

Синхронизация в распределенных системах на базе фильтра Калмана

Synchronization in distributed systems based on the Kalman filter

Татарникова / Tatarnikova T.

Татьяна Михайловна

(tm-tatarn@yandex.ru)

доктор технических наук, профессор.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский

государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП),

директор института информационных технологий и программирования.

г. Санкт-Петербург

Архипцев / Arhiptsev E.

Евгений Дмитриевич

(lokargenia@gmail.com)

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

им. В. И. Ульянова (Ленина),

аспирант кафедры информационных систем.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: синхронизация времени – time synchronization; фильтр Калмана – Kalman filter; NTP (Network Time Protocol); распределенные системы – distributed systems; алгоритмы оценки состояния – state estimation algorithms; адаптивная фильтрация – adaptive filtering.

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, PTP) в средах с нестабильными сетевыми условиями.

The study is devoted to the use of the Kalman filter to improve the accuracy of time synchronization in distributed cloud systems. The paper proposes an adaptive algorithm that combines the classic NTP protocol with the optimal state estimation method, which allows for effective suppression of network jitter and compensation for clock drift. The study demonstrates, that the Kalman filter can become a cost-effective alternative to specialized synchronization protocols (e. g., PTP) in environments with unstable network conditions.

Введение

В распределенных системах, таких как глобальные облачные платформы, Интернет вещей (IoT), блокчейн-инфраструктура остается актуальной проблема согласованности данных и процессов в условиях децентрализованной асинхронной среды [1–3].

Одной из основных задач в этом направлении является синхронизация времени, и чем выше нагрузка на систему, тем сложнее обеспечивать решение данной задачи. Методы и протоколы синхронизации для распределенных систем должны одновременно обеспечивать метрическую точность, каузальную согласованность и устойчивость к динамическим сетевым условиям [4, 5].

Метрическая точность – это точность измерения физического времени на всех узлах распределенной системы.

Каузальная согласованность – это модель согласованности, которая отражает потенциальные причинно-следственные связи между операциями и гарантирует, что все процессы соблюдают их в общем порядке. Например в мессенджерах каузальная согласованность позволяет избежать неверного отображения сообщений и изменений, то есть случаев, когда ответ на сообщение может появиться раньше оригинального, если узлы не синхронизированы по времени [6].

Устойчивость к динамическим сетевым условиям – это способность сети возвращаться в свое синхронное состояние после того, как она столкнулась с помехами [7].

Синхронизация в распределенных системах основана на таких протоколах, как NTP (Network Time Protocol) – синхронизация Клиента и Сервера, и PTP (Precision Time Protocol) – синхронизация в локальных сетях. С появлением распределенных систем обработки и доставки больших данных на синхронизацию времени стали влиять сетевые задержки, джиттер и аппаратные погрешности [8].

Таким образом, применение этих протоколов становится ненадежным в сценариях с жесткими требованиями к синхронизации времени.

Попытки гибридизации подходов к синхронизации времени по протоколам NTP и PTP обсуждались в работах [8] и [9], по результатам которых можно сделать вывод о потенциале комбинирования физических и логических меток времени, например механизм HLC (Hybrid Logical Clocks), сочетающий физическое время с логическими счетчиками. Однако предлагаемые решения не обеспечивают динамическую адаптацию к изменяющимся условиям, а стохастическая природа сетевых шумов игнорируется.

В статье предлагается гибридный метод синхронизации времени: фильтр Калмана в интеграции с логическими часами.

Анализ ограничений современных подходов синхронизации времени

NTP – наиболее распространённый протокол синхронизации времени, основанный на иерархии серверов точного времени – Stratum, изображенной на рис. 1.

Чем ниже уровень сервера Stratum, тем он ближе к эталонному источнику и 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 1 мс при использовании локального источника – встроенных GPS-приёмников, и до 10 мс при использовании удалённого источника – радио или интернета. Доступ к Stratum 1 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. Серверы уровня Stratum 2 опрашивают несколько серверов уровня Stratum 1 для повышения точности и имеют погрешность до 50 мс [10].

В работе протокола NTP выделяются 4 основные временные точки, изображенные рис. 2.

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).

Задержка *Delay* и смещение *Offset* вычисляются следующим образом [11]:

$$Delay = (T_4 - T_1) - (T_3 - T_2);$$

$$Offset = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2}.$$

Для корректировки собственных часов клиенту необходимо добавить вычисленное *Offset* к текущему времени: $NewTime = CurrentTime + Offset$.

