11. Консенсус и связанные задачи

Сухорослов Олег Викторович

20.11.2023

План лекции

- Примеры практических задач
- Возможные подходы и фундаментальные примитивы
- Задача консенсуса
- Алгоритм консенсуса Raft
- Сервисы для координации

The best way of building fault-tolerant systems is to find some general-purpose abstractions with useful guarantees, implement them once, and then let applications rely on those guarantees.

Martin Kleppmann (Designing Data-Intensive Applications)

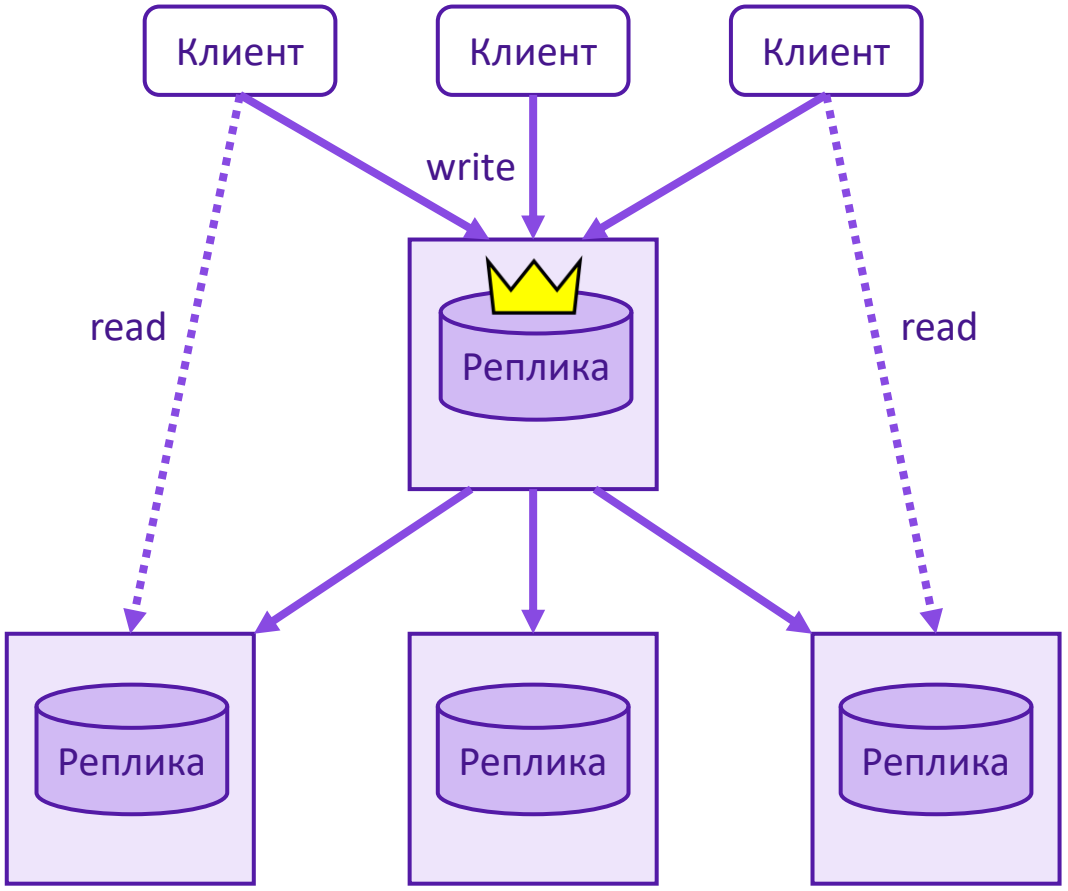
Требования, встречающиеся на практике

- Только один клиент должен вести запись в файл
- Только один узел в системе должен играть некоторую роль
- У каждого пользователя должно быть уникальное имя
- Баланс счёта не должен быть отрицательным
- Не должно быть продано больше товаров, чем есть на складе
- Реплицируемое хранилище должно обеспечивать линеаризуемость
- Транзакция не должна быть зафиксирована в системе частично

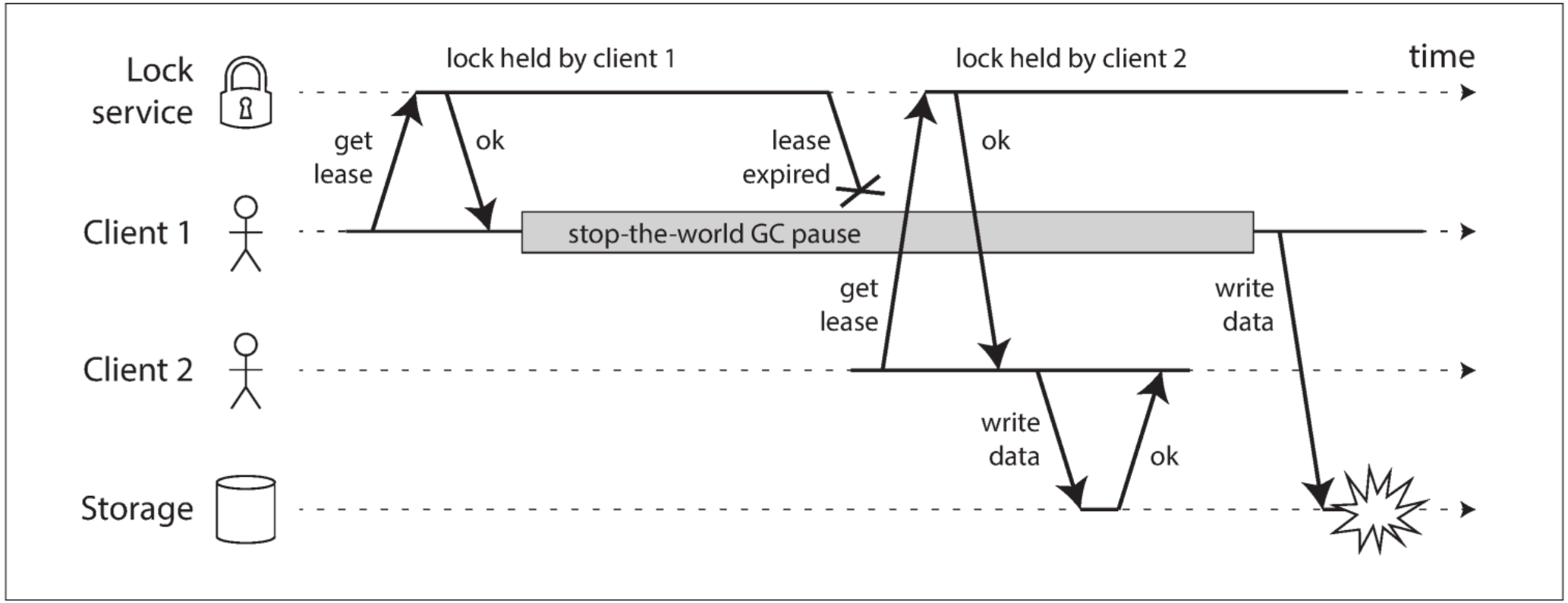
Возможные решения

- Один сервер
  - Упорядочивание операций
  - Блокировки (locks)
  - Атомарные RMW-операции типа compare-and-swap (CAS)
- Распределенная система
  - Лидер
  - Сервис блокировок
  - Координатор транзакций
  - Атомарная рассылка
  - Консенсус

