Отчет по теме:
Deadlock в параллельном программировании

Введение

Параллельное программирование является важной частью современных вычислительных систем, позволяя эффективно использовать ресурсы многопроцессорных и многоядерных систем. Однако, при работе с параллельными процессами или потоками возникают различные проблемы, одной из которых является deadlock (взаимная блокировка). Deadlock — это ситуация, при которой два или более потоков или процессов находятся в состоянии бесконечного ожидания ресурсов, занятых друг другом, что приводит к остановке выполнения программы. В данном отчете рассматриваются причины возникновения deadlock, методы его предотвращения и обнаружения, а также примеры на языке Go (Golang)[3].

1. Понятие deadlock

Deadlock возникает, когда несколько потоков или процессов блокируют ресурсы, которые необходимы другим потокам для продолжения работы. В результате все вовлеченные потоки оказываются в состоянии ожидания, и программа не может продолжить выполнение. Для возникновения deadlock необходимо выполнение четырех условий, известных как условия Коффмана[5]:

- Условие взаимного исключения: ресурсы не могут быть разделены между потоками, и только один поток может использовать ресурс в данный момент времени.
- Условие удержания и ожидания: поток удерживает один ресурс и ожидает освобождения другого ресурса, который занят другим потоком.
- Условие отсутствия принудительного изъятия: ресурс не может быть отобран у потока, пока он сам его не освободит.
- Условие циклического ожидания: существует замкнутый цикл потоков, каждый из которых ожидает ресурса, удерживаемого следующим потоком в цикле.

Если все четыре условия выполняются одновременно, возникает deadlock.
Deadlock может возникать не только в программном коде, но и в реальных системах, таких как базы данных, операционные системы и распределенные системы. Например, в базах данных deadlock может возникнуть при одновременной блокировке строк разными транзакциями. В операционных системах deadlock может привести к зависанию системы, что требует перезагрузки и потери данных.

2. Пример deadlock на языке Go

Классический пример deadlock на языке Go с использованием горутин и мьютексов[2]:

```
package main

import (
    "fmt"
    "sync"
    "time"
)

func main() {
    var mutexA, mutexB sync.Mutex

    go func() {
```

```
        mutexA.Lock()
        fmt.Println("Горутина 1 захватила мьютекс A")
        time.Sleep(100 * time.Millisecond) // Имитация работы
        mutexB.Lock()
        fmt.Println("Горутина 1 захватила мьютекс B")
        mutexB.Unlock()
        mutexA.Unlock()
    }()

    go func() {
        mutexB.Lock()
        fmt.Println("Горутина 2 захватила мьютекс B")
        time.Sleep(100 * time.Millisecond) // Имитация работы
        mutexA.Lock()
        fmt.Println("Горутина 2 захватила мьютекс A")
        mutexA.Unlock()
        mutexB.Unlock()
    }()

    time.Sleep(1 * time.Second) // Ожидание завершения
    горутин
    fmt.Println("Программа завершена")
}
```

В данном примере первая горутина захватывает мьютекс A и ожидает мьютекс B, в то время как вторая горутина захватывает мьютекс B и ожидает мьютекс A. В результате обе горутины оказываются заблокированными, и программа зависает.
Этот пример иллюстрирует типичную ситуацию deadlock, которая может возникнуть при неправильном управлении ресурсами в многопоточных приложениях.

3. Методы предотвращения deadlock
Для предотвращения deadlock используются различные стратегии[6]:

- Устранение условия взаимного исключения: если ресурсы могут быть разделены между потоками, то deadlock не возникнет. Однако это не всегда возможно, так как некоторые ресурсы по своей природе требуют исключительного доступа. В нашем примере мьютексы по своей природе требуют исключительного доступа, поэтому этот метод не применим напрямую. Вместо использования мьютексов мы применим атомарные операции для безопасного доступа.

```
package main

import (
    "fmt"
    "sync/atomic"
    "time"
)

var (
    resourceA int32 = 0 // Ресурс A
    resourceB int32 = 0 // Ресурс B
```

```
)

func main() {
   go func() {
      // Горутина 1 работает с ресурсами
      for {
         // Захватываем ресурс A атомарно
         if atomic.CompareAndSwapInt32(&resourceA, 0, 1) {
            fmt.Println("Горутина 1 захватила ресурс A")
                time.Sleep(100 * time.Millisecond) // Имитация
работы

            // Захватываем ресурс B атомарно
            if atomic.CompareAndSwapInt32(&resourceB, 0, 1) {
               fmt.Println("Горутина 1 захватила ресурс B")
                 time.Sleep(100 * time.Millisecond) // Имитация
работы

               // Освобождаем ресурсы
               atomic.StoreInt32(&resourceB, 0)
               atomic.StoreInt32(&resourceA, 0)
               break
            } else {
                // Если ресурс B недоступен, освобождаем ресурс
A и повторяем попытку
               atomic.StoreInt32(&resourceA, 0)
                   fmt.Println("Горутина 1 не смогла захватить
ресурс B, освобождаю ресурс A")
                   time.Sleep(100 * time.Millisecond) // Пауза
перед повторной попыткой
            }
         }
      }
   }()

   go func() {
      // Горутина 2 работает с ресурсами
      for {
         // Захватываем ресурс B атомарно
         if atomic.CompareAndSwapInt32(&resourceB, 0, 1) {
            fmt.Println("Горутина 2 захватила ресурс B")
                time.Sleep(100 * time.Millisecond) // Имитация
работы

            // Захватываем ресурс A атомарно
            if atomic.CompareAndSwapInt32(&resourceA, 0, 1) {
               fmt.Println("Горутина 2 захватила ресурс A")
                 time.Sleep(100 * time.Millisecond) // Имитация
работы

               // Освобождаем ресурсы
```

```
                atomic.StoreInt32(&resourceA, 0)
                atomic.StoreInt32(&resourceB, 0)
                break
            } else {
                // Если ресурс A недоступен, освобождаем ресурс
B и повторяем попытку
                atomic.StoreInt32(&resourceB, 0)
                    fmt.Println("Горутина 2 не смогла захватить
ресурс A, освобождаю ресурс B")
                    time.Sleep(100 * time.Millisecond) // Пауза
перед повторной попыткой
            }
        }
    }
    }()

    time.Sleep(1 * time.Second) // Ожидание завершения горутин
    fmt.Println("Программа завершена")
}
```

- Устранение условия удержания и ожидания: можно требовать, чтобы поток запрашивал все необходимые ресурсы сразу, прежде чем начать выполнение. Если хотя бы один ресурс недоступен, поток освобождает все ранее захваченные ресурсы и повторяет попытку позже.

```
package main

import (
    "fmt"
    "sync"
    "time"
)

func main() {
    var mutexA, mutexB sync.Mutex

    go func() {
        for {
            mutexA.Lock()
            fmt.Println("Горутина 1 захватила мьютекс A")
            time.Sleep(100 * time.Millisecond) // Имитация работы

            // Попытка захватить мьютекс B с таймаутом
            if mutexB.TryLock() {
                fmt.Println("Горутина 1 захватила мьютекс B")
```

```
            mutexB.Unlock()
            mutexA.Unlock()
            break
        } else {
                fmt.Println("Горутина 1 не смогла захватить
мьютекс B, освобождаю мьютекс A")
            mutexA.Unlock()
             time.Sleep(100 * time.Millisecond) // Пауза перед
повторной попыткой
        }
    }
}()

go func() {
    for {
        mutexB.Lock()
        fmt.Println("Горутина 2 захватила мьютекс B")
        time.Sleep(100 * time.Millisecond) // Имитация работы

        // Попытка захватить мьютекс A с таймаутом
        if mutexA.TryLock() {
            fmt.Println("Горутина 2 захватила мьютекс A")
            mutexA.Unlock()
            mutexB.Unlock()
            break
        } else {
                fmt.Println("Горутина 2 не смогла захватить
мьютекс A, освобождаю мьютекс B")
            mutexB.Unlock()
             time.Sleep(100 * time.Millisecond) // Пауза перед
повторной попыткой
        }
    }
}()

time.Sleep(1 * time.Second) // Ожидание завершения горутин
fmt.Println("Программа завершена")
}
```

