

Устойчивость к произвольным отказам

Олег Сухорослов

Распределенные системы

Факультет компьютерных наук НИУ ВШЭ

12.12.2022

Произвольные (византийские) отказы

- Любое отклонение поведения узлов РС от заданного протоколом
 - Наиболее общая модель отказов, включающая ранее рассмотренные
 - Процесс может быть активен, но при этом работать некорректно
- Намеренные атаки
 - Пропуск, вставка, изменение, повтор сообщений, сговор...
- Ненамеренные сбои
 - Сбои аппаратуры, баги в ПО...
 - Shuttle Mission STS-124 (2008)
 - Amazon S3 Availability Event (2008)
 - How the Boeing 737 Max Disaster Looks to a Software Developer (2019)

Византийские генералы

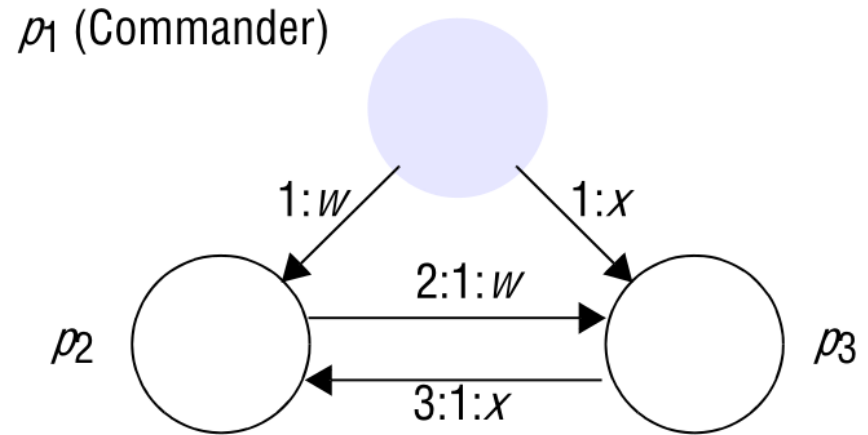
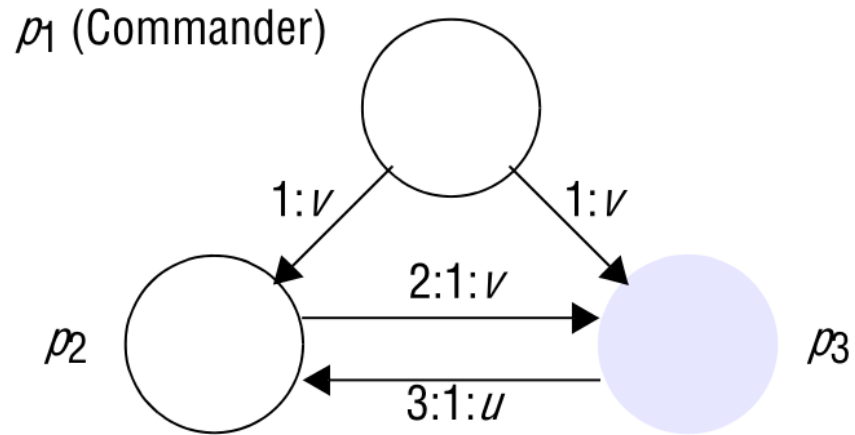


Lamport L., Shostak R., Pease M. The Byzantine Generals Problem (1982)

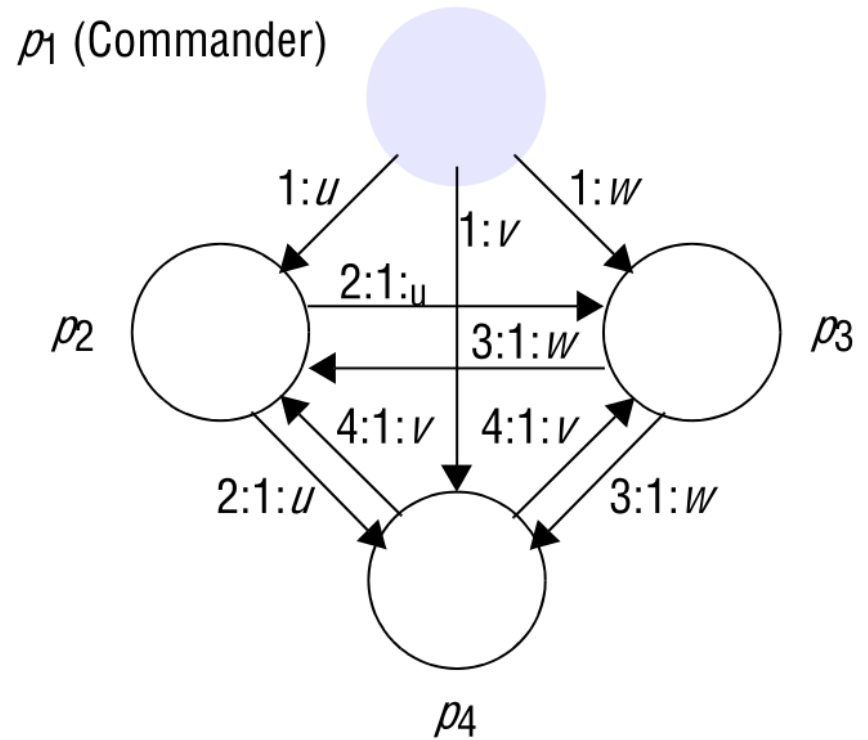
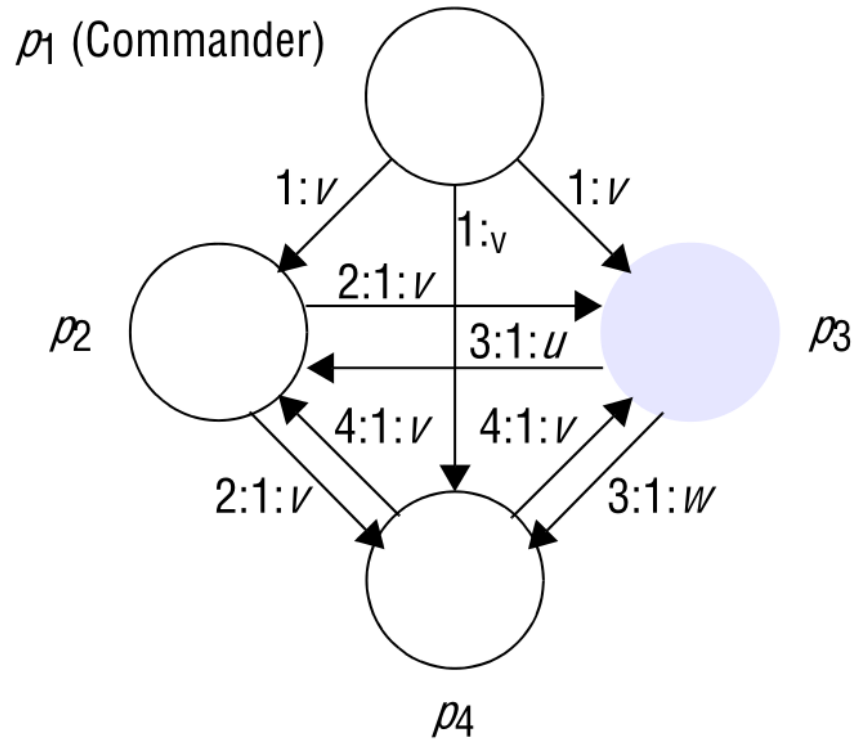
Задача с командиром

- Главный генерал (командир) рассылает свой приказ (наступать, отступить) остальным генералам (лейтенантам)
- Требования
 - Все верные лейтенанты должны выполнить одинаковый приказ
 - Если командир не был предателем, то каждый верный лейтенант выполнит его приказ
- Предположения
 - Сообщения доставляются без изменений (контроль целостности)
 - Получатель может определить, кто отправил сообщение (аутентификация)
 - Отсутствие сообщения может быть определено (синхронная модель), в этом случае используется некоторое значение по умолчанию
- Сколько всего генералов N требуется в случае f предателей?

