

Késleltetés, ingadozás és aszimmetria: a Starlink-hálózat QoS jellemzőinek vizsgálata

Latency, Jitter, and Asymmetry: An Analysis of Starlink Network QoS Characteristics

Dr. GÁL Zoltán¹, KOBAYASHI Ayaka²

Debreceni Egyetem, Informatikai Kar, Debrecen
4028 Debrecen, Kassai út 26., Magyarország
<http://www.inf.unideb.hu>

¹gal.zoltan@inf.unideb.hu

²ayaka.kobayashi156@mailbox.unideb.hu

Abstract

Low-Earth-orbit satellite systems provide broadband Internet access with substantially lower propagation delay than geostationary systems, but their continuously changing topology introduces pronounced temporal QoS variability. This paper analyses 159,592 approximately five-second Starlink measurement aggregates (798,025 underlying samples) using RTT (Round-Trip Time) level, moving standard deviation, and moving skewness as complementary observables. Data were sampled in July 2026. The mean RTT is 22.92 ms (p95 28.82 ms, p99 33.55 ms) and the global RTT distribution is positively skewed (1.68). A multivariate Hankel embedding with delay dimension 150 shows that adding skewness increases the effective rank from 33.44 for RTT+jitter to 47.22 and raises the number of components required for 95% energy from 55 to 78, demonstrating non-redundant temporal information in latency asymmetry.

Keywords: Starlink, LEO satellite network, RTT, jitter, skewness, Hankel embedding

Kivonat

A Föld körüli alacsony röppályás műholdas rendszerek a geostacionárius megoldásoknál lényegesen kisebb terjedési késleltetést kínálnak, ugyanakkor a folyamatosan változó topológia számottevő időbeli QoS-ingadozást okoz. A tanulmány közel 5 másodperces periódusidővel a Starlink rendszer 159.592 mérési aggregátumát (798.025 mögöttes mintát) elemzi az RTT-szint, a mozgó szórás és a mozgó ferdeség együttes felhasználásával. A mérések 2026 júliusában készültek. Az átlagos RTT 22,92 ms, a p95 és p99 percentilis 28,82 ms, illetve 33,55 ms, a teljes eloszlás ferdesége pedig 1,68. A 150 késleltetési dimenziójú többváltozós Hankel-beágyazásban a ferdeség bevonása az RTT+dzsitter modell 33,44-es effektív rangját 47,22-re, a 95%-os energiaszinthez szükséges komponensek számát pedig 55-ről 78-ra növeli, ami az aszimmetria nem redundáns időbeli információtartalmát jelzi.

Kulcsszavak: Starlink, LEO műholdas hálózat, RTT, dzsitter, ferdeség, Hankel-beágyazás

1. BEVEZETÉS

A Föld körül alacsony röppályán (LEO - Low Earth Orbit) keringő műholdas rendszerek a korszerű szélessávú infrastruktúra egyre fontosabb részét képezik. A hagyományos geostacionárius műholdas rendszerekkel szemben a kisebb pályamagasság lényegesen alacsonyabb terjedési késleltetést tesz lehetővé, így interaktív Internet alkalmazások is elfogadható felhasználói élménnyel működtethetők. A Starlink jelenleg a legnagyobb, széles körben használt kereskedelmi LEO-hozzáférési rendszer, ezért joggal vizsgálják a hálózati szolgáltatásminőségének QoS (Quality of service) jellemzőit.

A korábbi mérések szerint a Starlink kedvező körülmények között a földi hozzáférési technológiákhoz közelítő késleltetést és nagy adatátviteli sebességet biztosíthat [6][7][8]. Ugyanakkor a hálózat dinamikája lényegesen összetettebb a földfelszíni rögzített rendszerekénél. A műholdak gyors mozgása, a kiszolgáló műhold és a nyaláb váltása, az átjáró kiválasztása, a roaming-váltások, a sorban állás és az esetleges hibák egy-

aránt módosíthatják a végpontok között mérhető késleltetést. A nagy időfelbontású vizsgálatok ismétlődő, körülbelül 15 s időskálájú szerkezeti sajátosságokat, valamint a hálózati újrakonfigurálással összefüggő késleltetés- és áteresztőképesség-változásokat azonosítottak [3][4][5], [8].

