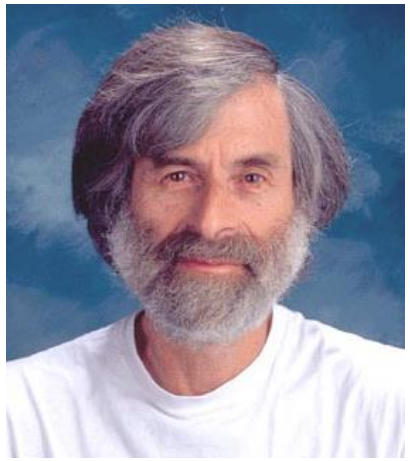
6. Обнаружение отказов

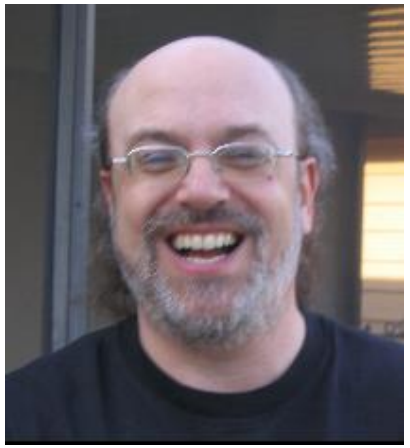
Сухорослов Олег Викторович

09.10.2023



A distributed system is one in which the failure of a computer you didn’t even know existed can render your own computer unusable.

Leslie Lamport



Failure is the defining difference between distributed and local programming.

Ken Arnold

План лекции

- Сбои и отказы
- Типы отказов и модели РС
- Детектор отказов
- Реализации детектора отказов

Терминология

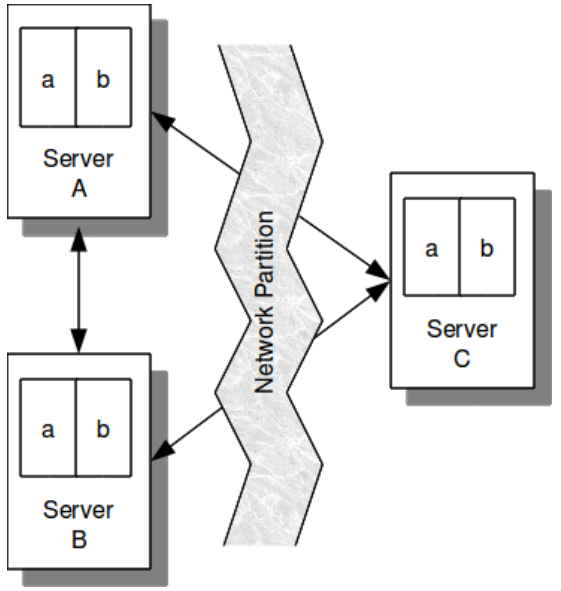
- Сбой (fault)
  - Неисправность части системы
  - Является причиной ошибки
- Ошибка (error)
  - Проявление сбоя во внутреннем состоянии системы
  - Может приводить к отказу
- Отказ (failure)
  - Внешне видимое отклонение поведения системы от ожидаемого
- Отказоустойчивость применительно к РС (fault-tolerance)
  - Способность не допускать отказов системы в целом в присутствии сбоев и отказов её частей (узлов, сети, процессов)
  - Имеет пределы по числу выдерживаемых отказов

Сбои

- Источники
  - Оборудование
  - Сеть
  - Программное обеспечение
  - Внешние факторы
- Виды
  - Временный
  - Периодический
  - Постоянный

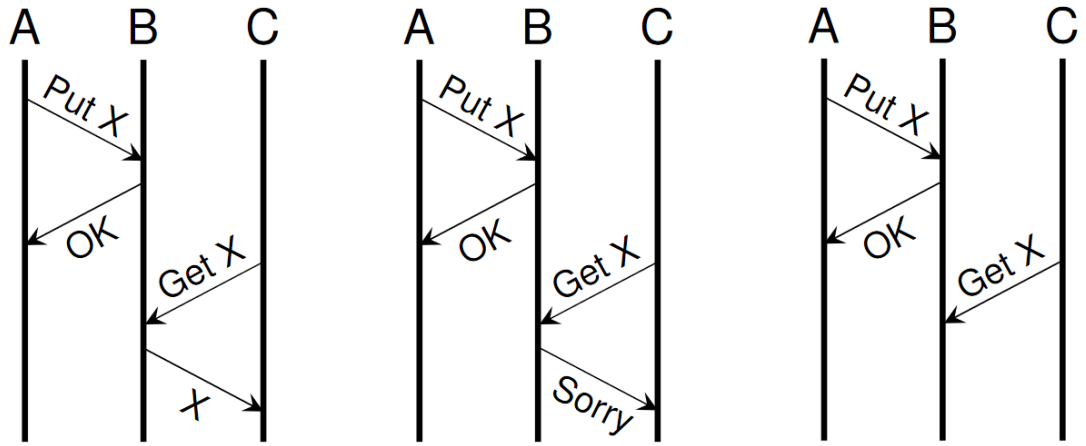
Типы отказов

- Остановка (crash failure)
  - Процесс внезапно прекратил свою работу
  - Навсегда (crash-stop), временно (crash-recovery)
- Пропуск (omission failure)
  - Процесс пропускает часть действий
  - Действия процесса не видны другим
  - Процесс не получает или не отправляет сообщения
  - Включает отказы, вызванные сбоями сети
- Нарушение гарантий на время работы (timing failure)
- Некорректный ответ (response failure)
- Произвольный отказ (arbitrary failure)



Произвольные (византийские) отказы

- Процесс активен и реализует произвольную логику поведения, нарушая спецификацию системы
  - Процесс может пропускать действия или выполнять дополнительные действия
  - Процесс может отправлять сообщения, только выглядящие корректными
- Могут быть вызваны случайными сбоями или намеренной атакой

