

TARMOQ KECHIKISHLARINI KAMAYTIRISH USULLARI: ZAMONAVIY YONDASHUVLAR VA TEXNOLOGIYALAR

IBRAGIMOV SH.M., A'ZAMOVA S.U.

FarDU dotsenti, shavkat70@bk.ru, FarDU talabasi, sevincazamova02@gmail.com

Annotatsiya: Ushbu maqolada kompyuter tarmoqlarida kechikishlarni (latency) kamaytirish bo'yicha zamonaviy ilmiy yondashuvlar va amaliy texnologiyalar tadqiq etilgan. Maqolada tarmoq kechikishlarining tabiati, kelib chiqish sabablari va ularning axborot uzatish tizimlariga ta'siri batafsil tahlil qilingan. Asosiy e'tibor protokollarni optimallashtirish, tarmoq infratuzilmasini modernizatsiya qilish, Edge Computing texnologiyasi, Content Delivery Network (CDN) tizimlari va Software-Defined Networking (SDN) kabi zamonaviy usullarga qaratilgan. Bundan tashqari, Quality of Service (QoS) mexanizmlari, trafikni boshqarish algoritmlari va kechikishni kamaytiruvchi apparat yechimlari ham ko'rib chiqilgan. Tadqiqot natijalari asosida tarmoq ishlash samaradorligini oshirish bo'yicha amaliy tavsiyalar ishlab chiqilgan. Maqola kompyuter tizimlari va tarmoqlari sohasidagi mutaxassislar, magistratura talabalari hamda tadqiqotchilar uchun mo'ljallangan.

Kalit so'zlar: tarmoq kechikishi, latency, QoS, CDN, Edge Computing, SDN, TCP/IP optimallashtirish, tarmoq protokollari, trafikni boshqarish, QUIC protokoli.

KIRISH. Zamonaviy axborot jamiyatida kompyuter tarmoqlari iqtisodiyot, ta'lim, sog'liqni saqlash va boshqa ko'plab sohalarning asosiy infratuzilmasini tashkil etadi. Internet foydalanuvchilar soni kundan-kunga oshib bormoqda va 2023 yilgi ma'lumotlarga ko'ra, jahon bo'yicha internet foydalanuvchilari soni 5.4 milliard nafardan oshdi (ITU, 2023). Bunday sharoitda tarmoq samaradorligini ta'minlash va kechikishlarni minimallashtirishga bo'lgan talab tobora ortib bormoqda.

Tarmoq kechikishi — bu ma'lumot paketining manbadan manzilga yetib borishi uchun ketadigan vaqt bo'lib, u ko'pincha millisekund (ms) birligida o'lchanadi. Tarixan, kechikish muammosi faqat texnik mutaxassislarni qiziqtirgan bo'lsa, bugun bu masala biznes samaradorligi, foydalanuvchi tajribasi va hattoki xavfsizlik tizimlarining ishlashiga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Amazon kompaniyasining tadqiqotlari shuni ko'rsatdiki, sahifaning yuklanish vaqti 100 ms ga oshishi savdo hajmini 1% ga kamaytiradi (Linden, 2006).

5G simsiz tarmoqlar, Internet of Things (IoT) qurilmalari, bulut hisoblash va real vaqt rejimida ishlash talabi qo'yadigan ilovalar (masalan, video konferentsiya, onlayn o'yinlar, telemeditsina) kabi texnologiyalar tarqalishi bilan tarmoq kechikishini kamaytirish muammosi yanada dolzarb bo'lib qolmoqda. Masalan, autonomous haydash tizimlari uchun kechikish 1 ms dan oshmasligi talab etiladi, teletibbiyot amaliyotlarida esa bu ko'rsatkich muhim tibbiy qarorlarning sifatiga bevosita ta'sir qiladi (Gupta & Jha, 2015).

