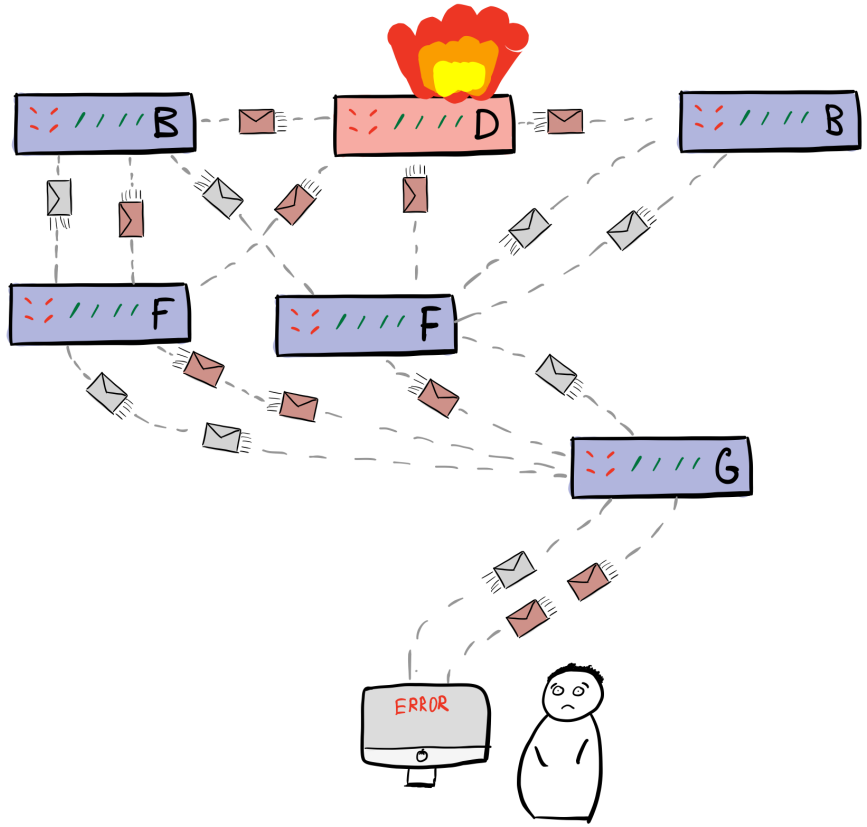
Отказы в PC

> 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

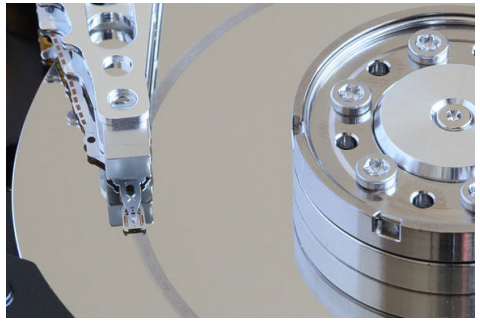


Терминология

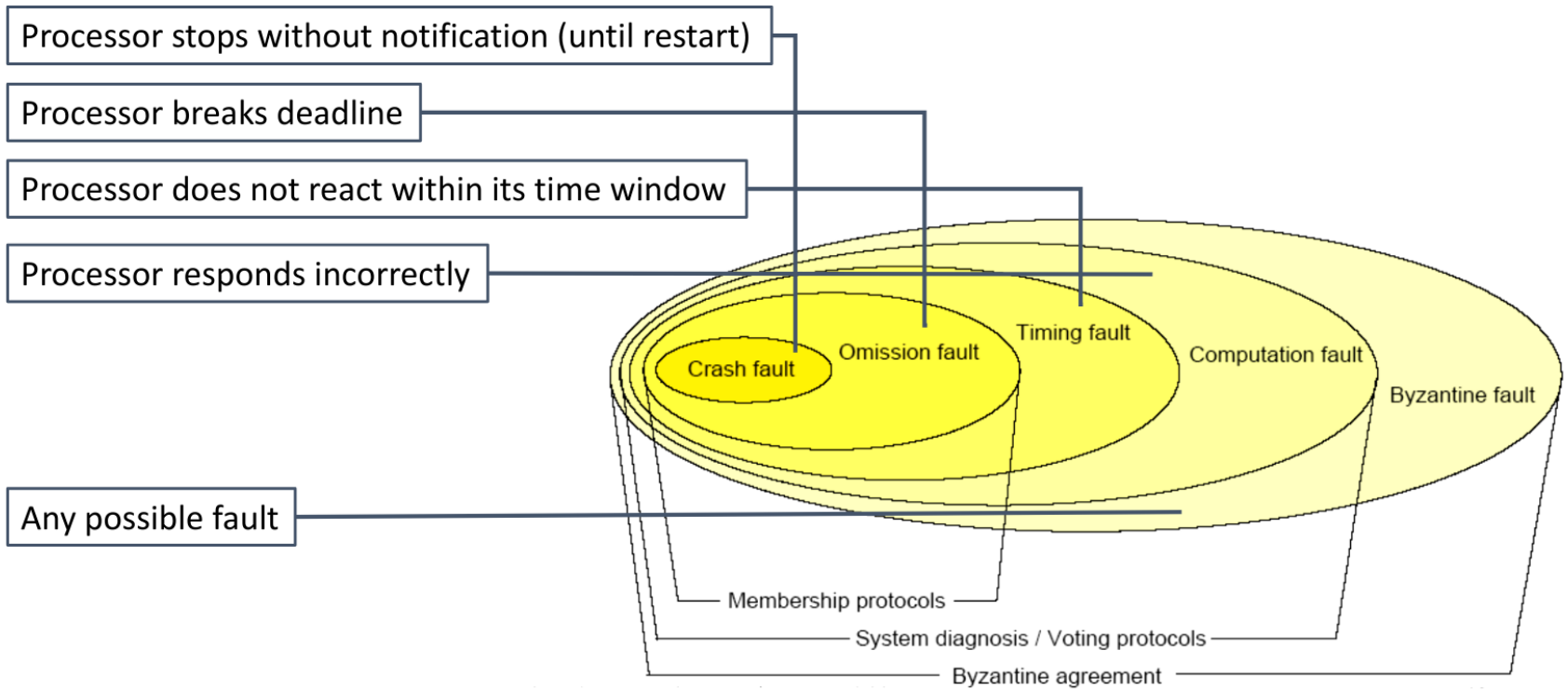
- Сбой (fault)
  - Неисправность, нарушение условий, баг
  - Является причиной ошибки
- Ошибка (error)
  - Проявление сбоя в состоянии системы
  - Может приводить к отказу
- Отказ (failure)
  - Отклонение поведения компонента или системы от спецификации

