

TAQSIMLANGAN TIZIMLARDA KONFLIKTSIZ REPLIKATSIYALANUVCHI MA'LUMOT TURLARI (CRDT): NAZARIY TAHLIL VA RESURS-CHEKLANGAN REAL VAQTLI MUHITLAR UCHUN KONTSEPTUAL KENGAYTMA

J.J.Munirov¹

1. Osiyo xalqaro universiteti, stajor-o'qituvchi

Mas'ul muallif: Munirov Jonibek
Jamshed o'g'li, Osiyo xalqaro
universiteti, stajor-o'qituvchi.

e-mail:
munirovjonibek@gmail.com

Accepted: 23 Sentabr 2026
Published: 23 Sentabr 2026

Copyright: © 2026 by the
author(s). Licensee Buxoro xalqaro
universiteti ilmiy axborotnomasi.

Iqtibos uchun: Munirov, J. J.
TAQSIMLANGAN TIZIMLARDA
KONFLIKTSIZ
REPLIKATSIYALANUVCHI
MA'LUMOT TURLARI (CRDT):
NAZARIY TAHLIL VA RESURS-
CHEKLANGAN REAL VAQTLI
MUHITLAR UCHUN KONTSEPTUAL
KENGAYTMA / J. J. Munirov //
Buxoro xalqaro universiteti ilmiy
axborotnomasi. — 2026. — T. 9, №
2. — B. 327–331.

Annotatsiya. Maqolada taqsimlangan tizimlarda replikalar o'rtasida markazlashgan muvofiqlashtiruvchi yoki konsensus protokolisiz izchillikni ta'minlash muammosi - konflikt-siz replikasiyalanuvchi ma'lumot turlari (Conflict-free Replicated Data Types, CRDT) nazariyasi asosida tahlil qilingan. CAP teoremasi va kuchli oxir-oqibat konsistentligi (Strong Eventual Consistency) tushunchalaridan kelib chiqib, CRDT'ning ikki asosiy turi - holatga asoslangan (CvRDT) va operatsiyaga asoslangan (CmRDT) - hamda ularning trafik samaradorligini oshiruvchi delta-mutatsiya kengaytmasi tizimli tarzda ko'rib chiqilgan. Hamkorlikdagi matn tahrirlash, taqsimlangan fayl tizimlari va peer-to-peer virtual borliq (VR) muhitlaridagi amaliy qo'llanilish tajribalari tahlil qilinib, mavjud tatbiqlarning uchta asosiy cheklovi - metadata (tombstone) o'sishi, barcha yangilanishlarga nisbatan ustuvorlik-neytralligi va murakkab turlarda delta hajmining kattalashuvi - aniqlangan. Ushbu tahlil asosida maqolada delta-CRDT arxitekturasiga tarmoq holati va ma'lumot ahamiyatiga asoslangan uzatish navbati qatlamini CRDT'ning matematik konflikt-sizlik xossalari buzmaganda holda qo'shishga asoslangan "ustuvorlik-ogoh delta-CRDT" kontseptual modeli taklif etiladi. Model resurs-cheklangan (past o'tkazuvchanlik, yuqori tebranishli) tarmoq sharoitida ishlaydigan real vaqtlil ko'p foydalanuvchili tizimlar uchun mo'ljallangan.

Kalit so'zlar: CRDT, taqsimlangan tizimlar, kuchli oxir-oqibat konsistentligi, delta-CRDT, CAP teoremasi, holat replikasiyasi, resurs-cheklangan tarmoqlar.

КОНФЛИКТНО-СВОБОДНЫЕ РЕПЛИЦИРУЕМЫЕ ТИПЫ ДАННЫХ (CRDT) В РАСПРЕДЕЛЁННЫХ СИСТЕМАХ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ РАСШИРЕНИЕ ДЛЯ РЕСУРСОГРАНИЧЕННЫХ СРЕД РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Аннотация. В статье анализируется проблема обеспечения согласованности между репликами в распределённых системах без централизованного координатора или протокола консенсуса на основе теории бесконфликтных реплицируемых типов данных (CRDT). Рассмотрены два основных типа CRDT - на основе состояния (CvRDT) и на основе операций (CmRDT), а также их дельта-расширение. Проанализирован опыт применения в совместном редактировании текста, распределённых файловых системах и peer-to-peer VR-средах, выявлены три основных ограничения существующих реализаций. На основе этого предлагается концептуальная модель «приоритетно-осведомлённого» дельта-CRDT для ресурсно-ограниченных сред реального времени.