Ushbu maqolaning maqsadi — tarmoq kechikishlarini kamaytirish bo'yicha mavjud ilmiy tadqiqotlarni tizimli ravishda tahlil qilish, eng samarali yondashuvlarni aniqlash va amaliy tavsiyalar ishlab chiqishdan iborat. Tadqiqotda quyidagi vazifalar

qo'yilgan: tarmoq kechikishining asosiy komponentlarini va kelib chiqish sabablarini tahlil qilish; mavjud optimallashtirish usullarini tasniflash; zamonaviy texnologik yechimlarning afzalliklari va kamchiliklarini qiyosiy tahlil qilish; kechikishni kamaytirish bo'yicha amaliy tavsiyalar ishlab chiqish.

TARMOQ KECHIKISHINING NAZARIY ASOSLARI

Kechikishning ta'rifi va komponentlari

Tarmoq kechikishi (network latency) — bu ma'lumot paketining tarmoq orqali bir nuqtadan ikkinchi nuqtaga o'tishi uchun ketadigan umumiy vaqt. Tanenbaum va Wetherall (2011) ta'rifiga ko'ra, tarmoq kechikishi quyidagi asosiy komponentlardan tashkil topadi:

Uzatish kechikishi (Transmission Delay) — ma'lumot paketini tarmoq kanaliga joylashtirish uchun ketadigan vaqt. Bu ko'rsatkich paket o'lchamiga va kanal o'tkazuvchanligiga bog'liq. Masalan, 1 Mbps kanalida 1000 bit hajmli paketni uzatish 1 ms davom etadi.

Tarqalish kechikishi (Propagation Delay) — signal tarmoq muhitida (mis simlar, optik tolali kabel yoki simsiz kanal) tarqalish uchun ketadigan vaqt. Bu ko'rsatkich uzatish muhitidagi signal tezligiga va masofaga bog'liq. Optik tolali kabel orqali signal taxminan 200,000 km/s tezlikda tarqaladi.

Qayta ishlash kechikishi (Processing Delay) — router va kommutatorlar paketlarni qabul qilib, yo'nalishini aniqlash va ularni qayta ishlash uchun sarflaydigan vaqt. Zamonaviy yuqori unumdorli routerlarda bu ko'rsatkich mikrosekund darajasida bo'lishi mumkin.

Navbat kechikishi (Queuing Delay) — tarmoq qurilmalarida paketlar navbatda kutish vaqti. Bu ko'rsatkich tarmoq yuklanishiga eng sezgir komponent hisoblanadi va tarmoq yuklanganda sezilarli darajada oshishi mumkin (Forouzan, 2013).

Kechikishga ta'sir etuvchi omillar

Kechikishga ta'sir etuvchi omillarni uch asosiy guruhga ajratish mumkin: fizik, dasturiy va tarmoq arxitekturasi bilan bog'liq omillar.

Fizik omillar qatoriga kabel uzunligi va turi, signal kuchaytirgichlar soni, tarmoq qurilmalarining apparat xususiyatlari kiradi. Jain (1991) tadqiqotlarida ko'rsatilganidek, fiber optik kabellar mis simlar bilan solishtirganda ikki baravar kam kechikish ta'minlaydi, chunki ularda signalning tarqalish tezligi yuqoriroq bo'ladi.

Dasturiy omillar jumlasiga protokollar boshqarish funksiyalari, marshrutizatsiya algoritmlari, operatsion tizim yadrosi tarmoq to'plamining samaradorligi va shifrlash operatsiyalari kiradi. TCP/IP protokollar to'plamining o'zi ham ma'lum miqdorda qo'shimcha kechikish kiritadi, chunki sessiya o'rnatish uchun uch tomonlama qo'l berish (three-way handshake) zarur (Stevens, 1994).