Три генерала (N=3, f=1)



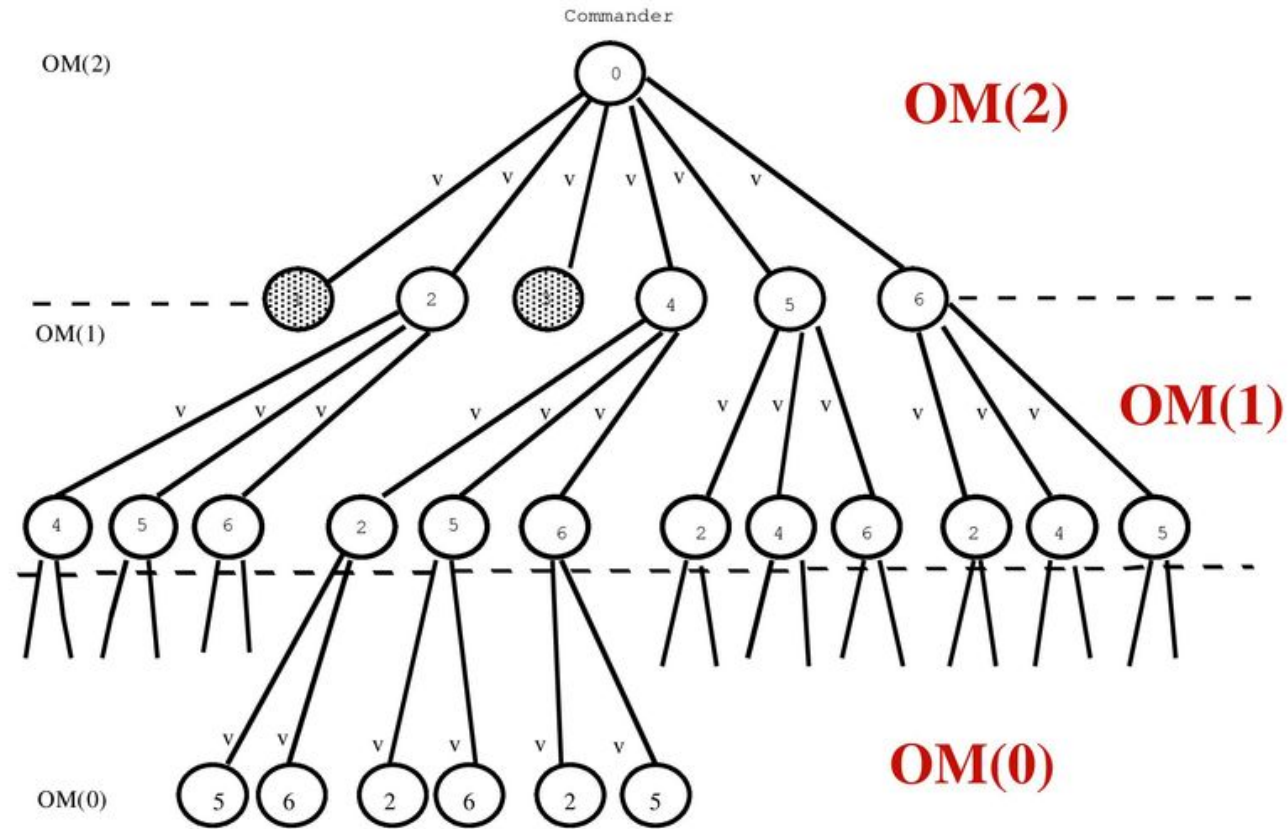
Четыре генерала (N=4, f=1)



Oral Messages Algorithm

- Algorithm $OM(0)$
 - ① The commander sends its value to every lieutenant
 - ② Each lieutenant uses the value he received from commander, or uses RETREAT if he received no value
- Algorithm $OM(m)$
 - ① The commander sends its value to every lieutenant
 - ② $\forall i$, let v_i be the value lieutenant i receives from the commander, or RETREAT if it has received no value. Lieutenant i acts as the commander of algorithm $OM(m - 1)$ to send the value v_i to each of the other $n - 2$ other lieutenants
 - ③ $\forall j \neq i$, let v_j be the value received by i from j in Step 2 of algorithm $OM(m - 1)$ or RETREAT if no value. Lieutenant i uses the value $\text{majority}(v_1, \dots, v_{n-1})$ (deterministic function)

Семь генералов ($N=7, f=2$)

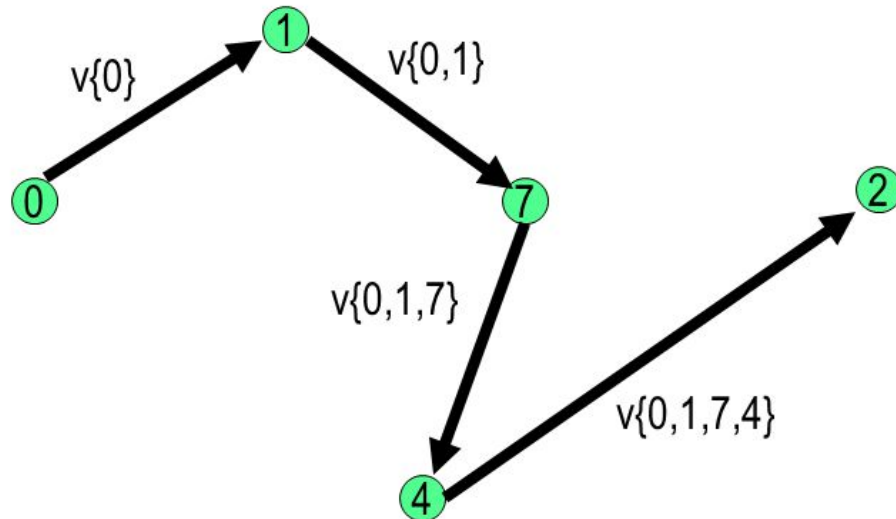


Свойства алгоритма

- В случае f предателей требуется
 - не менее $3f + 1$ генералов (минимальное возможное число)
 - $f + 1$ раундов взаимодействий
 - $O(N^{f+1})$ сообщений
- Зависимость от таймаутов
 - уязвимость к атакам на корректные узлы (например, DoS)

Подписанные сообщения

- Сообщения подписаны отправителем
- Подпись верного генерала не может быть подделана
- Каждый генерал может проверить подпись и аутентичность сообщения



Алгоритм с подписанными сообщениями

- Генерал подписывает и отправляет свой приказ лейтенантам
- Лейтенант i
 - при получении сообщения $v\{0\}$ от командира запоминает v в V_i , подписывает его и отправляет $v\{0, i\}$ остальным лейтенантам
 - при получении сообщения $v\{0 : j_1 : \dots : j_k\}$ и если v нет в V_i
 - добавляет v в V_i
 - если $k < f$, то отправляет сообщение $v\{0 : j_1 : \dots : j_k : i\}$ лейтенантам, которые еще не подписали сообщение
 - когда сообщений больше не ожидается, вычисляет финальный приказ с помощью функции $choice(V_i)$
- Сообщения, не прошедшие проверку с помощью подписей, отбрасываются