Сбои

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



Разновидности отказов



Обычные отказы

- 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)

Произвольные (византийские) отказы

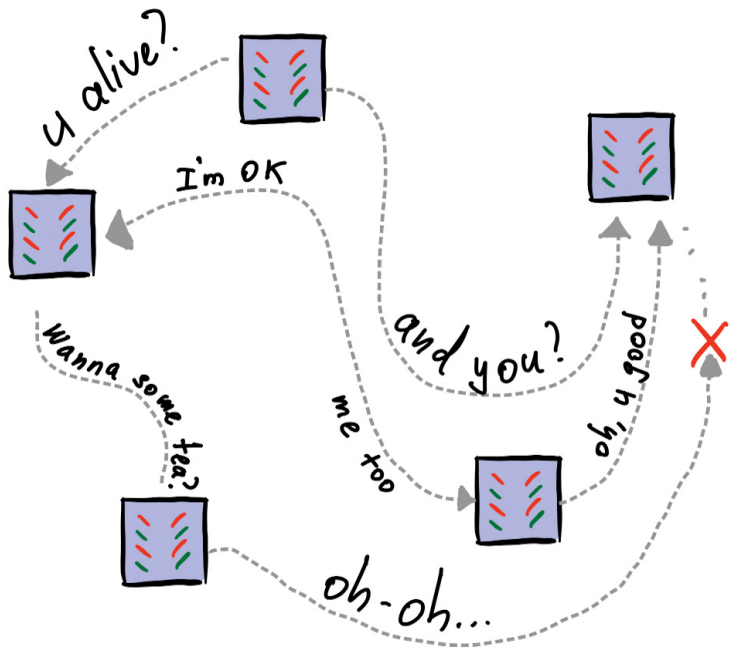
- Процесс активен и реализует произвольную логику поведения, нарушая спецификацию системы
  - Процесс может пропускать действия или выполнять дополнительные действия
  - Процесс может отправлять сообщения, только выглядящие корректными
- Могут быть вызваны случайными сбоями или намеренной атакой на ситему

Аспекты отказоустойчивости

- Предотвращение отказов
- **Обнаружение отказов**
- Реагирование на отказы
  - маскировка отказов за счёт избыточности
- Устранение отказов
- Прогнозирование отказов

Детектор отказов

- Компонент, определяющий состояние процессов в системе
  - Какой сейчас статус процесса X?
  - Healthy, Failed, Unsuspected, Suspected
- Часто присутствует на каждом процессе (локальный детектор)
- Детектор может давать разные ответы на разных процессах
- Должен быстро и точно обнаруживать отказы, не нагружая систему



Свойства детектора отказов

- Полнота (completeness)
  - Каждый отказавший процесс должен в конце концов стабильно подозреваться
  - Сильная (strong) полнота: ... каждым корректным процессом
  - Слабая (weak) 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 (eventual): свойство сильной или слабой точности выполняется спустя некоторое время