PROTOKOLLARNI OPTIMALLASHTIRISH USULLARI

TCP optimallashtirish texnikalari

Transmission Control Protocol (TCP) — internet tarmog'ining asosiy transport protokoli bo'lib, uning samaradorligi to'g'ridan-to'g'ri kechikishga ta'sir qiladi. TCP kechikishini kamaytirish uchun bir necha samarali usullar ishlab chiqilgan.

TCP Fast Open (TFO) — Google muhandislari tomonidan ishlab chiqilgan ushbu mexanizm TCP qo'l berish jarayonini tezlashtiradi. An'anaviy TCP sessiyasida ma'lumot uzatishni boshlash uchun to'liq uch tomonlama qo'l berish talab etiladi, bu esa kamida bir round-trip time (RTT) kechikish kiritadi. TFO esa birinchi SYN paketi bilan birga ma'lumot yuborishga imkon beradi (Ratnasamy et al., 2011). Tajribalar shuni ko'rsatdiki, TFO veb-sahifalar yuklanishini o'rtacha 10-40% ga tezlashtiradi.

TCP Nagle algoritmini o'chirish — kichik hajmli paketlar bilan intensiv ishlash talab etiladigan ilovalarda (masalan, onlayn o'yinlar yoki SSH sessiyalari) TCP_NODELAY opsiyasini yoqish kechikishni sezilarli kamaytiradi. Nagle algoritmi kichik paketlarni birlashtirish orqali tarmoq samaradorligini oshirsa-da, bu real vaqt ilovalari uchun ortiqcha kechikish kiritadi (Allman et al., 1999).

Receive Window Size optimallashtirish — TCP qabul qilish oynasi hajmini to'g'ri sozlash yuqori kechikishli tarmoqlarda unumdorlikni oshiradi. RFC 1323 da tavsiya etilgan Window Scaling mexanizmi TCP oynasi hajmini 65,535 baytdan 1 gigabaytgacha oshirishga imkon beradi, bu esa yuqori kechikishli tarmoqlarda kanaldan to'liq foydalanishni ta'minlaydi (Jacobson et al., 1992).

QUIC protokoli — kelajak texnologiyasi

QUIC (Quick UDP Internet Connections) protokoli Google tomonidan ishlab chiqilib, keyinchalik IETF tomonidan HTTP/3 asosi sifatida standartlashtirilgan. Ushbu protokol TCP ning asosiy kamchiliklari — head-of-line blocking muammosi va sekin qo'l berish jarayonini — bartaraf etish maqsadida yaratilgan (Langley et al., 2017).

QUIC ning asosiy afzalliklari quyidagilardan iborat: 0-RTT yoki 1-RTT qo'l berish, yani avval muloqot bo'lgan serverlar bilan yangi sessiya boshlashda qo'shimcha round-trip talab etilmaydi; mustaqil oqimlar tufayli bitta paket yo'qolishi faqat o'sha oqimni to'xtatadi, boshqa oqimlar davom etaveradi; TLS 1.3 ni to'liq qo'llab-quvvatlash orqali shifrlash uchun qo'shimcha vaqt sarflanmaydi. Cloudflare va Google'ning amaliy o'lchovlari shuni ko'rsatdiki, QUIC HTTP/2 ga nisbatan sahifa yuklanish vaqtini o'rtacha 8-15% ga, yuqori paket yo'qotilishi sharoitida esa 35% gacha kamaytiradi (Marx et al., 2020).

INFRATUZILMA DARAJASIDA OPTIMALLASHTIRISH

Content Delivery Network (CDN) texnologiyasi

Content Delivery Network — bu geografik jihatdan tarqalgan serverlar tarmog'i bo'lib, kontentni foydalanuvchiga eng yaqin serverdan yetkazib berish hisobiga

kechikishni kamaytiradi. CDN texnologiyasining asosiy g'oyasi Nygren, Sitaraman va Sun (2010) tomonidan batafsil yoritilgan: foydalanuvchi bilan origin server o'rtasidagi masofani qisqartirish orqali propagation delay sezilarli kamayadi.