- Устранение условия отсутствия принудительного изъятия: можно реализовать механизм принудительного освобождения ресурсов у потоков, что может быть полезно в некоторых системах, но требует сложной логики восстановления.

```go
package main

import (
   "fmt"
   "sync"
   "time"
)

func main() {
   var mutexA, mutexB sync.Mutex

   go func() {
      for {
         mutexA.Lock()
         fmt.Println("Горутина 1 захватила мьютекс A")

         if mutexB.TryLock() {
            fmt.Println("Горутина 1 захватила мьютекс B")
            mutexB.Unlock()
            mutexA.Unlock()
            break
         } else {
                  fmt.Println("Горутина 1 не смогла захватить
мьютекс B, освобождаю мьютекс A")
            mutexA.Unlock()
             time.Sleep(100 * time.Millisecond) // Пауза перед
повторной попыткой
         }
      }
   }()

   go func() {
      for {
         mutexB.Lock()
         fmt.Println("Горутина 2 захватила мьютекс B")

         if mutexA.TryLock() {
            fmt.Println("Горутина 2 захватила мьютекс A")
            mutexA.Unlock()
            mutexB.Unlock()
            break
```

```
        } else {
                fmt.Println("Горутина 2 не смогла захватить мьютекс A, освобождаю мьютекс B")
            mutexB.Unlock()
             time.Sleep(100 * time.Millisecond) // Пауза перед повторной попыткой
        }
    }
  }()

  time.Sleep(1 * time.Second) // Ожидание завершения горутин
  fmt.Println("Программа завершена")
}
```

- Устранение условия циклического ожидания: можно ввести порядок захвата ресурсов, чтобы потоки всегда запрашивали ресурсы в определенной последовательности. Например, если все потоки запрашивают ресурс A перед ресурсом B, то циклическое ожидание невозможно.

```
package main

import (
  "fmt"
  "sync"
  "time"
)

func main() {
  var mutexA, mutexB sync.Mutex

  go func() {
    mutexA.Lock()
    fmt.Println("Горутина 1 захватила мьютекс A")
    time.Sleep(100 * time.Millisecond) // Имитация работы
    mutexB.Lock()
    fmt.Println("Горутина 1 захватила мьютекс B")
    mutexB.Unlock()
    mutexA.Unlock()
  }()

  go func() {
```

```
        mutexA.Lock() // Теперь обе горутины захватывают мьютекс
A первым
        fmt.Println("Горутина 2 захватила мьютекс A")
        time.Sleep(100 * time.Millisecond) // Имитация работы
        mutexB.Lock()
        fmt.Println("Горутина 2 захватила мьютекс B")
        mutexB.Unlock()
        mutexA.Unlock()
    }()

    time.Sleep(1 * time.Second) // Ожидание завершения горутин
    fmt.Println("Программа завершена")
}
```

4. Методы обнаружения deadlock

Если предотвращение deadlock невозможно, можно использовать методы его обнаружения:

- Граф ожидания: система строит граф, где узлы представляют потоки и ресурсы, а ребра — запросы и удержания ресурсов. Если в графе обнаруживается цикл, это указывает на наличие deadlock.
- Алгоритм банкира: этот алгоритм моделирует распределение ресурсов и проверяет, может ли система безопасно завершить выполнение всех потоков без deadlock.
- Таймауты: если поток ожидает ресурс слишком долго, система может предположить наличие deadlock и предпринять действия для его устранения, например, завершить один из потоков.

5. Практические примеры и последствия deadlock

Для более наглядного примера возьмем реальную практическую задачу с вычислением чисел фибоначчи рекурсивным методом. Программа будет использовать кеш для хранения уже вычисленных значений и пытаться работать с кешем из нескольких горутин параллельно:

```
package main

import (
    "fmt"
    "sync"
)

// Кэш для хранения вычисленных чисел Фибоначчи
var cache = struct {
    sync.Mutex
    values map[int]int
}{
    values: make(map[int]int),
```