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

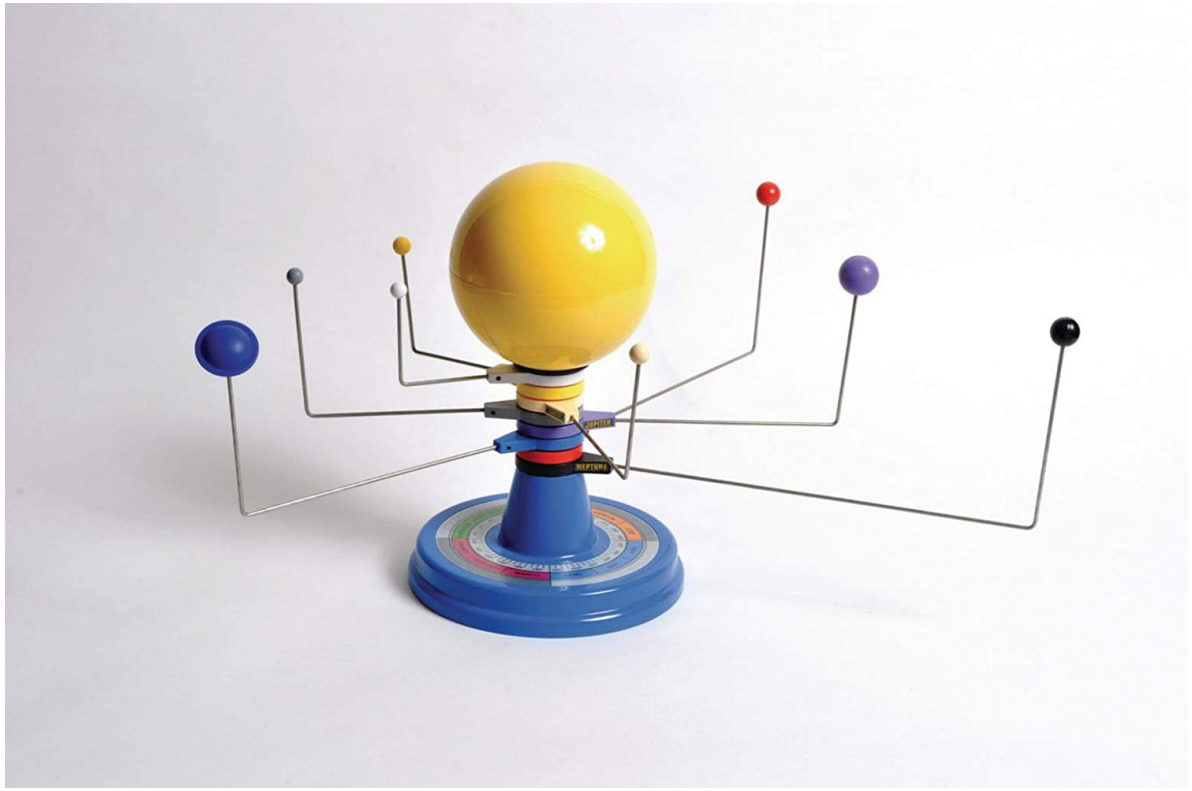
- Периодический прием сообщений от наблюдаемого процесса
  - Активная (pings) или пассивная (heartbeats) проверка
  - Интервал между отправками сообщений - T_{send}
- Процесс *Suspected*, если от него ничего не поступало в течении некоторого таймаута T_{fail}
- Если потом будет получено сообщение, то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

Выбор параметров?

- 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 наш детектор надежным?

Смотря в какой модели распределенной системы



Модели распределенных системы

- Синхронная система
  - Времена обработки и передачи сообщений ограничены сверху
  - Наш детектор можно сделать надежным, выбрав соотв. значение таймаута
- Асинхронная система
  - Процессы могут обрабатывать сообщения с произвольной скоростью
  - Время передачи сообщений не ограничено
  - Нельзя отличить медленно выполняющийся процесс от отказавшего
- Частично синхронная система
  - Поведение приближено к синхронной системе
  - Но верхние границы могут быть не точными и соблюдаться не всегда

Полезен ли ненадежный детектор?

- Chandra T. D., Toueg S. Unreliable failure detectors for reliable distributed systems // Journal of the ACM, 1996.
- Для консенсуса в асинхронной системе достаточно **eventually weak** детектора
  - Слабая полнота: каждый отказавший процесс в конце концов должен постоянно стать *Suspected* у некоторого корректного процесса
  - Слабая точность в конечном счёте: через некоторое время как минимум один корректный процесс никогда не *Suspected* у всех корректных процессов

Можно ли построить такой детектор?

- В асинхронной системе такой детектор построить нельзя
  - ...используя только обмен сообщениями
- На практике (~частично синхронные системы) можно к нему приблизиться
  - Полнота гарантируется
  - Точность можно улучшить и дать вероятностные гарантии

Как повысить точность нашего детектора?

Другие свойства детектора

- 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 циркулируемых 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 (1998)
- SWIM (2001)
- φ-accrual (2004)
- FALCON (2011)
- Albatross (2015)
- Panorama (2017)