Работа протокола NTP основана на предположении о том, что сетевые задержки симметричны и имеют

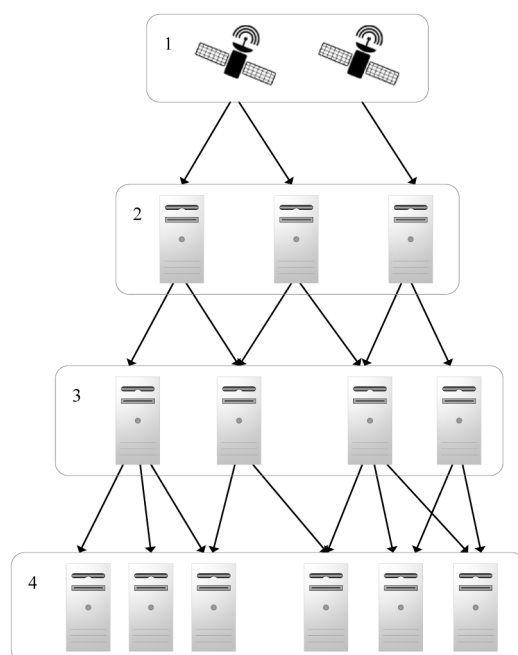


Рис. 1. Иерархия Stratum-серверов

нормальное распределение. Если путь «Клиент→Сервер» и «Сервер→Клиент» имеют разную задержку (асимметрию каналов), то протокол NTP определит некорректное значение смещения. На практике так и получается. Например в средах с беспроводным доступом WI-FI или сотовой связи задержки группируются вокруг нескольких типичных значений из-за нестабильности среды. Пакеты ожидают в очередях роутеров, создавая тяжелые хвосты в распределение сетевой задержки. Таким образом, работа протокола NTP в сетях подобного типа систематически ошибается в оценке *Offset*.

В протоколе точного времени PTP, известного как стандарт IEEE 1588, задействована аппаратная поддержка сетевых интерфейсов, например, маркировка временных меток на физическом уровне взаимодействия PHY (Physical Layer Protocol). Алгоритм работы протокола PTP предполагает динамический выбор Grandmaster Clock – основного источника точного времени среди серверов, отправивших временные метки. Это позволяет минимизировать джиттер, вносимый операционными системами и стеками протоколов, а также обеспечивает автоматическое восстановление при отказах.

Основными недостатками протокола PTP является предположение о симметричности задержек в направлениях «Ведущий→Ведомый» и «Ведомый→Ведущий» и фиксированный интервал синхронизации. Правда в последней версии стандарта в протокол введены компенсации асимметричных задержек [12] через калибровку смещений, но для этого необходимо использовать сторонние протоколы, оборудование и т. д. Фиксированные интервалы синхронизации в сценариях с резким изменением сетевой нагрузки, например, flash-трафик в дата-центре приводит к «раскачиванию» часов – частые коррекции вводят высокочастотный шум, а редкие – приводят к накоплению ошибок [13]. Также немаловажным является отсутствие встроенной криптографической защиты в протоколе PTP, что дает возможность злоумышленнику искусственно увеличивать время доставки пакетов или фальсифицировать сооб-

щения для назначения ложного Grandmaster Clock [14]. Тем не менее, наличие механизма компенсации задержек является основным преимуществом протокола PTP, что делает его незаменимым в промышленных системах управления, телекоммуникациях и высокочастотном трейдинге, где погрешность синхронизации свыше 1 мс неприемлема.

Механизм HLC синхронизации времени в распределенных системах сочетает физическое время с логическими часами Лампорта и векторными часами. Механизм обеспечивает не только метрическую интерпретируемость, но и причинно-следственную согласованность событий [15].

Часы Лампорта представляют собой счетчик, который увеличивается при выполнении задачи или получении сообщения со счетчиком от другого процесса. Порядок изменения счетчика подчиняется правилу: если событие a произошло до b , то временная метка a меньше b : $TimeStamp(a) < TimeStamp(b)$. Однако обратное утверждение неверно, поскольку для событий без детерминистской связи нельзя выстроить временную зависимость. Например, событие a отправляет сообщение, а событие b получает это сообщение, то есть $a \rightarrow b$, можно сказать, что событие a произошло раньше события b . Предположим, что еще одно событие c произошло раньше b и было отправлено сообщение $c \rightarrow d$, сообщение о событии d получено после события a , то есть событие c , как и событие a , произошло раньше события d . Основываясь на алгоритме Лампорта, невозможно определить какие-либо связи между событиями a и c . Все, что известно – это и $a \rightarrow d$, и $c \rightarrow b$, но не понятно, $a \rightarrow c$ или $c \rightarrow a$.