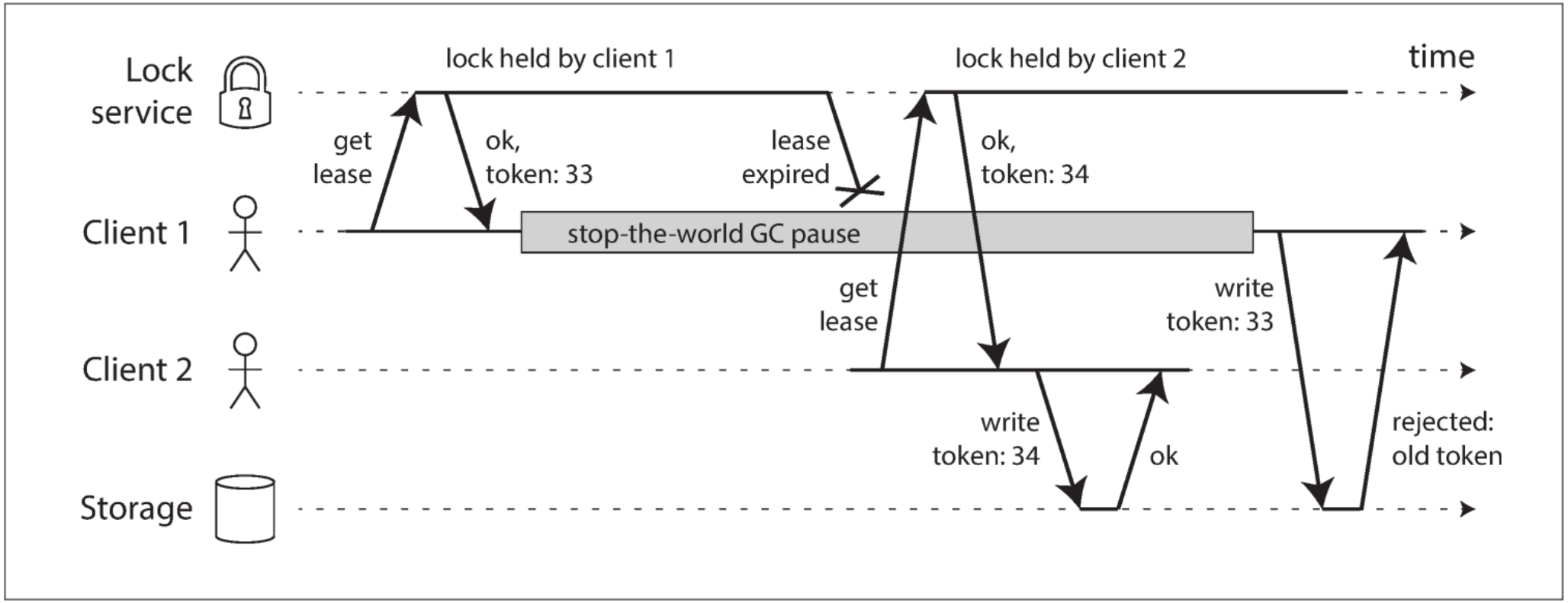
Лидер


Клиент
Клиент
Клиент
write
read
read
Реплика
Реплика
Реплика
Реплика

Сервис блокировок



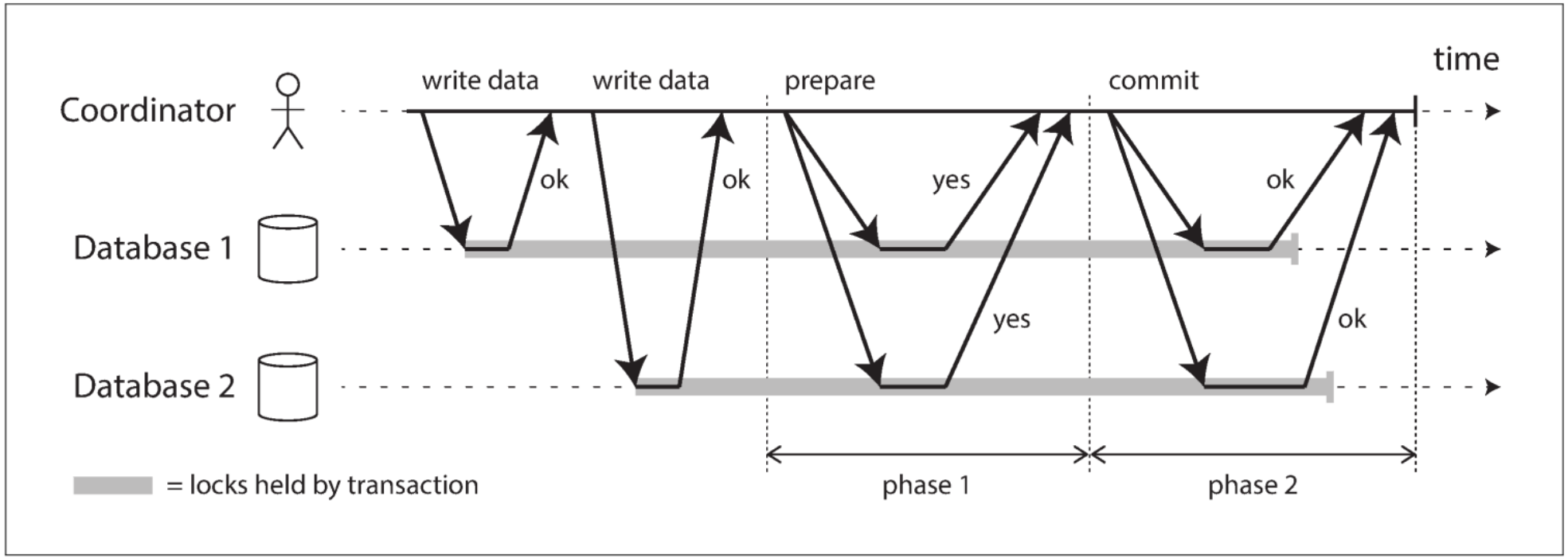
Fencing Token



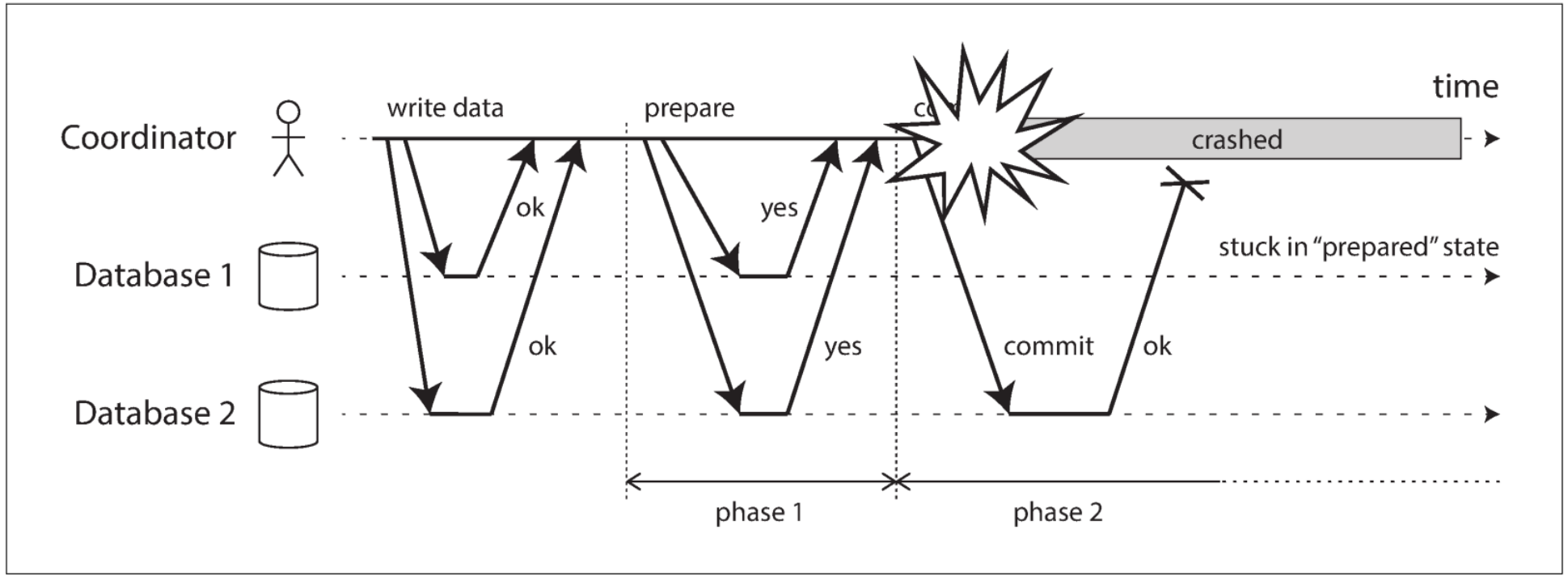
Атомарная фиксация транзакции

- Транзакция
  - Несколько операций над несколькими объектами в базе данных
  - Может быть выполнена либо целиком, либо не выполнена вообще
- Один сервер
  - Запись изменений в журнал на диске (write-ahead log)
  - Добавление записи о фиксации изменений (commit record)
  - Одно устройство (контроллер диска, на котором хранится журнал)
- Несколько серверов
  - Достаточно ли просто отправить commit на каждый сервер?
  - Изменения должны быть применены только если все серверы "согласны"
  - Примененные изменения нельзя отменить, они уже видны клиентам