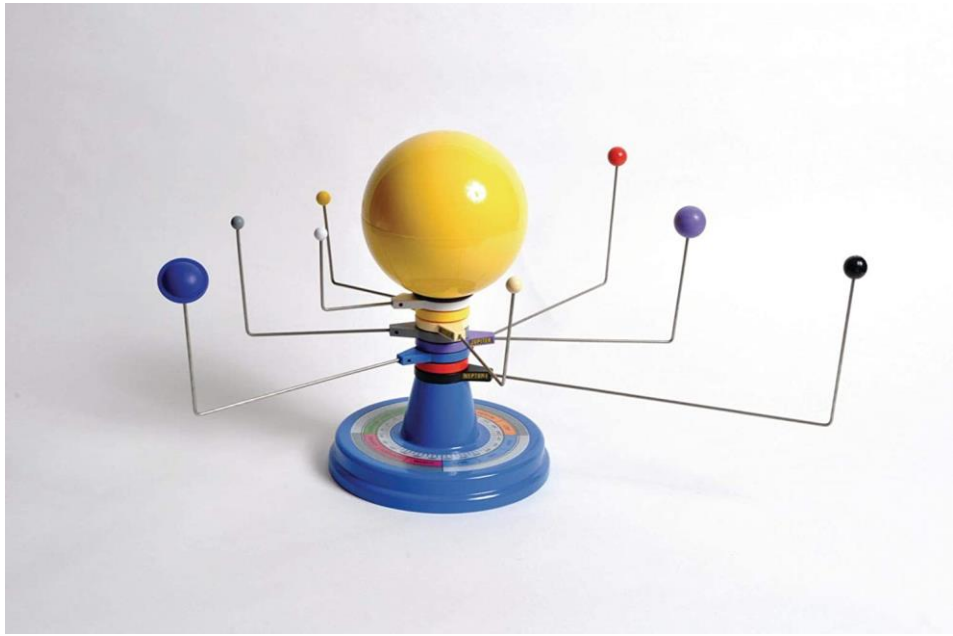


Другие виды отказов в PC

- Gray Failure: The Achilles' Heel of Cloud-Scale Systems (2017)
- Fail-Slow at Scale: Evidence of Hardware Performance Faults in Large Production Systems (2018)
- Metastable Failures in Distributed Systems (2021)
- Metastable Failures in the Wild (2022)

Модель распределенной системы

- Поведение сети
  - Надежные каналы
  - Ненадежные каналы
  - Произвольные каналы
- Возможные отказы процессов
  - Остановка
  - Остановка с восстановлением
  - Произвольные
- Ограничения на времена операций (синхронность)
  - Ограничены ли времена передачи и обработки сообщений?



Ограничения на времена операций

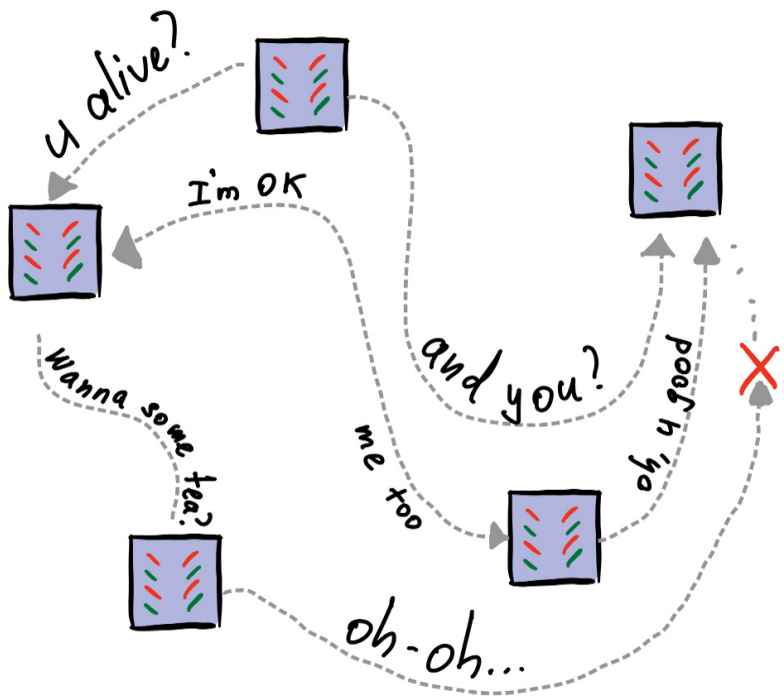
- Синхронная система
  - Времена обработки и передачи сообщений ограничены сверху
  - Можно обнаружить отказ процесса по отсутствию ответа за таймаут
  - Наименее реалистичная модель
- Асинхронная система
  - Процессы могут обрабатывать сообщения с произвольной скоростью
  - Время передачи сообщений не ограничено
  - Нельзя отличить отказ процесса от “зависшего” процесса или сбоя сети
- Частично синхронная система
  - Поведение приближено к синхронной системе
  - Но верхние границы могут быть не точными и соблюдаться не всегда
  - Наиболее близкая к реальности модель

Аспекты отказоустойчивости

- Предотвращение отказов
  - повышение надежности компонентов системы
  - устранение единых точек отказа (single point of failure, SPOF)
- **Обнаружение отказов**
- Реагирование на отказы
  - маскировка отказов за счёт избыточности
  - устранение отказов (восстановление)
- Прогнозирование отказов

Детектор отказов

- Компонент, определяющий состояние процессов в системе
  - Какой сейчас статус процесса X?
  - *Healthy*, *Failed*, *Unsuspected*, *Suspected*
- Обычно используется для обнаружения отказов типа остановки (crash)
- Часто присутствует на каждом процессе системы
- Детектор может давать разные ответы на разных процессах
- Должен <u>быстро</u> и <u>точно</u> обнаруживать отказы, не <u>нагружая</u> систему



Свойства детектора отказов

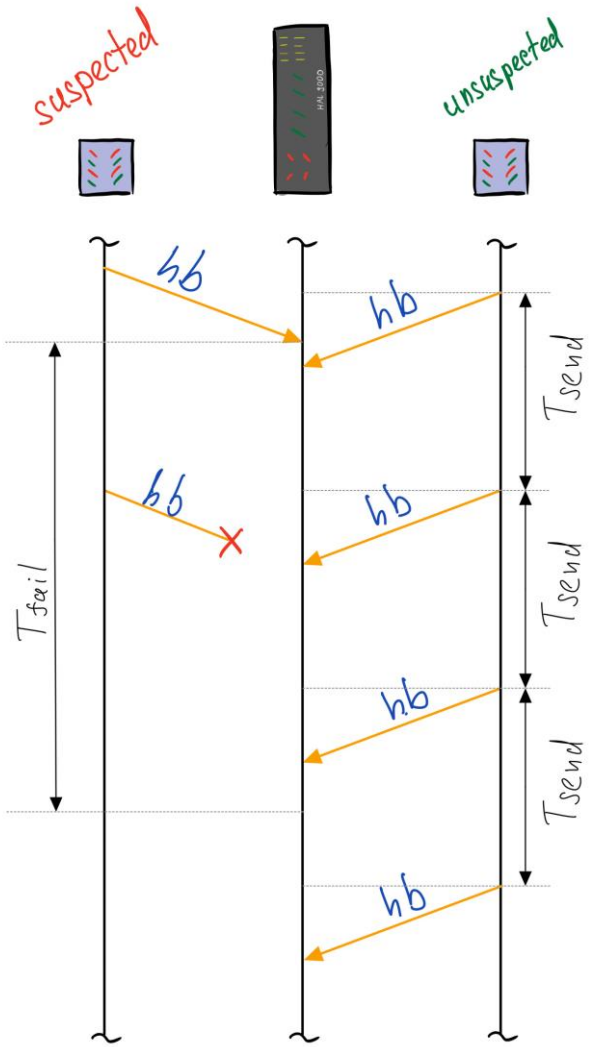
- Полнота (completeness)
  - Каждый отказавший процесс должен в конце концов стабильно подозреваться
  - *Сильная полнота*: ... каждым корректным процессом
  - *Слабая полнота*: ... некоторым корректным процессом
- Точность (accuracy)
  - Корректные процессы не должны подозреваться
  - *Сильная точность*: никакой корректный процесс не подозревается
  - *Слабая точность*: некоторый корректный процесс никогда не подозревается
  - *+ В конечном счете*: свойство сильной или слабой точности выполняется спустя некоторое время
- Идеальный (perfect) детектор обладает обоими свойствами
  - Процесс подозревается тогда и только тогда когда он отказал