Ключевые слова: CRDT, распределённые системы, сильная итоговая согласованность, дельта-CRDT, теорема CAP.

CONFLICT-FREE REPLICATED DATA TYPES (CRDTs) IN DISTRIBUTED SYSTEMS: THEORETICAL ANALYSIS AND A CONCEPTUAL EXTENSION FOR RESOURCE-CONSTRAINED REAL-TIME ENVIRONMENTS

Abstract. This article analyzes the problem of ensuring consistency among replicas in distributed systems without a centralized coordinator or consensus protocol, based on the theory of Conflict-free Replicated Data Types (CRDTs). Building on the CAP theorem and the notion of Strong Eventual Consistency, the two principal CRDT families - state-based (CvRDT) and operation-based (CmRDT) - and their delta-mutation extension are systematically reviewed. Practical application experience in collaborative text editing, distributed file systems, and peer-to-peer virtual reality (VR) environments is analyzed, and three key limitations of existing implementations are identified: metadata (tombstone) growth, priority-neutrality toward all updates, and delta-size inflation for complex data types. Based on this analysis, the article proposes a conceptual "priority-aware delta-CRDT" model that adds a transmission-scheduling layer - driven by network state and data relevance - on top of delta-CRDTs without violating their mathematical conflict-freedom guarantees. The model targets real-time multi-user systems operating over resource-constrained (low-bandwidth, high-jitter) networks.

Keywords: CRDT, distributed systems, strong eventual consistency, delta-CRDT, CAP theorem, state replication, resource-constrained networks.

1. Kirish. Taqsimlangan tizimlarda ma'lumotni bir nechta tugun (replika) orasida saqlash mavjudlik va kechikishni pasaytirish maqsadida keng qo'llaniladi, biroq bu holat replikalar orasida izchillikni ta'minlash muammosini keltirib chiqaradi. Klassik yechim - konsensus protokoli (masalan, Paxos, Raft) yordamida qat'iy izchillikni ta'minlash - barcha yozuv amallari uchun markazlashgan muvofiqlashtirishni talab qiladi. Bruer tomonidan asoslab berilgan mashhur CAP teoremasiga ko'ra, tarmoq bo'linishi (partition) yuz berganda taqsimlangan tizim izchillik (Consistency) va mavjudlik (Availability) o'rtasida tanlov qilishga majbur bo'ladi [1].

Mavjudlikni ustuvor qo'yuvchi tizimlar uchun muqobil yo'nalish - oxir-oqibat izchillik (eventual consistency) modeli bo'lib, unda replikalar vaqtinchalik farqlanishi mumkin, biroq yangi yozuvlar to'xtatilganda barchasi bir xil holatga yaqinlashadi [2]. Biroq, oxir-oqibat izchillikning "klassik" amalga oshirilishlarida konfliktlarni hal qilish mantiq'i ilova darajasida qo'lda yoziladi, bu esa xatolarga moyil va rasmiy asoslanmagan yondashuv hisoblanadi. Shapiro, Preguiza, Bakero va Zavirski tomonidan taklif etilgan konfliktli replikasiyalanuvchi ma'lumot turlari (Conflict-free Replicated Data Types, CRDT) nazariyasi ushbu muammoni algebraik xossalari - assotsiativlik, kommutativlik va idempotentlik - orqali rasmiy tarzda hal qiladi, bunda replikalar konfliktlarni hal qiluvchi tashqi mantiqsiz, faqat ma'lumot tuzilmasining matematik xususiyatlari hisobiga avtomatik ravishda bir xil holatga yaqinlashadi (kuchli oxir-oqibat izchillik, Strong Eventual Consistency) [3].