Two-Phase Commit (2PC)



Отказ координатора

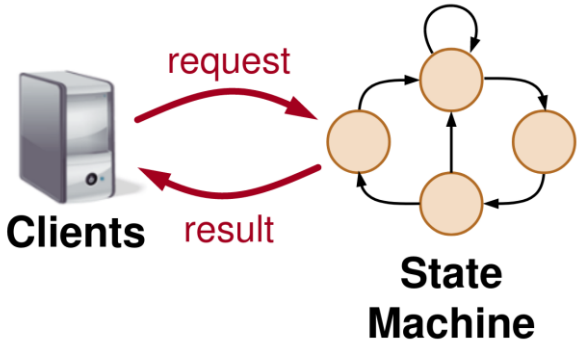


Атомарная рассылка

- Надежная и полностью упорядоченная рассылка
  - Reliable + Total Ordered = **Atomic Broadcast** (или Total Order Broadcast)
  - если процесс доставил сообщение, то оно доставлено всеми корректными процессами
  - сообщение доставляется ровно один раз
  - порядок доставки сообщений одинаков для всех процессов
  - возможно также сохранение порядка отправки сообщений (FIFO-total)
- Гарантий на скорость доставки нет
  - некоторые получатели могут отставать от других

Применение атомарной рассылки

- Репликация произвольных объектов (состояния, данных) с поддержкой линеаризуемости
  - рассылка операций по репликам
  - каждая реплика применяет операцию локально
  - т.н. репликация автомата (state machine replication)
- Реплицированный журнал (append-only log)
  - полученное сообщение добавляется в конец журнала
  - на всех узлах префиксы журналов совпадают
- Упорядочивание блокировок
  - каждый запрос на блокировку добавляется в журнал
  - номер записи в журнале используется для fencing



Применение атомарной рассылки

- Фиксация транзакции?
- Уникальность имени пользователя?

Применение атомарной рассылки

- Фиксация транзакции
  - каждый участник рассылает свой голос (commit или abort)
  - узел B может проголосовать за A, если считает A отказавшим
  - каждый участник локально определяет окончательный исход, читая журнал
  - для каждого узла учитывается только голос из первого полученного сообщения
- Уникальность имени пользователя
  - добавить сообщение в журнал "планирую взять это имя"
  - читать журнал до тех пор, пока не будет получено это сообщение
  - проверить нет ли аналогичного сообщения от другого участника
  - (по сути получили **linearizable register with atomic compare-and-set**)

Реализация атомарной рассылки

- Лидер, рассылающий сообщения с помощью надежной FIFO-рассылки
  - отказ лидера блокирует доставку сообщений
- Рассылка без лидера на основе часов Лэмпорта
  - см. прошлую лекцию
  - отказ любого узла блокирует доставку сообщений
- Как сделать рассылку отказоустойчивой?

Эквивалентные проблемы и примитивы

- Атомарная рассылка
- Линеаризуемый регистр с compare-and-set
- Консенсус

Решив одну из данных проблем, мы получим готовый примитив, с помощью которого можно:

- решать рассмотренные ранее практические задачи
- реализовать остальные (эквивалентные) примитивы

Консенсус

- Согласие, единодушное принятие чего-либо группой участников
  - обозначает как процесс принятия решения, так и само решение
- Прийти к согласию относительно чего-то между узлами РС
  - кто будет лидером
  - порядок применения операций над репликами
  - применить или откатить транзакцию
  - какой пользователь получит данный username

Консенсус (более формально)

- Один или несколько процессов предлагают значения
- Алгоритм консенсуса определяет, какое из значений принять
- Требуемые свойства
  - Никакие два корректных процесса не должны принять разные значения
  - Никакой процесс не принимает значение дважды
  - Если процесс принял значение, то оно было предложено некоторым процессом
  - Каждый корректный процесс в конце концов принимает значение

FLP Impossibility

- Impossibility of Distributed Consensus with One Faulty Process (1985)
- Не существует **детерминированного** алгоритма, гарантирующего достижение консенсуса в **асинхронной** системе, если хотя бы **один** процесс подвержен отказу типа crash-stop
  - Нарушается последнее свойство консенсуса (termination)
- Не мешает достигать консенсуса на практике
  - Условия, приводящие к постоянному отсутствию прогресса, маловероятны
  - Реальные системы являются частично синхронными
  - Алгоритмы консенсуса используют таймауты для обеспечения termination
  - Другие способы обхода FLP: рандомизация, надежные детекторы отказов

Модель системы (предположения)

- Система является **частично синхронной**
  - система может вести себя как асинхронная только в течение конечных (но неизвестных) периодов времени
  - в остальное время система является синхронной
- Сеть моделируется с помощью **fair-loss links**
  - сообщения могут теряться, дублироваться и переупорядочиваться
  - сообщения в конце концов доходят, если не сдаваться
  - сообщения не искажаются, нет византийских отказов
- Узлы подвержены отказам типа **crash-recovery**
  - узел может внезапно упасть и потерять состояние из памяти (можно хранить важные данные на диске)
  - позже узел может включиться и продолжить выполнение
  - нет византийских отказов

Предел отказоустойчивости

- Выполнение последнего свойства (termination) требует по меньшей мере **большинства** корректных (не отказавших) узлов
  - в случае *византийских отказов* требуется более *2/3* корректных узлов
- Первые три свойства (safety) могут быть гарантированы и при большем числе отказавших узлов

Алгоритмы консенсуса

- **Viewstamped Replication** (Oki, Liskov, 1988)
- **Paxos** (Lamport, 1989)
- **Zab** (Junqueira, Reed, Serafini, 2011)
- **Raft** (Ongaro, Ousterhout, 2013)

Многие алгоритмы изначально спроектированы под консенсус не для одного значения, а для последовательности значений, по сути реализуя **репликацию журнала** или **атомарную рассылку**

Paxos

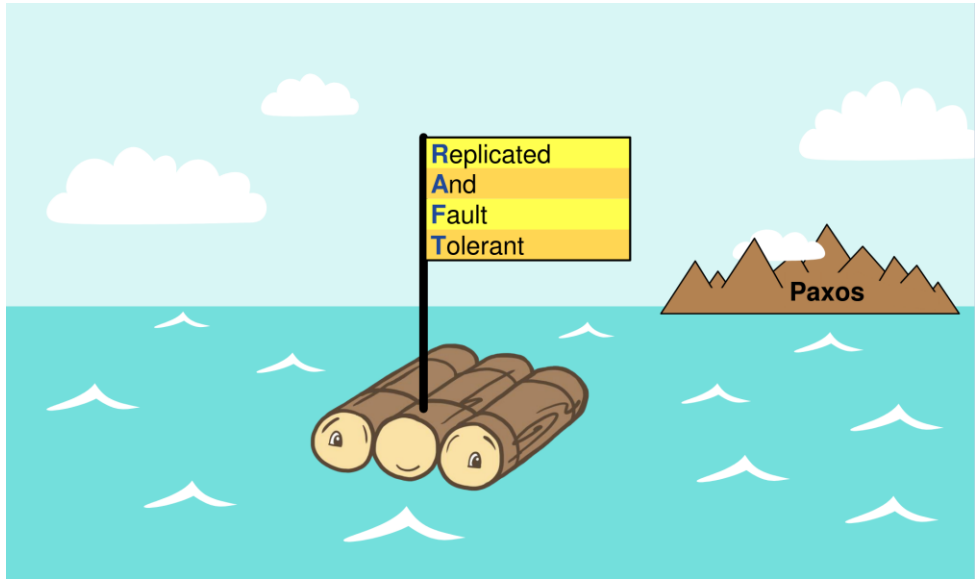
- 1989: Leslie Lamport разрабатывает новый алгоритм консенсуса
- 1998: Lamport L. The Part-Time Parliament // ACM TOCS
- 2001: Lamport L. Paxos Made Simple // ACM SIGACT News
- 2007: Chandra T. et al. Paxos Made Live: An Engineering Perspective // PODC

“The dirty little secret of the NSDI community is that at most five people really, truly understand every part of Paxos” (NSDI reviewer)