Классы детекторов

- Полнота обеспечивается легко
  - Как из слабой полноты получить сильную?
- Точность обеспечить гораздо сложнее
- Надежный детектор
  - Не ошибается (сильная точность)
  - Ответы: $Unsuspected, Failed$
- Ненадежный детектор
  - Может ошибаться (false positives)
  - Ответы: $Unsuspected, Suspected$

Простейший детектор отказов

- Периодический прием сообщений от наблюдаемого процесса
  - Активная (pings) или пассивная (heartbeats) проверка
  - Интервал между отправками сообщений T_{send}
- Процесс $Suspected$, если от него ничего не поступало в течении некоторого таймаута T_{fail}
- Если потом будет получено сообщение, то процесс становится $Unsuspected$



Выбор параметров детектора

- Интервал между проверками
  - Малые значения увеличивают нагрузку на сеть
  - Большие значения увеличивают время обнаружения отказа
- Таймаут
  - Heartbeats: $T_{fail} = T_{send} + D$
    - D – оценка максимального времени передачи сообщения
  - Малые значения могут приводить к частым ложным срабатываниям
  - Большие значения увеличивают время обнаружения отказа
  - Сетевая задержка может изменяться во время работы системы

Является ли этот детектор надежным...

- в синхронной системе?
- в асинхронной системе?
- в частично синхронной системе?

Как повысить точность нашего детектора?

Характеристики детектора отказов

- Время обнаружения отказов (detection time)
  - Полнота не говорит о том, насколько быстро происходит обнаружение
  - На практике важно уменьшить это время
  - Достаточно рассматривать время первого обнаружения отказа
- Эффективность
  - Быстрота + точность обнаружения отказов
- Масштабируемость
  - Нагрузка на процесс (число получаемых и отправляемых сообщений)
  - Нагрузка на сеть (число передаваемых сообщений, трафик)
  - Отсутствие узких мест (выделенный процесс)

Варианты реализации

- Централизованная схема
  - Все процессы отправляют heartbeats выделенному процессу
- Схема "каждый с каждым"
  - Каждый процесс отправляет heartbeats все остальным процессам
- Существуют ли другие схемы?

Другие детекторы отказов

- Timeout-free (1997)
- Gossip-style (1998)
- SWIM (2001-2002)
- φ-accrual (2004)
- FALCON (2011)
- Albatross (2015)
- Panorama (2017)

Детектор отказов без таймаутов

Heartbeat: a Timeout-Free Failure Detector for Quiescent Reliable Communication (1997)

- Процессы и каналы между ними образуют граф
  - Между любой парой процессов есть путь
- Процесс хранит список своих соседей и счётчик для каждого из них
- Процессы периодически отправляют *heartbeat*-ы своим соседям
- Процессы пересылают чужие *heartbeat*-ы и обновляют локальные счётчики
- Детектор отказов выводит вектор счётчиков без их интерпретации

Детектор отказов без таймаутов

For every process p:

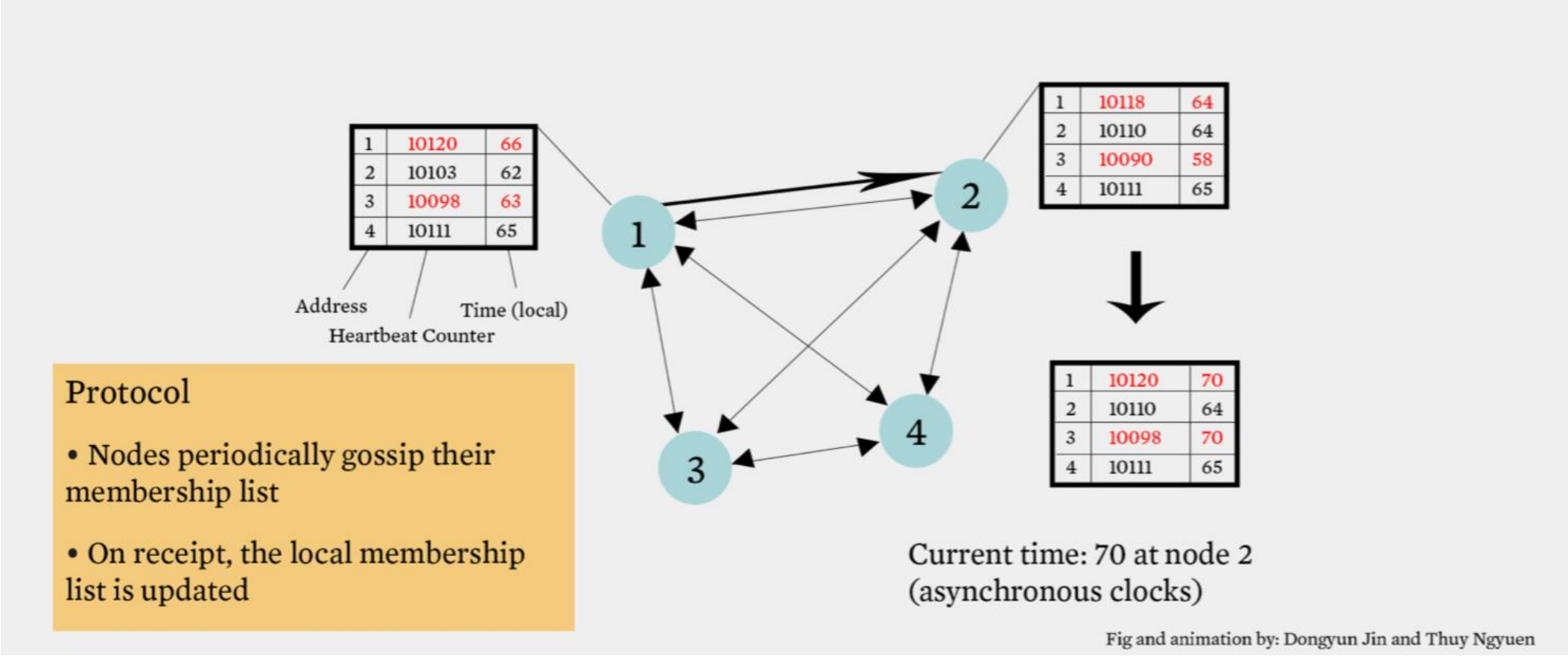
Initialization:
for all $q \in neighbor(p)$ **do** $\mathcal{D}_p[q] \leftarrow 0$

cobegin
|| *Task 1*:
repeat periodically
for all $q \in neighbor(p)$ **do** $\mathsf{send}_{p,q}(\mathsf{HEARTBEAT}, p)$

|| *Task 2*:
upon $\mathsf{receive}_{p,q}(\mathsf{HEARTBEAT}, path)$ **do**
for all q such that $q \in neighbor(p)$ and q appears in $path$ **do**
$\mathcal{D}_p[q] \leftarrow \mathcal{D}_p[q] + 1$
$path \leftarrow path \cdot p$
for all q such that $q \in neighbor(p)$ and q does not appear in $path$ **do**
$\mathsf{send}_{p,q}(\mathsf{HEARTBEAT}, path)$
coend