So'nggi yillarda CRDT nazariyasi hamkorlikdagi matn tahrirlash tizimlari, taqsimlangan fayl tizimlari va markazlashgan serverga muhtoj bo'lmagan peer-to-peer ilovalar (jumladan, ko'p foydalanuvchili virtual borliq muhitlari) uchun nazariy poydevor sifatida faol qo'llanilmoqda. Shuni alohida ta'kidlash lozimki, ushbu maqola muallifning taqsimlangan ko'p foydalanuvchili VR tizimlarida ma'lumotlar oqimini ko'p agentli adaptiv sinxronlashga bag'ishlangan kengroq doktorlik tadqiqotidan farqli, mustaqil va tor doiradagi masalaga - bevosita CRDT'ning o'zining nazariy asoslari, mavjud amalga oshirilishlaridagi cheklovlar va ularni transport qatlamida bartaraf etish imkoniyatiga - bag'ishlangan. Maqolaning maqsadi: (1) CRDT nazariyasining asosiy matematik poydevorini tizimli bayon etish; (2) uning amaliy qo'llanilish tajribalarini qiyosiy tahlil qilish; (3) mavjud amalga oshirilishlarning uchta asosiy cheklovini aniqlash; (4) resurs-cheklangan real vaqti muhitlar uchun ushbu cheklovlarni CRDT'ning matematik kafolatlarini buzmaganda bartaraf etuvchi kontseptual kengaytma taklif etish.

2. CRDT NAZARIY ASOSLARI

2.1. Kuchli oxir-oqibat izchillik va join-yarimtarmoq xossalari

Kuchli oxir-oqibat izchillik (Strong Eventual Consistency, SEC) shartiga ko'ra, bir xil yangilanishlar to'plamini qabul qilgan ikkita replika, bu yangilanishlar qanday tartibda yoki necha marta yetib kelishidan qat'iy nazar, har doim bir xil holatga keladi - bunda hech qanday konflikt hal qilish bosqichi talab etilmaydi [3]. Bu xossa matematik jihatdan holatlar to'plamining join-yarimtarmoq (join-semilattice) tuzilmasini tashkil etishi orqali ta'minlanadi: holatlar qisman tartiblangan to'plam (poset) hosil qiladi, ikkita holatni birlashtiruvchi (merge) "join" amali esa ularning eng kichik yuqori chegarasini (least upper bound) hisoblaydi. Join amali quyidagi uchta xossaga ega bo'lishi shart:

$\text{merge}(a, \text{merge}(b, c)) = \text{merge}(\text{merge}(a, b), c)$ (assotsiativlik)

$\text{merge}(a, b) = \text{merge}(b, a)$ (kommutativlik)

$\text{merge}(a, a) = a$ (idempotentlik)

Ushbu uchta xossaning bajarilishi - yangilanishlarning takrorlanishi (idempotentlik tufayli zararsiz), tartibsiz yetib kelishi (kommutativlik tufayli zararsiz) va guruhlab qayta ishlanishi (assotsiativlik tufayli zararsiz) - kafolatlanishini bildiradi. Aynan shu xossa CRDT'ni markazlashgan muvofiqlashtiruvchi yoki konsensus protokolisiz ishlashga imkon beruvchi asosiy nazariy negiz hisoblanadi.

2.2. Holatga asoslangan (CvRDT) va operatsiyaga asoslangan (CmRDT) modellar

Shapiro va boshqalar CRDT'ning ikkita nazariy jihatdan teng kuchli, ammo amaliyotda turlicha xususiyatlarga ega bo'lgan oilasini rasmiylashtirgan [3]. Holatga asoslangan CRDT (state-based, CvRDT) modelida har bir replika davriy ravishda o'zining to'liq mahalliy holatini qo'shni replikalarga uzatadi, qabul qiluvchi replika esa uni join funksiyasi orqali o'z holati bilan birlashtiradi. Bu yondashuvning afzalligi - tarmoq qatlamiga nisbatan talabchan emasligida: xabarlar istalgan tartibda, hatto takroran yetib kelsa ham, natija to'g'ri bo'lib qoladi ("best-effort" tarqatish yetarli). Operatsiyaga asoslangan CRDT (operation-based, CmRDT) modelida esa to'liq holat o'rniga faqat bajarilgan amal (masalan, "elementni qo'shish") translatsiya qilinadi, bu amallar konkurrent bajarilganda o'zaro kommutativ bo'lishi shart. CmRDT ancha kam trafik sarflaydi, biroq bu holat tarqatish tizimidan sabab-tartibli va aynan bir marta (causal, exactly-once) yetkazib berishni talab qiladi - bu esa amaliy tarmoq infratuzilmasiga nisbatan qo'shimcha talab yaratadi.