Алгоритм с подписанными сообщениями

Требуется

- не менее $f + 2$ генералов
- $f + 1$ раундов взаимодействий
- $O(N^{f+1})$ сообщений
 - можно уменьшить до $O(N^2)$

Консенсус

- Один или несколько узлов предлагают значения
- Требуемые свойства
 - Никакие два корректных узла не должны принять разные значения
 - Никакой узел не принимает значение дважды
 - Если узел принял значение, то оно было предложено некоторым корректным узлом
 - Каждый корректный узел в конце концов принимает значение
- Традиционные алгоритмы консенсуса (Paxos, Raft)
 - не поддерживают произвольные отказы
 - требуют не менее $2f + 1$ узлов

Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT)

Castro M., Liskov B. Practical Byzantine Fault Tolerance (1999)

- Протокол для state machine replication
 - Реплицированный сервис с состоянием и детерминированными операциями над ним
 - Клиенты отправляют запросы с операциями и ожидают ответов
- Предположения
 - Частично синхронная модель, ненадежные каналы (см. традиционные алгоритмы)
 - Сообщения могут быть проверены на подлинность с помощью цифровых подписей
 - f узлов могут быть подвержены независимым произвольным отказам
- Требуется $3f + 1$ узлов

PBFT: Оптимальность

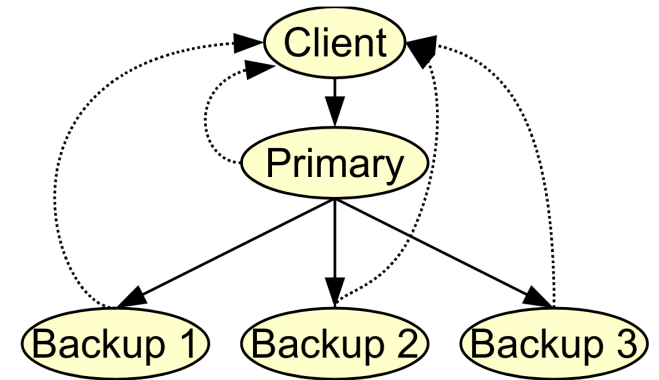
- Для ответа на запрос клиента должно быть достаточно получить ответы от $N - f$ реплик, так как f реплик могут не ответить
- Но f реплик, от которых не пришли ответы, могут просто работать медленно, и среди ответивших могут быть f отказавших реплик
- Число ответов от корректных реплик $N - 2f$ должно превышать f , откуда получаем $N > 3f$

РВFT: Конфигурация системы

- Каждый узел (реплика) имеет идентификатор i от 0 до $N-1$
- Конфигурация системы называется *view*
 - аналог *term* в Raft
- Внутри *view* один из узлов является *главным (primary)*
 - принимает запросы клиентов
 - присваивает им номера (sequence number) и рассылает по остальным узлам
 - определяется однозначным образом, например $i = v \bmod N$
- Остальные узлы играют роль *резервных (backup)*
 - принимают запросы от главного узла
 - участвуют в процессе принятия решения о коммите операции
- При отказе главного узла происходит смена *view*

PBFT: Базовая схема работы

- Клиент отправляет *подписанный* запрос главному узлу
- Главный узел рассылает запрос резервным узлам
- С помощью кворумов достигается консенсус относительно порядка операций и их коммита
- Как только консенсус достигнут, узлы выполняют запрос и отправляют ответ напрямую клиенту
- Клиент ожидает получения $f + 1$ идентичных ответов
- Если ответы не приходят, то клиент рассылает запрос повторно *всем* узлам

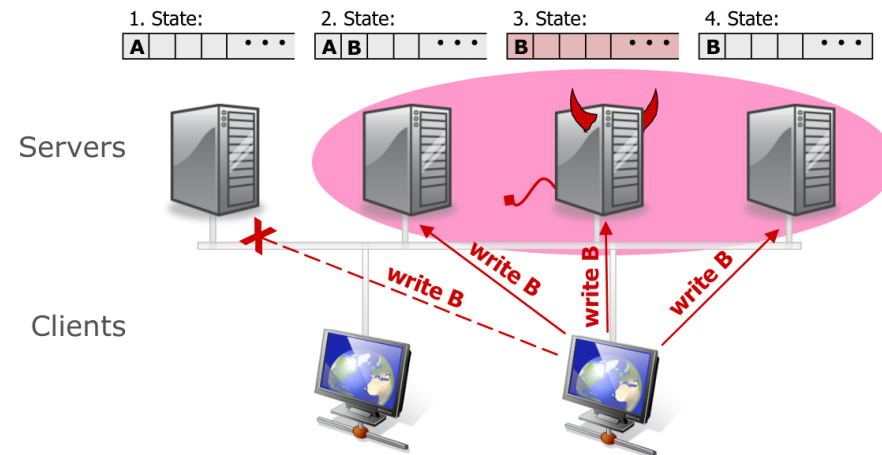
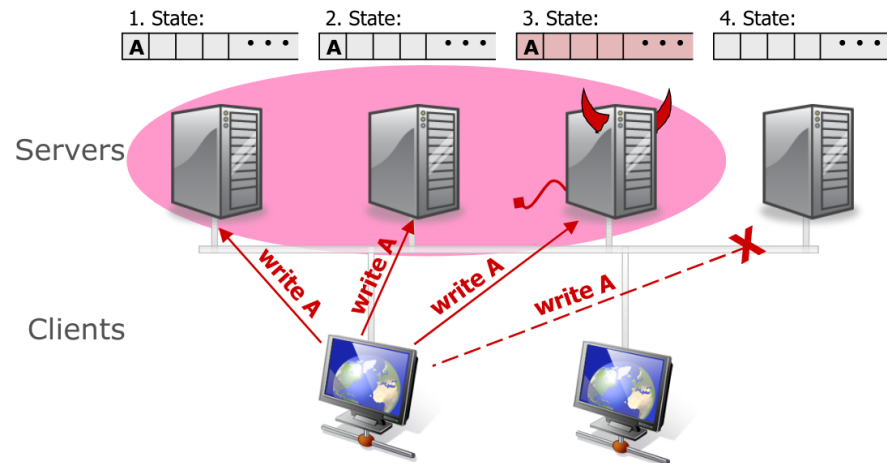