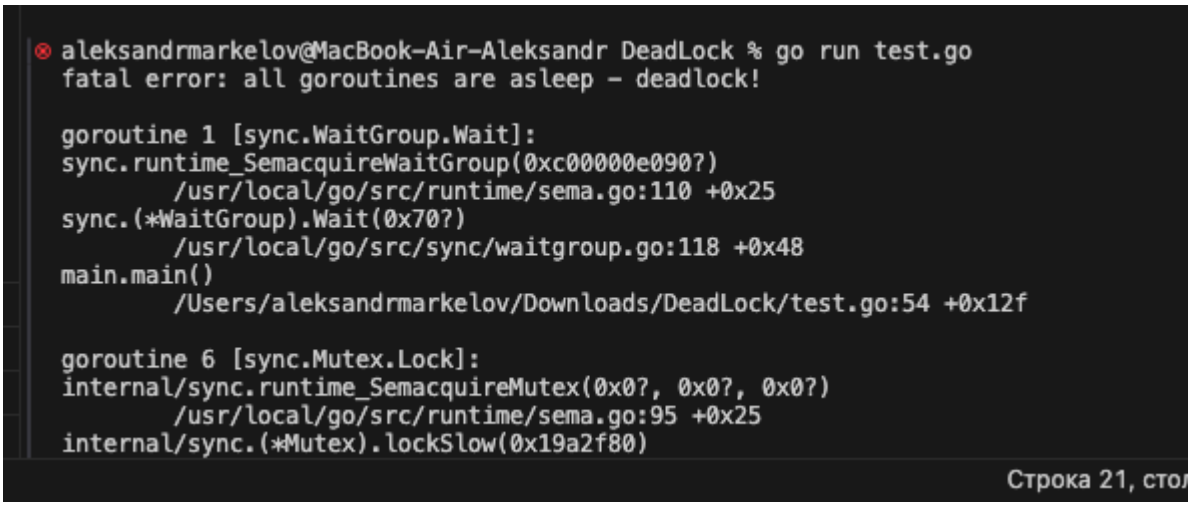
```go
func (fc *FibonacciCalculator) FibonacciWithDeadlock(n int) int {
    fc.deadlockCache.Lock()
    defer fc.deadlockCache.Unlock()

    if val, found := fc.deadlockCache.values[n]; found {
        return val
    }

    if n <= 1 {
        return n
    }

    val := fc.FibonacciWithDeadlock(n-1) + fc.FibonacciWithDeadlock(n-2)
    fc.deadlockCache.values[n] = val
    return val
}
```

Горутина блокирует мьютекс для Fib(n). Рекурсивно вызывает Fib(n-1) и Fib(n-2), пытаясь повторно заблокировать тот же мьютекс. Результат: программа зависает, так как мьютекс нельзя захватить дважды в одной горутине.:



Варианты решения:

1. **Двойная проверка**. Первая проверка кэша — с блокировкой. Рекурсивные вычисления — без блокировки. Сохранение результата — с повторной блокировкой:

```go
func (fc *FibonacciCalculator) FibonacciWithDoubleCheck(n int) int {
    fc.doubleCheckCache.Lock()
    if val, found := fc.doubleCheckCache.values[n]; found {
        fc.doubleCheckCache.Unlock()
        return val
    }
```

```
    fc.doubleCheckCache.Unlock()

    if n <= 1 {
        return n
    }

    val := fc.FibonacciWithDoubleCheck(n-1) + fc.FibonacciWithDoubleCheck(n-2)

    fc.doubleCheckCache.Lock()
    fc.doubleCheckCache.values[n] = val
    fc.doubleCheckCache.Unlock()

    return val
}
```

2. **Использование sync.Map.** Встроенная потокобезопасность. Не требует явных блокировок. Высокая производительность при частых чтениях:

```
func (fc *FibonacciCalculator) FibonacciWithSyncMap(n int) int {
    if val, ok := fc.syncMapCache.Load(n); ok {
        return val.(int)
    }

    if n <= 1 {
        return n
    }

    val := fc.FibonacciWithSyncMap(n-1) + fc.FibonacciWithSyncMap(n-2)
    fc.syncMapCache.Store(n, val)
    return val
}
```

При этих решениях deadlock не возникает и программа корректно обрабатывает результат:

```
Демонстрация deadlock:
Deadlock подтверждён (функция не завершилась)

Исправленная версия с двойной проверкой:
Fib(20) = 6765

Версия с sync.Map:
Fib(20) = 6765
```

Deadlock может возникать в различных системах, включая операционные системы, базы данных и распределенные системы. Например, в базах данных deadlock может возникнуть при одновременной блокировке строк разными транзакциями. В

операционных системах deadlock может привести к зависанию системы, что требует перезагрузки и потери данных.
Для предотвращения deadlock в базах данных используются механизмы обнаружения и разрешения конфликтов, такие как откат одной из транзакций. В операционных системах применяются алгоритмы планирования, которые минимизируют вероятность возникновения deadlock.

Рассмотрим также еще один пример программы с deadlock и его исправлением. Программа моделирует банковские переводы между счетами (имитация работы транзакций в БД).

```
func main() {
   rand.Seed(time.Now().UnixNano())
   const numAccounts = 100
   const numTransactions = 10000
     fmt.Println("=== ДЕМОНСТРАЦИЯ DEADLOCK С 10 000 ГОРУТИН
===")
   //с deadlock
   fmt.Println("Запуск 10 000 небезопасных переводов...")
   bankDeadlock := Bank{}
   for i := 0; i < numAccounts; i++ {
         bankDeadlock.Accounts = append(bankDeadlock.Accounts,
&Account{ID: i, Balance: 1000})
   }
   runTransactions(&bankDeadlock, numTransactions, true)
   //без deadlock
   fmt.Println("Запуск 10 000 безопасных переводов...")
   bankCorrect := Bank{}
   for i := 0; i < numAccounts; i++ {
          bankCorrect.Accounts = append(bankCorrect.Accounts,
&Account{ID: i, Balance: 1000})
   }
   runTransactions(&bankCorrect, numTransactions, false)
   fmt.Println("Программа завершена!")
}
```