Gossip-style детектор

A Gossip-Style Failure Detection Service (1998)



Gossip-style детектор

- Каждый процесс хранит список $[(process, counter, last\_update\_time)]$
- Периодически каждый процесс увеличивает свой счётчик и отправляет свой список случайным процессам
- При получении сообщения процесс обновляет свой список
- Процесс, счётчик которого давно не обновлялся, считается $Suspected$
- Дополнительный таймаут для удаления процесса из списка

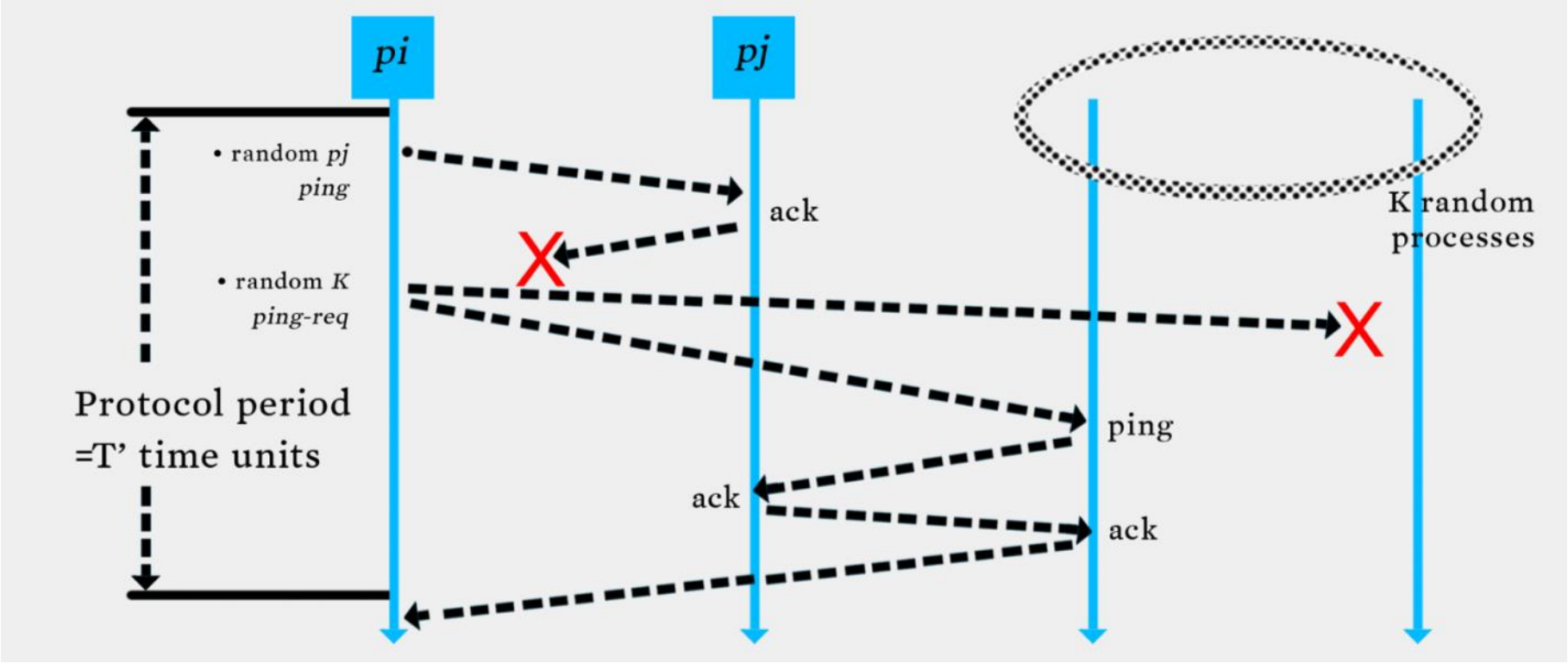
Характеристики детектора

- Детектор **all-to-all heartbeats**
  - каждый процесс отправляет N сообщений размера $O(1)$ с периодом T
  - суммарное число сообщений: N^2, сетевой трафик: N^2
  - нагрузка на процесс: N/T
- Детектор **gossip-style**
  - каждый процесс отправляет 1 сообщение размера $O(N)$ с периодом T_g
  - для распространения gossip требует $logN$ шагов
  - чтобы обеспечить такое же время обнаружения отказа: $T = T_g\ logN$
  - суммарное число сообщений: $NlogN$, сетевой трафик: N^2logN
  - нагрузка на процесс: $NlogN/T$

SWIM

On Scalable and Efficient Distributed Failure Detectors (2001)

SWIM: ***S***calable ***W***eakly-consistent ***I***nfection-style Process Group ***M***embership Protocol (2002)



Почему SWIM?

- Process Group Membership Protocol
  - кто сейчас является (живым) участником (системы, группы)?
  - отслеживание штатных входов (join) и выходов (leave) процессов
  - обнаружение отказов процессов (failure detection module)
  - распространение информации между участниками (dissemination module)
- Scalable
  - масштабируется лучше heartbeats и gossip-style на большое число процессов
- Weakly-consistent
  - нет строгой согласованности, информация на разных процессах может отличаться
- Infection-style
  - для распространения информации о состоянии процессов используется gossip

SWIM: Обнаружение отказов

- Процесс периодически выбирает случайный процесс P и отправляет ему $ping$
  - Если ack не получен, то процесс просит K случайных процессов выполнить $ping(P)$
  - Если ack по-прежнему не получен, то процесс P объявляется отказавшим
- Процесс рассылает информацию об отказе с помощью multicast или gossip
  - Обнаружение отказов и распространение информации реализуют разные модули
- Оптимизации
  - Выбор процесса для $ping$ по схеме round-robin
  - Промежуточный статус $Suspected$, с возможностью его снятия
  - Техника piggybacking для передачи информации в $ping$ и ack

