Распределенные алгоритмы и системы

mk.cs.msu.ru → Лекционные курсы → Распределенные алгоритмы и системы

Блок 13

Коммуникационный протокол с таймерами

Лектор:
Подымов Владислав Васильевич
E-mail:
valdus@yandex.ru

ВМК МГУ, 2022/2023, весенний семестр

Рассматриваемая задача

Усложним задачу передачи данных, рассмотренную на примере симметричного протокола раздвижного окна:

- Передача данных может занимать длительное время, и следует учитывать установку и завершение соединения (*сеанса связи*) между узлами и его разрыв при длительном обмене данными
- Разрешим сообщениям не только теряться в канале связи, но и
  - дублироваться: могут появляться копии сообщений, имеющихся в канале
  - перемешиваться: порядок отправки сообщений может не совпадать с порядком их приёма

Этот расширенный спектр ошибок соответствует сетевому уровню модели OSI

Для решения такой усложнённой задачи передачи данных в 1978 году был предложен протокол Δt транспортного уровня

Рассматриваемая задача

По сравнению с BSWP, рассматривающийся (упрощённый) вариант протокола Δt имеет следующие особенности

Однонаправленность: требуется передать данные в одну сторону, $p \to q$

Узел p будем называть отправителем, а q — получателем

Окно приёма ширины 1: получатель в каждый момент времени ожидает блок данных с одним конкретным порядковым номером, блоки с другими номерами игнорируются

Наличие таймеров — устройств измерения физического времени

Подробно рассмотрим только упрощённую версию протокола с небольшим числом таймеров

Таймеры и допущения о времени

Таймером будем называть переменную, значениями которой являются действительные (вещественные) числа ($\mathbb{R}$)

Будем полагать, что система выполняется в услових глобального (физического, действительного) времени:

- Глобальное время линейно
- Каждое действие выполняется мгновенно (имеет длительность 0) в некоторый заданный момент глобального времени
- Узлы системы не могут обозревать глобальное время

Таймеры и допущения о времени

Будем считать, что по умолчанию (когда не выполняется явно присваивание) значение таймера убывает в темпе глобального времени:

- $X^{(t)}$ — значение таймера в момент глобального времени t
- По умолчанию верно $X^{(t_1)} - X^{(t_2)} = t_2 - t_1$

Также будем считать, что каждый пакет имеет максимальное время жизни μ:

- Если пакет был отправлен в момент t_s и получен в момент t_r, то верно $t_s < t_r < t_s + \mu$, иначе пакет теряется
- Если пакет дублируется, то временем отправки считается время отправки исходного пакета

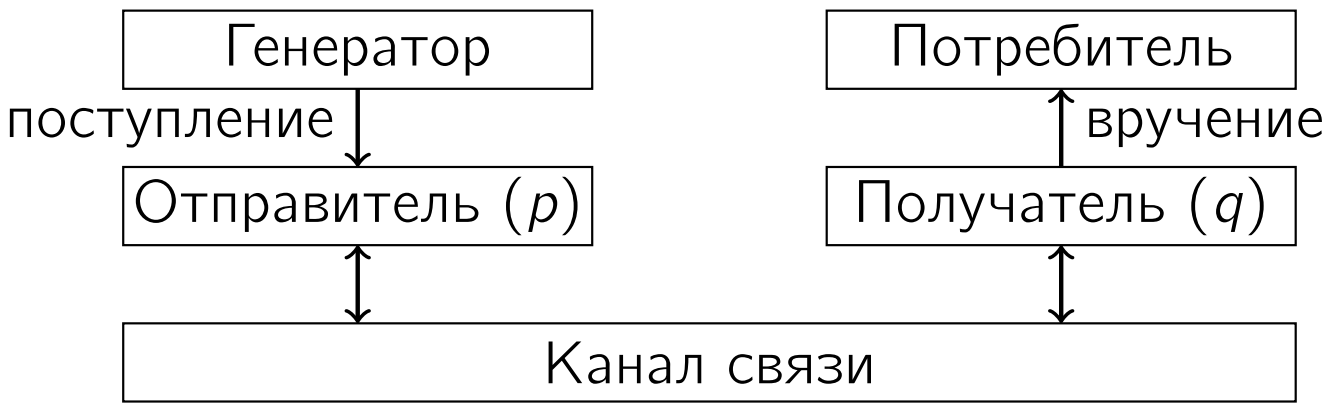
timer — так будем обозначать тип таймера (вещественной переменной)