В данном случае программа сначала выполняет транзакции с помощью метода, который имеет вероятность получить deadlock(для того чтобы горутины точно успели заблокировать друг друга выставлена задержка)

```
func (b *Bank) TransferDeadlock(fromID, toID, amount int) {
   from := b.Accounts[fromID]
   to := b.Accounts[toID]

   from.mu.Lock()
```

```
    // Искусственная задержка для увеличения вероятности
deadlock
    time.Sleep(time.Microsecond * 100)
    to.mu.Lock()

    from.Balance -= amount
    to.Balance += amount

    to.mu.Unlock()
    from.mu.Unlock()
}
```

При вызове данного метода программа будет последовательно ментять счета from и to, что в конечном счете может рано или поздно привести к возникновению deadlock (Если одновременно горутина 1 блокирует А, затем пытается заблокировать Б, а горутина 2 блокирует Б и пытается заблокировать А). Все условия Коффмана выполняются, и поэтому мы можем лицезреть заветный deadlock в тесте этого метода:

```
=== RUN   TestTransferDeadlock
--- PASS: TestTransferDeadlock (2.00s)
```

Далее программа запускает вторую имитацию транзакций через метод, который не допускает образования deadlock

```
func (b *Bank) TransferCorrect(fromID, toID, amount int) {
    first, second := fromID, toID
    if fromID > toID {
        first, second = second, first
    }

    b.Accounts[first].mu.Lock()
    b.Accounts[second].mu.Lock()

    b.Accounts[fromID].Balance -= amount
    b.Accounts[toID].Balance += amount

    b.Accounts[second].mu.Unlock()
    b.Accounts[first].mu.Unlock()
}
```

В этом методе используется универсальный порядок блокировки: всегда сначала блокируется счет с меньшим ID. Это гарантирует отсутствие циклических зависимостей. Также порядок блокировки не зависит от направления перевода и все горутины используют одинаковый алгоритм. Из-за того что мы исключили циклические зависимости и сделали поведение программы детерминированным (результат не зависит от случайных факторов) deadlock перестал возникать при работе программы, что наглядно отображено в тестах:

```
=== RUN   TestTransferCorrect
--- PASS: TestTransferCorrect (0.00s)
=== RUN   TestConcurrentTransfers
--- PASS: TestConcurrentTransfers (0.01s)
```

Так как в методе нарушается 4-е условие Коффмана (циклическое ожидание) deadlock перестает возникать.

Заключение

Deadlock является серьезной проблемой в параллельном программировании, которая может привести к остановке выполнения программы и потере данных. Для предотвращения deadlock необходимо понимать его причины и использовать соответствующие стратегии, такие как упорядоченное захватывание ресурсов или алгоритмы обнаружения. В реальных системах важно проектировать программы с учетом возможных deadlock и тестировать их на наличие подобных проблем.

Список источников

Официальная документация и книги

1. The Go Programming Language Specification (Mutex and Deadlock)
   https://go.dev/ref/spec#Mutual_exclusion

   Официальная документация Go о мьютексах и блокировках.
2. Go by Example: Mutexes

   https://gobyexample.com/mutexes

   Практические примеры работы с мьютексами в Go.
3. Книга: "Concurrency in Go" by Katherine Cox-Buday

   Глава 4: "Deadlocks, Starvation, and Livelocks"

   Подробное объяснение deadlock, starvation и livelock в Go.
4. Effective Go: Concurrency

   https://go.dev/doc/effective_go#concurrency

   Рекомендации по написанию конкурентного кода от создателей Go.

Академические материалы и исследования

1. Coffman Conditions for Deadlock (University Lectures)
   https://www.cs.uic.edu/~jbell/CourseNotes/OperatingSystems/7_Deadlocks.html

   Условия Коффмана: взаимное исключение, удержание и ожидание, отсутствие вытеснения, циклическое ожидание.
2. Deadlock Prevention Algorithms (Stanford CS)

   https://web.stanford.edu/~ouster/cgi-bin/cs140-spring14/lecture.php?topic=deadlock

   Алгоритмы предотвращения deadlock в распределённых системах.