Ennek következtében a szolgáltatásminőség pusztán átlagos vagy medián RTT-vel történő jellemzése fontos információkat rejthet el. Két mérési intervallum átlagos késleltetése lehet azonos, miközben az egyikben az RTT szűk tartományban mozog, a másikban pedig jelentős rövid idejű ingadozás vagy ritka, nagy pozitív tüskék jelennek meg. Ez utóbbiak különösen érzékenyen érintik a valós idejű kommunikációt, a felhőalapú interaktív szolgáltatásokat és más késleltetéskritikus alkalmazásokat.

A tanulmány három, egymást kiegészítő megfigyelhető mennyiséget vizsgál: az aktuális RTT-szintet, a lokális időbeli szórást és a lokális ferdeséget. Az első a késleltetés szintjét, a második a rövid-közepes időtávú változékonyságot, a harmadik pedig az eloszlás aszimmetriáját méri. A három idősor külön standardizálása után többváltozós blokk-Hankel reprezentációt és szingulárisérték-elemzést alkalmazunk. A feltöltött adatahalmaz további előnye, hogy közvetlenül tartalmazza az egyes kb. 5 másodperces mintavételezési időközökkel készült aggregátumokon belüli RTT-szórást és a késleltetési deciliseket is, így a mozgó statisztikák független, rövidebb időskálájú mérőszámokkal vethetők össze.

A dolgozat további részében előbb áttekintjük a fontosabb kapcsolódó publikációk állításait és eredményeit. A harmadik részben az elemzési módszert ismertetjük, míg az eredményeket és azok értelmezését a negyedik részben mutatjuk be. A dolgozat végén összefoglaljuk a mondanivalót és a témakörrel kapcsolatosan további lehetséges kutatási irányokat fogalmazunk meg.

2. KAPCSOLÓDÓ KUTATÁSOK ÁTTEKINTÉSE

Michel és munkatársai az elsők között végeztek szisztematikus végfelhasználói Starlink-teljesítmény-vizsgálatot [7]. Eredményeik szerint a rendszer késleltetése lényegesen kedvezőbb a klasszikus műholdas hozzáféréseknél, ugyanakkor a terhelés és a csomagvesztés érzékelhetően befolyásolja az RTT-t. Ma és munkatársai több földrajzi és környezeti helyzetben vizsgálták a Starlink rendszert és rámutattak arra, hogy a LEO műholdak hozzáféréseinek késleltetése és áteresztőképessége erős időbeli dinamikát mutat [6]. Mohan és munkatársai nagyméretű, több adatforrást egyesítő vizsgálatukban globálisan szinkronizált, körülbelül 15 másodperces újrakonfigurációs intervallumokat azonosítottak, amelyek jelentős késleltetés- és sebességváltozással járhatnak [8].

Garcia és munkatársai több időskálán elemezték a Starlink áteresztőképességét és szintén kimutatták a 15 s körüli rendszeridő-skálát [4]. Későbbi, nagy időfelbontású egyirányú késleltetésméréseik a felfelétöltés (uplink) és lefelétöltés (downlink) ütemezési sajátosságok eltéréseit, valamint a túl ritka mintavételezésből származó átlapolódás (aliasing) veszélyét emelték ki [5]. Casparsen és munkatársai statisztikai modellel választották szét a LEO-végpontok közötti késleltetés determinisztikus és sztochasztikus komponenseit [3]. Bhosale és munkatársai Astrolabe-modellje közvetlenül az LEO-hálózatok RTT-variabilitását vizsgálja és azt mutatja, hogy egyetlen RTT-bebecslés helyett a változékonyság tartományának leírása informatívabb lehet [1].

A fenti eredmények közös tanulsága, hogy a Starlink minőségi jellemzői időben strukturáltak, és egyetlen skaláris késleltetési statisztika nem elegendő a teljes viselkedés leírására. Jelen dolgozat ehhez az irányhoz kapcsolódik, de az RTT mellett a lokális másod- és harmadrendű statisztikai jellemzőket is időfüggő megfigyelhető mennyiségként kezeli, majd azokat közös késleltetett koordinátátérbe ágyazza. A Hankel-mátrixon alapuló reprezentáció és a szingulárisérték-elemzés a késleltetett koordinátákra épülő adatvezérelt dinamikai módszerekhez kapcsolódik [2].

3. ELEMZÉSI MÓDSZERTAN

A mintavételezett RTT idősor elemzés előtt standardizáljuk. A dzsittert és az aszimmetriát csúszóablakos módszerrel számoljuk, mivel látni akarjuk ezek időbeni módosulását. Többváltozós Hankel-beágyazást alkalmaztunk az RTT átlag, szórás és ferdeség csúszóablakos idősoraira. Szingulárisérték elemzés segítségével három modellt hasonlítottunk össze.