Другие допущения

Будем считать, что требуется передать от p к q потенциально неограниченный массив блоков данных in_p, недоступный целиком узлу p

Элементы этого массива поступают в узел p из генератора по порядку следования в массиве при помощи соответствующего действия

Узел q после приёма очередного блока данных d должен вручить этот блок потребителю выполнением команды $done(d)$



Основная задача узлов p и q — обеспечить *как можно более* надёжную передачу данных от генератора к потребителю

Некоторые блоки данных будут помечаться как «вероятно потерянные», и это будет обозначаться значением $\mathbb{t}$ в особом массиве *lost*

Основные свойства протокола

Отсутствие потерь: для некоторой константы C каждое слово из in_p спустя время C после поступления от генератора будет вручено потребителю или помечено как вероятно потерянное

Полного отсутствия вероятно потерянных блоков избежать невозможно, как бы ни был устроен протокол

Соблюдение порядка: данные вручаются узлом q согласно возрастанию номеров в in_p

Описание протокола: параметры

Будем использовать в протоколе несколько заранее заданных положительных вещественных констант (параметров протокола):

- μ — максимальное время жизни всех пакетов
- $\mathbf{t}$ — время активности передачи блока
- $\mathbf{r}$ — ожидание после приёма пакета, $\mathbf{r} \geq \mathbf{t} + \mu$
- $\mathbf{s}$ — ожидание после отправки пакета, $\mathbf{s} \geq \mathbf{r} + 2\mu$

Описание протокола: переменные отправителя p

Основные переменные:

- in_p : **array of word** — массив блоков данных для передачи
- $Low, High : \mathbb{N}_0 = 0$
  Этими переменными обозначается окно передачи $Low \leq i < High$
- $\vec{\tau}_t$: **array of timer** $= (0, 0, \dots)$ — массив таймеров, отсчитывающих длительность **t** с момента получения блока
- τ_s : **timer** $= 0$ — таймер, отсчитывающий длительность **s** с момента последней отправки пакета

Вспомогательные переменные:

- c_p : **bool** $= \mathbb{f}$ — соединение установлено в узле p
- $N : \mathbb{N}_0 = 0$ — переменная, отсутствующая в реализации, отмечающая суммарное число сообщений, считающихся врученными или вероятно потерянными и необходимая в обосновании корректности и для удобства использования массивов

Описание протокола: переменные получателя q

Основные переменные:

- $Exp : \mathbb{N}_0 = 0$ — номер очередного ожидаемого блока
- τ_r : **timer** $= 0$ — таймер, отсчитывающий длительность **r** с момента последнего приёма ожидаемого пакета

Вспомогательные переменные:

- c_q : **bool** $= \mathbb{f}$ — соединение установлено в узле q

Описание протокола: переменные коммуникационной подсистемы

- M_q — мультимножество пакетов данных, адресованных q
  Пакет данных имеет вид $(\textbf{data}, \langle b, i, d, \rho \rangle)$, где:
  - $b \in \textbf{bool}$ — признак начала окна передачи: индикатор того, что пересылаемый блок данных отвечают наименьшему номеру окна передачи
    Этот признок используется получателем, чтобы понять, следует ли установить соединение
  - $i \in \mathbb{N}_0$ — номер пересылаемого блока данных
  - $d \in \textbf{word}$ — пересылаемый блок данных
  - $\rho \in \mathbb{R}$ — оставшееся время жизни пакета: при отправке равно μ, и уменьшается с течением времени (это будет моделироваться соответствующим действием)
- M_p — мультимножество пакетов подтверждения, адресованных p
  Пакет подтверждения имеет вид $(\textbf{ack}, \langle i, \rho \rangle)$, где:
  - $i \in \mathbb{N}_0$ — номер блока данных, приём которого подтверждается
  - $\rho \in \mathbb{R}$ — оставшееся время жизни пакета

Описание протокола: схема передачи данных

p: Блок d с очередным номером i поступает из генератора
Блок d отправляется

..: Если пакет данных слишком долго находится в канале, то он удаляется

q: Блок d принимается, его номер сверяется с ожидаемым, и при совпадении блок вручается потребителю (а при несовпадении игнорируется)
Если пакет с ожидаемым номером долго не приходит, то выполняется переход к ожиданию следующего блока
Если блок d вручен, то отправляется соответствующее подтверждение