SWIM: Свойства

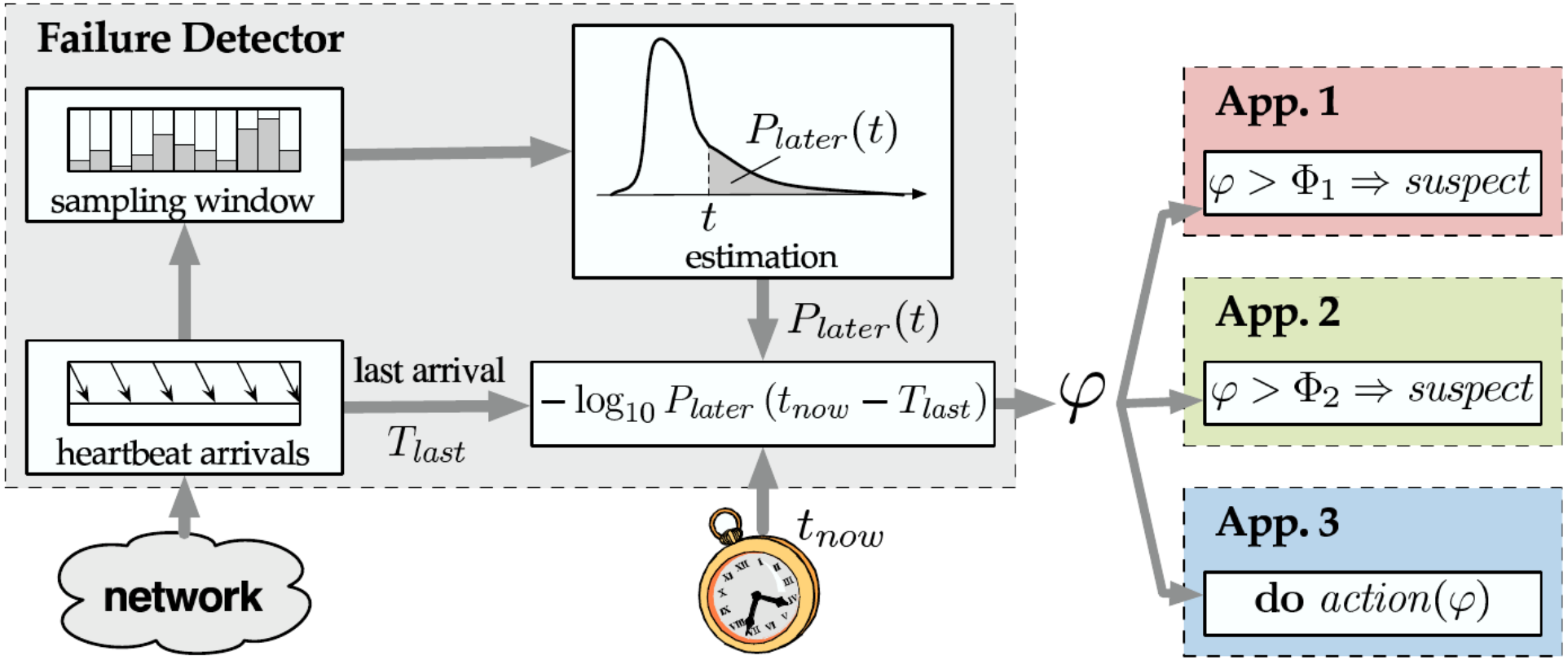
- Полнота
  - каждому процессу будет отправлен $ping$
- Время (первого) обнаружения отказа ~ периоду протокола
  - не зависит от N
- Высокая точность
  - false positive rate уменьшается экспоненциально с ростом K
- Отличная масштабируемость
  - нагрузка на процесс не зависит от N
  - нагрузка на сеть $O(N)$

SWIM: Применение и улучшения

- HashiCorp: memberlist, Serf, Consul
- Apple: Swift Cluster Membership
- Tarantool: Module swim, доклад
- Lifeguard: Local Health Awareness for More Accurate Failure Detection (2018)

φ-accrual детектор

The ϕ Accrual Failure Detector (2004)

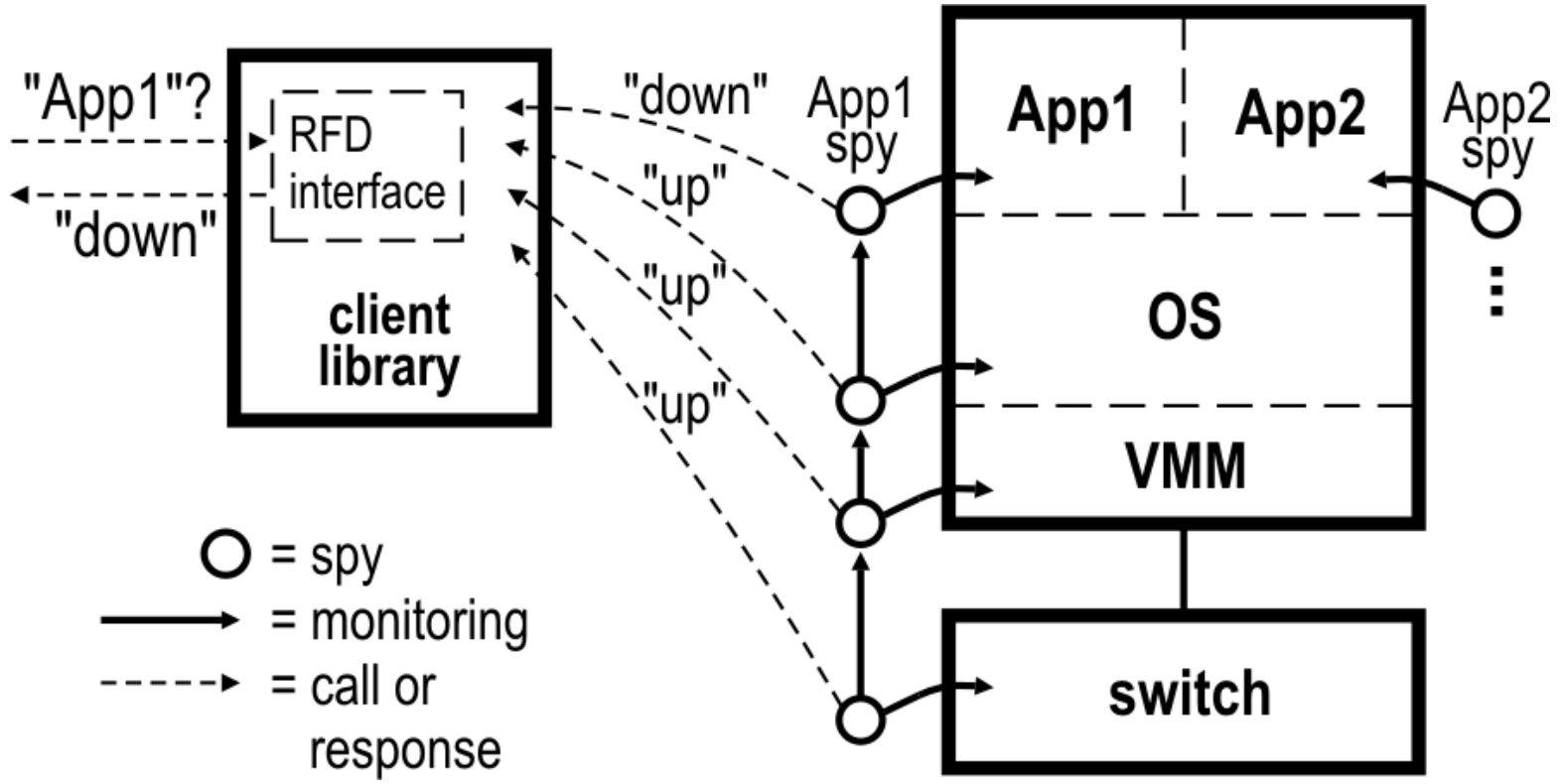


φ-accrual детектор

- Возвращает значение φ, соответствующее уровню подозрения отказа
- Детектор динамически подстраивается под текущую нагрузку сети
- На основе истории интервалов поступления предыдущих сообщений вычисляется вероятность прихода сообщения
- Настраиваемое пороговое значение φ определяет момент, когда процесс считается отказавшим
- Сочетание мониторинга, анализа истории и прогнозирования
- Применение: Akka, Cassandra