PBFT: Проблемы и меры

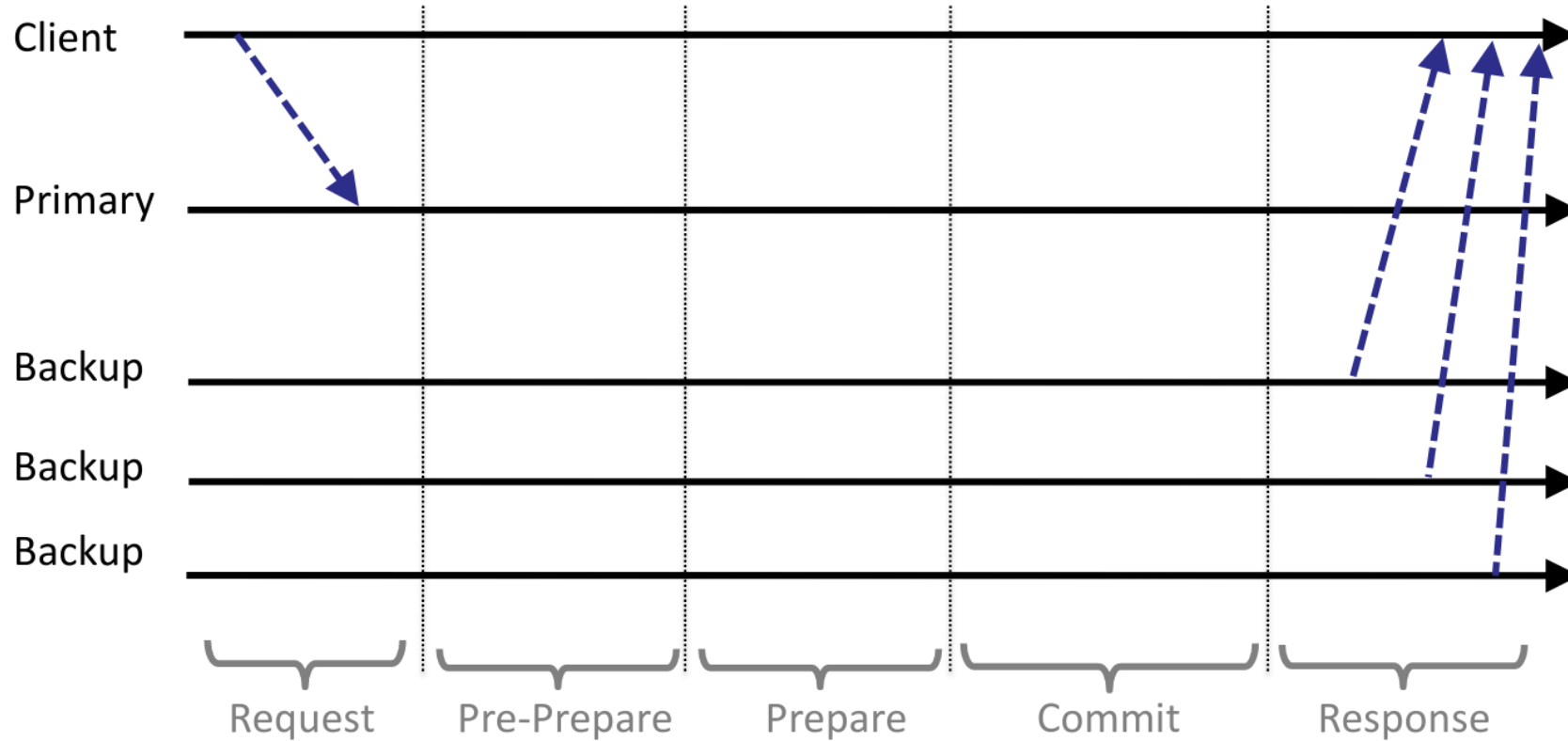
- Может отказать главный узел
 - игнорирует запросы, назначает один номер разным запросам, пропускает номера...
 - резервные узлы отслеживают поведение главного и могут инициировать его смену
- Может отказать резервный узел
 - некорректно сохраняет и применяет операции, переданные корректным главным узлом
 - для защиты от таких отказов используются кворумы
- Узел может отправить некорректный ответ клиенту
 - клиент ожидает получения $f + 1$ идентичных ответов

PBFT: Основная идея

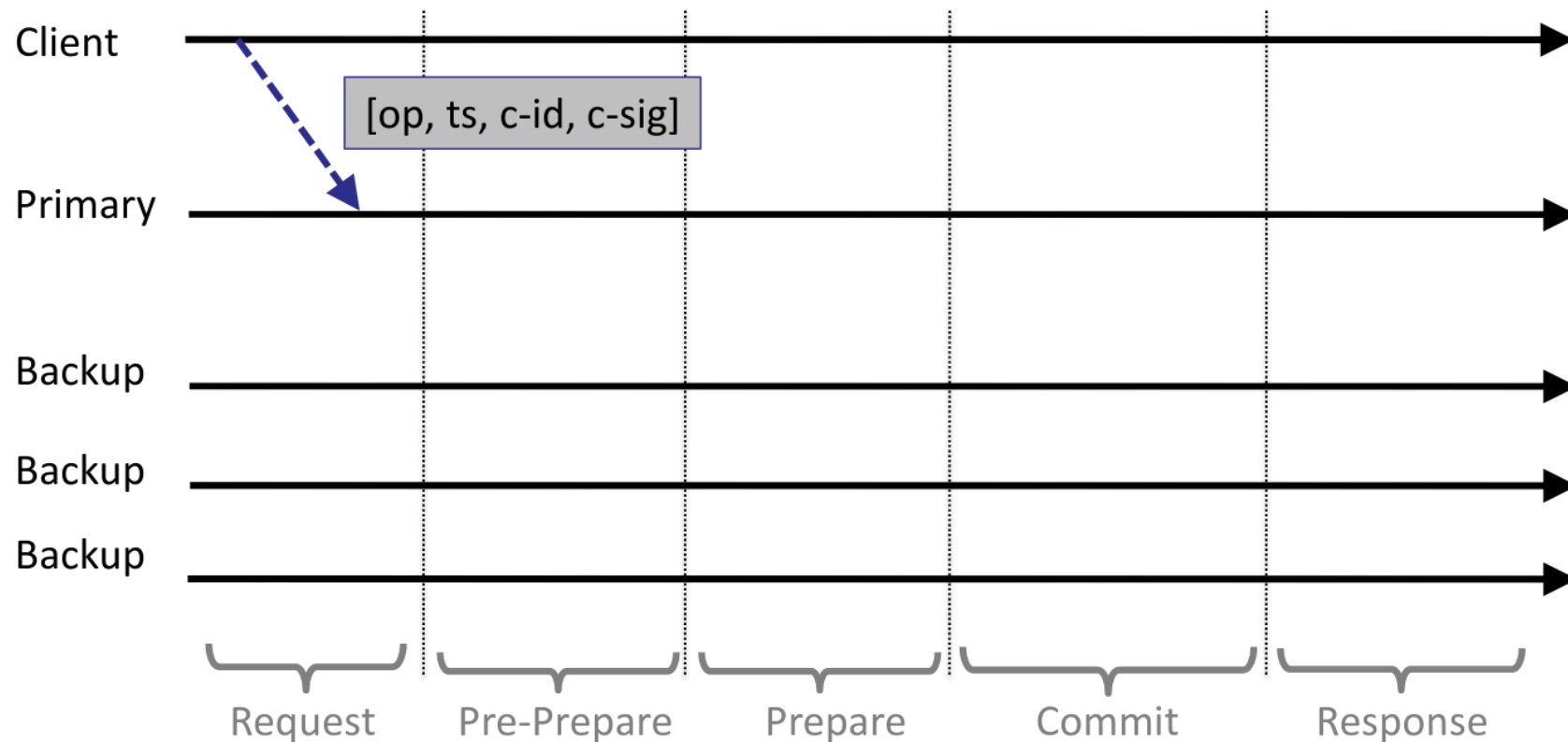
- Шаги протокола координируются с помощью т.н. *сертификатов*
 - Набор подписанных сообщений от кворума узлов, подтверждающих выполнение нек. свойства
- Кворумы имеют размер $N - f = 2f + 1$
 - пересечение любых двух кворумов содержит по крайней мере один корректный узел