2.3. Delta-CRDT: ikkala yondashuv o'rtasidagi muvozanat

Almeida, Shoker va Bakero tomonidan taklif etilgan delta-mutatsiya (delta-mutation) kontseptsiyasi CvRDT'ning oddiyligi bilan CmRDT'ning trafik samaradorligini birlashtirishga qaratilgan [4]. Ushbu modelda har bir mutatsiya to'liq holat emas, balki holatning faqat o'zgargan "delta" qismini (kichik CvRDT ob'ekti sifatida) hosil qiladi; delta ham xuddi to'liq holat kabi join orqali birlashtiriladi, shu bois yuqoridagi uchta algebraik xossa (assotsiativlik, kommutativlik, idempotentlik) avtomatik ravishda saqlanib qoladi va CmRDT'ga xos qat'iy yetkazib berish talabi shart emas. Almeida va boshqalarning keyingi rasmiy ishida (delta-state replicated data types) ushbu model matematik jihatdan chuqurroq asoslab berilgan hamda delta guruhlarini bufferlash va qayta uzatish orqali xabar yo'qotilishiga chidamlilikni ta'minlash mexanizmlari taqdim etilgan [5]. Shu tariqa delta-CRDT amaliyotda eng ko'p qo'llaniladigan CRDT amalga oshirish

strategiyasiga aylangan, biroq quyida ko'rsatilishicha, uning ham o'ziga xos cheklovlari mavjud.

3. QO'LLANILISH TAJRIBALARI VA TAQQOSLASH TAHLILI

3.1. Hamkorlikdagi matn tahrirlash: CRDT va operatsion transformatsiya (OT)

Hamkorlikdagi real vaqtli matn tahrirlash tizimlari (Google Docs kabi) tarixan operatsion transformatsiya (OT) texnologiyasiga tayangan, unda konkurrent amallar boshqa replikaga tatbiq etilishidan oldin maxsus transformatsiya funksiyasi orqali qayta hisoblanadi. Sun, Sun, Ng, Kay va Cho tomonidan o'tkazilgan keng qamrovli qiyosiy tahlilda ko'rsatilishicha, OT transformatsiya funksiyalarining to'g'riligini isbotlash (ayniqsa TP2 xossasi bo'yicha) nazariy jihatdan juda murakkab bo'lib, ko'plab amaliy tizimlar buni markazlashgan server orqali soddalashtiradi [6]. CRDT-asoslangan matn tuzilmalari (masalan, RGA, WOOT kabi ketma-ketlik CRDT'lari) esa markazlashgan transformatsiya bosqichisiz, sof algebraik birlashish orqali izchillikka erishadi, biroq buning evaziga har bir belgi uchun noyob identifikator va, ba'zan, o'chirilgan elementlar uchun metama'lumot saqlashni talab qiladi.

3.2. Taqsimlangan fayl tizimlari: CrossFS

CRDT nazariyasining infratuzilma darajasidagi qo'llanilishiga misol sifatida Ke va hammualliflarining CrossFS tizimini keltirish mumkin, unda turli domenlar (masalan, mahalliy va bulutli saqlash tizimlari) o'rtasidagi fayl tizimi metama'lumotlarini muvofiqlashtirish uchun CRDT-asoslangan sinxronizatsiya mexanizmi qo'llanilgan [8]. Ushbu ish shuni ko'rsatadiki, CRDT nafaqat foydalanuvchi darajasidagi ilovalarda, balki tizim darajasidagi infratuzilmada ham markazlashgan qulflash (locking) va muvofiqlashtirish xarajatlarini sezilarli darajada kamaytirish imkonini beradi.

3.3. Peer-to-peer virtual borliq (VR) muhitlari

Dantas va Bakero tomonidan CRDT yondashuvi bevosita peer-to-peer VR o'yin holatini sinxronlashtirish vazifasiga tatbiq etilgan, natijalar markazlashgan serversiz, faqat CRDT'ning algebraik kafolatlariga tayangan holda ko'p foydalanuvchili virtual muhitda izchil holatni saqlash mumkinligini amaliy jihatdan tasdiqlaydi [7]. Shu bilan birga, ko'p foydalanuvchili kengaytirilgan reallik (XR) dasturiy tizimlaridagi haqiqiy nosozliklarni keng qamrovli tahlil qilgan so'nggi empirik tadqiqotga ko'ra, holat va sinxronlash nomuvofiqligi bunday tizimlardagi eng ko'p uchraydigan nosozlik toifasi (18,0%) bo'lib, tahlil qilingan nosozliklarning 94,4 foizi tizim ishlashiga tanqidiy yoki jiddiy salbiy ta'sir ko'rsatgan [9]. Ushbu statistik ma'lumot - garchi u to'g'ridan-to'g'ri CRDT amalga oshirilishlariga emas, balki umuman ko'p foydalanuvchili XR tizimlaridagi sinxronlash muammolariga tegishli bo'lsa-da - CRDT kabi nazariy jihatdan mustahkam yechimlarning amaliyotdagi cheklovlarini chuqur tahlil qilish va ularni bartaraf etish zarurligini ko'rsatadi. Quyidagi 4-bo'lmda aynan shu cheklovlar ko'rib chiqiladi.