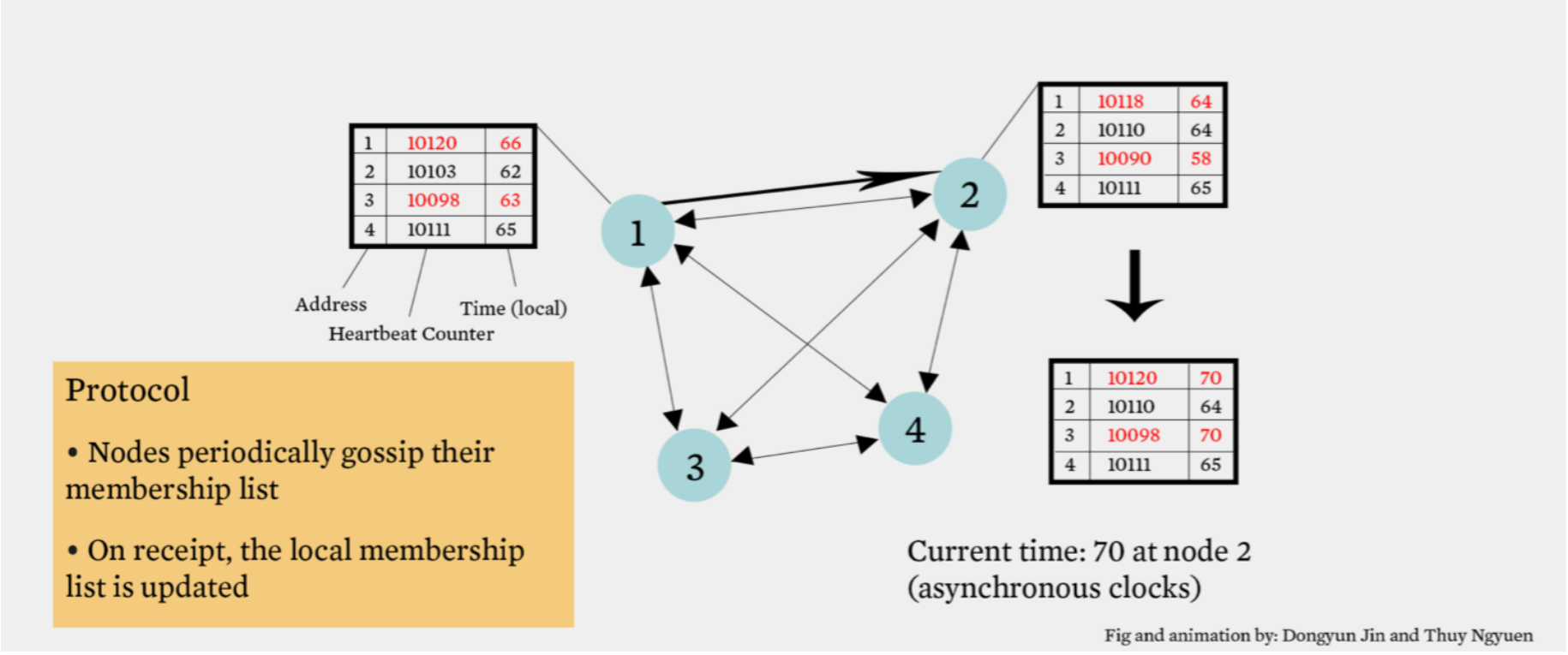
Детектор отказов без таймаутов

- Aguilera M. K., et al. Heartbeat: a Timeout-Free Failure Detector for Quiescent Reliable Communication (1997)
- Процессы и каналы между ними образуют граф
  - Между любой парой процессов есть путь
- Каждый процесс знает все остальные процессы
- Процесс хранит список соседей и счётчик для каждого из них

Детектор отказов без таймаутов

- Процессы отправляют heartbeat-сообщения своим соседям
- Сообщения содержат проделанный ими путь
- При получении нового сообщения процесс
  - увеличивает счётчики для всех процессов из сообщения
  - добавляет себя в сообщение
  - отправляет сообщение соседям, которых не было в сообщении
- Передача сообщения прекращается, когда все процессы получили его
- Детектор выводит вектор счётчиков без их интерпретации

Gossip-style детектор



Van Renesse R. et al. A Gossip-Style Failure Detection Service (1998)

