

ПРОБЛЕМИ СИНХРОНІЗАЦІЇ ГОДИННИКІВ ТА РОБОТИ РОЗПОДІЛЕНИХ ДОДАТКІВ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Максимова Ю. А., Максимов А.Л.

Одеський національний університет імені І.І.Мечнікова

Синхронізація годинників в розподілених системах вже довгий час залишається актуальним завданням, незважаючи на використання відомих протоколів синхронізації, таких як NTP, RTP та багатьох їх аналогів [1].

Хоча існують протоколи для точної синхронізації часу, їх використання у веб-додатках ускладнюється через обмеження браузера та відсутність підтримки в стандартних мережевих протоколах, які використовуються для веб-комунікацій. На відміну від NTP чи RTP, протоколи HTTP та WebSocket не мають вбудованих механізмів вимірювання та компенсації асиметрії каналів передачі даних. Вони покладаються на нижчі рівні моделі OSI (наприклад, TCP) для забезпечення надійної доставки даних.

Синхронізація годинників має обмеження в точності. Це пов'язано з фізичними обмеженнями, такими як швидкість світла та затримки в мережевих компонентах. Однак, критичну роль у досягненні максимально можливої точності синхронізації відіграє симетрія каналу зв'язку.

Базовий механізм синхронізації годинників, який описаний в IEEE 1588 [3], може бути узагальнений до наступної формули:

$$\theta_0 = \frac{(T_1 - \tau_0) + (T_2 - \tau_3)}{2} \quad (1)$$

де

τ_0 - часова позначка клієнта про передачу пакета запиту,

T_1 - часова позначка сервера прийому пакета запиту,

T_2 - часова позначка сервера відповідного пакета,

τ_3 - часова позначка клієнта про прийом пакету у відповідь рис. 1.

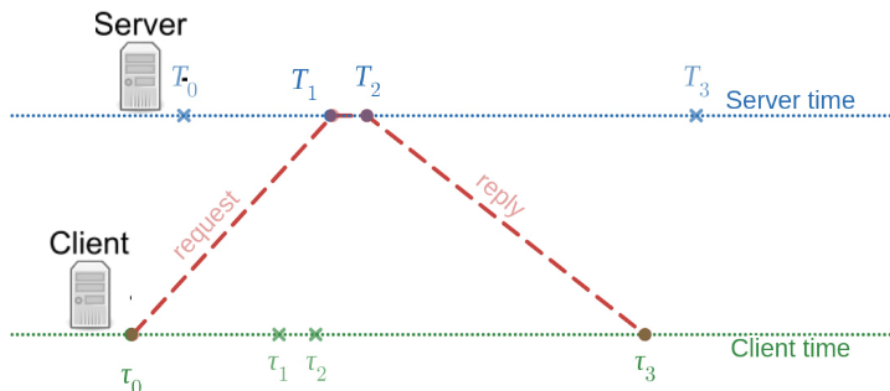


Рис. 1 Базовий обмін повідомленнями для синхронізації годинників

У роботі [2] представлені фундаментальні обмеження на точність розв'язання цього завдання у разі детермінованої (афінної) моделі комп'ютерного годинника і каналів передачі даних без варіації часу передачі сигналів, проте з невідомою асиметрією та заздалегідь невідомим часом поширення. Ці обмеження не дають можливості забезпечувати хорошу якість синхронізації без наявності у вузлах мережі високоточних (атомних) годинників або обладнання з аналогічними функціями. Однак, за наявності апріорної інформації про тип стабільного каналу зв'язку та його мінімальної і максимальної довжини, або інформації про коефіцієнт асиметрії каналу ξ , отриманої шляхом досліджень реальних каналів передачі даних, можна значно збільшити точність синхронізації. Початкова оцінка помилки синхронізації:

$$\text{Err} = |\Delta/2|$$

може бути покращена до

$$\text{err} = |(\xi-1)/(\xi+1)| |\Delta/2| \quad (2)$$

де

Δ - кругова затримка розповсюдження сигналу в каналі,

ξ - коефіцієнт асиметрії каналу, що розглядається як відношення часу прямого поширення сигналу, до часу зворотного.

Доказ:

Припустимо, що ми маємо дві затримки: пряму δ_f і зворотну δ_b . Якщо ми припускаємо, що вони симетричні, то ми припускаємо, що $\delta_f = \delta_b = \frac{\Delta}{2}$, де Δ - це загальна затримка.

Але в реальності ці затримки можуть бути асиметричними. Тоді ми можемо визначити коефіцієнт асиметрії $\xi_a = \frac{\delta_f}{\delta_b}$.