1-jadval.

CRDT oilalari va operatsion transformatsiyaning qiyosiy tahlili

Yondashuv	Asosiy mexanizm	Afzalligi	Asosiy cheklovi
Operatsion transformatsiya (OT) [6]	Konkurrent operatsiyalarni boshqa replikalarga tatbiq etishdan oldin matematik transformatsiya funksiyasi orqali qayta hisoblash	Yozuvchilar niyatini (intention) matnli tahrirlashda yuqori aniqlik bilan saqlaydi	Transformatsiya funksiyalarining to'g'riligini (TP1/TP2 xossalari) isbotlash murakkab, ko'p holatlarda markazlashgan server talab qilinadi
Holatga asoslangan CRDT (CvRDT) [3]	To'liq holatni davriy uzatish va join (eng kichik yuqori chegara) funksiyasi orqali birlashtirish	Merge funksiyasi oddiy, yetkazib berish tartibi va takrorlanishiga sezgir emas	Har bir sinxronlashda to'liq holat uzatiladi - katta obyektlar uchun tarmoq sarfi yuqori
Operatsiyaga asoslangan CRDT (CmRDT) [3]	Faqat kommutativ operatsiyalarni translatiya qilish	Uzatiladigan ma'lumot hajmi minimal	Ishonchli va sabab-tartibli (causal, exactly-once) yetkazib berish infratuzilmasini talab qiladi
Delta-CRDT [4, 5]	Faqat so'nggi o'zgarish natijasida hosil bo'lgan kichik holat parchasini (delta) uzatish, uni ham join orqali birlashtirish	CvRDT'ning oddiyligi bilan CmRDT'ning trafik samaradorligini birlashtiradi, qattiq yetkazish shartini talab qilmaydi	Barcha delta'larga bir xil ustuvorlikda munosabatda bo'ladi, murakkab turlarda delta hajmi kattalashishi mumkin

4. CRDT NING TANQIDIY TAHLILI: ASOSIY CHEKLOVLAR

4.1. Metama'lumot (tombstone) o'sishi

Ko'pgina CRDT tuzilmalarida (masalan, to'plamlar uchun OR-Set) elementni o'chirish uni fizik jihatdan yo'q qilish emas, balki "o'chirilgan" deb belgilangan maxsus metama'lumot (tombstone) sifatida saqlashni talab qiladi - aks holda kechroq yetib kelgan eski "qo'shish" amali o'chirilgan elementni qayta tiklab qo'yishi mumkin. Barcha replikalar tombstone'ning "sabab jihatdan barqaror" (causally stable) ekanligiga, ya'ni uni endi hech qanday replika qayta yaratmasligiga to'liq ishonch hosil qilmaguncha, bu metama'lumotni butunlay o'chirib bo'lmaydi. Uzoq muddat ishlaydigan yoki tez-tez uzilib qoladigan (intermittent) replikalar mavjud tizimlarda tombstone'lar to'planib boradi, bu esa xotira va tarmoq sarfini vaqt o'tishi bilan asossiz oshiradi.

4.2. Ustuvorlik-neytrallik

CRDT'ning join funksiyasi barcha delta yoki operatsiyalarni bir xil, mutlaqo neytral tarzda birlashtiradi [4, 5]. Bu, matematik to'g'rilik nuqtai nazaridan zarur bo'lsa-da, transport (uzatish) qatlamida qaysi yangilanishni birinchi navbatda, qaysi birini keyinroq uzatish kerakligini belgilaydigan hech qanday mexanizm mavjud emasligini bildiradi. Resurslari cheklangan yoki tebranishi (jitter) yuqori tarmoqlarda barcha delta'lar teng ustuvorlikda navbatga qo'yilsa, foydalanuvchi uchun eng muhim ma'lumot (masalan, unga yaqin obyektning holati) tarmoq tirbandligi sababli kam ahamiyatli ma'lumot

bilan bir xil kechikish bilan yetib borishi mumkin.