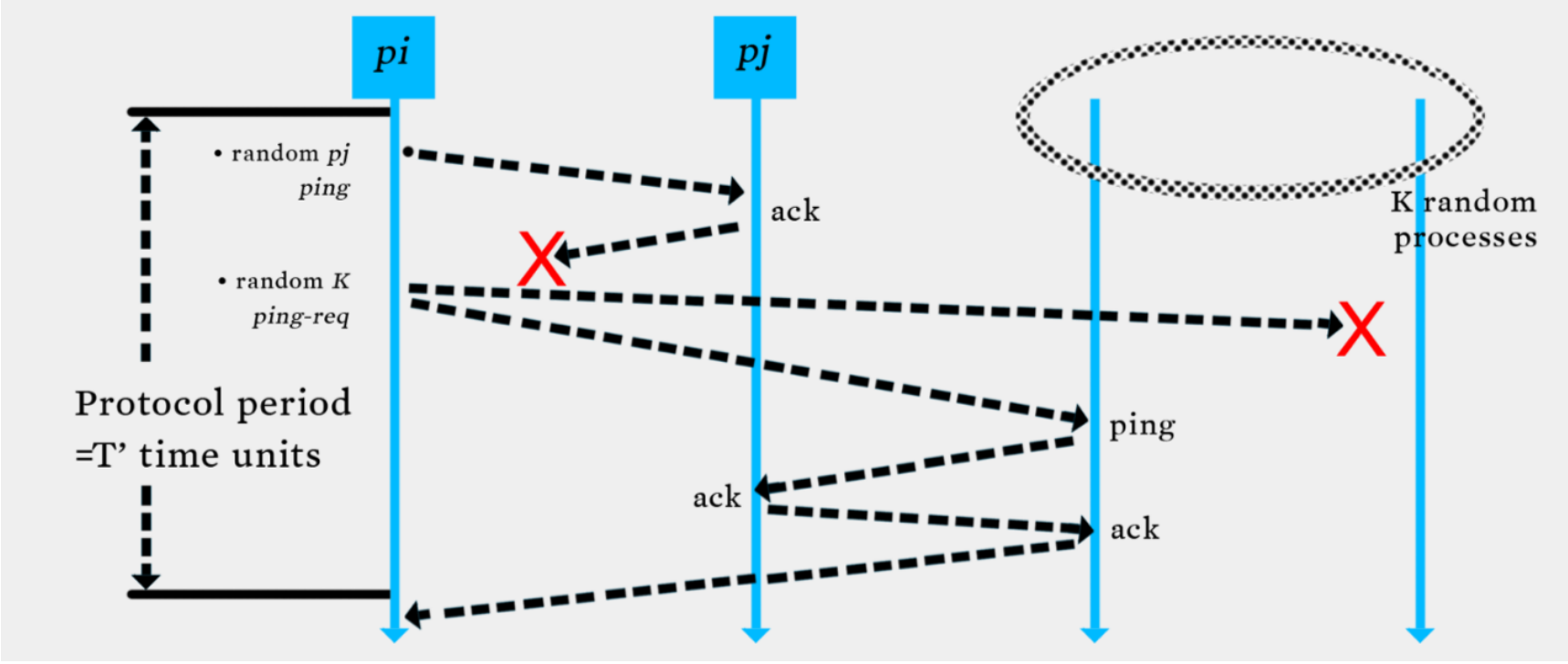
Gossip-style детектор

- 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

- Зафиксируем требуемое нам время обнаружения отказа T
- 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, отсюда $T = T_g logN$
  - суммарное число сообщений: $NlogN$, сетевой трафик: N^2logN
  - нагрузка на процесс: $NlogN/T$

SWIM



Gupta I. et al. On Scalable and Efficient Distributed Failure Detectors (2001)
Das A. et al. SWIM: Scalable Weakly-consistent Infection-style Process Group Membership Protocol (2002)

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 ответ не получен, то процесс просит *K* случайных процессов выполнить *ping(P)*
  - Если ответ по-прежнему не получен, то процесс *P* объявляется отказавшим
- Процесс рассылает информацию об отказе с помощью multicast или gossip
  - Обнаружение отказов и распространие 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/ack*