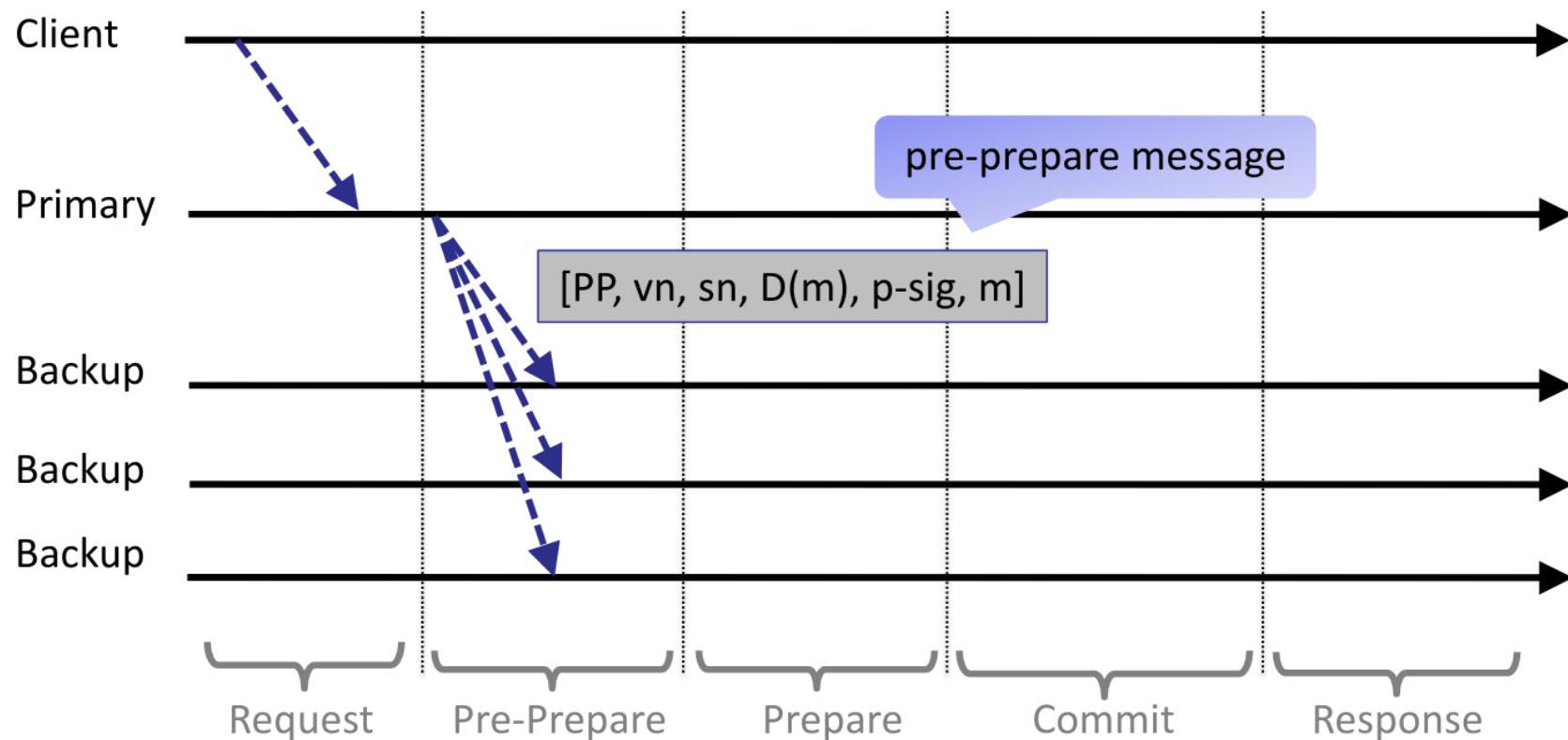
PBFT: Протокол



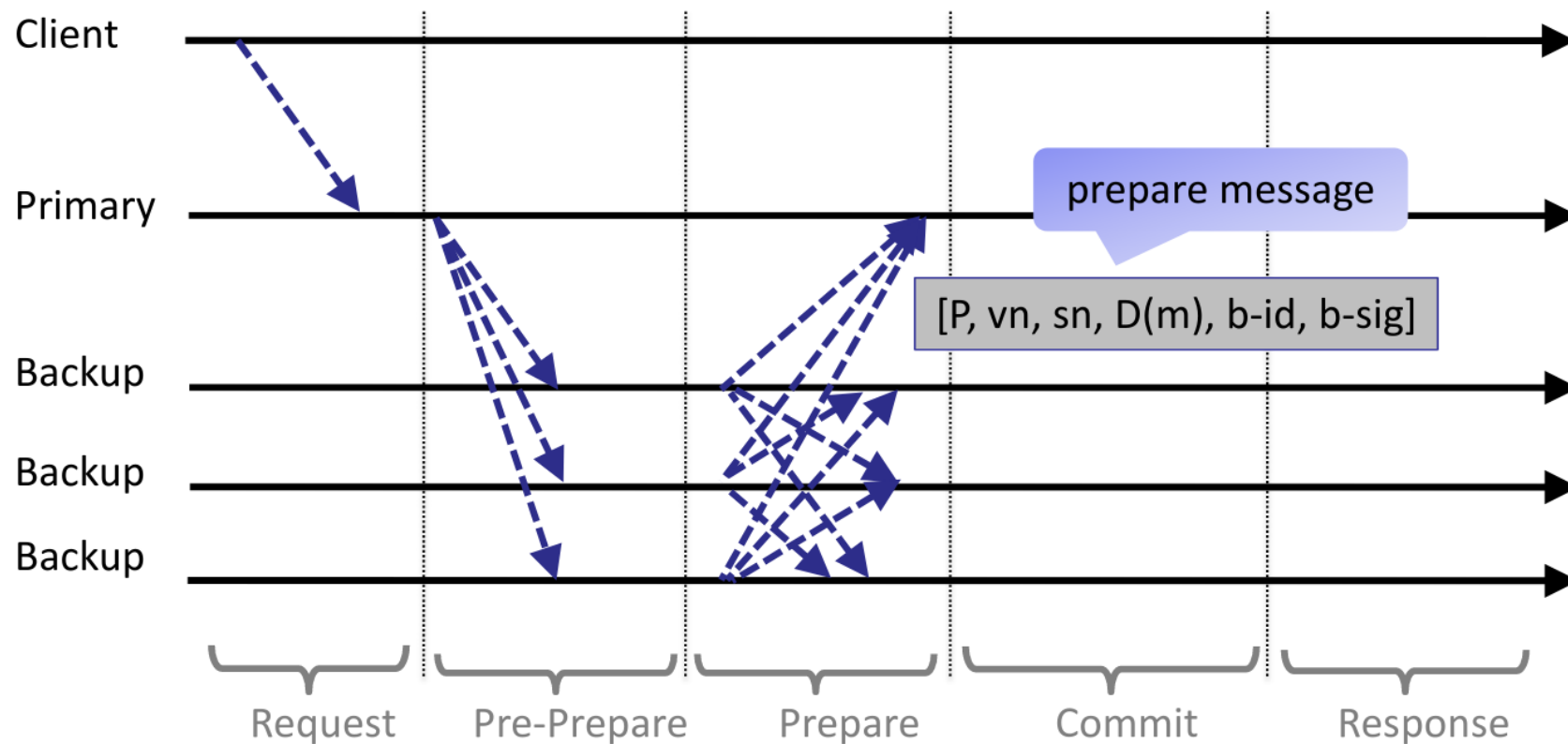
PBFT: Фаза Request



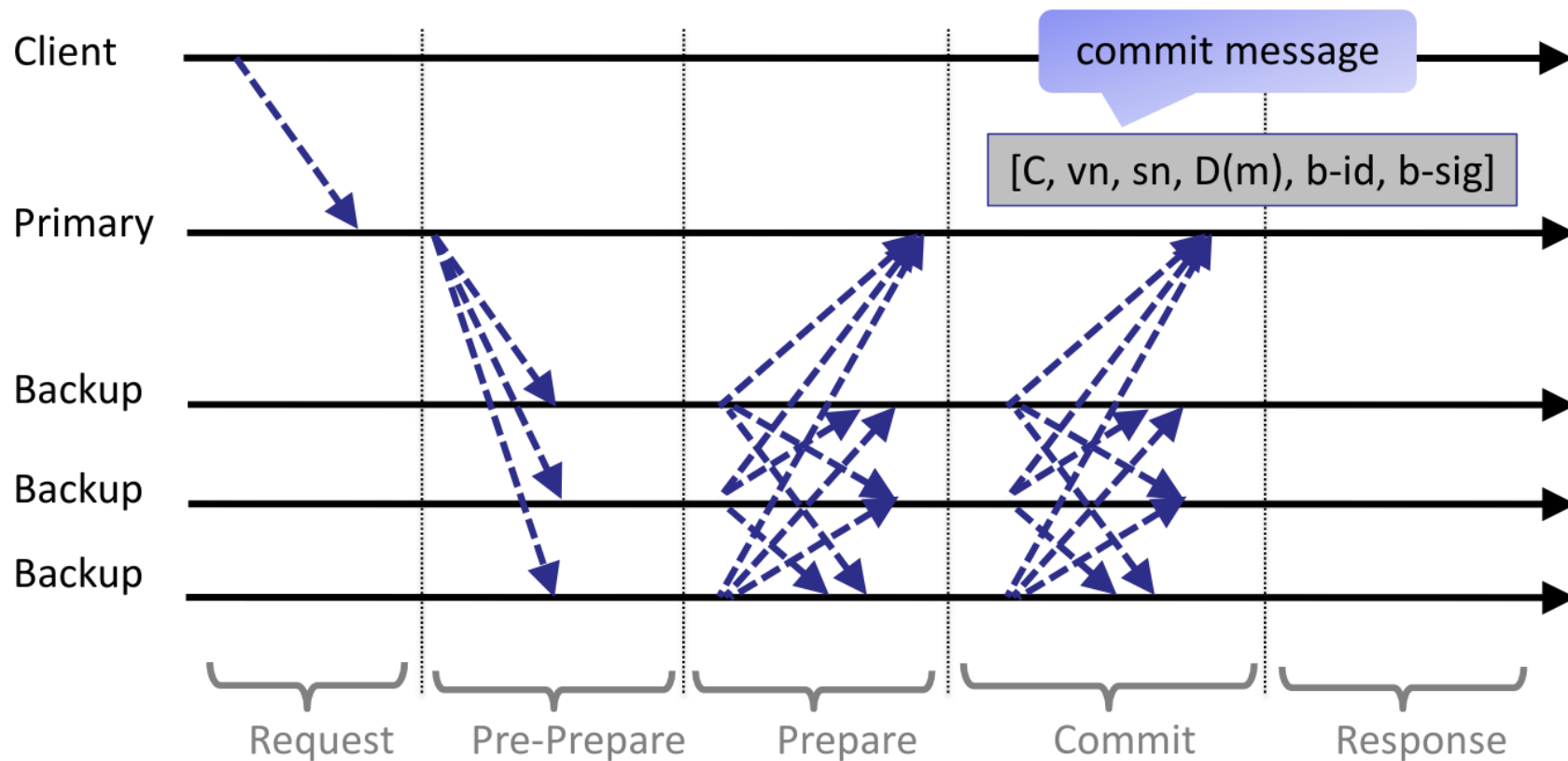
PBFT: Фаза Pre-Prepare



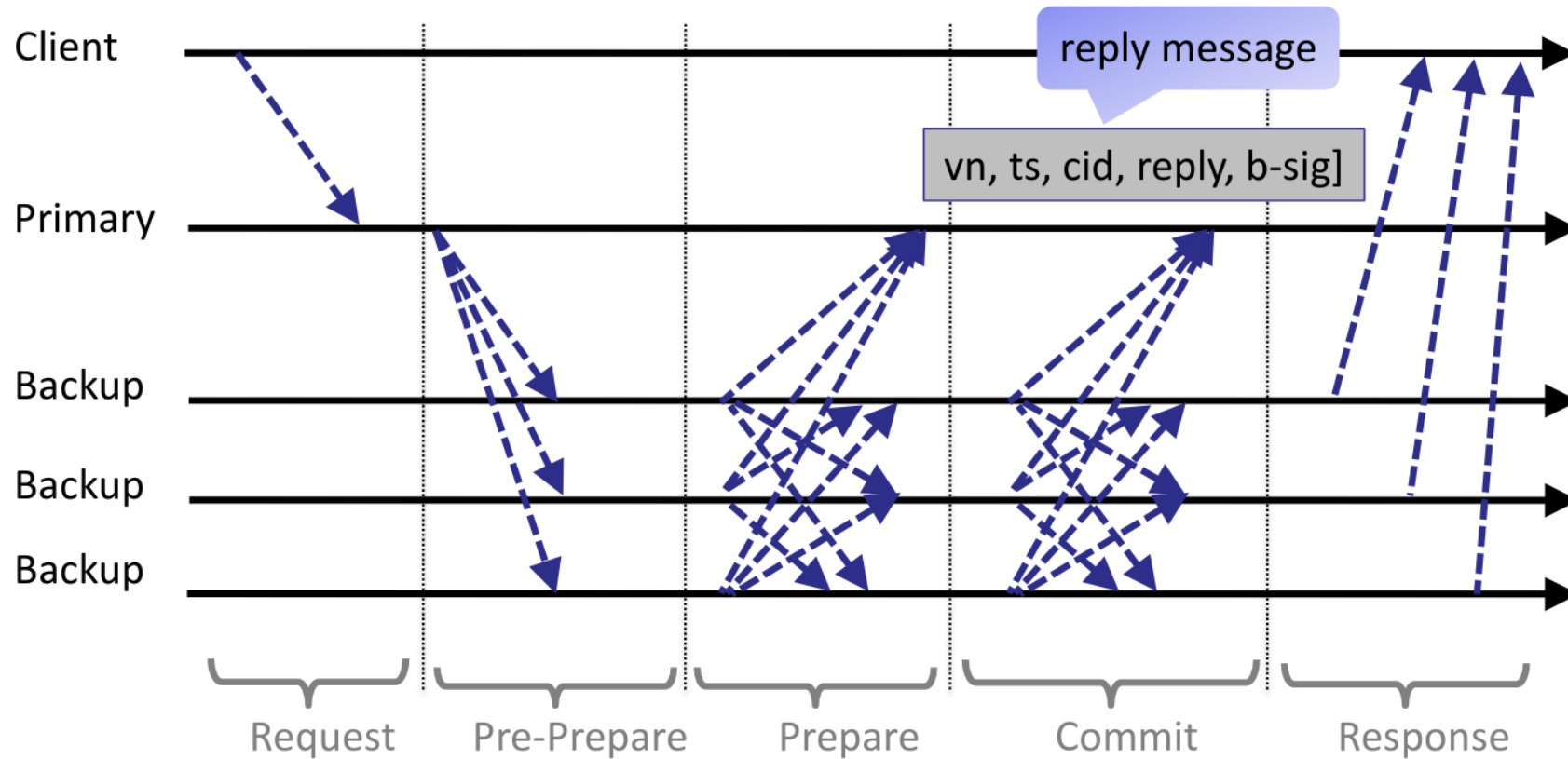
PBFT: Фаза Prepare



PBFT: Фаза Commit



PBFT: Φαза Response



Обнаружение отказа главного узла

- Клиент не дожидается ответа
 - Или запрос клиента потерялся или главный узел отказал
- После таймаута клиент рассылает запрос *всем* узлам
 - Узел, который уже закоммитил результат, отправляет его
 - Узел, который не получал *pre-prepare*, направляет запрос главному и ждёт *pre-prepare*