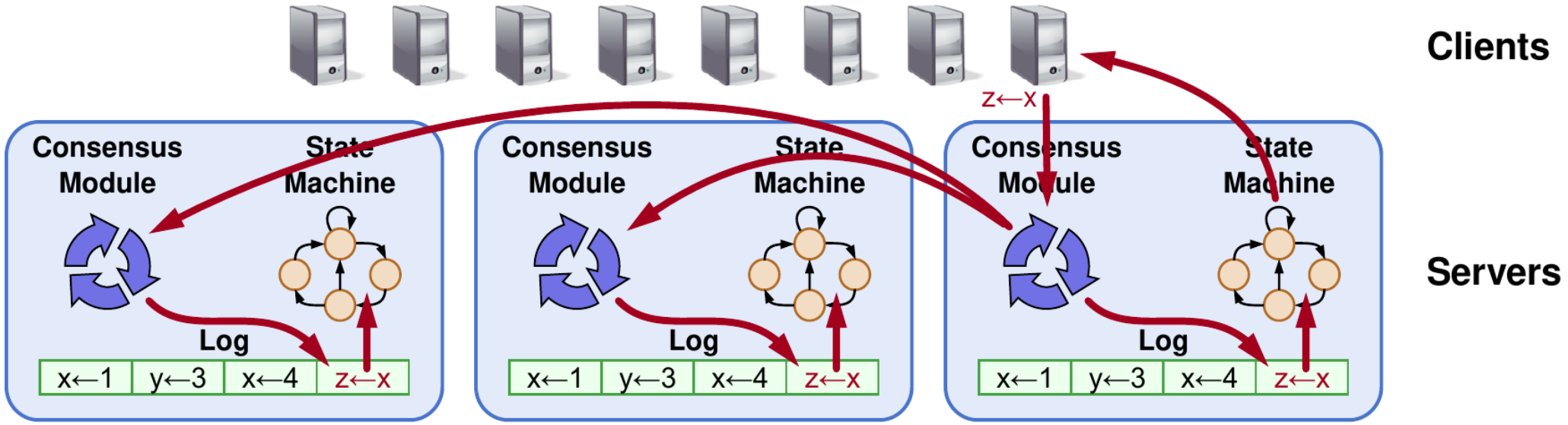
“There are significant gaps between the description of the Paxos algorithm and the needs of a real-world system... the final system will be based on an unproven protocol.” (Chubby authors from Google)

Raft

- In Search of an Understandable Consensus Algorithm (2014)
  - Цель – простой для понимания и реализации алгоритм консенсуса
  - Статья была отклонена 3 раза
  - В итоге был принята на Usenix ATC и получила Best Paper Award
- Десятки реализаций
  - LogCabin, etcd, hashicorp/raft
  - https://raft.github.io/



Репликация автомата



- Все серверы (копии автомата) выполняют команды из журнала
- Консенсус относительно значений, записываемых в каждую позицию журнала

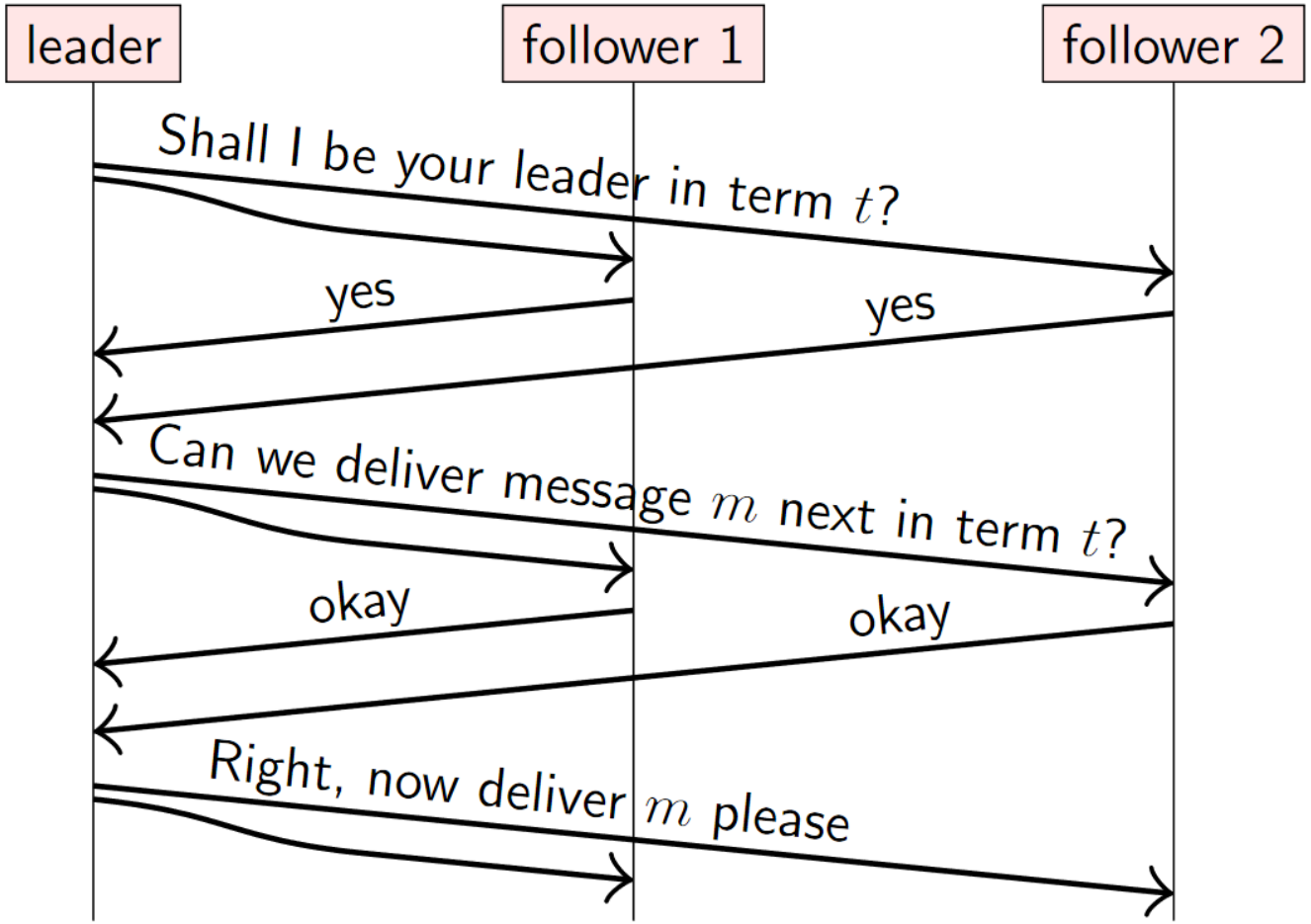
Элементы Raft

- Выборы лидера
- Репликация журнала (нормальный режим)
- Обеспечение согласованности журнала
- Безопасная смена лидера

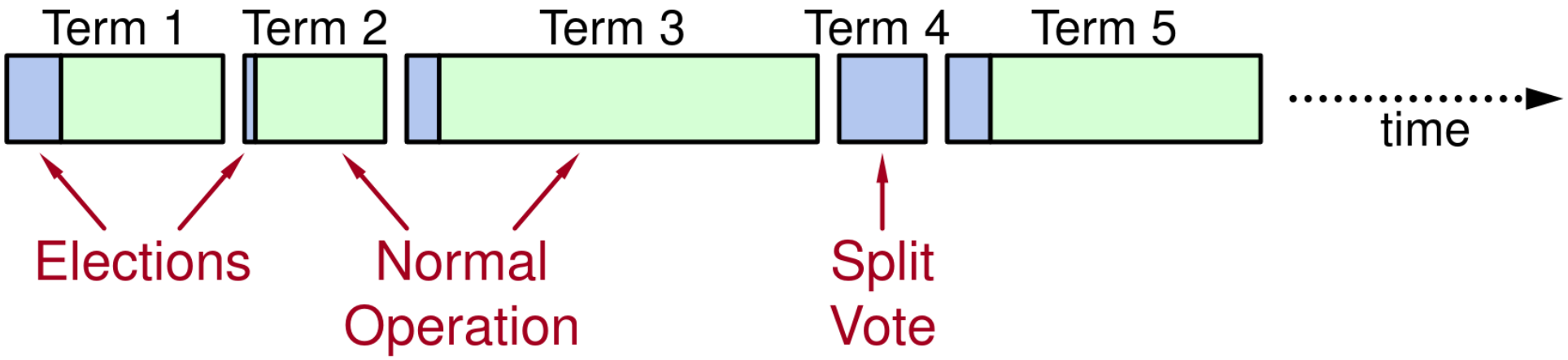
Лидер в алгоритме консенсуса

- Лидер уникален только в пределах некоторой **эпохи**
  - С эпохой связан уникальный номер, который монотонно растет
- При отказе текущего лидера выбирается лидер новой эпохи
  - Номер эпохи увеличивается, лидер выбирается кворумом голосов
- Несколько узлов в системе могут считать себя лидерами
  - В случае конфликта преимущество имеет лидер с большим номером эпохи
- Перед принятием решения лидер должен проверить свое лидерство
  - Отправить предлагаемое значение всем узлам
  - Получить положительный ответ от кворума узлов
  - Узел отклоняет запрос, если знает лидера с бОльшим номером эпохи
- **Кворумы голосований за лидера и за значение должны пересекаться**