..: Если подтверждение слишком долго находится в канале, то оно удаляется

p: Подтверждение принимается, и выносится решение об успешной передаче блока
Если подтверждение долго не приходит, то блок помечается как возможно потерянный и больше не передаётся

Описание протокола: действия отправителя

В отправителе содержится пять действий (процедур):

1. $\mathbf{G}_p$: поступление очередного блока с возможным установлением соединения
2. $\mathbf{S}_p$: отправка блока
3. $\mathbf{R}_p$: получение подтверждения
4. $\mathbf{L}_p$: пометка блока как возможно потерянного
5. $\mathbf{C}_p$: завершение соединения

Описание протокола: действия отправителя

Поступление блока (G_p)

1. Если $c_p = \mathbb{f}$, то:
   1.1 Устанавливается соединение: $c_p := \mathbb{t}$;
   1.2 $\tau_s := \mathbf{s}$;
2. $\vec{\tau}_t[N + High] := \mathbf{t}$;
3. $High := High + 1$;

Соединение устанавливается, если оно отсутствует и из генератора поступает очередной блок

Действия в протоколе устроены так, что перед установкой соединения верно $Low = High = 0$

При установке соединения обновляется время ожидания после отправки данных

В любом случае при поступлении блока:

- Обновляется время продолжения попыток его передать
- Обновляется правая створка окна передачи (блок сохраняется в p)

Описание протокола: действия отправителя

Отправка блока ($\mathbf{S}_p$)

Предусловие: $c_p \,\&\, Low \leq i < High \,\&\, \vec{\tau}_s[N+i] > 0$

1. $send(\mathbf{data}, (i = Low), i, in_p[N+i], \mu)$
2. $\tau_s := \mathbf{s}$;

Отправить блок можно только в том случае, если

- соединение установлено,
- он сохранён в p (принадлежит окну передачи) и
- время попыток передачи блока ещё не истекло

После отправки пакета обновляется таймер, отсчитывающий соответствующую длительность

Описание протокола: действия отправителя

Приём подтверждения ($\mathbf{R}_p$)

Предусловие: $c_p\,\&(\mathbf{ack}, \langle i, \rho \rangle) \in M_p$

1. $receive(\mathbf{ack}, \langle i, \rho \rangle)$
2. $Low := \max(Low, i)$;

Принять подтверждение можно только в том случае, если

- соединение установлено и
- подтверждение есть в коммуникационной подсистеме

После приёма подтверждения обновляется левая створка окна передачи:
i — номер, следующий за номером успешно принятого пакета

Описание протокола: действия отправителя

Пометка блока как потерянного ($\mathbf{L}_p$)

Предусловие: $c_p \,\&\, \vec{\tau}_t[N + Low] \leq -(\mathbf{r} + 2\mu)$

1. $lost[N + Low] := \mathbb{t}$;
2. $Low := Low + 1$;

Пометить как возможно потерянный можно только наименьший блок окна передачи и только в том случае, если

- сеанс установлен и
- с поступления блока прошло хотя бы $\mathbf{t} + \mathbf{r} + 2\mu$ единиц времени — столько требуется суммарно для отправки данных и получения подтверждения в наихудшем (наиболее медленном) случае

После пометки левая створка окна передачи сдвигается: больше этот блок не передаётся

Описание протокола: действия отправителя

Завершение соединения ($\mathbf{C}_p$)

Предусловие: $c_p \,\&\, \tau_s < 0 \,\&\, Low = High$

1. $N := N + High$;
2. $Low := 0$;
3. $High := 0$;
4. Завершить соединение: $c_p := \mathbb{f}$;

Завершить соединение можно только в том случае, если

- оно установлено,
- истекло время, выделенное для отправки данных, и
- окно передачи закрылось

Блоки с номерами меньше N, отвечающими завершённым соединениям, считаются доставленными или вероятно потерянными и удаляются из p
В реализациях протокола нет переменной N, и блоки нумеруются с ноля для каждого соединения
Пока соединения нет, обеспечивается равенство $Low = High = 0$

Описание протокола: действия получателя

В получателе содержится два действия (две процедуры):

