

Гибридная синхронизация времени в распределённых системах

Т. М. Татарникова

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

tm-tatarn@yandex.ru

Е. Д. Архипцев

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

lokargenia@gmail.com

Аннотация. Исследование посвящено применению фильтра Калмана для повышения точности синхронизации времени в распределённых облачных системах. В работе предложен адаптивный алгоритм, сочетающий классический протокол NTP с методом оптимальной оценки состояния, что позволяет эффективно подавлять сетевой джиттер и компенсировать дрейф часов. Исследование демонстрирует, что фильтр Калмана может стать экономичной альтернативой специализированным протоколам синхронизации (например, RTP) в средах с нестабильными сетевыми условиями.

Ключевые слова: синхронизация времени; фильтр Калмана; (Network Time Protocol; распределённые системы; алгоритмы оценки состояния; адаптивная фильтрация

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные распределённые системы: глобальные облачные платформы, Интернет вещей (IoT), блокчейн-инфраструктура – сталкиваются с проблемой согласованности данных и процессов в условиях децентрализованной асинхронной среды. Одной из основных проблем данного направления является синхронизация времени. Физические часы, основанные на таких протоколах, как NTP (Network Time Protocol) и RTP (Precision Time Protocol), страдают от сетевых задержек, джиттера и аппаратных погрешностей. Это делает их ненадежными в сценариях с жёсткими требованиями к детерминизму.

Попытки гибридизации этих подходов, такие как работы «Logical Physical Clocks and Consistent Snapshots in Globally Distributed Databases» [1] и «Time Synchronization in Industrial Internet of Things» [2], демонстрируют потенциал комбинирования физических и логических меток времени. Однако большинство существующих решений либо игнорируют стохастическую природу сетевых шумов, либо не обеспечивают динамической адаптации к изменяющимся условиям. Здесь на помощь приходит фильтр Калмана – математический аппарат, успешно применяемый в навигационных системах для оценки состояния через зашумленные измерения. Его интеграция с логическими часами открывает путь к созданию адаптивного механизма, который не только корректирует физическое время, учитывая статистические аномалии, но и сохраняет причинно-следственную целостность событий.

Классический NTP предполагает, что сетевые задержки симметричны и имеют нормальное распределение. На практике в средах с беспроводным доступом (Wi-Fi, сотовая связь) задержки группируются вокруг нескольких типичных значений из-за нестабильности среды. Пакеты могут «застревать» в очередях роутеров, создавая тяжелые хвосты в распределении. Алгоритмы, не учитывающие это (например, наивное усреднение), систематически ошибаются в оценке clock offset.

Протокол RTP использует фиксированные интервалы синхронизации и детерминированные коррекции. В сценариях с резким изменением сетевой нагрузки (например, flash-трафик в дата-центре) это приводит к «раскачиванию» часов: частые коррекции вводят высокочастотный шум, а редкие – допускают накопление ошибок.

Существующие решения (например, FTSP – Flooding Time Synchronization Protocol) используют линейную регрессию для коррекции часов, но не учитывают:

- Внезапные изменения частоты дискретизации (например, переход от измерения каждую секунду к режиму «каждые 100 мс» при аварийном перегреве).
- Коррелированные шумы (ошибки измерений, зависящие во времени).

Это приводит к «залипанию» синхронизации: протокол продолжает применять устаревшие коэффициенты коррекции, увеличивая расхождение часов.

II. АНАЛИЗ ОГРАНИЧЕНИЙ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ

NTP – наиболее распространённый протокол синхронизации времени, основанный на иерархии серверов (stratum) изображённую на рис. 1. Чем ниже stratum, тем ближе к эталонному источнику и (теоретически) выше точность. Серверы верхнего уровня (stratum 1) получают время напрямую от атомных часов или GPS, используя аппаратное соединение через спутник, телефонные модемы или радио. Для них характерны задержки до 1мс при использовании локального источника (встроенные GPS приёмники) и до 10мс при использовании удалённого источника (радио или интернет). Доступ к серверам первого уровня является ограниченным и предоставляется доверенным клиентам или в рамках

исследовательских или представительских сетей, поскольку имеют ограниченную пропускную способность. Серверы нижних уровней (stratum 2, stratum 3 и т. д.) в основном являются публичными и используют сетевое соединение. Stratum 2 опрашивают несколько stratum 1 для повышения точности и имеют погрешность до 50 мс.