Akamai Technologies kompaniyasining ma'lumotlariga ko'ra, CDN dan foydalanish veb-ilovalar uchun o'rtacha kechikishni 50-70% ga kamaytiradi. Bu natijaga quyidagi mexanizmlar orqali erishiladi: edge serverlarida statik kontentni kesh (cache) qilish; TCP qo'l berish sonini kamaytirish; optimallashtirilgan tarmoq marshrutlaridan foydalanish; keep-alive ulanishlar orqali qayta-qayta sessiya o'rnatishni oldini olish (Nygren et al., 2010).

Zamonaviy CDN tizimlari faqat statik kontent bilan cheklanmaydi. Dynamic Site Acceleration (DSA) texnologiyasi yordamida dinamik veb-ilovalar ham CDN dan samarali foydalana oladi. Bundan tashqari, CDN tizimlari DDoS hujumlaridan himoya, SSL/TLS terminatsiyasi va tarmoq trafikini optimallashtirish kabi qo'shimcha funktsiyalarni ham bajaradi (Pathan & Buyya, 2007).

Edge Computing va Fog Computing

Edge Computing paradigmasi hisoblash resurslarini foydalanuvchiga yaqinroq joyda — tarmoq chekkasida joylashtirish g'oyasiga asoslanadi. Shi va Dustdar (2016) ta'rifiga ko'ra, Edge Computing bulut hisoblash modelining tabiiy evolyutsiyasi bo'lib, IoT qurilmalari va real vaqt ilovalari uchun kechikishni millisekundan mikrosekund darajasiga tushirish imkonini beradi.

Edge Computing ning asosiy afzalliklari: birinchidan, hisoblash resurslarini tarmoq chekkasiga ko'chirish orqali ma'lumotlar markaziy bulutga jo'natilmasdan, mahalliy qayta ishlash amalga oshiriladi, bu esa 10-100 ms kechikishni 1-5 ms gacha kamaytiradi; ikkinchidan, lokal ma'lumotlarni qayta ishlash kontekstida xavfsizlik va maxfiylik ta'minlanadi; uchinchidan, tarmoq o'tkazuvchanligidan samarali foydalaniladi, chunki faqat kerakli ma'lumotlar bulutga uzatiladi (Mach & Becvar, 2017).

Fog Computing — bu Edge Computing ning kengaytirilgan varianti bo'lib, hisoblash resurslarini tarmoqning turli qatlamlarida (qurilmalar, edge serverlar, regional markazlar va bulut) taqsimlaydi. OpenFog Consortium (2017) ta'rifiga ko'ra, Fog Computing tarmoq iyerarxiyasining barcha darajalarida hisoblashni qo'llab-quvvatlaydi va kechikishni yanada kamaytirish imkonini beradi.

DASTURIY TA'MINOT ASOSIDA TARMOQ BOSHQARUVI

Software-Defined Networking (SDN)

Software-Defined Networking — bu tarmoq boshqaruvini apparat qurilmalaridan ajratib, markazlashtirilgan dasturiy nazorat ostiga olish kontseptsiyasi. McKeown va boshqalar (2008) tomonidan taklif etilgan ushbu yondashuv tarmoq

infratuzilmasini dinamik va moslashuvchan boshqarish imkonini beradi, bu esa kechikishni kamaytirish uchun muhim ahamiyatga ega.

SDN arxitekturasi uch qatlamdan iborat: infratuzilma qatlami (fizik tarmoq qurilmalari), boshqaruv qatlami (SDN kontroller) va ilovalar qatlami. SDN kontrolleri tarmoq topologiyasi haqida to'liq ma'lumotga ega bo'lganligi sababli, u paketlarni eng optimal marshrutlar orqali yo'naltirishi mumkin. OpenFlow protokoli yordamida kontroller har bir oqim uchun alohida yo'naltirish qoidalarini belgilashi mumkin (Kreutz et al., 2015).