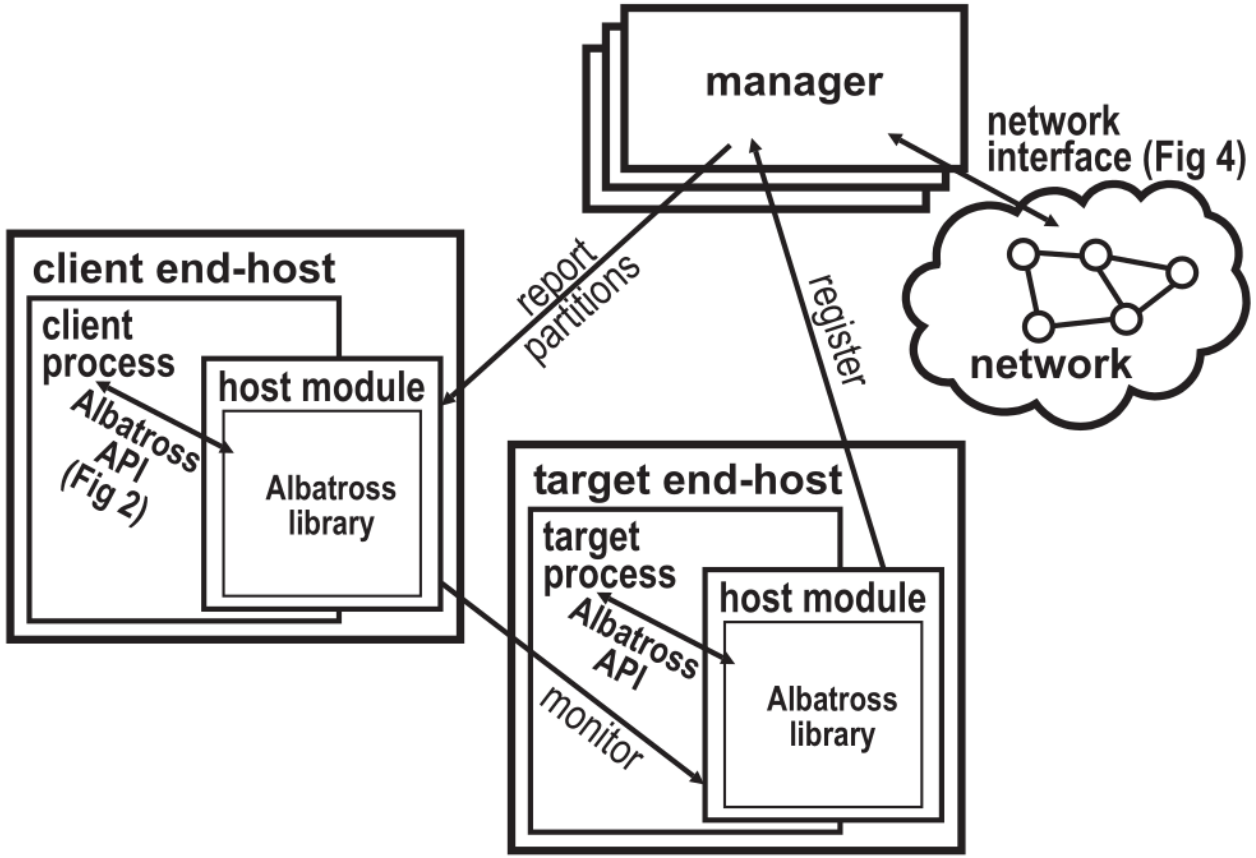
FALCON (Fast And Lethal Component Observation Network)

Detecting failures in distributed systems with the FALCON spy network (2011)