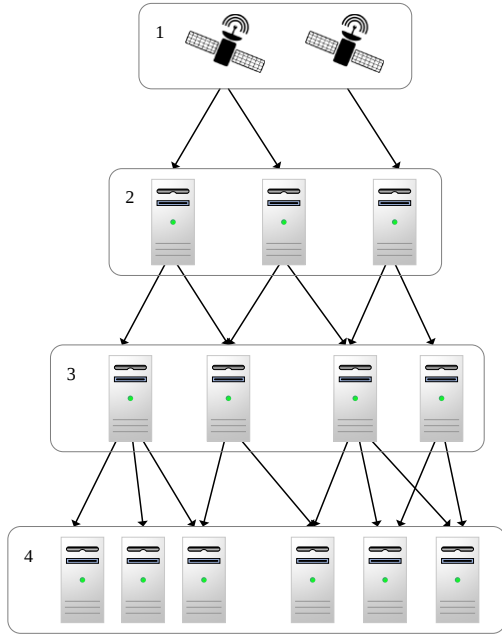


Рис. 1. Иерархия stratum серверов

В данном подходе выделяются 4 основные временные точки, изображенные рис. 2.

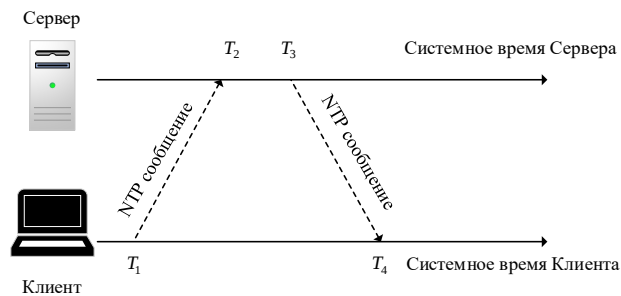


Рис. 2. Синхронизации времени между клиентом и сервером

- T_1 – время отправки запроса от клиента к серверу (по часам клиента).
- T_2 – время получения запроса сервером (по часам сервера)
- T_3 – время отправки ответа сервером (по часам сервера).
- T_4 – время получения ответа клиентом (по часам клиента).

На основе вышеописанных точек вычисляется задержка и смещение:

$$\begin{aligned} Delay &= (T_4 - T_1) - (T_3 - T_2); \\ Offset &= \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Для корректировки собственных часов пользователю необходимо добавить вычисленное смещение (1) к текущему времени:

$$NeTime = CurrentTime + Offset$$

Точность синхронизации напрямую зависит от симметричности задержек между клиентом и сервером. Если путь клиент → сервер и сервер → клиент имеют разную задержку (например, из-за перегрузки канала), формулы NTP дают некорректный offset.

Протокол точного времени (PTP), стандартизированный как IEEE 1588, представляет собой эволюционный шаг в синхронизации распределённых систем, ориентированный на среды, где требования к точности измеряются микро- и даже наносекундами. В отличие от NTP, опирающегося на программную коррекцию и иерархию серверов, PTP задействует аппаратную поддержку сетевых интерфейсов (например, маркировку временных меток на уровне PHY – Physical Layer Protocol), что позволяет минимизировать джиттер, вносимый операционными системами и стеками протоколов. Архитектура PTP предполагает динамический выбор «главных часов» (Grandmaster Clock) через алгоритмы Best Master Clock, обеспечивая автоматическое восстановление при отказах. Ключевым преимуществом протокола является механизм компенсации задержек: измерение времени прохождения пакетов (Peer Delay) между устройствами и учет асимметрии каналов через калибровку смещений. Это делает PTP незаменимым в промышленных системах управления, телекоммуникациях и высокочастотном трейдинге, где погрешность синхронизации свыше 1 мс неприемлема.

Основными недостатками протокола также является симметричные задержки. PTP предполагает, что задержки передачи данных в направлениях «master → slave» и «slave → master» идентичны. В последней версии стандарта в протокол были введены компенсации асимметричных задержек [3],[4]. Однако для этого необходимо использовать сторонние протоколы, оборудования и т. д. PTP не включает встроенной криптографической защиты, что дает возможность искусственно увеличивать время доставки пакетов или подделки сообщений для назначения ложного Grandmaster Clock [5].

HLC (Hybrid Logical Clocks) – это механизм синхронизации времени в распределённых системах, сочетающий физическое время с логическими счетчиками. HLC решает ключевые проблемы чисто физических (NTP, PTP) и логических часов (Lamport, Vector Clocks). Также обеспечивает как метрическую интерпретируемость, так и причинно-следственную согласованность событий. Часы Лампорта представляют собой счётчик, которые увеличивается при выполнении задачи или при получении сообщения с счётчиком от другого процесса. Он определяет частичный порядок со следующим правилом: если событие a произошло до b , то временная метка a меньше b :

$$TimeStamp(a) < TimeStamp(b).$$

Однако обратное не верно: для событий, которые не связаны причинно-следственной согласованностью (без

использовании коммуникации) нельзя выстроить временную зависимость.