 - Если узел не получит *pre-prepare*, то он признает главного отказавшим
- В случае обнаружения отказа главного, узел инициирует изменение *view*
 - Номер *view* увеличивается на 1, определяется новый главный узел ($v \bmod N$)
 - Узел отправляет всем сообщение *view change*
 - Новый главный узел вступает в права после получения $2f$ сообщений от других узлов

PBFT: Детали

- Смена view
- Сборка мусора
- Восстановление отказавшей реплики
- Оптимизации

PBFT: Свойства

- Операции упорядочены с помощью номеров *view* и *sequence number*
- Если корректный узел закоммитил $[m, vn, sn]$, то никакой другой корректный узел не может закоммитить $[m', vn, sn]$, где $m \neq m'$ и $D(m) \neq D(m')$
- Если клиент получил результат, то никакой корректный узел не закоммитит другой результат
- Протокол в конце концов завершается (клиент получает результат)

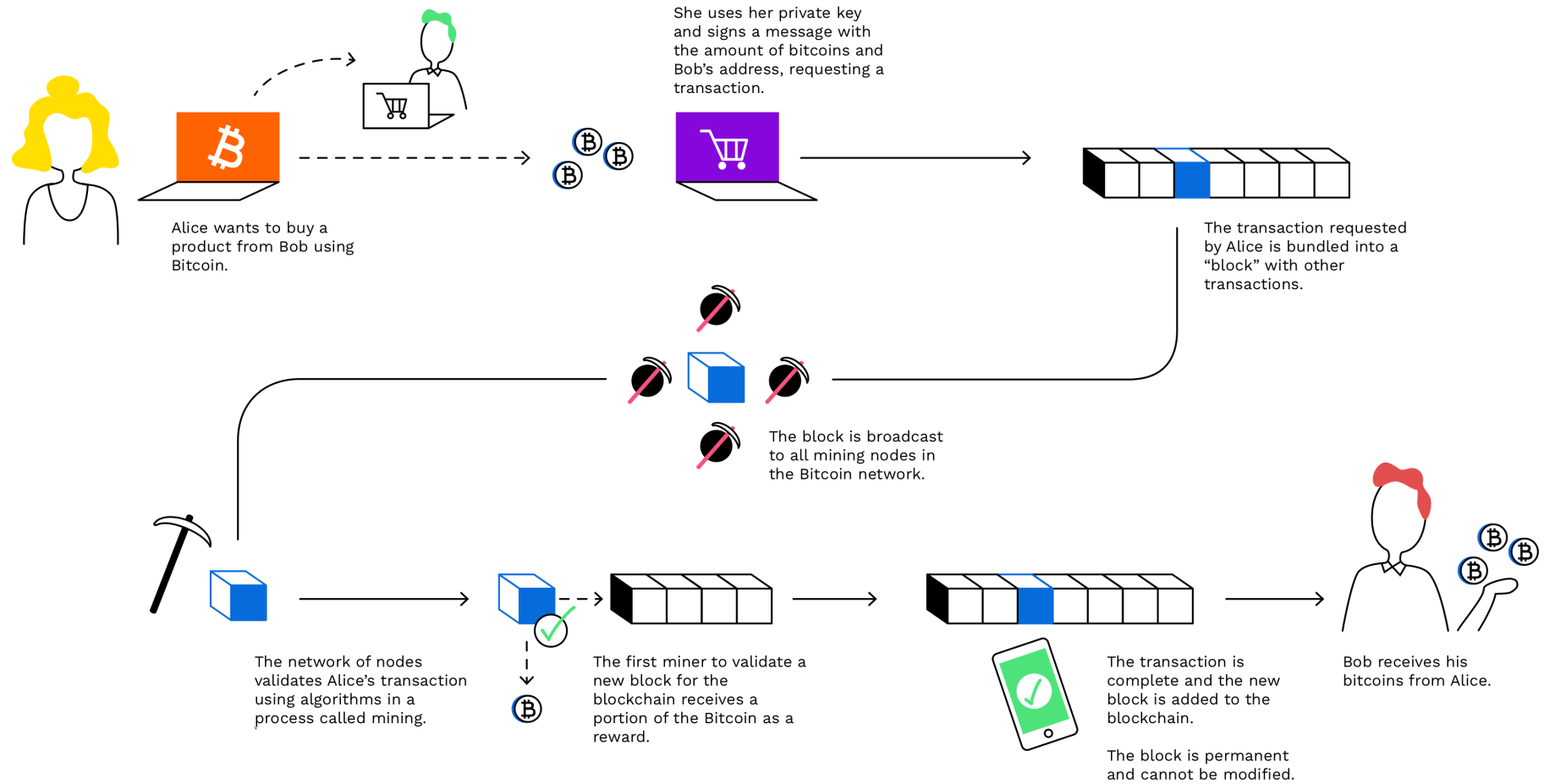
PBFT: Недостатки

- Отказавший главный узел может замедлить работу протокола
 - Игнорирует изначальный запрос клиента
 - Отправляет *pre-prepare* в ответ на повторный приход запроса от других узлов
- Низкая масштабируемость
 - Требуется $O(N^2)$ сообщений и full peering
- Не подходит для систем с открытым участием без изначального доверия
 - Самостоятельное подключение новых узлов
 - Защита от атаки Сивиллы (Sybil attack)