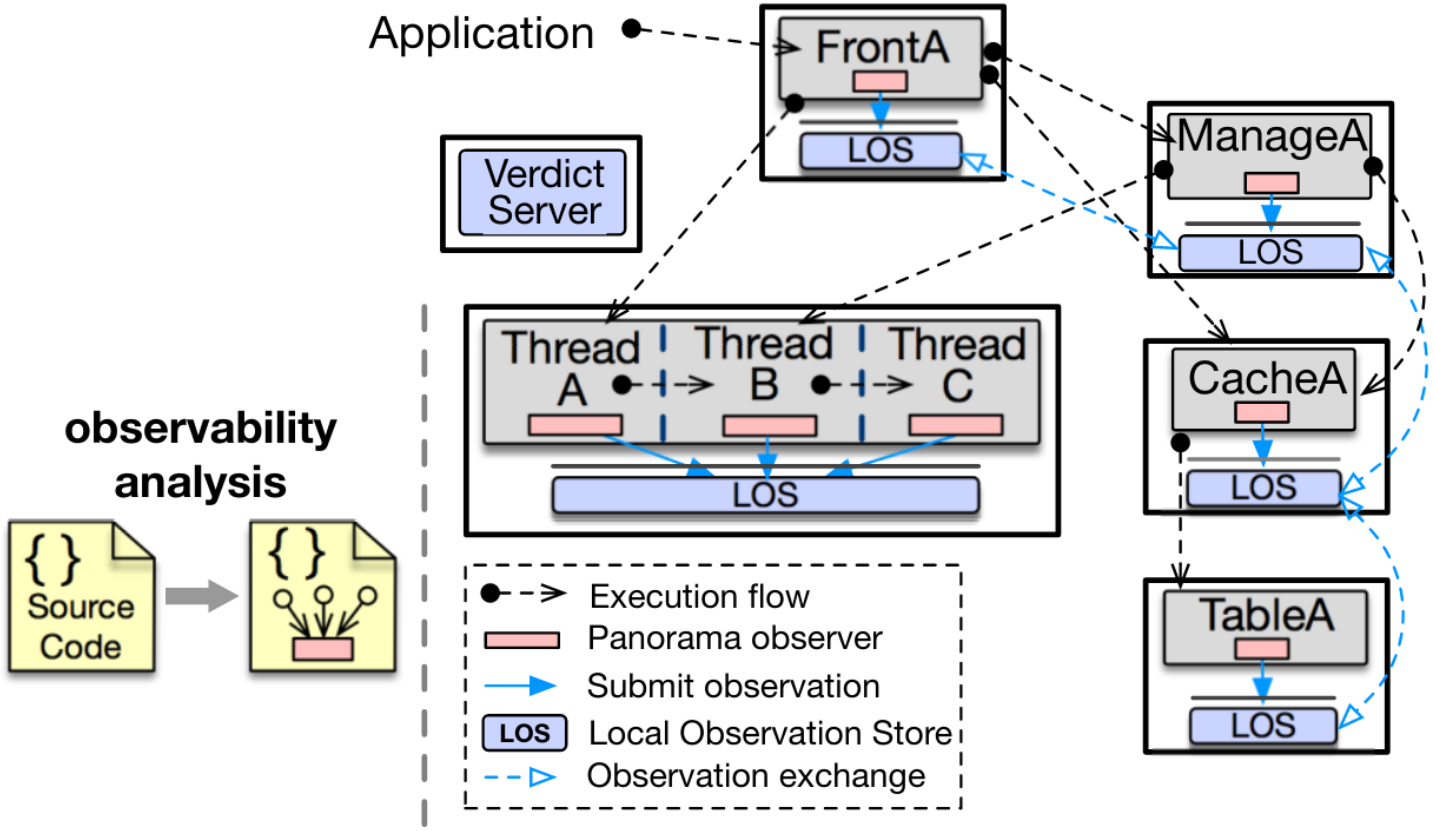
Albatross

Taming uncertainty in distributed systems with help from the network (2015)



Panorama

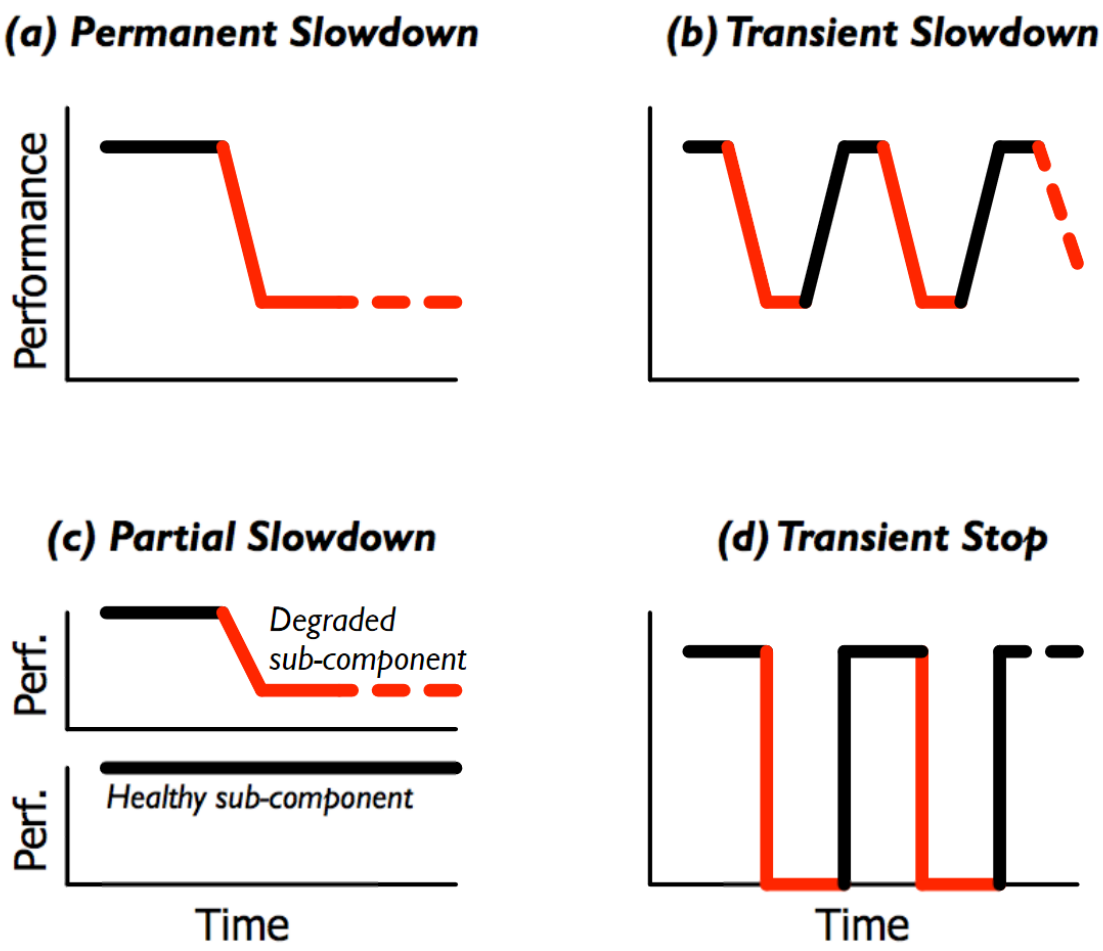
Capturing and enhancing in situ system observability for failure detection (2018)



Материалы

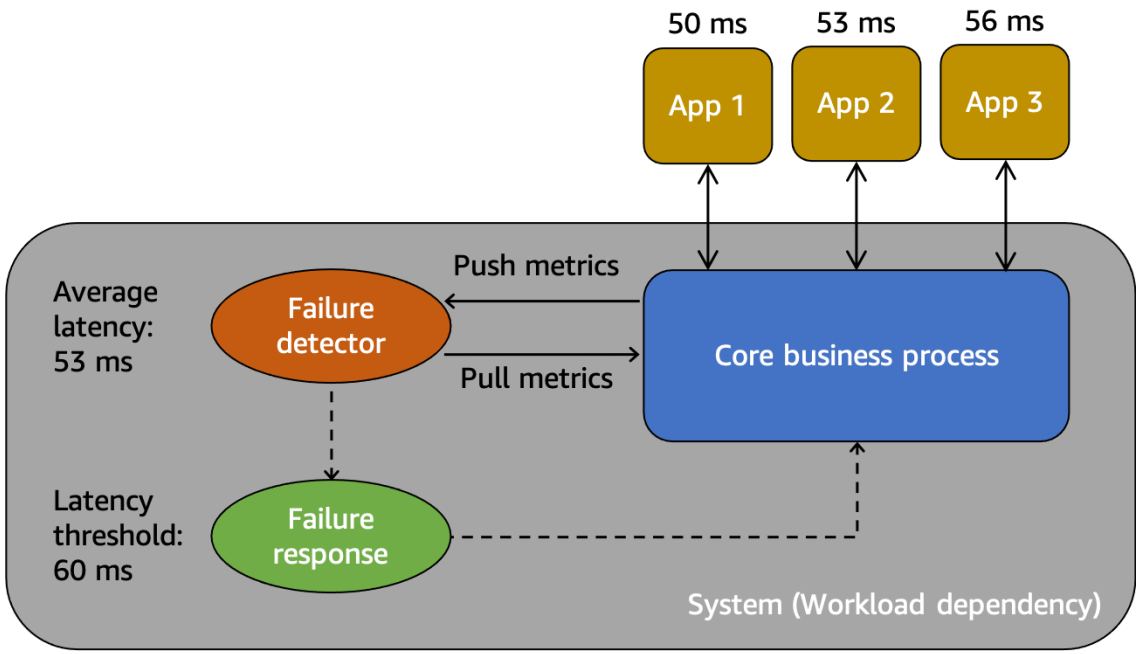
- Distributed Systems: Principles and Paradigms (раздел 8.1)
- Distributed Systems: Concepts and Design (разделы 15.1.1, 15.5.4)
- Distributed Systems Course (разделы 2.3, 2.4)
- Database Internals (глава 9)
- Упомянутые статьи про детекторы отказов
- PapersWeLove - Armon Dadgar on SWIM
- No Time for Asynchrony (2009)