Векторные часы – это расширение, которое вместо простого счетчика использует вектор счетчиков по одному на узел (рис. 3).

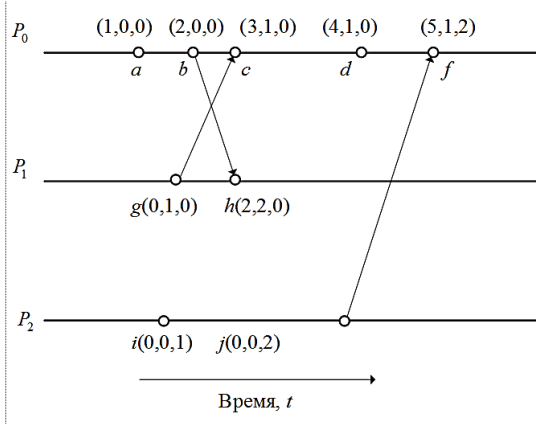


Рис. 3. Векторные часы

Векторные часы более продвинуты, чем часы Лампорта. Они способны определять параллельные события, что является полезным свойством из-за сетевых разделов. Недостатком является то, что они требуют хранения N часов, где N – число узлов в системе.

Каждый узел в системе поддерживает гибридную метку времени, состоящую из двух компонент: pt и l .

- Физическое время (pt): локальное время узла, синхронизированное с NTP или другим протоколом.
- Логический счётчик (l): инкрементируется при локальных событиях или для разрешения конфликтов.

При получении события на узле генерируется новая метка по следующему правилу:

$$pt_{New} = \max(pt_{Old}, pt_{Local});$$

$$l_{New} = pt_{Local} > pt_{Old} ? 0 : l_{Old} + 1,$$

где pt_{Local} – текущее физическое время узла (например, из NTP); (pt_{Old}, l_{Old}) – текущая метка HLC до обновления.

Перед отправкой сообщения необходимо сгенерировать новую метку HLC, как при локальном событии. Отправьте сообщение с меткой (pt_{New}, l_{New}) .

При получении сообщения на узле необходимо вычислить новую метку:

$$pt_{New} = \max(pt_{Current}, pt_{MSG}, pt_{Local});$$

$$l_{New} = pt_{MSG} = pt_{New} ? l_{MSG} + 1 : l_{Current} + 1,$$

где $(pt_{Current}, l_{Current})$ – текущая метка HLC на узле.

Данный механизм обеспечивает как синхронизацию с физическим временем, так и каузальную согласованность. Однако он также полагается на физическое время, которое может быть неточным из-за сбоя NTP или аппаратных ошибок [6].

Современные распределенные системы требуют синхронизации, которая одновременно обеспечивает метрическую точность, каузальную согласованность и устойчивость к динамическим сетевым условиям [7],[8]. Ни один из существующих протоколов – ни NTP, ни RTP, ни HLC – не решает эту задачу в полной мере. Однако комбинация их сильных сторон с адаптивными алгоритмами открывает путь к созданию гибридных моделей, способных компенсировать индивидуальные недостатки.

III. ФИЛЬТР КАЛМАНА

Одним из методов повышения точности синхронизации времени является использование фильтра Калмана – адаптивного алгоритма, позволяющего минимизировать шум измерений и предсказывать истинное значение временных меток. Данный метод основан на статистической обработке поступающих измерений и динамическом обновлении оценок с учетом априорной модели изменений времени.

Применение фильтра Калмана позволяет:

- Сглаживать вариации задержек передачи данных в NTP, минимизируя ошибки синхронизации.
- Корректировать временные метки RTP при резких изменениях мастер-часов.
- Обеспечивать устойчивость HLC к неточностям в измерениях физического времени.

A. Математическая модель фильтра Калмана

Фильтр Калмана опирается на две ключевые модели

- Модель процесса прогнозирования состояния):

$$x_k = F \times x_{k-1} + B \times u_k + w_k,$$

где x_k – вектор состояния (смещение часов и дрейф частоты); F – матрица перехода (модель эволюции состояния); u_k – управляющее воздействие (например, коррекция от NTP); $w_k \sim N(0, Q_k)$ – шум процесса.

- Моделью наблюдения (связывает состояние с измерениями):

$$z_k = H \times x_k + u_k$$

где z_k – измерение (разница между локальным и удаленным временем); H – матрица наблюдений; $u_k \sim N(0, Q_k)$ – шум измерений (джиттер сети).

B. Уравнения прогноза и коррекции

Фильтр Калмана реализует итеративный процесс, состоящий из двух ключевых этапов: прогноза (предсказания состояния системы на основе модели) и коррекции (уточнения предсказания с использованием новых измерений). Эти этапы образуют замкнутый

цикл, позволяющий адаптивно балансировать между доверием к модели и поступающим данным.