Векторные часы – это расширение, которое вместо простого счетчика использует вектор счетчиков по одному на узел. Приведенный пример на рис. 3 иллюстрирует механизм векторных часов: размер вектора равен трем, стрелки показывают передачу значений векторов между процессами P_1, P_2, P_3 , векторные часы обновляются после выполнения внутренних событий $a, b, \dots, j$.

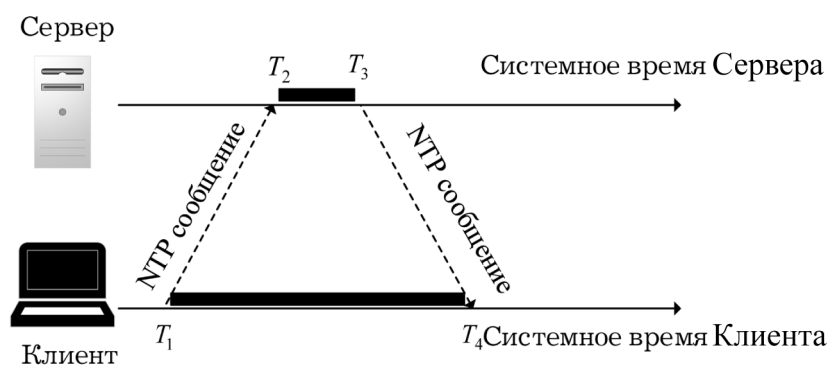


Рис. 2. Синхронизации времени между клиентом и сервером

Векторные часы способны определять параллельные события, что является важным свойством для распределенных систем [16]. 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:

- физическое время (pt): локальное время узла, синхронизированное с NTP или другим протоколом;
- логический счетчик (lc): счетчик, который необходим для регистрации локальных событий или для разрешения конфликтов.

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

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

$$lc_{New} = lc_{Old} + 1, \text{ при } pt_{Local} > pt_{Old},$$

где pt_{Local} – текущее физическое время узла, полученное из пакета NTP;

(pt_{Old}, lc_{Old}) – текущая метка HLC до обновления.

Перед отправкой сообщения генерируется новая метка HLC, как при локальном событии. На узел отправляется сообщение с меткой (pt_{New}, lc_{New}) . При получении сообщения на узле вычисляется новая метка:

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

$$lc_{New} = lc_{Current} + 1, lc_{MSG} + 1, \text{ при } pt_{MSG} = pt_{New},$$

где $(pt_{Current}, lc_{Current})$ – текущая метка HLC на принимающем узле;

(pt_{MSG}, lc_{MSG}) – физическая метка, извлекаемая из полученного сообщения.

Таким образом, механизм HLC обеспечивает синхронизацию с физическим временем и каузальную согла-

сованность. Но поскольку механизм HLC основан на физическом времени, которое может быть неточным из-за сбоя NTP или аппаратных ошибок, то метрическая точность не гарантируется.

Как показывает анализ, ни один из существующих протоколов – NTP, RTP, HLC – не решает эту задачу синхронизации в полной мере. Однако комбинация их сильных сторон с адаптивными алгоритмами позволяет создавать гибридные модели, способные компенсировать индивидуальные недостатки. Одно из таких решений – комбинация фильтра Калмана и логических часов.

Решение о синхронизации на основе фильтра Калмана

Для повышения точности синхронизации времени применим фильтр Калмана – адаптивный алгоритм, позволяющий 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.

Фильтр Калмана опирается на две ключевые модели:

- 1) Модель процесса прогнозирования состояния:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{F} \times \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B} \times \mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{w}_k,$$

где $\mathbf{x}_k$ – вектор состояния (смещение часов и дрейф частоты);