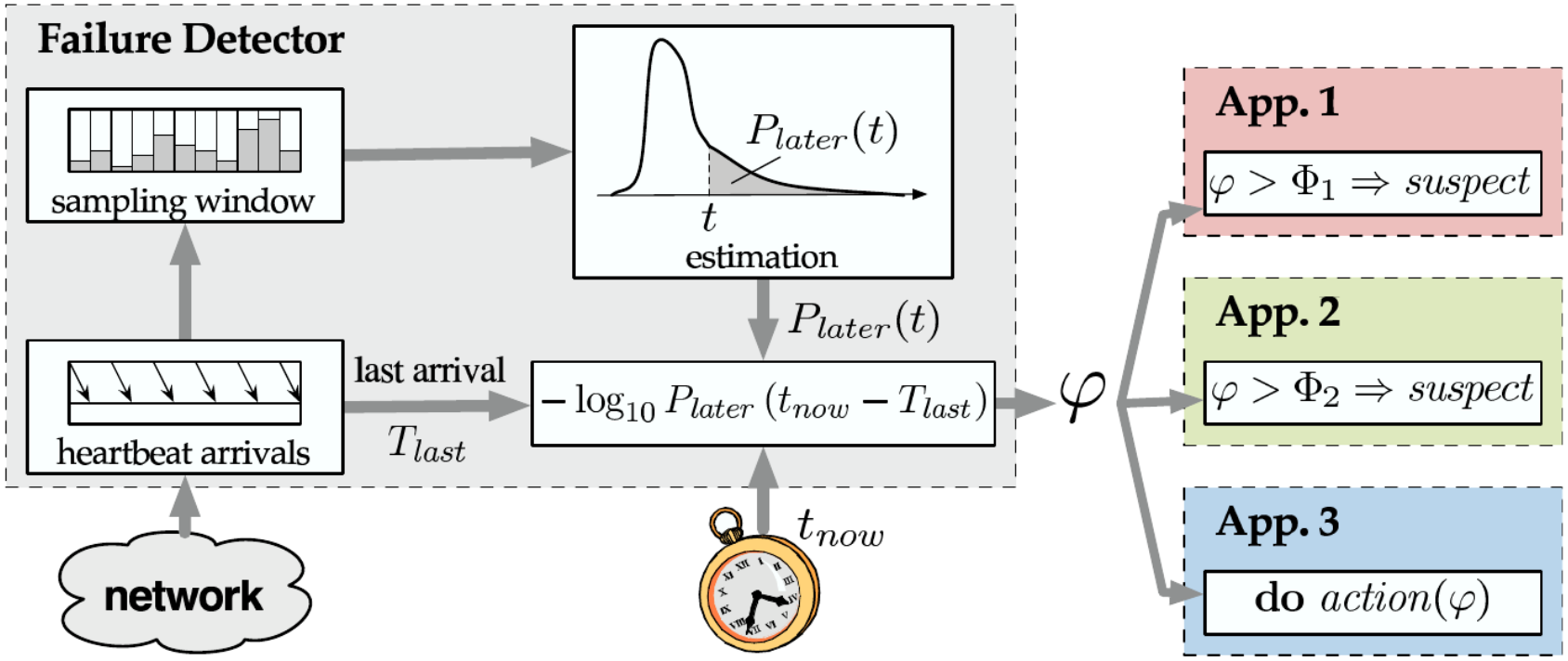
SWIM: Свойства

- 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
- Dadgar A. et al. Lifeguard: Local Health Awareness for More Accurate Failure Detection (2018)

φ-accrual детектор

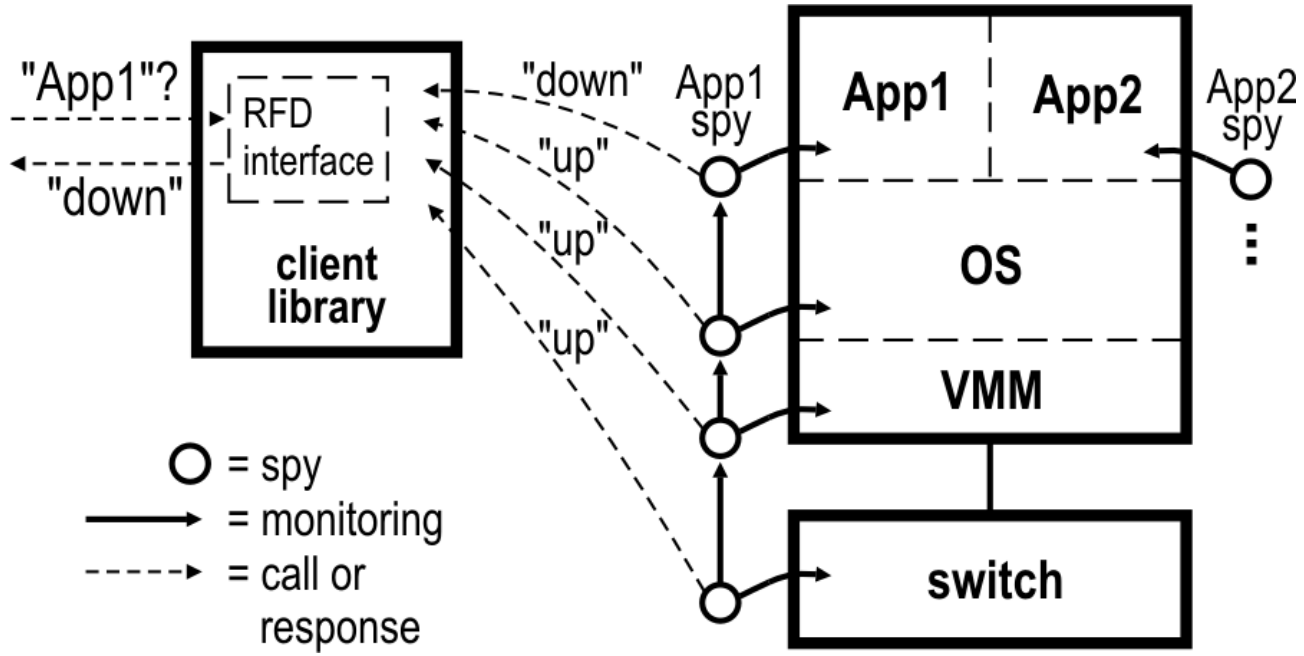


Hayashibara N. et al. The φ Aaccrual Failure Detector (2004)

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
- Применяется на практике (Akka, Cassandra)