3.1. RTT-mérések és előfeldolgozás

Az MT-hez huzalosan kapcsolódó PC a Debreceni Egyetem Informatikai Kar épületére telepített Starlink-végpontról (MT – mobile terminal) 5 másodperces időközönként kéri a mintavételt a kezdési $T_1 = 2026-07-25T05:57:10$ és befejezési $T_2 = 2026-08-03T11:38:18$ időpillanatok között. A vizsgált adatahalmaz $N = 159.592$ mintavételt tartalmaz. Az MT másodpercenként méri a vele kommunikáló aktív műhellyel lévő

RTT viszont, amit itt mögöttes mérésnek nevezünk. Az MT egy 15 percnyi mögöttes mérési adat tárolására alkalmas historikus pufferral rendelkezik, amibe másodpercenként kerül új mért érték. Ezt az MT automatikusan végzi a felhasználói forgalomtól függetlenül egy dedikált kontrollcsatornán. Minden mintavétel 5 s mérési időt aggregál és a mintavételek 99,98% részében pontosan 5 minta szerepel. Összesen 798.025 darab másodpercenként mért mögöttes érték áll rendelkezésre, ami összesen 9,2 napnak felel meg. A dolgozatban a fő RTT-változó az 5 másodpercenkénti, a részleges csomagvesztés mellett is értelmezett átlagos ping-késleltetés. A 9,2 nap alatt mindössze 4 mintavétel esetén hiányzott érvényes RTT. Az `end_counter` az MT-ben lévő, historikus puffert aktuális pozícióját mutatja és jelzi a mintavételezett értékek tárolásának újraindulási sorrendjét. Ezért a mozgó statisztikai és a csúszóablakokat két folytonos szegmensben képeztük és nem engedjük, hogy az ablak átlépje az újraindulási határt. A standardizálás a szokásos módon történt.

$$\mu_r = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N r_t, \quad \sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N (r_t - \mu_r)^2}, \quad r_t^{(n)} = \frac{r_t - \mu_r}{\sigma_r} \quad (1)$$

ahol r_t a t -edik RTT mintavétel, μ_r az átlag, σ_r a szórás, $r_t^{(n)}$ pedig a standardizált RTT késleltetés. A standardizálás megőrzi az RTT időbeli szerkezetét, ugyanakkor minden mintát a hosszú távú átlagtól való eltérésként, globális szórásrendszerben fejez ki. A későbbi többváltozós felbontásban az RTT, a mozgó szórás és a ferdeség így összehasonlítható numerikus súllyal jelennek meg.

3.2. A dzsitter lokális mérőszáma

A közepes időskálájú RTT-ingadozás leírására $w = 30$ paraméterű visszatekintő csúszóablakban számított mintaszórást alkalmazunk. A kb. 5 s-os soridő mellett ez megközelítőleg 150 s-os lokális időskálát jelent. A t -edik ablakhoz tartozó lokális szórás:

$$\bar{r}_t = \frac{1}{w} \sum_{i=1}^{w-1} r_{t-i}, \quad s_t = \sqrt{\frac{1}{w-1} \sum_{i=1}^{w-1} (r_{t-i} - \bar{r}_t)^2} \quad (2)$$

ahol $\bar{r}_t$ az aktuális w hosszúságú ablakban számított lokális átlagos RTT, s_t pedig a t -edik időpillanathoz tartozó lokális RTT-szórás, vagyis a rövid időtávú késleltetés-ingadozás mértéke. Emellett az adathalmaz közvetlenül tartalmazza a „`stdev_full_ping_latency`” változót, amely a teljesen sikeres ping-minták kb. 5 s-on belüli populációs szórása. E rövidebb időskálájú „natív dzsitter” mediánja 0,24 ms, p95 percentilise 0,85 ms, míg a 150 s-os mozgó szórás mediánja 2,50 ms és p95 percentilise 4,73 ms. A két mérőszám mérsékelt kapcsolatot mutat, így eltérő időskálájú változékonyságot írnak le.