Для коррекции можно воспользоваться следующими формулами, где K_k – коэффициент Калмана, $\hat{x}_k$ – апостериорная оценка состояния, P_k – апостериорная ковариация ошибки:

$$K_k = P_k \times H^T \times (H \times P_k \times H^T + R)^{-1};$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K_k \times (z_k - H \times \hat{x}_{k-1});$$

$$P_k = (I - K_k \times H) \times P_{k-1}.$$

С. Адаптация к синхронизации времени

Для синхронизации часов вектор состояния x обычно включает *смещение часов* – разница между локальным и эталонным временем, *дрейф частоты* – линейное изменение смещения со временем (например, ppm кварцевого генератора).

Модель процесса для часов:

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, Q_k = \begin{bmatrix} \sigma_{Offset}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{Drift}^2 \end{bmatrix}$$

где Δt – интервал между измерениями; σ_{Offset}^2 , σ_{Drift}^2 – дисперсии шумов смещения и дрейфа.

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Применение фильтра Калмана в сочетании с классическими протоколами синхронизации демонстрирует значительное улучшение стабильности и точности временных меток в распределённых системах.

Для эксперимента было использовано 8 виртуальных вычислительных машин с синхронизацией через NTP. В дополнение к этому на каждом сервере генерировалась нагрузка в виде постоянных HTTP запросов. На каждой машине использовался фильтр Калмана со следующими параметрами:

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, Q_k = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 \\ 0 & 0,01 \end{bmatrix}$$

Без использования фильтра среднеквадратическое отклонение (RMS) джиттера составило 12.3 мс. Также были случаи, при которых пиковые задержки достигали 127 мс.

При использовании фильтра (рис. 4), удалось снизить джиттер на 74 %, а пиковые нагрузки с 127 мс до 8 мс.

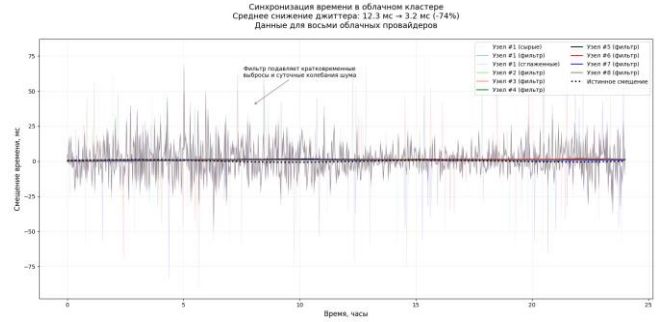


Рис. 4. Синхронизация времени в облачном кластере

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперимент подтверждает, что фильтр Калмана – эффективный инструмент для борьбы с джиттером в NTP-сетях. При помощи него удалось снизить среднюю задержку со 12.3 мс до 3.2 мс. Внедрение метода в облачные инфраструктуры может стать «золотым стандартом» для задач, где важна балансировка между точностью и вычислительными затратами. Дальнейшие исследования стоит направить на создание самообучающихся алгоритмов для динамических сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kulkarni S.S. et al. Logical physical clocks // Principles of Distributed Systems: 18th International Conference, OPODIS 2014, Cortina d'Ampezzo, Italy, December 16-19, 2014. Springer International Publishing, 2014. С. 17-32.
- [2] Zhou K., Wang X., Cui S. Time Synchronization in Industrial Internet of Things: A Survey // 2024 IEEE 7th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). 2024. Т. 7. С. 506-510.
- [3] Exel R. Mitigation of asymmetric link delays in IEEE 1588 clock synchronization systems // IEEE Communications Letters. 2014. Т. 18. №. 3. С. 507-510.
- [4] Mallela C., Tholu K., Bordogna M. Timing models for PTP in Ethernet networks // 2017 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control, and Communication (ISPCCS). 2017. С. 1-6.
- [5] Finkenzeller A. et al. PTPsec: Securing the Precision Time Protocol Against Time Delay Attacks Using Cyclic Path Asymmetry Analysis // IEEE INFOCOM 2024-IEEE Conference on Computer Communications. 2024. С. 461-470.
- [6] Татарникова Т.М., Архипцев Е.Д. Проектирование отказоустойчивых систем с микросервисной архитектурой // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2024. Т. 1. С. 451-455.
- [7] Татарникова Т.М., Архипцев Е.Д., Кармановский Н.С. Определение размера кластера и числа реплик высоконагруженных информационных систем // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2023. Т. 66. № 8. С. 646-651. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-646-651.
- [8] Татарникова Т.М., Архипцев Е.Д. Определение числа реплик распределенного хранения больших данных // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2023. Т. 1. С. 305-308.