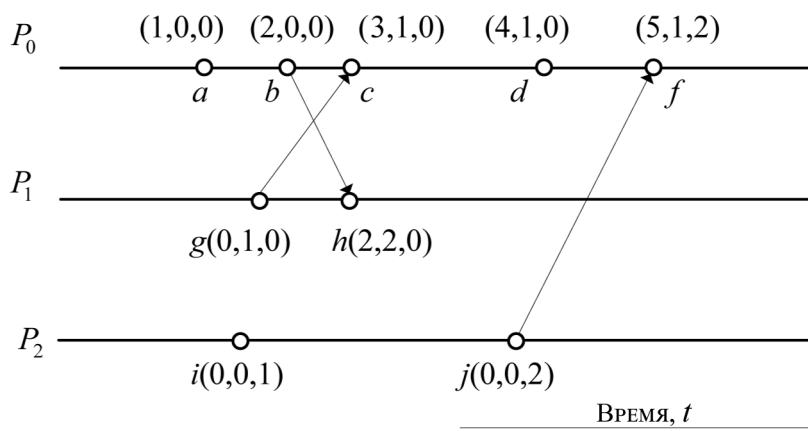


Рис. 3. Векторные часы

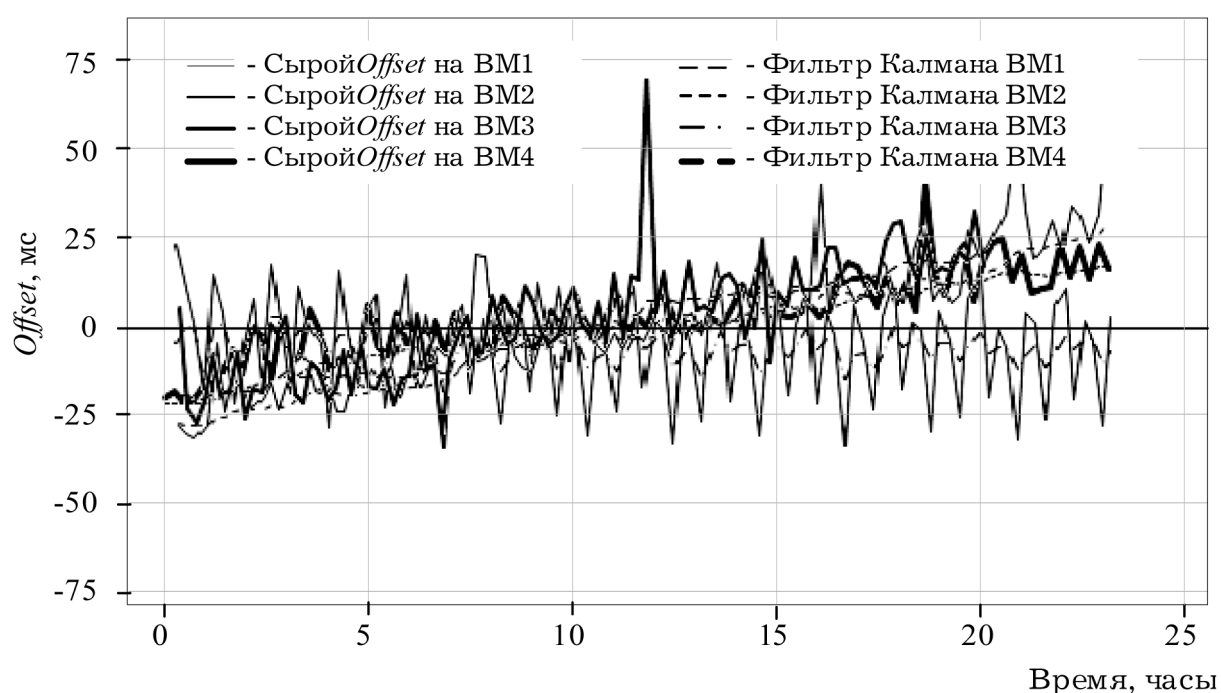


Рис. 4. Синхронизация времени в облачном кластере

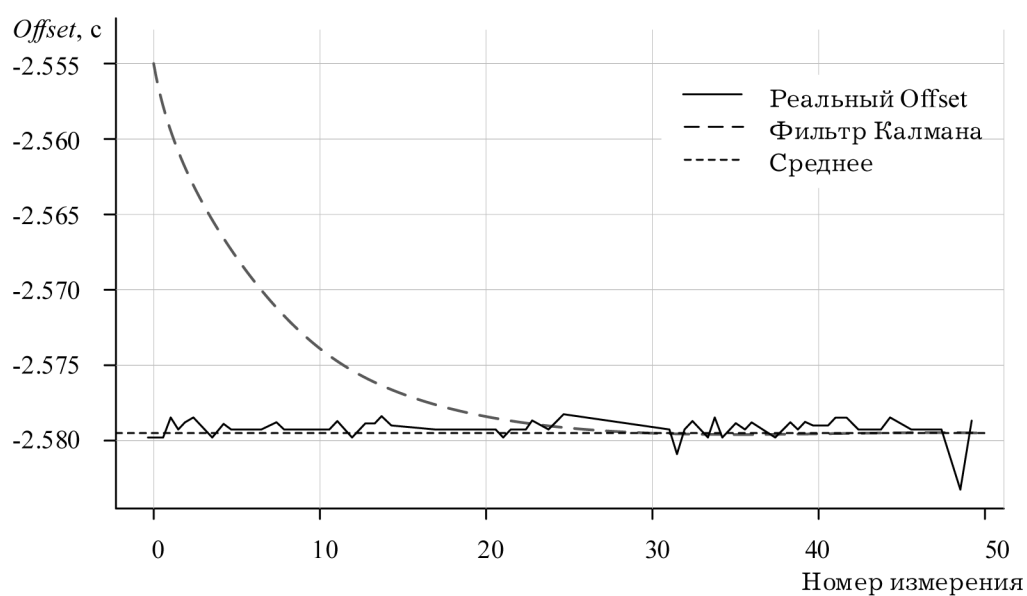


Рис. 5. Определение смещения Offset по алгоритму протокола NTP и по комбинации фильтра Калмана и логических часов

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \text{матрица перехода (модель эволюции}$$

состояния), Δt – интервал дискретизации;

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \Delta t \\ 1 \end{bmatrix} - \text{матрица применения управляющего}$$

воздействия;

$\mathbf{u}_{k-1}$ – управляющее воздействие (например, коррекция от NTP);

$\mathbf{w}_k \sim N(0, \mathbf{Q}_k)$ – шум процесса

$$\mathbf{Q}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_k \times \mathbf{w}_k^T & 0 \\ 0 & \sigma_{Drift}^2 \end{bmatrix},$$

где $\sigma_{Offset}^2, \sigma_{Drift}^2$ – дисперсии шумов смещения и дрейфа частоты.

Для синхронизации часов вектор состояния $\mathbf{x}$ обычно включает смещение часов – разницу между локальным и эталонным временем, дрейф частоты – линейное изменение смещения со временем, например ppm (Parts Per Million – количество миллионных частей от какой-то средней величины) кварцевого генератора.

2) Модель наблюдения, которая связывает состояние с измерениями:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H} \times \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k,$$

где $\mathbf{z}_k$ – измерение (разница между локальным и эталонным временем);

$\mathbf{H}$ – матрица наблюдений;

$\mathbf{v}_k$ – шум измерений (джиттер сети), представляется ковариационной матрицей $\mathbf{R}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_k \times \mathbf{v}_k^T \end{bmatrix}$.