4.3. Murakkab turlarda delta hajmining kattalashuvi

Delta-CRDT'ning trafik samaradorligi asosan oddiy turlar (hisoblagichlar, oddiy to'plamlar) uchun yaxshi namoyon bo'ladi. Murakkab, ichma-ich joylashgan tuzilmalar (masalan, xaritalar ichidagi ketma-ketliklar yoki katta hamkorlik hujjatlari) uchun bitta mantiqiy o'zgarish natijasida hosil bo'lgan delta ba'zan to'liq holatga nisbatan istalganidan sezilarli darajada katta bo'lishi mumkin, chunki delta o'zgargan elementning identifikatorlari va bog'liq metama'lumotlarini ham o'z ichiga olishi kerak. Bu, ayniqsa, ketma-ketlik (sequence) CRDT'lari uchun sezilarli - bunda kichik tahrirlash amali katta miqdordagi noyob identifikatorlar bilan bog'liq bo'lishi mumkin.

5. Taklif etilayotgan kontseptual kengaytma: ustuvorlik-ogoh DELTA-CRDT

5.1. Asosiy g'oya

4-bo'limda aniqlangan cheklovlarining barchasi - birinchi navbatda ustuvorlik-neytrallik - CRDT'ning matematik yadrosida (join funksiyasida) emas, balki uni qo'llovchi transport (uzatish) qatlamida hal qilinishi mumkin. Taklif etilayotgan g'oyaning mohiyati shundaki, delta-CRDT arxitekturasiga uning merge semantikasini o'zgartirmaydigan, faqat delta'larning uzatish tartibi va vaqtini boshqaruvchi qo'shimcha "ustuvorlik-ogoh uzatish qatlami" (priority-aware transmission layer) qo'shiladi. Bu yerda tub farq shundaki, ustuvorlashtirish delta'ning tarkibiga yoki join funksiyasiga emas, faqat uning tarmoqqa jo'natilish navbatiga ta'sir qiladi - shu bois 2.1-bo'limda keltirilgan assotsiativlik, kommutativlik va idempotentlik xossalari, demak kuchli oxir-oqibat izchillik kafolati ham, o'zgarishsiz saqlanib qoladi.

5.2. Uzatish ustuvorligi funksiyasi

Har bir hosil bo'lgan delta δ uchun uzatish ustuvorligi $w(\delta, t)$ quyidagi uchta mezon asosida hisoblanadi: delta tarkibidagi o'zgarishning ilova darajasidagi ahamiyati $I(\delta) \in [0,1]$ (masalan, VR muhitida - o'zgargan obyektning foydalanuvchiga yaqinligi yoki e'tibor markazida ekanligi; fayl tizimida - o'zgargan metama'lumotga bog'liq operatsiyalar soni); delta'ning yaratilganidan beri o'tgan vaqti $a(\delta)$ (ochlik - starvation - holatining oldini olish uchun); va joriy tarmoq holati ko'rsatkichi $N(t)$ (masalan, baholangan mavjud o'tkazish qobiliyati yoki navbat uzunligi). Ustuvorlik quyidagi umumlashgan chiziqli funksiya orqali hisoblanadi:

$$w(\delta, t) = \lambda_1 \cdot I(\delta) + \lambda_2 \cdot g(a(\delta)) + \lambda_3 \cdot h(N(t)), \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$$

bu yerda $g(\cdot)$ - delta yoshi bo'yicha monoton o'suvchi funksiya (uzoq kutilgan, past ahamiyatli delta'ning ham oxir-oqibat ustuvorlik olishini kafolatlaydi - bu bilan SEC'ning "barcha yangilanishlar oxir-oqibat yetib boradi" talabi buzilmaydi), $h(\cdot)$ esa tarmoq tirbandligi kuchayganda kichikroq yoki muhimroq delta'larni ustuvor qo'yuvchi funksiya. Vaznlar $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ilova sohasiga qarab sozlanadigan statik parametrlar sifatida yoki (kelgusi tadqiqot yo'nalishi sifatida) mahalliy adaptiv siyosat orqali dinamik moslashtirilishi mumkin.