Лидер в алгоритме консенсуса

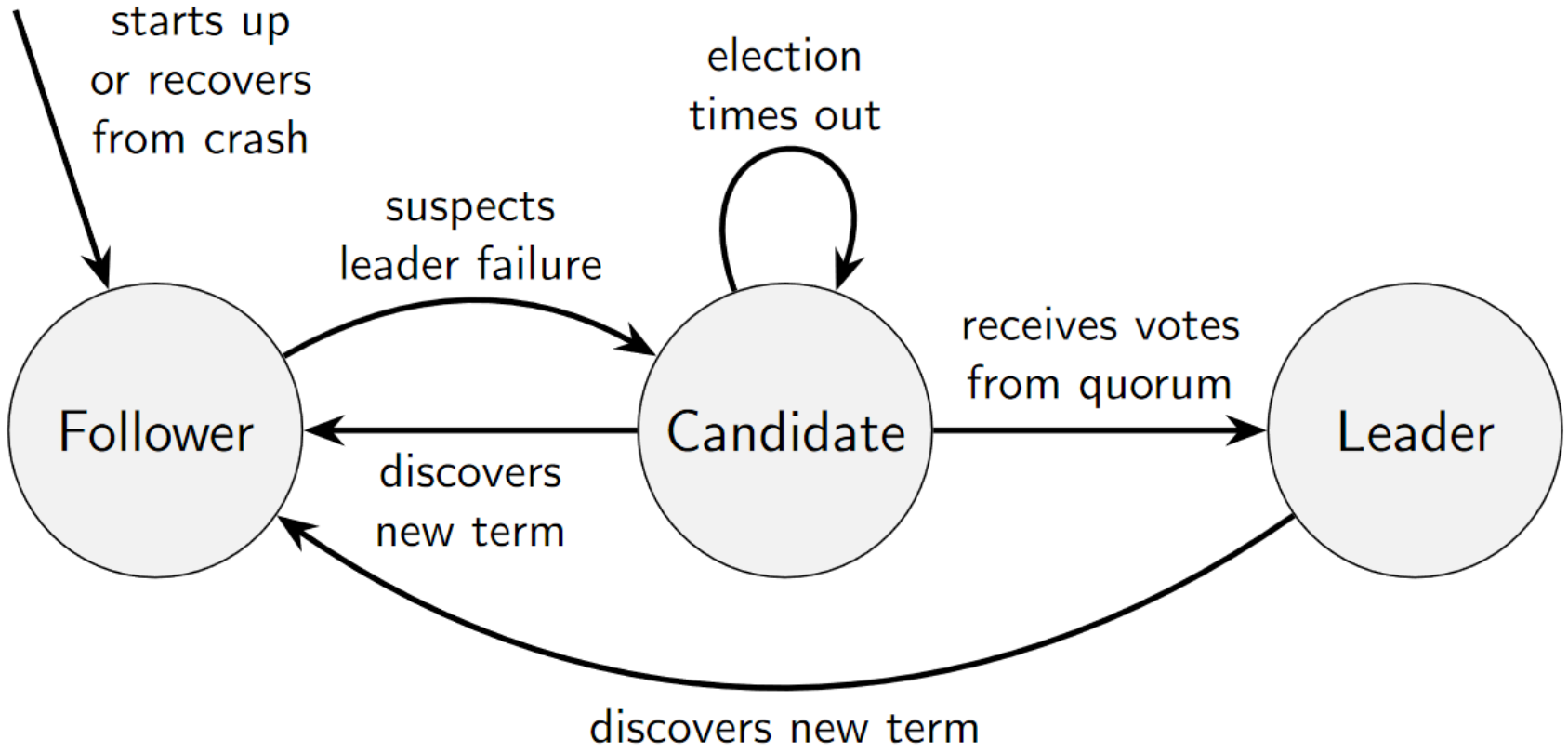


Эпохи

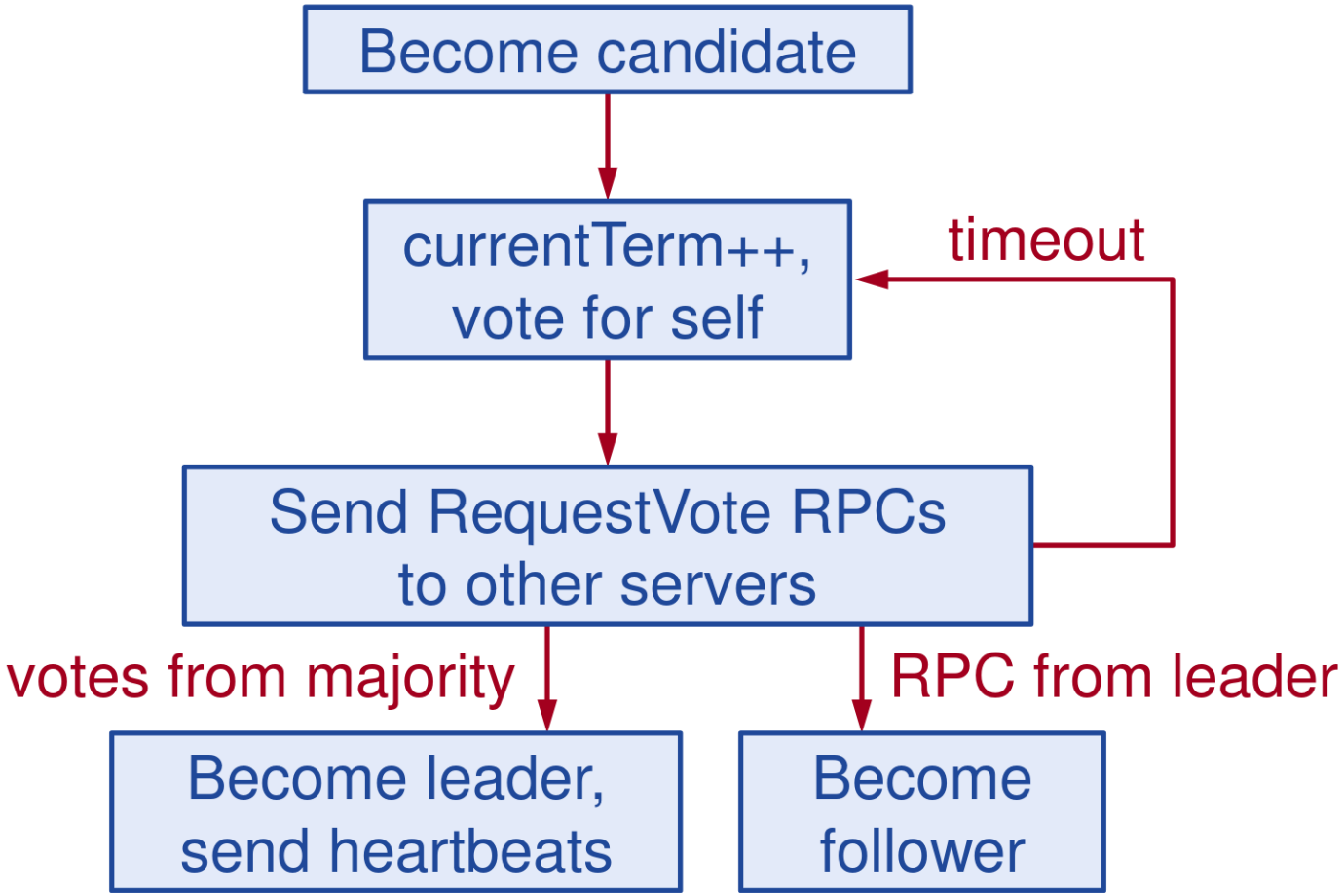


- В каждой **эпохе (term)** есть **не более одного лидера**
- Каждый узел хранит номер текущей (на его взгляд) эпохи
- Узлы обмениваются значениями эпох в сообщениях
- Эпохи позволяют избавиться от устаревшей информации