SDN ning kechikishni kamaytirish bo'yicha asosiy imkoniyatlari: trafik muhandisligi (Traffic Engineering) yordamida tarmoq resurslarini real vaqtda taqsimlash; tarmoq yuklanishini (load balancing) dinamik boshqarish orqali navbat kechikishini kamaytirish; proaktiv oqim o'rnatish (proactive flow installation) orqali reaktiv kechikishni oldini olish. Yu va boshqalar (2013) o'tkazgan eksperimentlar shuni ko'rsatdiki, SDN asosidagi trafik muhandisligi an'anaviy OSPF marshrutizatsiyasi bilan solishtirganda o'rtacha kechikishni 23% ga kamaytiradi.

XULOSA

Ushbu maqolada tarmoq kechikishlarini kamaytirish bo'yicha zamonaviy ilmiy yondashuvlar va texnologiyalar keng qamrovli tahlil qilindi. Tadqiqot natijalari quyidagi muhim xulosalarga olib keldi. tarmoq kechikishi ko'p komponentli muammo bo'lib, uni samarali hal etish uchun bir vaqtda bir necha darajada — protokol, dasturiy ta'minot, apparat va arxitektura darajalarida — chora-tadbirlarni amalga oshirish zarur. Bitta usulga suyanish ko'pincha yetarli natija bermaydi. QUIC/HTTP3, Edge Computing va 5G URLLC kabi eng yangi texnologiyalar kechikishni sifatijihatdan yangi darajaga — millisekundan mikrosekundga — tushirish imkonini bermoqda. Bu esa ilgari mumkin bo'lmagan yangi ilovalar sinfini — real vaqtda haydovchisiz transport, telesiruriya, immersiv AR/VR tajribalari — amalga oshirish uchun yo'l ochmoqda.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Al-Fares, M., Loukissas, A., & Vahdat, A. (2008). A scalable, commodity data center network architecture. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(4), 63–74.
2. Allman, M., Paxson, V., & Stevens, W. (1999). TCP Congestion Control. RFC 2581. Internet Engineering Task Force (IETF). <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2581>
3. Braden, R., Zhang, L., Berson, S., Herzog, S., & Jamin, S. (1994). Resource Reservation Protocol (RSVP) — Version 1 Functional Specification. RFC 2205. IETF.
4. Forouzan, B. A. (2013). *Data Communications and Networking* (5th ed.). McGraw-Hill. New York.

5. Ge, X., Tu, S., Mao, G., Wang, C. X., & Han, T. (2016). 5G ultra-dense cellular networks. *IEEE Wireless Communications*, 23(1), 72–79.
6. Giordano, L. B., Lacava, A., Patriciello, N., & Martignon, F. (2021). IEEE 802.11be: A complete guide to the upcoming Wi-Fi 7 standard. *IEEE Access*, 9, 20616–20636.
7. Greenberg, A., Hamilton, J. R., Jain, N., Kandula, S., Kim, C., Lahiri, P., ... & Sengupta, S. (2009). VL2: A scalable and flexible data center network. *ACM SIGCOMM*, 39(4), 51–62.
8. Gupta, M. S., & Jha, R. K. (2015). Machine-to-machine communication in the internet of things. *IEEE Access*, 3, 2672–2682.
9. Hu, Y. C., Patel, M., Sabella, D., Sprecher, N., & Young, V. (2015). Mobile edge computing — A key technology towards 5G. *ETSI White Paper*, 11(11), 1–16.
10. ITU (2023). *Measuring digital development: Facts and Figures 2023*. International Telecommunication Union. Geneva.
11. Jacobson, V., Braden, R., & Borman, D. (1992). TCP Extensions for High Performance. RFC 1323. IETF.
12. Jacobson, V., Nichols, K., & Poduri, K. (1999). An Expedited Forwarding PHB. RFC 2598. IETF.