1. $\mathbf{R}_q$: получение пакета с возможным установлением соединения
2. $\mathbf{S}_q$: отправка подтверждения

Соединение завершается сразу по истечении таймера τ_r, и это обозначено далее в особом действии системы, отвечающем течению времени

Отправка подтверждения ($\mathbf{S}_q$)

Предусловие: c_q

1. $send(\mathbf{ack}, \langle Exp, \mu \rangle)$

Подтверждение отправляется только в том случае, если установлено соединение, и отсылается текущий номер ожидаемого блока (следующий за последним принятым)

Описание протокола: действия получателя

Получение пакета ($\mathbf{R}_q$)

Предусловие: $(\mathbf{data}, \langle b, i, d, \rho \rangle) \in M_q$

1. *receive*$(\mathbf{data}, \langle b, i, d, \rho \rangle)$
2. Если $c_q = \mathbb{f} \,\&\, b = \mathbb{t}$:
   - 2.1 Устанавливается соединение: $c_q := \mathbb{t}$;
   - 2.2 $\tau_r := \mathbf{r}$;
   - 2.3 $Exp := i + 1$;
   - 2.4 *done*(d)
3. Если $c_q = \mathbb{t} \,\&\, i = Exp$:
   - 3.1 $\tau_r := \mathbf{r}$;
   - 3.2 $Exp := Exp + 1$;
   - 3.3 *done*(d)

Принять пакет можно только в том случае, если он есть в M_q
Если соединения нет и прислан первый блок окна передачи, то устанавливается соединение и принимается блок
Если соединение установлено и прислан блок с ожидаемым номером, то принимается блок

Описание протокола: действия получателя

Получение пакета ($\mathbf{R}_q$)

Предусловие: $(\mathbf{data}, \langle b, i, d, \rho \rangle) \in M_q$

1. *receive*$(\mathbf{data}, \langle b, i, d, \rho \rangle)$
2. Если $c_q = \mathbb{f} \,\&\, b = \mathbb{t}$:
   - 2.1 Устанавливается соединение: $c_q := \mathbb{t}$;
   - 2.2 $\tau_r := \mathbf{r}$;
   - 2.3 $Exp := i + 1$;
   - 2.4 *done*(d)
3. Если $c_q = \mathbb{t} \,\&\, i = Exp$:
   - 3.1 $\tau_r := \mathbf{r}$;
   - 3.2 $Exp := Exp + 1$;
   - 3.3 *done*(d)

Приём блока состоит во вручении блока потребителю, перехода к ожиданию следующего блока и (пере)установке таймера, отсчитывающего время до закрытия соединения

Описание протокола: особые действия

Возникновение ошибок в ненадёжном канале связи будем считать действиями особого узла Ω, вносящего эти ошибки

Кроме того, как действие узла Ω представим и течение времени

Таким образом, в узле Ω содержится три действия:

1. **Loss**: потеря сообщения
2. **Dup**: дублирование сообщения
3. **Time**: течение времени

Потеря сообщения (Loss)

Предусловие: $m \in M_x \,\&\, x \in \{p, q\}$

1. $M_x := M_x - \{m\}$;

Дублирование сообщения (Dup)

Предусловие: $m \in M_x \,\&\, x \in \{p, q\}$

1. $M_x := M_x + \{m\}$;

Описание протокола: особые действия

Течение времени (Time)

1. Выбрать произвольное значение $\Delta \in \mathbb{R}$, $\Delta > 0$
2. Для каждого $i \in \mathbb{N}_0$: $\vec{\tau}_s[i] := \vec{\tau}_s[i] - \Delta$;
3. $\tau_s := \tau_s - \Delta$;
4. $\tau_r := \tau_r - \Delta$;
5. Если $\tau_r \leq 0$:
   5.1 Завершить соединение в q: $c_q := \mathbb{f}$;
6. Для каждого пакета $m = (\ldots, \langle \ldots, \rho \rangle) \in M_x$, $x \in \{p, q\}$:
   6.1 $\rho := \rho - \Delta$;
   6.2 Если $\rho \leq 0$:
      6.2.1 $M_x := M_x - \{m\}$;

При выполнении этого действия значения всех таймеров системы уменьшаются на одну и ту же положительную константу Δ

Если время ожидания в q истекло, то соединение завершается

Если время жизни пакета истекло, то он удаляется