock_t *restrict          pRWLock,  
    const pthread_rwlockattr_t *restrict pAttr);
```

```
pthread_rwlock_t rwlock = PTHREAD_RWLOCK_INITIALIZER;
```

```
int pthread_rwlock_destroy(  
    pthread_rwlock_t *          pRWLock);
```

Блокировка чтения/записи (продолжение)

POSIX `pthread_rwlock_rdlock()` и т. д.

```
int pthread_rwlock_rdlock(  
    pthread_rwlock_t *                pRWLock);
```

```
int pthread_rwlock_wrlock(  
    pthread_rwlock_t *                pRWLock);
```

```
int pthread_rwlock_unlock(  
    pthread_rwlock_t *                pRWLock);
```

Пример: поиск простых чисел POSIX

Пример

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

#include <iostream>
#include <set>
#include <cstdlib>

typedef std::set <int> IntSet;
```

Пример (продолжение)

```
volatile bool g_vbRun = true;
IntSet g_Bitcoins;
pthread_rwlock_t g_Lock =
    PTHREAD_RWLOCK_INITIALIZER;

inline bool divides(
    int n1, int n2)
{
    return (n1 % n2 == 0);
}
```

Пример: поиск простых чисел POSIX (продолжение)

Пример (продолжение)

```
void *thread_proc(void *pvData)
{
    int n = 2;
    while (g_vbRun)
    {
        ++ n;
        bool bFound = true;
        //
        pthread_rwlock_rdlock(
            &g_Lock);
        //
```

Пример (продолжение)

```
IntSet::const_iterator
    i = g_Bitcoins.begin(),
    e = g_Bitcoins.end();
    for (; i != e; ++ i)
        if (divides(n, *i))
        {
            bFound = false;
            break;
        }
    //
    pthread_rwlock_unlock(
        &g_Lock);
    //
```

Пример: поиск простых чисел POSIX (продолжение)

Пример (продолжение)

```
if (bFound)
{
    pthread_rwlock_wrlock(
        &g_Lock);
    //
    IntSet::const_iterator
        i = g_Bitcoins.begin(),
        e = g_Bitcoins.end();
    while (i != e)
        if (divides(*i, n))
            g_Bitcoins.erase(i ++);
        else
            ++ i;
}
```

Пример (продолжение)

```
//
g_Bitcoins.insert(n);
//
pthread_rwlock_unlock(
    &g_Lock);
} // if (bFound)
} // while (g_vbRun)
} // thread_proc()
```

Пример: поиск простых чисел POSIX (продолжение)

Пример (продолжение)

```
int main()
{
    const int cnThreads = 8;
    pthread_t ahThreads[cnThreads];
    //
    g_Bitcoins.insert(2);
    //
    for (int i = 0; i < cnThreads; ++ i)
        pthread_create(&ahThreads[i], NULL, thread_proc, NULL);
    //
    sleep(10);
    //
    g_vbRun = false;
```

Пример: поиск простых чисел POSIX (окончание)

Пример (окончание)

```
//  
for (int i = 0; i < cnThreads; ++ i)  
    pthread_join(ahThreads[i], NULL);  
//  
IntSet::const_iterator  
    i = g_Bitcoins.begin(),  
    e = g_Bitcoins.end();  
for (; i != e; ++ i)  

```

Инвариант и предикат

Определения

Инвариант: (*invariant*) — предположения об условиях, накладываемых на данные, обеспечивающие корректную работу программы.

Предикат: (*predicate*) — набор условий, накладываемых на данные, определяющий их некоторое состояние.

Условная переменная

Windows API InitializeConditionVariable() и т. д.

```
VOID WINAPI InitializeConditionVariable(  
    _Out_ PCONDITION_VARIABLE pConditionVariable  
);
```

```
VOID WINAPI WakeConditionVariable(  
    _Inout_ PCONDITION_VARIABLE pConditionVariable  
);
```

```
VOID WINAPI WakeAllConditionVariable(  
    _Inout_ PCONDITION_VARIABLE pConditionVariable  
);
```

Условная переменная (продолжение)

Windows API SleepConditionVariableCS() и т. д.

```
BOOL WINAPI SleepConditionVariableCS(  
    _Inout_ PCONDITION_VARIABLE pConditionVariable,  
    _Inout_ PCRITICAL_SECTION   pCriticalSection,  
    _In_     DWORD               dwMilliseconds      // INFINITE  
);
```

```
BOOL WINAPI SleepConditionVariableSRW(  
    _Inout_ PCONDITION_VARIABLE pConditionVariable,  
    _Inout_ PSRWLOCK           pSRWLock,  
    _In_     DWORD               dwMilliseconds,  
    _In_     ULONG              ulFlags  
); // CONDITION_VARIABLE_LOCKMODE_SHARED
```