Тепер розглянемо помилку $|\delta\theta| = |\theta_0 - \theta|$. Якщо ми використовуємо формулу (1) для оцінки θ_0 то ми отримуємо $\theta_0 = \frac{\Delta}{2} = \frac{\delta_f + \delta_b}{2}$. Але якщо затримки асиметричні, то реальне значення θ буде відрізнятися. Ми можемо визначити $\delta_f = \xi_a \cdot \delta_b = \xi_a \cdot \frac{\Delta}{\xi_a + 1}$.

Тоді максимальна помилка буде $|\delta\theta| = |\theta_0 - \theta| = \left| \frac{\Delta}{2} - \frac{\xi_a \cdot \Delta}{\xi_a + 1} \right| = \frac{1}{2} \left| \frac{\xi_a - 1}{\xi_a + 1} \right| \Delta$. (4)

Наприклад, якщо для волоконно-оптичних каналів виміряний коефіцієнт асиметрії $\xi=0.9$ і ми синхронізуємо годинник у протилежних точках земної кулі з круговою затримкою розповсюдження сигналу $\Delta=200$ мілісекунд, можна поліпшити песимістичну похибку синхронізації, рівну

100 мілісекундам, до 5 мілісекунд. Таким чином, якщо існує можливість отримання явної інформації про асиметрію каналу або її неявного обчислення по геодам вузлів, гістограм затримок, встановленого точного обладнання та можливими системами машинного навчання за цими даними, можна виконувати синхронізацію годинників в глобальних мережах з субмілісекундною точністю. Ще більш радикальним кроком у цьому напрямі є вдосконалення протоколів та обладнання маршрутизації в мережі інтернет, таке, що у кожному пакеті передачі даних має існувати поле часу передачі пакета, інформація у якому оновлюється від вузла до вузла. При цьому кожна лінія зв'язку повинна мати точну характеристику часу передачі його медіа, і ця інформація повинна бути доступна маршрутизаторам.

Однак, навіть точне розв'язання задачі синхронізації годинника у вузлах мережі не вирішує завдання синхронізації роботи розподілених додатків реального часу. Ось кілька прикладів типів програм у реальному часі, які потребують синхронізованої координації:

1) Розподілені системи управління: у промисловій автоматизації та системах управління. Приклади включають системи керування електростанціями, виробничі складальні лінії та системи керування рухом. Синхронізована координація забезпечує спільну дію різних компонентів системи в потрібний час, запобігаючи конфліктам і забезпечуючи безперебійну роботу.

2) Спільне редагування в режимі реального часу: програми, які дозволяють кільком користувачам спільно редагувати документ або працювати над проектом у режимі реального часу, вимагають синхронізованої координації. Приклади включають платформи для спільної розробки програмного забезпечення. Механізми синхронізації гарантують, що зміни, внесені різними користувачами, застосовуються в правильному порядку та є видимими для всіх учасників у режимі реального часу.

3) Розподілені мультимедійні системи, такі як відеоконференції та потокові послуги, потребують синхронізованої координації для доставки медіа-потоків в режимі реального часу та забезпечення безперебійної взаємодії з користувачем. Те ж саме стосується і розподіленої симуляції та віртуальних середовищ, які вимагають синхронізації для координації дій та взаємодії об'єктів на всіх вузлах.

4) Розподілені системи фінансової торгівлі: системи високочастотної торгівлі та фінансові ринки, які включають кількох розподілених учасників, вимагають синхронізованої координації. У цих системах точність часу має вирішальне значення для здійснення угод, узгодження замовлень і підтримки чесних та ефективних ринків.

Нами пропонується використання прикладних протоколів взаємодії компонентів розподілених додатків, подібних до базових протоколів синхронізації часу, для синхронізації майбутніх подій в мережевій системі.

Ми стверджуємо, що, незважаючи на неможливість точної синхронізації годинників, є можливість точної синхронізації майбутніх подій в частинах розподілених додатків для детермінованих каналів зв'язку. Для каналів зв'язку з недетермінованими затримками потрібна розробка ймовірнісних протоколів кратного узгодження у часі дій.

Список використаних джерел:

1. D. L. Mills Internet time synchronization: The network time protocol, IEEE Trans. Commun., vol. 39, no. 10, pp. 1482–1493, Oct.1991
2. Nikolaos M. Freris, Scott R. Graham, P. R. Kumar Fundamental Limits on Synchronizing Clocks Over Networks. IEEE Transactions On Automatic Control, Vol. 56, № 6, June 2011, P. 1352–1364.
3. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems, 2008