Состояния узла в Raft



Выборы лидера



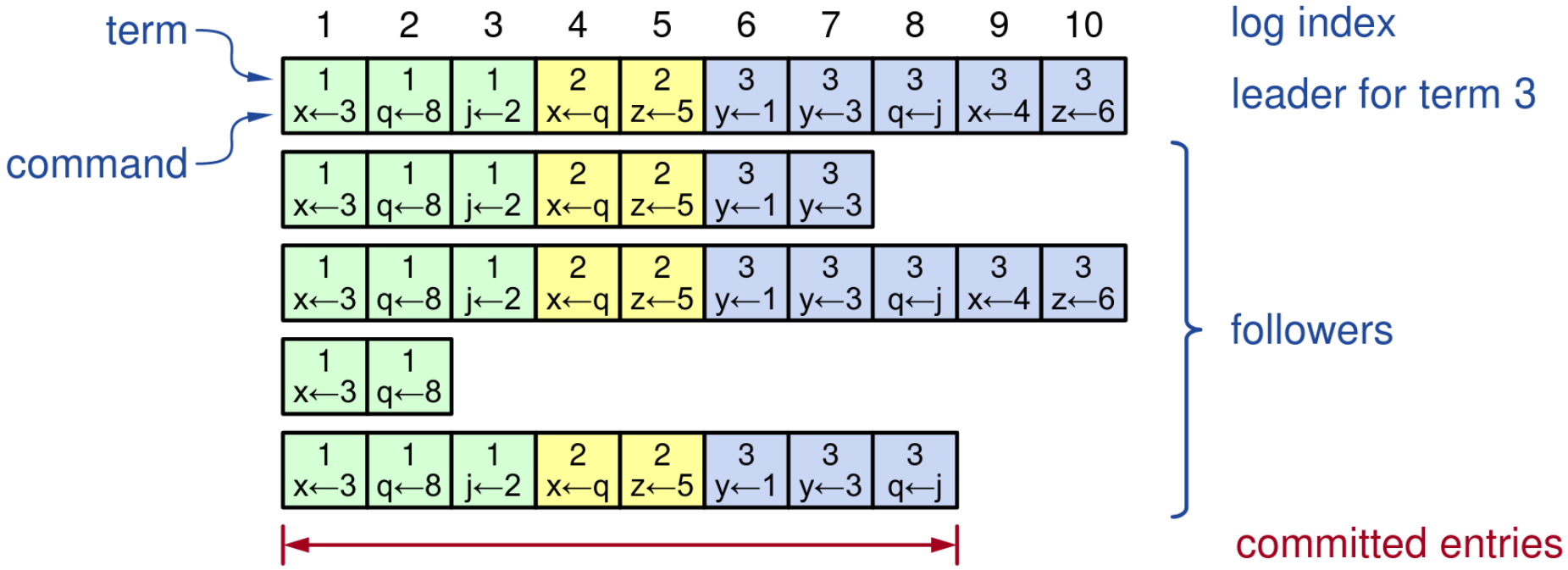
Корректность выборов

- Не более одного победителя в рамках эпохи (safety)
  - Узел голосует не более 1 раза в эпохе, голос сохраняется на диск
  - Два кандидата не могут одновременно набрать большинство голосов
- Какой-то кандидат в конечном счете побеждает (liveness)
  - Таймаут для запуска выборов выбирается случайно из интервала $[T, 2T]$
  - Один узел обычно выигрывает выборы до того, как истечет таймаут у остальных
  - Значение T должно быть $\gg$ времени рассылки сообщения
  - Подход с рандомизацией гораздо проще, чем ранжирование узлов

Репликация журнала (норм. режим)

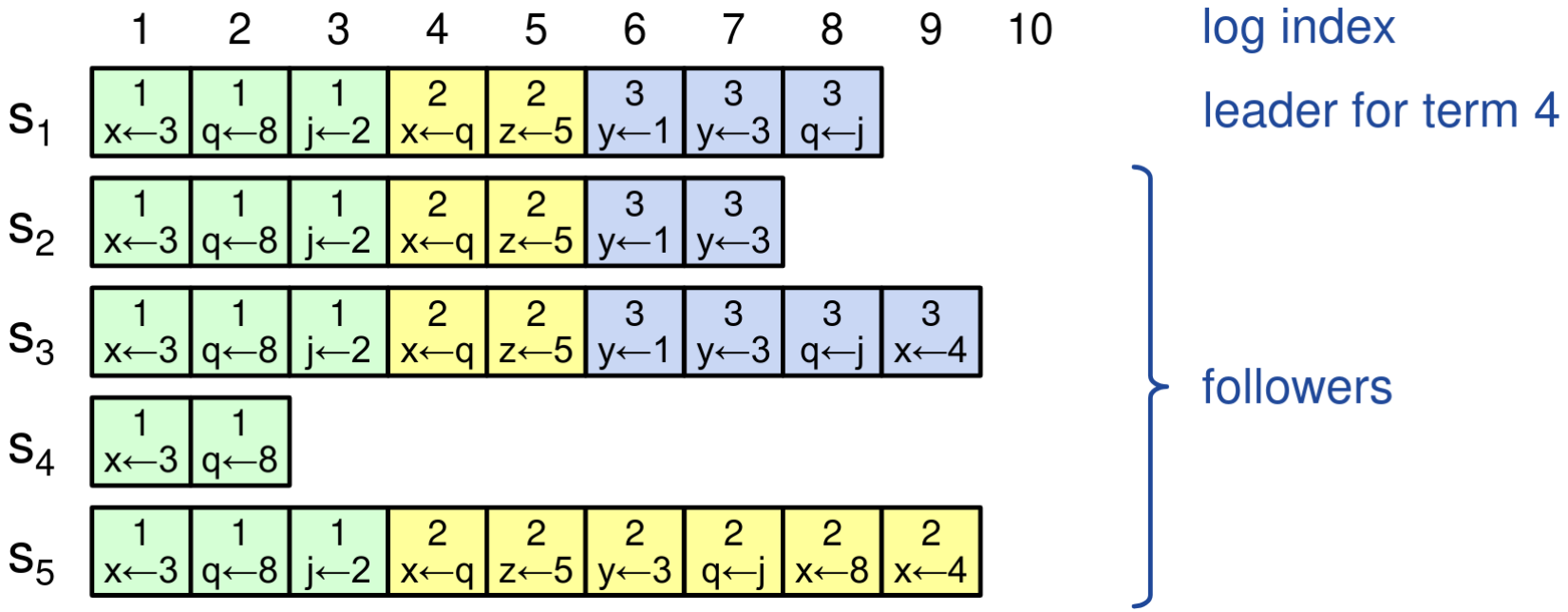
- Клиент отправляет команду лидеру
- Лидер записывает команду в конец своего журнала
- Лидер отправляет подчиненным сообщения **AppendEntries**
- Как только большинство подчиненных ответило
  - Лидер выполняет команду на своей копии автомата (commit) и отвечает клиенту
  - Лидер уведомляет о **committed** записи подчиненных
  - Подчиненные выполняют команду на своих копиях автомата
- Сбой или отставание подчиненного?
  - Лидер повторно отправляет сообщения до достижения успеха
- При отсутствии отказов алгоритм оптимален в плане числа сообщений

Структура журнала



- Запись включает индекс, эпоху и команду
- Журнал хранится на диске и должен переживать отказы
- Запись считается **committed**, если она записана в журналы большинства узлов