Фильтр Калмана реализует итеративный процесс, состоящий из двух основных 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:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k \times \mathbf{H}^T \times (\mathbf{H} \times \mathbf{P}_k \times \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_k)^{-1},$$

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{x}_k^- + \mathbf{K}_k \times (\mathbf{z}_k - \mathbf{H} \times \mathbf{x}_k^-),$$

$$\mathbf{P}_k = \left[(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_k^-) \times (\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_k^-)^T \right],$$

где $\mathbf{K}_k$ – коэффициент Калмана (коэффициент усиления фильтра);

$\mathbf{P}_k$ – матрица ковариации предсказываемой ошибки оценивания;

$\mathbf{x}_k^-$ – вектор предсказываемой оценки состояния;

$\mathbf{P}_k$ – матрица ковариации ошибки оценивания.

Модель процесса для часов:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{Q}_k = \begin{bmatrix} \sigma_{Offset}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{Drift}^2 \end{bmatrix}$$

В эксперименте участвовали 4 виртуальные машины (ВМ) 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:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{Q}_k = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 \\ 0 & 0,01 \end{bmatrix}.$$

Без использования фильтра среднее квадратическое отклонение джиттера составило 12,3 мс, с фильтром Калмана – 3,2 мс. При использовании фильтра Калмана удалось снизить среднее квадратическое отклонение джиттера на 74 %, а пиковые нагрузки – со 127 мс до 8 мс (рис. 4).

На рис. 5 приведен график, демонстрирующий определение смещения *Offset* по алгоритму протокола NTP и по комбинации фильтра Калмана и логических часов. Очевидны всплески в значениях сырого (не обработанного) *Offset* и усреднение *Offset*, в таком случае протокол NTP приводит к определению некорректного значения смещения.