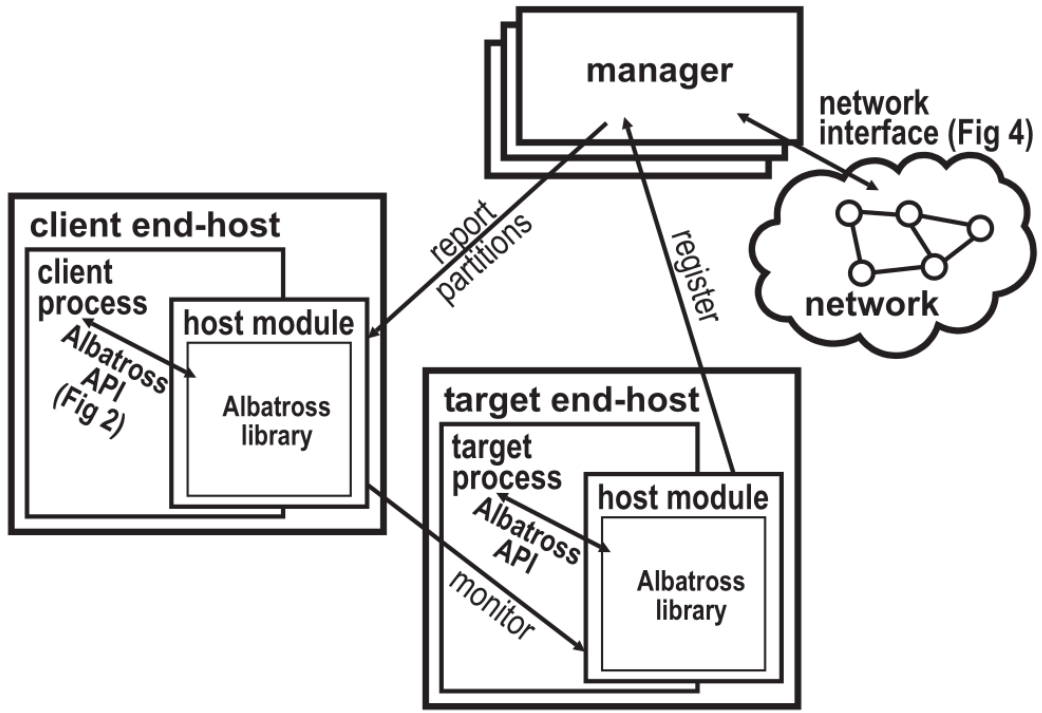
FALCON (Fast And Lethal Component Observation Network)



Leners J. B. et al. Detecting failures in distributed systems with the FALCON spy network (2011)

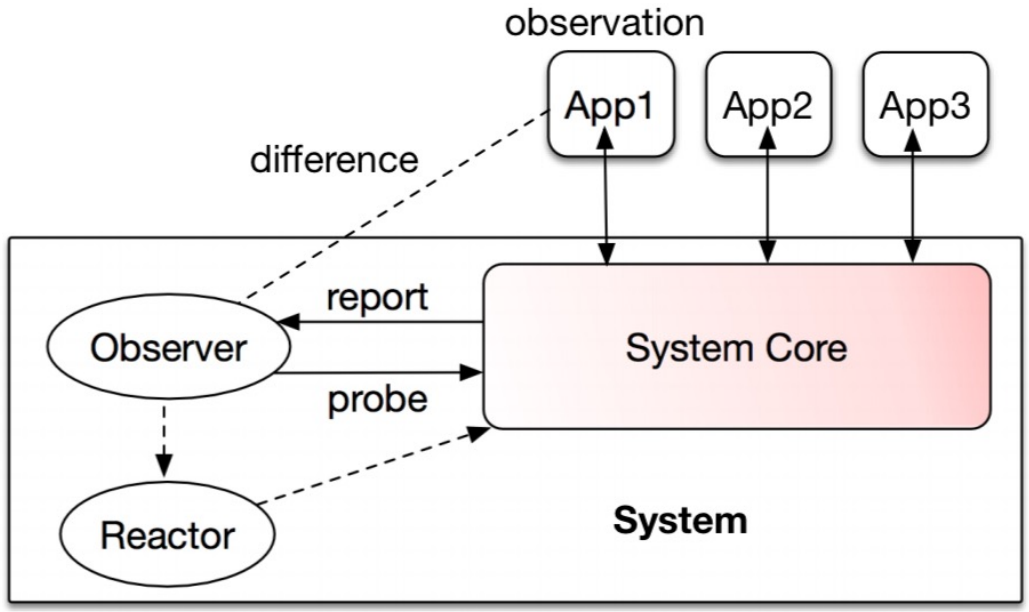
http://www.cs.utexas.edu/falcon/

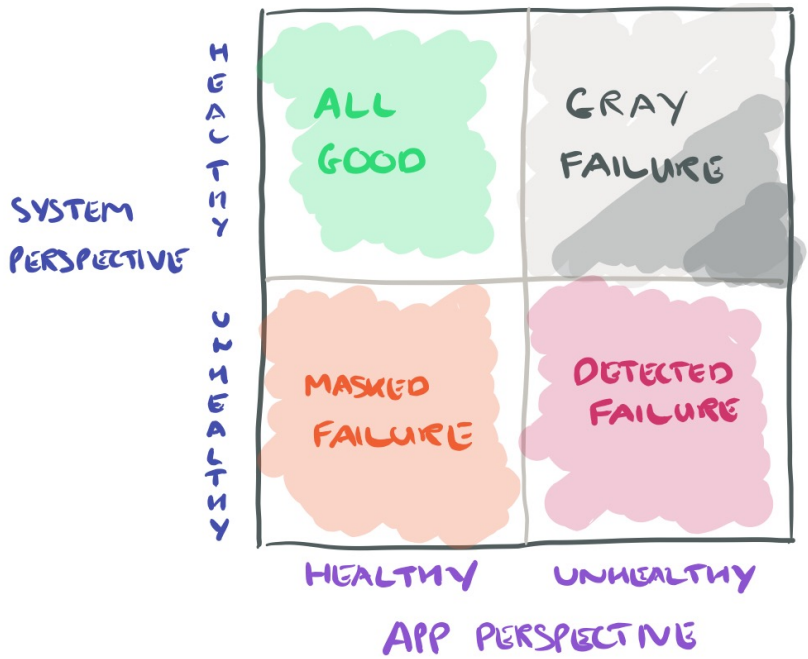
Albatross



Leners J. B. et al. Taming uncertainty in distributed systems with help from the network (2015)