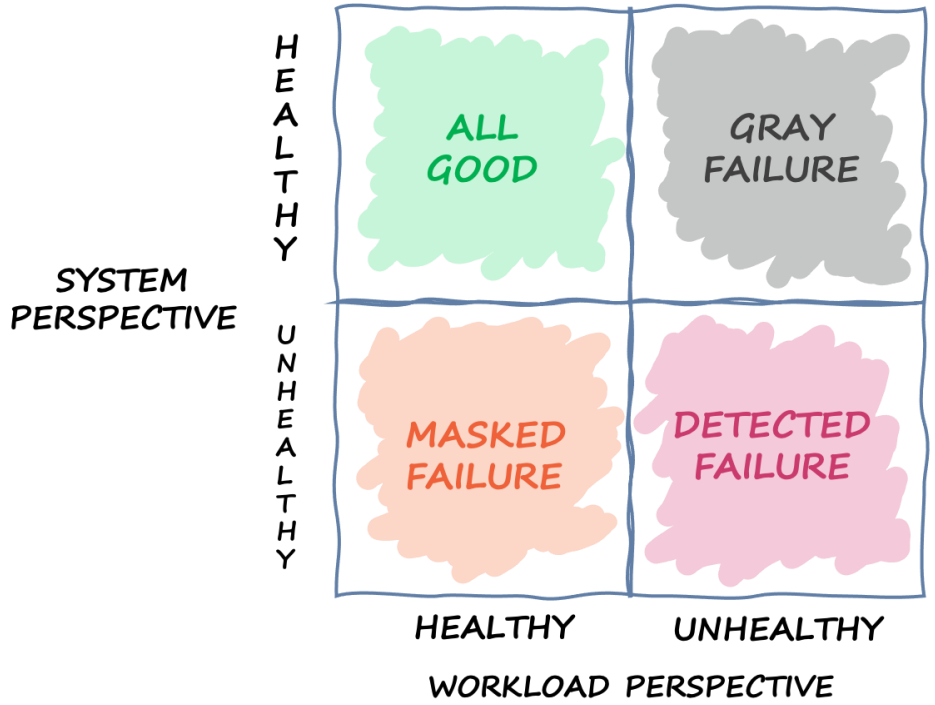
Деградация производительности



Fail-Slow at Scale: Evidence of Hardware Performance Faults in Large Production Systems (2018)

Серые отказы

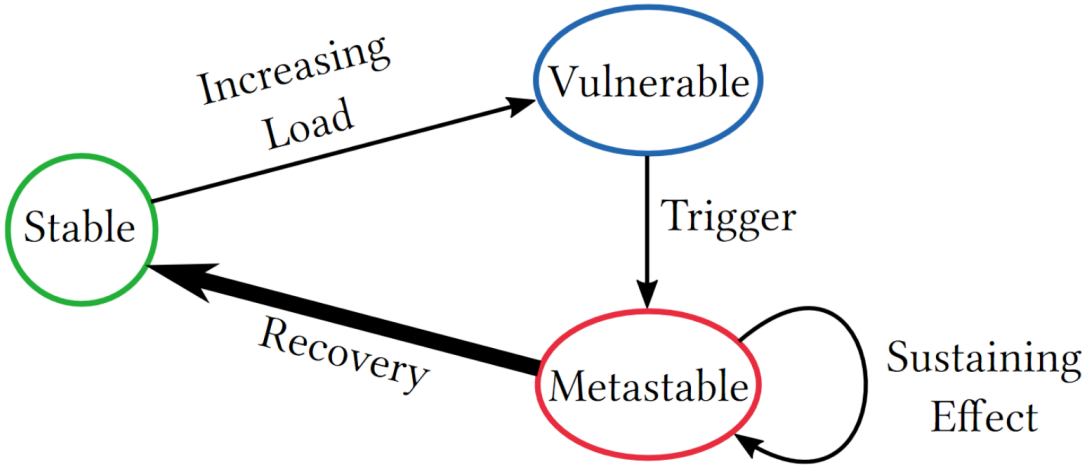


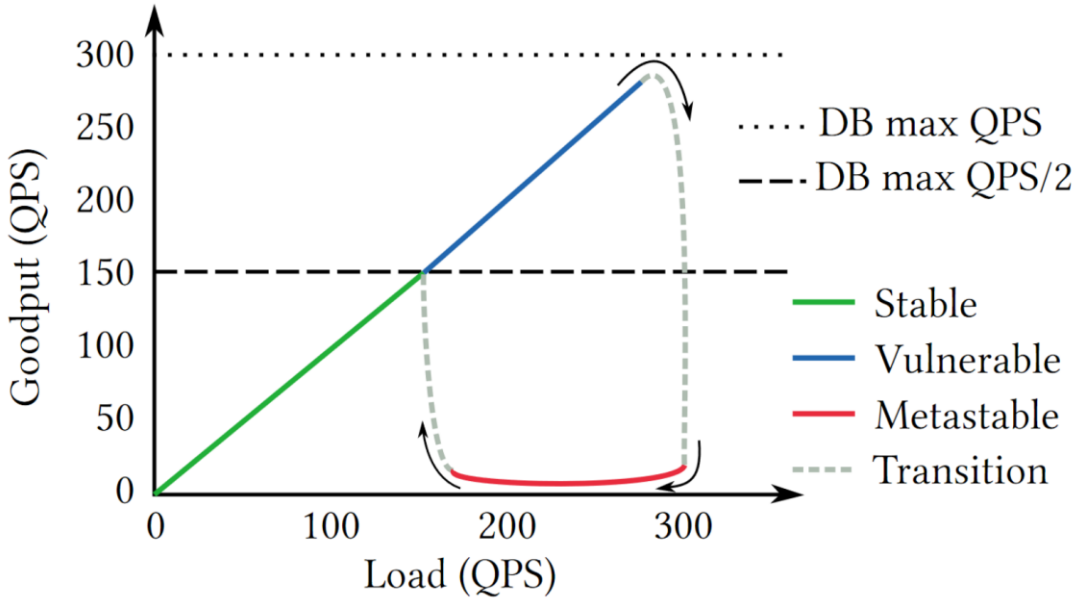


Gray Failure: The Achilles' Heel of Cloud-Scale Systems (2017)

https://docs.aws.amazon.com/whitepapers/latest/advanced-multi-az-resilience-patterns/gray-failures.html

Метастабильные отказы





Metastable Failures in Distributed Systems (2021)

Metastable Failures in the Wild (2022)