PBFT: Применение и развитие

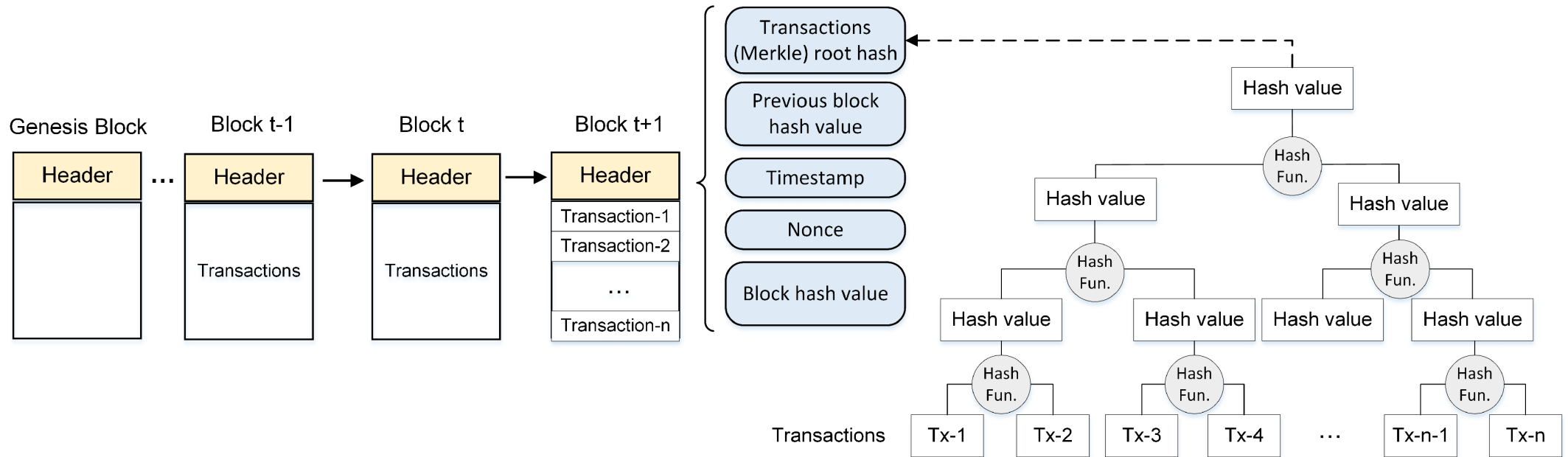
- Permissioned (private) blockchains
 - Hyperledger Sawtooth
- Другие протоколы
 - Zyzzyva, Tendermint, HotStuff, LibraBFT...

Bitcoin



Nakamoto S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system (2008)

Blockchain



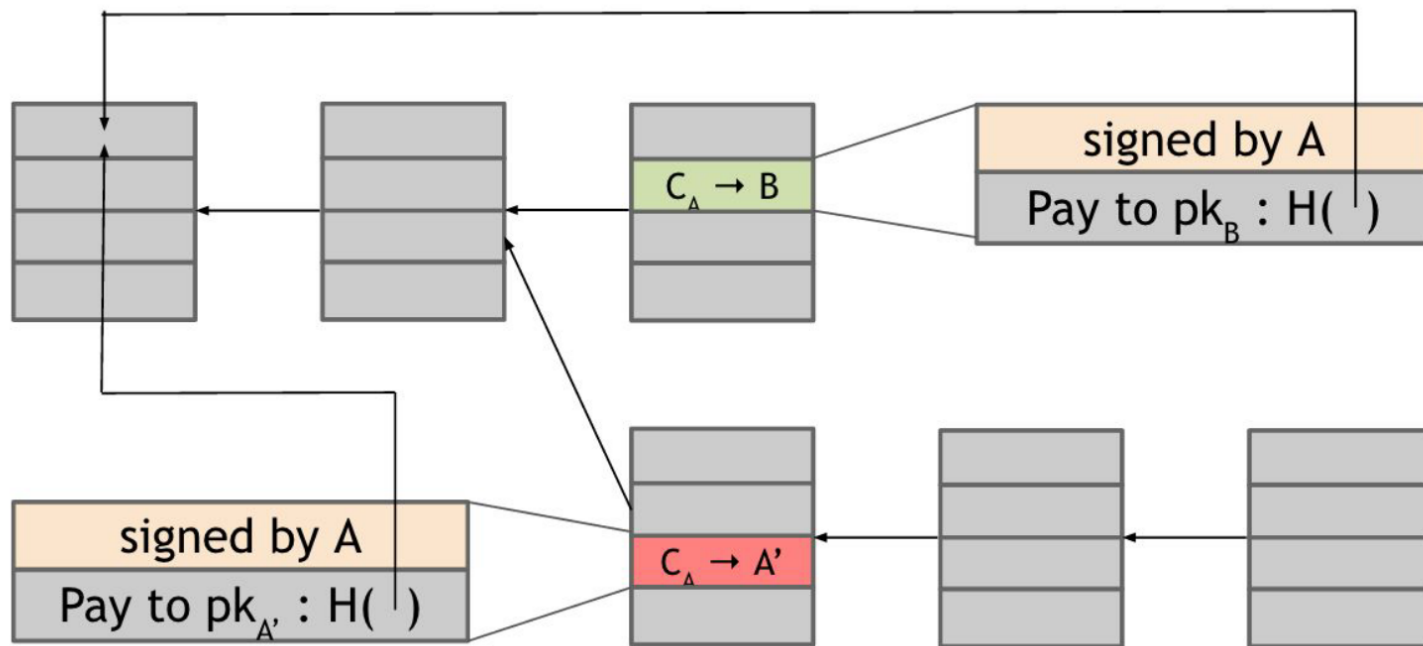
Связь с SMR и консенсусом

- State Machine Replication
 - Состояние - набор балансов счётов, блокчейн
 - Операции - транзакции между счётами, добавление блока
- Консенсус
 - Какие транзакции валидные и в каком порядке они выполнены
 - Какие блоки и в каком порядке включены в блокчейн
- Особенности
 - Децентрализованная система, нет регулирующего органа (authority)
 - Публичная система, каждый может подключиться, причем анонимно
 - Не все участники подключены друг к другу
 - Отсутствие взаимного доверия между участниками

Консенсус в Bitcoin

- Особенности
 - Рандомизация и вероятностные гарантии
 - Мотивация участников действовать честно путем вознаграждений в криптовалюте
- Базовый алгоритм
 - Новые транзакции рассылаются по всем узлам
 - Каждый узел собирает транзакции в новый блок
 - В каждом раунде выбирается *случайный* узел, который рассылает всем свой новый блок
 - Остальные узлы принимают блок, если все транзакции в нём валидны
 - Узлы подтверждают принятие блока путем включения его хеша в следующий создаваемый ими блок

Двойное расходование



Мотивация участников

- Наказать узел за то, что он создал "плохой" блок?
 - Нет, участники анонимны
- Поощрить узел за то, что он создал блок, попавший в стабильную ветвь блокчейна?
 - Да, у нас уже есть криптовалюта и её можно распределять анонимно
- Block reward
 - Создатель блока включает в него транзакцию с вознаграждением
 - Вознаграждение будет получено только, если блок попадет в стабильную ветвь
 - Сумма вознаграждения фиксированная и периодически уменьшается
- Transaction fee
 - Создатель транзакции может включить в неё "чаевые" за обработку

Как выбрать тот случайный узел?

- Требования
 - Создание блока не должно быть легким
 - Надо защититься от атаки Сивиллы
- Proof-of-work
 - Выбор узла пропорционально доступному его *владельцу* ресурсу (вычислительной мощности)
 - Для создания блока узел должен решить hash puzzle - найти значение *nonce*, такое что

$$H(\textit{nonce} || \textit{prev_hash} || tx_1 || tx_2 || ... || tx_i) < \textit{target}$$

- Значение *target* динамически подбирается так, чтобы среднее время между созданиями блоков было 10 минут
- Поиск решения hash puzzle вычислительно сложен, а проверка решения - нет

Литература

- van Steen M., Tanenbaum A.S. Distributed Systems: Principles and Paradigms. Pearson, 2017.
 - Consensus in faulty systems with arbitrary failures (глава 8)
- Coulouris G.F. et al. Distributed Systems: Concepts and Design (раздел 15.5)
- Narayanan A. et al. Bitcoin and Cryptocurrency Technologies (главы 1-2)

Дополнительно

- Упомянутые статьи
- Driscoll K. et al. Byzantine Fault Tolerance, from Theory to Reality. (2003)
- Narayanan A., Clark J. Bitcoin's Academic Pedigree
- Mickens J. The Saddest Moment