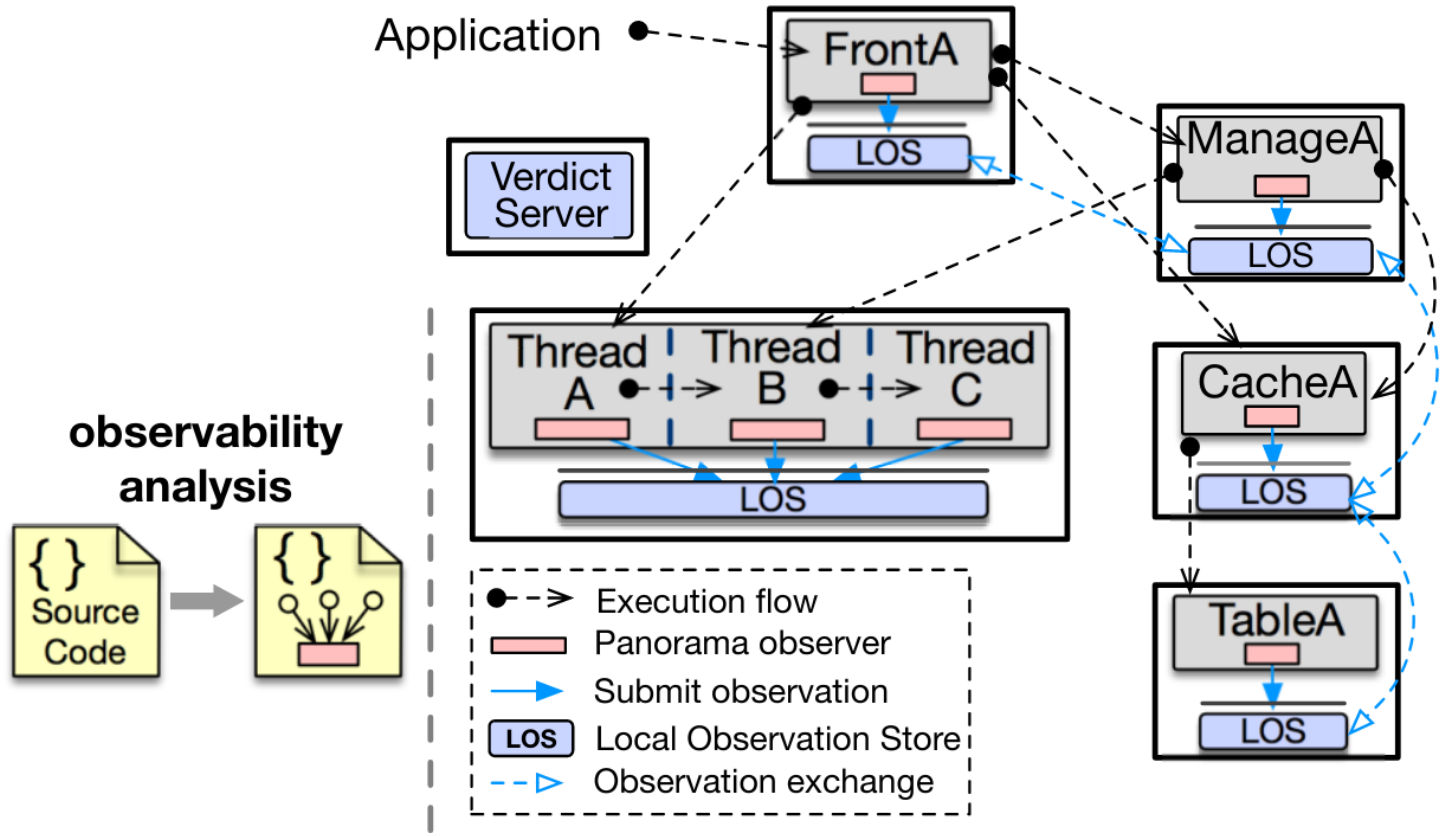
Серые отказы





Huang P. et al. Gray Failure: The Achilles' Heel of Cloud-Scale Systems (2017)

Panorama



Huang P. et al. Capturing and enhancing in situ system observability for failure detection (2018)

Литература и материалы

- van Steen M., Tanenbaum A.S. Distributed Systems: Principles and Paradigms. Pearson, 2017. (раздел 8.1)
- Coulouris G.F. et al. Distributed Systems: Concepts and Design. Pearson, 2011 (разделы 15.1.1, 15.5.4)
- Petrov A. Database Internals. O'Reilly, 2019 (глава 9)
- PWLSF- 09/2014 - Armon Dadgar on SWIM
- Gray failure: the Achilles' heel of cloud-scale systems

Литература и материалы (дополнительно)

- Упомянутые статьи про детекторы отказов
- Making Gossip More Robust with Lifeguard
- Aguilera M., Walfish M. No Time for Asynchrony (2009)