Условная переменная (продолжение)

POSIX `pthread_cond_init()`, `pthread_cond_destroy()` и т. д. (`<pthread.h>`)

```
int pthread_cond_init(  
    pthread_cond_t *restrict          pCond,  
    const pthread_condattr_t *restrict pAttr);
```

```
pthread_cond_t cond = PTHREAD_COND_INITIALIZER;
```

```
int pthread_cond_destroy(  
    pthread_cond_t *          pCond);
```

Условная переменная (окончание)

POSIX `pthread_cond_wait()`, и т. д.

```
int pthread_cond_wait(  
    pthread_cond_t *restrict          pCond,  
    pthread_mutex_t *restrict        pMutex);  
  
int pthread_cond_signal(  
    pthread_cond_t *                  pCond);  
  
int pthread_cond_broadcast(  
    pthread_cond_t *                  pCond);
```

Ложные и украденные пробуждения

Определения

Ложное пробуждение: (*Spurious Wakeup*) — пробуждение, вызванное случайными причинами вместо операции сигнализирования.

Украденное пробуждение: (*Stolen Wakeup*) — пробуждение, после которого текущий поток был вытеснен, и сработавший до его продолжения другой поток изменил условие.

Пример: задача производителей и потребителей POSIX

Пример

```
int g_nItem = 0;
const int MY_MAX_QUEUE = 50;
std::queue<int> g_Queue;
pthread_mutex_t g_MutexQueue = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;
pthread_cond_t g_CondNotEmpty = PTHREAD_COND_INITIALIZER;
pthread_cond_t g_CondNotFull = PTHREAD_COND_INITIALIZER;
volatile bool g_vbRun = true;
```

Пример: производители и потребители (продолжение)

Пример (продолжение)

```
void *thread_proc_get(void *pvData)
{
    while (true)
    {
        // ...
        pthread_mutex_lock(&g_MutexQueue);
        while (g_Queue.empty() && g_vbRun)
            pthread_cond_wait(&g_CondNotEmpty, &g_MutexQueue);
        if (!g_vbRun && g_Queue.empty())
        {
            pthread_mutex_unlock(&g_MutexQueue);
            break;
        }
    }
}
```

Пример: производители и потребители (продолжение)

Пример (продолжение)

```
// ... g_Queue.front()
g_Queue.pop();
//
pthread_mutex_unlock(&g_MutexQueue);
//
pthread_cond_signal(&g_CondNotFull);
//
} // while (true)
//
return 0;
} // thread_proc_get()
```

Пример: производители и потребители (продолжение)

Пример (продолжение)

```
void *thread_proc_put(void *)
{
    while (true)
    {
        g_nItem = g_nItem % MY_MAX_QUEUE + 1;
        pthread_mutex_lock(&g_MutexQueue);
        while (g_Queue.size() == MY_MAX_QUEUE && g_vbRun)
            pthread_cond_wait(&g_CondNotFull, &g_MutexQueue);
        if (!g_vbRun)
        {
            pthread_mutex_unlock(&g_MutexQueue);
            break;
        }
    }
}
```

Пример: производители и потребители (продолжение)

Пример (продолжение)

```
g_Queue.push(g_nItem);  
// ... g_Queue.front()  
//  
pthread_mutex_unlock(&g_MutexQueue);  
//  
pthread_cond_signal(&g_CondNotEmpty);  
// ...  
//  
} // while (true)  
//  
return 0;  
} // thread_proc_put()
```

Пример: производители и потребители (продолжение)

Пример (продолжение)

```
int main()
{
    pthread_t thread_get_1, thread_get_2, thread_put;
    pthread_create(
        &thread_get_1, NULL, thread_proc_get, (void *) 1);
    // ...
    pthread_mutex_lock(&g_MutexQueue);
    g_vbRun = false;
    pthread_mutex_unlock(&g_MutexQueue);
    //
    pthread_cond_broadcast(&g_CondNotEmpty);
    pthread_cond_broadcast(&g_CondNotFull);
}
```

Пример: производители и потребители (окончание)

Пример (окончание)

```
//  
pthread_join(thread_get_1, NULL);  
// ...  
pthread_mutex_destroy(&g_MutexQueue);  
pthread_cond_destroy(&g_CondNotEmpty);  
pthread_cond_destroy(&g_CondNotFull);  
} // main()
```