A szórás további normalizálása megakadályozza, hogy az egyik megfigyelhető mennyiség pusztán nagyobb numerikus varianciája miatt dominálja a későbbi SVD-felbontást (Singular Value Decomposition):

$$\mu_s = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N r_s, \quad \sigma_s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N (s_t - \mu_s)^2}, \quad s_t^{(n)} = \frac{s_t - \mu_s}{\sigma_s} \quad (3)$$

ahol N a mintavételek darabszáma, w a csúszóablak hossza, s_t az RTT t -edik mintavétel szórása, μ_s a szórás átlaga, a RTT-szórás szórása, $s_t^{(n)}$ pedig a standardizált szórás.

3.3. A lokális aszimmetria jellemzése

A szórás a fluktuáció nagyságát mutatja, de nem különbözteti meg a közel szimmetrikus ingadozást azoktól az intervallumoktól, amelyekben ritka, nagy pozitív RTT-értékek jelennek meg. Ezért ugyanabban a $w = 30$ soros ablakban a harmadik standardizált momentumon alapuló mozgó ferdeséget is számítjuk. A ferdeségbecslést csak elegendő lokális variancia mellett értelmezzük.

$$g_t = \frac{\frac{1}{w} \sum_{i=0}^{w-1} (r_{t-i} - \bar{r}_t)^3}{\left[\frac{1}{w} \sum_{i=0}^{w-1} (r_{t-i} - \bar{r}_t)^2 \right]^{3/2}} \quad (4)$$

A pozitív g_t azt jelzi, hogy a lokális eloszlás felső farkát ritka, nagy késleltetésű minták nyújtják meg; $g_t \approx 0$ esetén a lokális ingadozás közel szimmetrikus. A teljes RTT-sorozat ferdesége 1,68, a 150 s-os mozgó ferdeség mediánja 0,34, a p95 percentilise pedig 1,58. Kiegészítő robusztus ellenőrzésként a soronkénti p10, p50 és p90 RTT-decilisekből kvantilis-alapú aszimmetria is képezhető; ez nem része a Hankel-modell fő három változójának, de segíthet az extrém értékekkel szembeni érzékenység vizsgálatában. A ferdeséget is standardizáltuk az (1) és (3) összefüggésekkel analóg módon:

$$g_t^n = \frac{g_t - \mu_g}{\sigma_g} \quad (5)$$

A háromdimenziós megfigyelési vektor ezáltal $y_t = [r_t^{(n)}, s_t^{(n)}, g_t^{(n)}]^T, t = 1, 2, \dots, N$ lett, amelynek komponensei rendre a relatív késleltetési szintet, a relatív lokális dzsittert és a relatív lokális aszimmetriát írják le.

3.4. Többváltozós Hankel-beágyazás

A többváltozós Hankel-beágyazás célja, hogy több, egymással összefüggő idősor pillanatnyi értékei helyett azok közös időbeli fejlődését reprezentálja egy megnövelt dimenziójú késleltetett állapotterben. Ezáltal olyan korrelált dinamikai mintázatok, alacsony dimenziós struktúrák és visszatérő állapotok is feltárhatók, amelyek az egyes változók különálló vizsgálatakor rejtve maradhatnak. Gyakorlati előnye, hogy egységes kezelést ad több megfigyelhető mennyiség együttes SVD-, állapotter-, klaszterezési, előrejelzési és anomáliadektálási elemzéséhez, miközben explicit módon megőrzi a választott időhorizonton belüli időbeli összefüggéseket.

Az egyedi QoS-minták nem tartalmaznak információt arról, hogy a rendszer milyen időbeli trajektória mentén jutott az aktuális állapotba. A d késleltetési dimenziójú beágyazás minden időpontban d egymást követő háromdimenziós megfigyelést kapcsol össze:

$$h_j = [y_j^T, y_{j+1}^T, \dots, y_{j+d-1}^T]^T \in \mathbb{R}^{3d} \quad (6)$$

Az összes érvényes késleltetett vektor oszlopként történő összerendezésével kapjuk a blokk-Hankel mátrixot:

$$H_Y = [h_1 \ h_2 \ \dots \ h_{N-d+1}] \in \mathbb{R}^{3d \times (N-d+1)} \quad (7)$$

A $d = 150$ késleltetési dimenzió a kb. 5 s-os mintavételi időköz mellett az első és utolsó késleltetett minta között mintegy 745 s-os (12,4 perces) időhorizontot fed le. A teljes háromváltozós blokk-Hankel mátrix elméleti mérete 450×159.443 lenne. A spektrális elemzésben a szegmenshatárokat és hiányos ablakokat kizárva minden ötödik érvényes késleltetett állapotot használtunk, így 31.812 oszlop kerül a kovarianciaalapú SVD-elemzésbe. A 2, 5, 10 és 20 oszlopos lépésközzel végzett érzékenységi vizsgálat a 90/95/99%-os energiadimenziókat legfeljebb egy komponenssel változtatta, ezért az 5-ös lépésköz jó számítási kompromisszumnak számít.