5.3. Matematik konfliktisizlikning saqlanishi

Taklif etilayotgan qatlam faqat delta'larning jo'natilish tartibi va vaqtini o'zgartiradi, ularning tarkibini yoki join funksiyasini o'zgartirmaydi. Shu sababli, istalgan ikkita replika, delta'lar qanday tartibda va qanday kechikish bilan yetib kelishidan qat'iy nazar (agar barcha delta'lar oxir-oqibat, hech bo'lmaganda davriy "anti-entropiya" (anti-entropy) sinxronizatsiyasi orqali yetib borsa), 2.1-bo'limdagi join-yarimtarmoq xossalari kuchida bir xil holatga yaqinlashishda davom etadi. Boshqacha aytganda, ustuvorlik-ogoh qatlami CRDT'ning konfliktisizlik kafolatini buzish xavfisiz, faqat uning amaliy samaradorlik xususiyatlarini (kechikish, adolatlilik) yaxshilashga xizmat qiladi.

5.4. Qolgan ikki cheklovga nisbati

Taklif etilgan model bevosita 4.2-bandda aniqlangan ustuvorlik-neytrallik muammosini hal qiladi. Bundan tashqari, u qolgan ikkita cheklov bilan ham bilvosita bog'liq: (a) tombstone o'sishi muammosi (4.1-band) - ustuvorlik funksiyasidagi yosh omili $g(a(\delta))$ orqali eski, hali yetkazilmagan delta'larni tezroq tarqatishga undash orqali, mavjud sabab-barqarorlikka asoslangan tozalash (garbage collection) mexanizmlarining samaraliroq ishlashiga bilvosita yordam beradi; (b) delta hajmi kattalashuvi muammosi (4.3-band) - $h(N(t))$ funksiyasi tarmoq tirbandligi yuqori bo'lganda katta hajmli delta'larni navbatning oxiriga surish yoki ularni kichikroq bo'laklarga bo'lib yuborishni rag'batlantirish orqali qisman yumshatilishi mumkin. Shunga qaramay, bu ikkala yo'nalish taklif etilgan modelning asosiy hisssasi emas, balki uning tabiiy kengaytmasi sifatida kelgusi tadqiqotlar uchun ochiq qoladi.

6. Muhokama. Ushbu maqolada o'tkazilgan tahlil shuni ko'rsatadiki, CRDT nazariyasi taqsimlangan tizimlarda markazlashgan muvofiqlashtiruvchisiz izchillikni ta'minlashning matematik jihatdan qat'iy asoslangan yechimi bo'lsa-da, uning amaliy qo'llanilishida transport qatlamiga oid muammolar - ayniqsa resurs-cheklangan va heterogen tarmoq sharoitida - hali to'liq hal etilmagan. Taklif etilgan ustuvorlik-ogoh delta-CRDT kontseptsiyasi ushbu bo'shliqni CRDT'ning o'zagini (join funksiyasini) o'zgartirmagan, faqat uning ustiga qo'shimcha, ajratilishi mumkin bo'lgan (decoupled) qatlam qo'shgan holda to'ldirishga qaratilgan - bu arxitekturaviy tanlov modelning nazariy toza CRDT kafolatlarini butunlay saqlab qolishini ta'minlaydi.

Yondashuvning nazariy ahamiyati shundaki, u CRDT nazariyasiga transport-darajasidagi ustuvorlashtirishni matematik konfliktisizlikdan ajratilgan holda qo'shish mumkinligini ko'rsatadi. Amaliy ahamiyati esa past o'tkazuvchanlikka yoki yuqori tebranishga ega tarmoqlarda ishlaydigan real vaqtli ko'p foydalanuvchili tizimlar (edge-hisoblash, IoT, mobil tarmoqlar orqali ulanuvchi VR/AR) uchun CRDT'ni amaliy jihatdan yanada moslashuvchan qilishda namoyon bo'ladi.