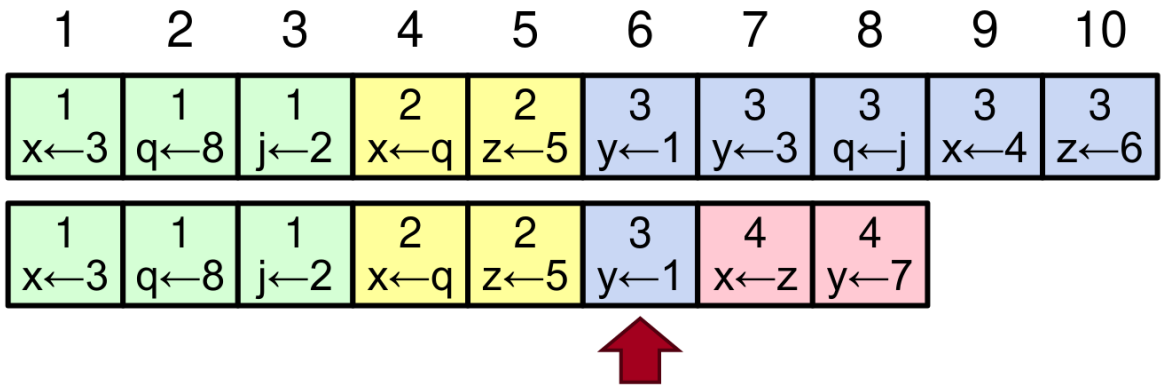
Согласованность журнала



- Отказы могут приводить к нарушению согласованности копий журнала
- Raft восстанавливает согласованность журнала в ходе своей работы

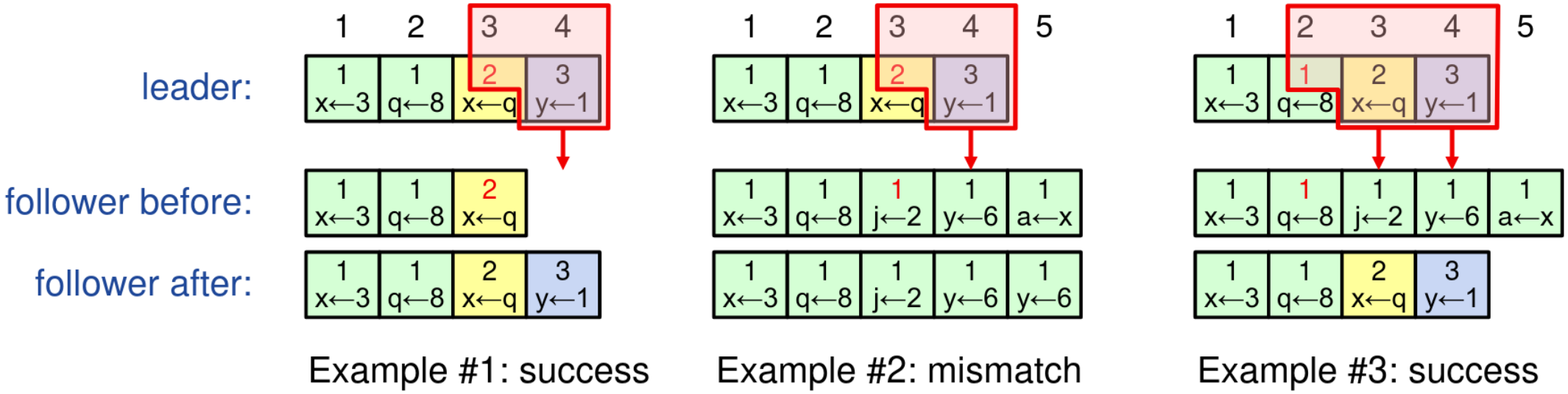
Гарантируемые свойства

- Если записи на разных узлах имеют одинаковые индекс и эпоху, то
  - они содержат одну и ту же команду
  - все предыдущие записи в журналах идентичны



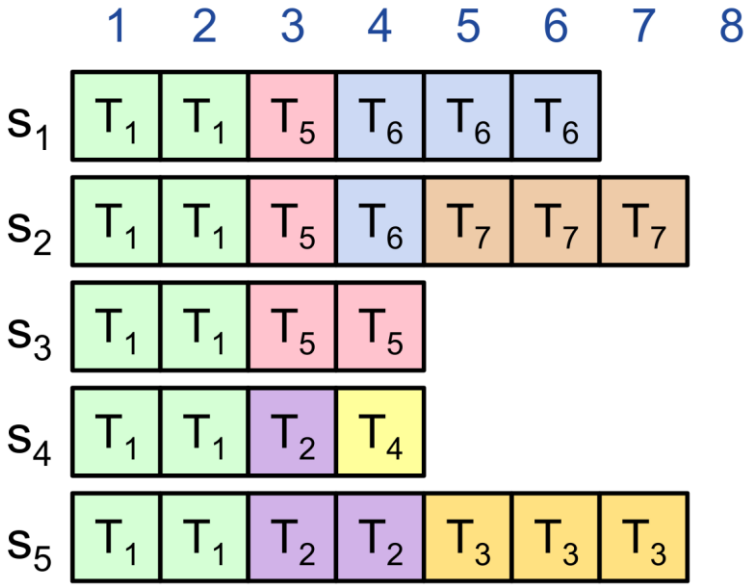
- Если запись *committed*, то все предыдущие записи тоже *committed*

Проверки при передаче изменений



- Сообщение **AppendEntries** содержит индекс и эпоху предыдущей записи
- Подчиненный отвергает запрос, если предыдущая запись не совпадает
- Механизм обеспечивает требуемые гарантии согласованности

Смена лидера



- Старый лидер мог оставить частично реплицированный журнал
- Новый лидер просто начинает выполнять нормальный режим
- Журнал лидера – "истина в последней инстанции"
- Журналы подчиненных в конце концов станут идентичны журналу лидера

Безопасность (safety)

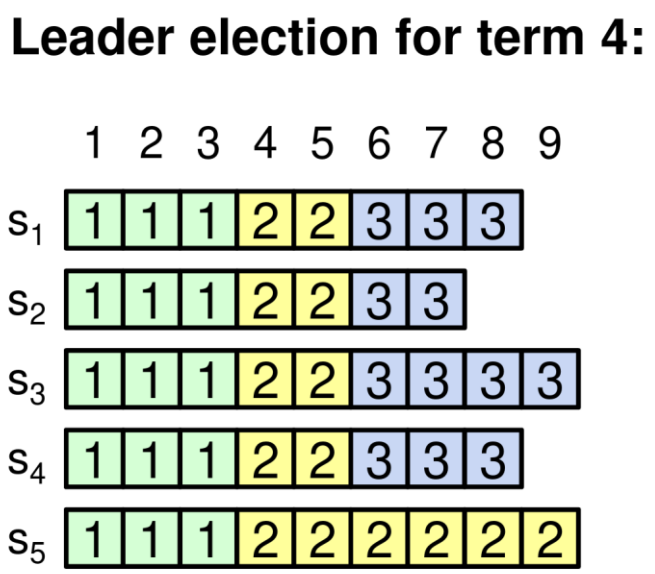
Как только команда была выполнена автоматом, никакой другой автомат не может выполнить другую команду для данного индекса в журнале

- Лидер никогда не перезаписывает записи в своем журнале
- Только записи из журнала лидера могут быть *committed*
- Запись должна быть *committed* до выполнения этой команды автоматом
- Как только запись стала *committed*, все последующие лидеры должны хранить её