Заключение

Интеграция фильтра Калмана в протоколы синхронизации времени, такие как NTP или PTP, обеспечивает существенное повышение точности временных меток в распределённых системах за счёт принципиально иного подхода к обработке неопределённостей, присущих сетевым взаимодействиям. Ключевое преимущество заключается в способности алгоритма Калмана декомпозировать полезный сигнал на основе стохастической модели, что невозможно в рамках детерминированных методов коррекции, используемых стандартными протоколами.

Эксперимент подтверждает, что фильтр Калмана – эффективный инструмент для борьбы с джиттером в NTP-сетях. Внедрение метода в облачные инфраструктуры может стать решением для задач, где важна балансировка между точностью и каузальной согласованностью.

Литература

1. Ёсу, М. Т. Принципы организации распределённых баз данных / М.Т. Ёсу, П.Е. Вальдурис ; пер. с англ. А.А. Слинкина. – Москва : ДМК Пресс, 2021. – 672 с.
2. Clock synchronization in industrial Internet of Things and potential works in precision time protocol: Review, challenges and future directions / K. Balakrishnan, R. Dhanalakshmi, B.B. Sinha, R. Gopalakrishnan // International Journal of Cognitive Computing in Engineering. – 2023. – Vol. 4. – P. 205–219.

3. A queuing theory model for cloud computing / J. Vilaplana, F. Solsona, I. Teixidy [et al.] // The Journal of Supercomputing. – 2014. – Vol. 69 (1). – P. 492–507.
4. Татарникова, Т. М. Проектирование отказоустойчивых систем с микросервисной архитектурой / Т.М. Татарникова, Е.Д. Архипцев // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2024. – Т. 1. – С. 451–455.
5. Фунг, В. К. Задержки и надежность обслуживания запросов в виртуальном компьютерном кластере / В.К. Фунг, В.А. Богатырев // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2024. – № 68. – С. 48–58.
6. Elbushra, M. M. Causal consistent databases / M.M. Elbushra, J. Lindström // Open Journal of Databases. – 2015. – Vol. 2, No.1. – P. 17–35.
7. Татарникова, Т. М. Определение размера кластера и числа реплик высоконагруженных информационных систем / Т.М. Татарникова, Е.Д. Архипцев, Н.С. Кармановский // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2023. – Т. 66, № 8. – С. 646–651.
8. Logical physical clocks / S.S. Kulkarni, M. Demirbas, D. Madappa [et al.] // Principles of Distributed Systems: 18th International Conference. – 2014. – P. 17–32.
9. Zhou, K. Time Synchronization in Industrial Internet of Things: A Survey / K. Zhou, X. Wang, S. Cui // IEEE 7th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). – 2024. – Т. 7. – P. 506–510.
10. Воронин, В. В. Уязвимость NTP-протокола: анализ происшествий и стратегия безопасности / В.В. Воронин, А.В. Землянухина, А.А. Репецкий // Вестник ТОГУ. – 2025. – № 1 (76). – С. 49–58.
11. Exel, R. Mitigation of asymmetric link delays in IEEE 1588 clock synchronization systems / R. Exel // IEEE Communications Letters. – 2014. – Т. 18, No. 3. – P. 507–510.
12. Батенков, К. А. Подстройка параметров времени для сетевых устройств с помощью протокола синхронизации Р Т Р (Precision Time Protocol) / К.А. Батенков, Е.А. Цидин // Инфокоммуникационные технологии: актуальные вопросы цифровой экономики : сборник научных трудов I Международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 2021). – 2021. – С. 90–95.
13. Mallela, C. Timing models for PTP in Ethernet networks / C. Mallela, K. Tholu, M. Bordogna // 2017 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control, and Communication (ISPCS). – 2017. – P. 1–6.
14. PTPsec: Securing the Precision Time Protocol Against Time Delay Attacks Using Cyclic Path Asymmetry Analysis / A. Finkenzeller, O. Butowski, E. Regnath [et al.] // IEEE INFOCOM 2024-IEEE Conference on Computer Communications. – 2024. – P. 461–470.
15. Поляков, В. Б. Средства обеспечения временной синхронизации данных и процессов в системах интернет вещей на уровне устройств и их классификация / В.Б. Поляков, Н.В. Аксёнов, М.В. Сергеев // Альманах современной метрологии. – 2019. – № 4 (20). – С. 40–53.
16. Bogatyrev, V. A. The model of reliability of dublated real-time computers for cyber-physical systems / V.A. Bogatyrev, A.N. Derkach, S.M. Aleksankov // Studies in Systems, Decision and Control. – 2020. – Vol. 260. – P. 11–21.