Shu bilan birga, taklif etilgan model hozircha kontseptual-nazariy bosqichda bo'lib, uning amaliy samaradorligi eksperimental tasdiqni talab qiladi. Muallifning kelgusi tadqiqot rejasiga ko'ra, model dastlab simulyatsiya muhitida (turli xil, sun'iy tarzda cheklangan o'tkazuvchanlik va tebranish parametrlari bilan) mavjud oddiy delta-CRDT bazaviy yechimi

bilan qiyoslanadi, baholash mezonlari sifatida esa o'rtacha konvergensiya vaqti, yuqori ahamiyatli yangilanishlarning kutish vaqti (staleness) va umumiy tarmoq trafigi tanlanadi. Ushbu maqolada keltirilgan barcha son ko'rsatkichlar va adabiyot natijalari muallifning shaxsiy eksperimental natijalari emas, balki keltirilgan manbalardagi tasdiqlangan ma'lumotlar bo'lib, ular tahlilning dolzarbligini asoslash uchun keltirilgan.

7. Xulosa. Ushbu maqolada konfliktisiz replikatsiyalanuvchi ma'lumot turlari (CRDT) nazariyasining matematik asoslari, uning holatga asoslangan, operatsiyaga asoslangan va delta-mutatsiya variantlari, hamda hamkorlikdagi tahrirlash, taqsimlangan fayl tizimlari va peer-to-peer VR muhitlaridagi amaliy qo'llanilish tajribalari tizimli tahlil qilindi. Tahlil natijasida mavjud CRDT amalga oshirilishlarining uchta asosiy cheklovi - metama'lumot (tombstone) o'sishi, ustuvorlik-neytrallik va murakkab turlarda delta hajmining kattalashuvi - aniqlandi.

Shu asosda taklif etilgan "ustuvorlik-ogoh delta-CRDT" kontseptual modeli delta-CRDT arxitekturasiga tarmoq holati, ma'lumot ahamiyati va delta yoshiga asoslangan uzatish ustuvorligi funksiyasini CRDT'ning join-yarimtarmoq xossalarini (assotsiativlik, kommutativlik, idempotentlik) buzmaganda qo'shadi, bu esa modelning kuchli oxir-oqibat izchillik kafolatini to'liq saqlab qolishini ta'minlaydi. Keyingi tadqiqot bosqichida ushbu kontseptual modelni dasturiy jihatdan amalga oshirish va simulyatsion muhitda eksperimental baholash orqali uning amaliy samaradorligini miqdoriy jihatdan tasdiqlash muallifning bevosita ilmiy vazifasi hisoblanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati

- [1] Brewer E. A. CAP Twelve Years Later: How the "Rules" Have Changed // IEEE Computer. - 2012. - Vol. 45, No. 2. - P. 23-29. DOI: 10.1109/MC.2012.37
- [2] Vogels W. Eventually Consistent // Communications of the ACM. - 2009. - Vol. 52, No. 1. - P. 40-44. DOI: 10.1145/1435417.1435432
- [3] Shapiro M., Preguiça N., Baquero C., Zawirski M. Conflict-Free Replicated Data Types // Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS 2011), LNCS vol. 6976. - Springer, 2011. - P. 386-400.
- [4] Almeida P. S., Shoker A., Baquero C. Efficient State-Based CRDTs by Delta-Mutation // Networked Systems (NETYS 2015), LNCS vol. 9466. - Springer, 2015. - P. 62-76. (arXiv:1410.2803). URL: <https://arxiv.org/abs/1410.2803>
- [5] Almeida P. S., Shoker A., Baquero C. Delta State Replicated Data Types // Journal of Parallel and Distributed Computing. - 2018. - Vol. 111. - P. 162-173. DOI: 10.1016/j.jpdc.2017.08.003
- [6] Sun C., Sun D., Ng A., Cai W., Cho B. Real Differences between OT and CRDT under a General Transformation Framework for Consistency Maintenance in Co-Editors // Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction. - 2020. - Vol. 4, No. GROUP, Article 1-26. DOI: 10.1145/3375186
- [7] Dantas A., Baquero C. CRDT-Based Game State Synchronization in Peer-to-Peer VR // arXiv:2503.17826, 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2503.17826>
- [8] Ke Q., Lv Y., Zhang Z., Shen Z., Yu Y., Chen H., Song Z., Gan X., Li J., Li D., Yao X., Wang M., Zhang Y. CrossFS: Improving Cross-Domain File System Performance with CRDT-Based Metadata Synchronization // ACM Transactions on Storage. - 2026. - Vol. 22, No. 2, Article 1-25. DOI: 10.1145/3777470
- [9] Li S., Zhang C., Li B., Gao C., Lyu M. R. When Shared Worlds Break: Demystifying Defects in Multi-User Extended Reality Software Systems // arXiv:2510.01182, 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2510.01182>

2021