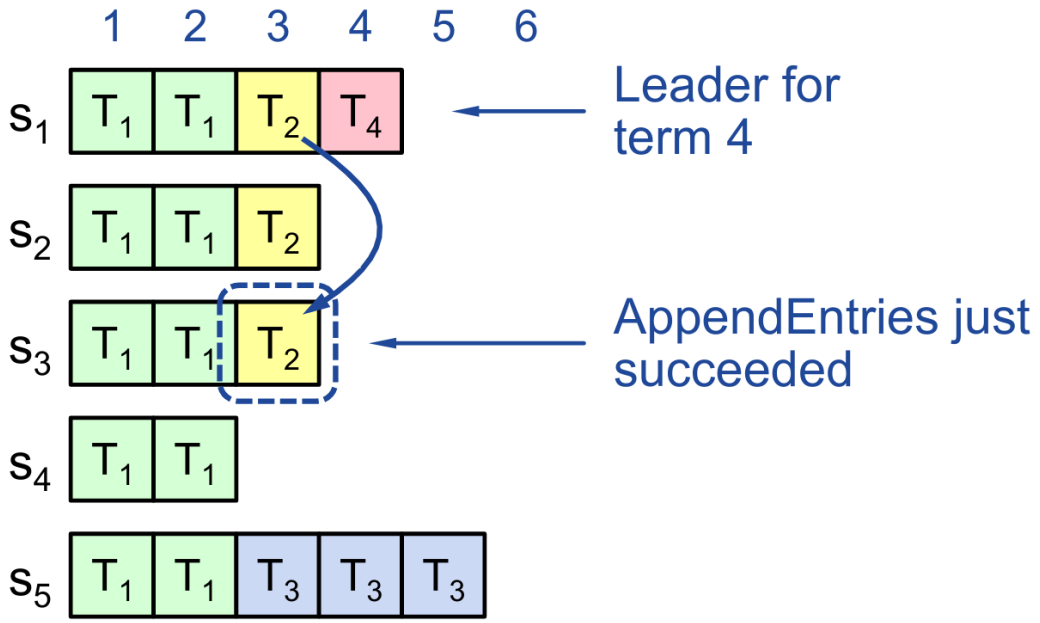
Выбор наилучшего лидера

- Узлы с неполными журналами не должны быть выбраны
- Кандидаты сообщают всем индекс и эпоху последней записи в их журнале
- Узел не отдает голос за кандидата, чей журнал "менее полный":

$$(lastLogTerm_C < lastLogTerm_V) \textbf{ or}$$
$$(lastLogTerm_C = lastLogTerm_V \textbf{ and } lastLogIndex_C < lastLogIndex_V)$$

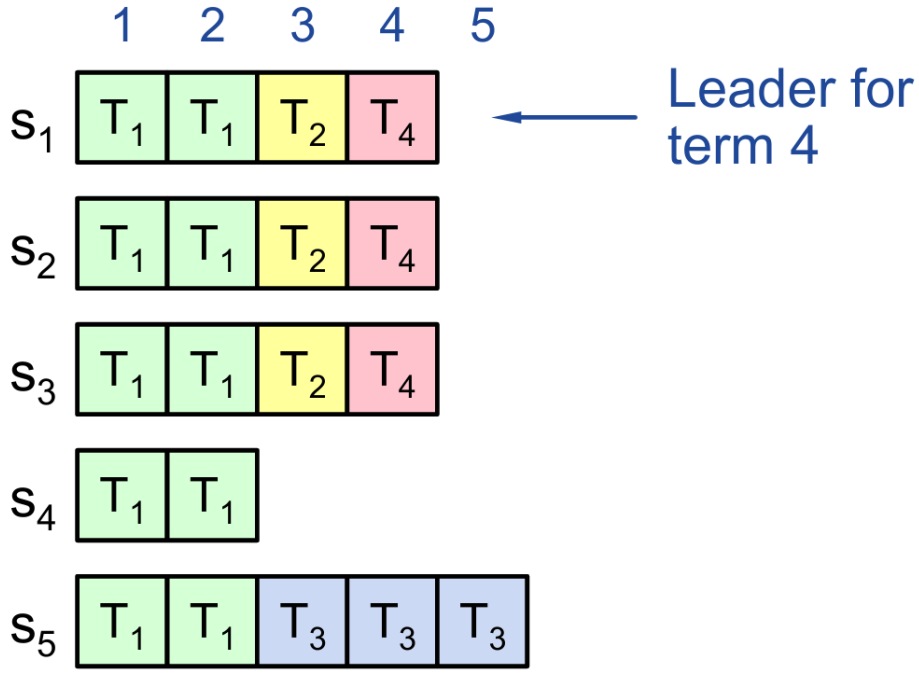


Проблема



- Новый лидер пытается завершить commit для записи 3 из старой эпохи
- Запись 3 нельзя считать committed
- Если будет выбран S_5, то запись будет перезаписана

Полное правило для commit



- Запись должна быть сохранена на большинстве узлов
- Как минимум одна запись из текущей эпохи должна быть также сохранена на большинстве узлов

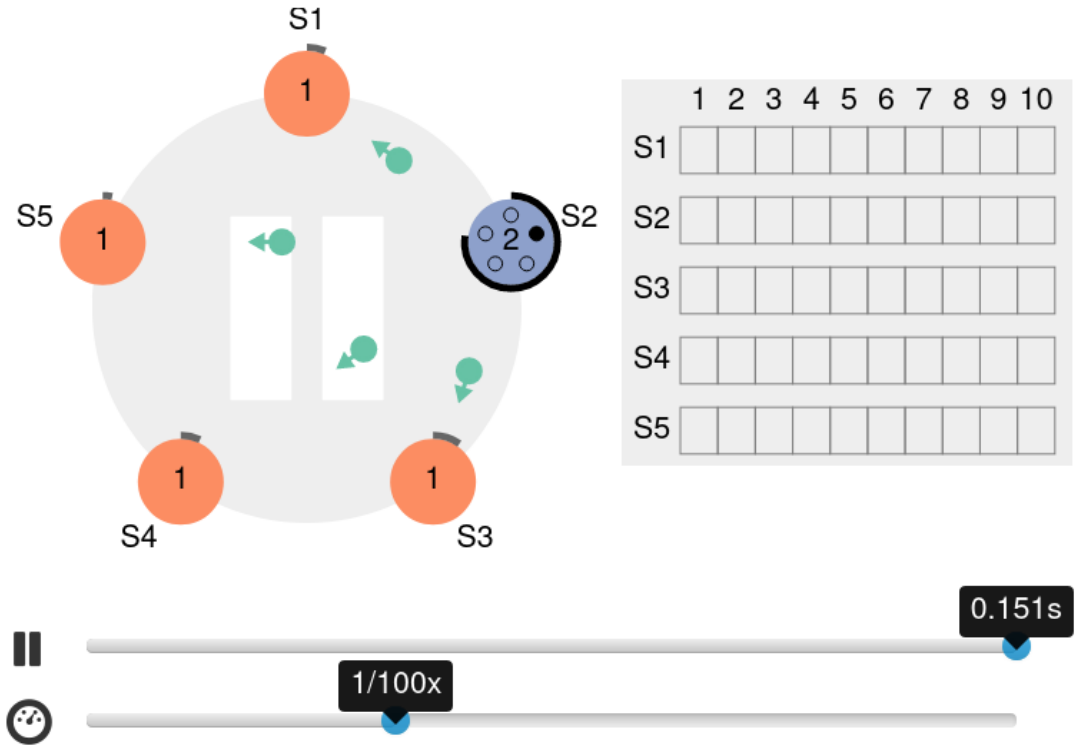
Другие элементы Raft

- Изменение конфигурации кластера
- Сжатие журнала (log compaction)
- Протокол работы клиента

См. статью про Raft

Визуализация работы Raft

- http://thesecretlivesofdata.com/raft/
- https://raft.github.io/raftscope/



Недостатки алгоритмов консенсуса

- Не масштабируются горизонтально
  - производительность ограничена одним сервером
  - можно масштабировать только путем шардинга
- Накладные расходы на синхронизацию перед принятием значения
  - полусинхронная репликация, связанная с этим задержка
- Требуется большинство узлов
  - конфигурация из не менее 3 серверов (3 или 5 на практике)
  - недоступность одной части в случае разделения сети
- Требуется достаточно стабильное окружение
  - в основном рассчитаны на статическую конфигурацию кластера
  - нестабильность сети может приводить к отсутствию прогресса

Сервисы для координации

- Реализация примитивов для координации распределенных процессов в виде отказоустойчивого сервиса
  - Обычно в виде реплицированного key-value хранилища (3-5 узлов)
  - Данных немного, они помещаются в памяти и не изменяются очень часто
  - Согласованность и отказоустойчивость достигаются с помощью консенсуса
- Варианты применения
  - Выборы лидера, блокировки, фиксация транзакций, очереди...
  - Сервис именования, хранение конфигурации, обнаружение отказов
- Примеры
  - Chubby (Paxos), ZooKeeper (Zab), Consul (Raft), etcd (Raft)

Материалы

- Distributed Systems Course (глава 6 и 7.1)
- Designing Data-Intensive Applications (глава 9)
- Distributed Systems: Principles and Paradigms (8.2, 8.5)
- In Search of an Understandable Consensus Algorithm
- Paxos vs Raft: Have we reached consensus on distributed consensus?
- Raft does not Guarantee Liveness in the face of Network Faults