3.5. Szingulárisérték-elemzés

Az SVD felbontás segítségével a késleltetett mátrix spektrumát a $C_H = H_Y \times H_Y^T \in \mathbb{R}^{3d \times 3d}$ kovarianciamátrix sajátértékeiből számítjuk, ami a teljes V mátrix előállításával nélkül adja a szinguláris értékek négyzetével arányos energiaspektrumot. A C_H SVD felbontása az alábbi mátrixokat határozza meg:

$$C_H = U \times \Sigma \times V^T \quad (8)$$

ahol $U \in \mathbb{R}^{3d \times q}, V \in \mathbb{R}^{q \times q}, \Sigma \in \mathbb{R}^{q \times 3d}$ rendre a bal, illetve jobb oldali szinguláris vektorok mátrixa, valamint a szinguláris értékeket csökkenő sorrendben tartalmazó átlós négyzetmátrix. A normalizált sajátértékek kumulatív összege alapján meghatározzuk a 90, 95 és 99%-os energiaszinthez szükséges komponensszámot, továbbá a q ($1 \leq q \leq 3d$), entrópialapú effektív rangot.

$$E(q) = \frac{\sum_{i=1}^q \sigma_i^2}{\sum_{i=1}^{3d} \sigma_i^2} \quad (9)$$

ahol σ_i az i -edik szinguláris érték, q a megtartott domináns szinguláris komponensek száma. Három modellt hasonlítunk össze: i) RTT; ii) RTT+mozgó STD; iii) valamint RTT+mozgó STD+mozgó ferdeség.

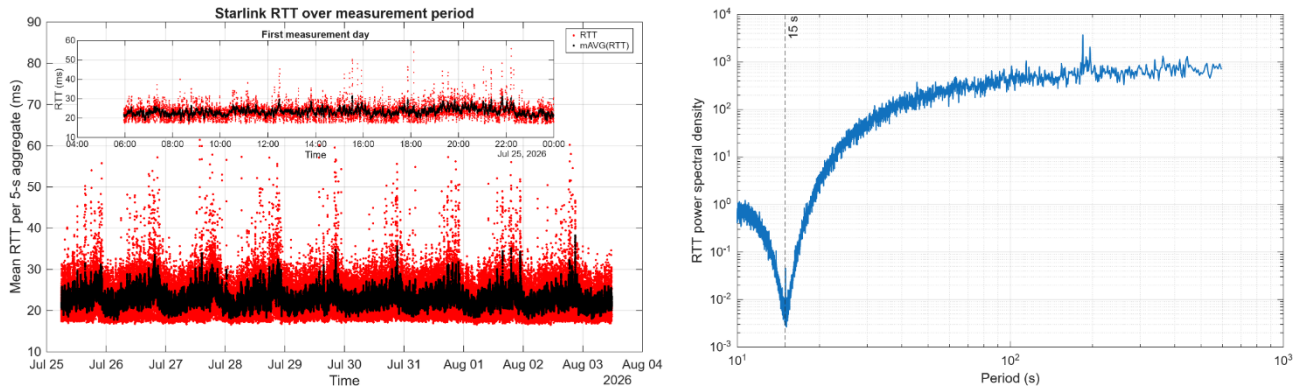
A ferdeség hozzáadott információtartalmát nem pusztán a formális ranggal, hanem a kumulatív energiaspektrum, az effektív rang és a QoS-állapotter szerkezete alapján ítéljük meg. Ha a ferdeség redundáns volna, a harmadik változó főként kis energiájú irányokat adna; ezzel szemben a mérésben a 95%-os energiaszint 55-ről 78 komponensre, az effektív rang 33,44-ről 47,22-re nő az RTT+STD modellhez képest.

4. ELEMZÉSI EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS

A továbbiakban a válaszügy alap statisztikai jellemzőit vizsgáljuk meg, majd a késleltetés, dzsitter és aszimmetria közös hatását, utána a Hankel-mátrix szingularitásérték-jellemzőit, majd az időablak és a késleltetési dimenzió hatásait tárjuk fel az RTT-idősorra.

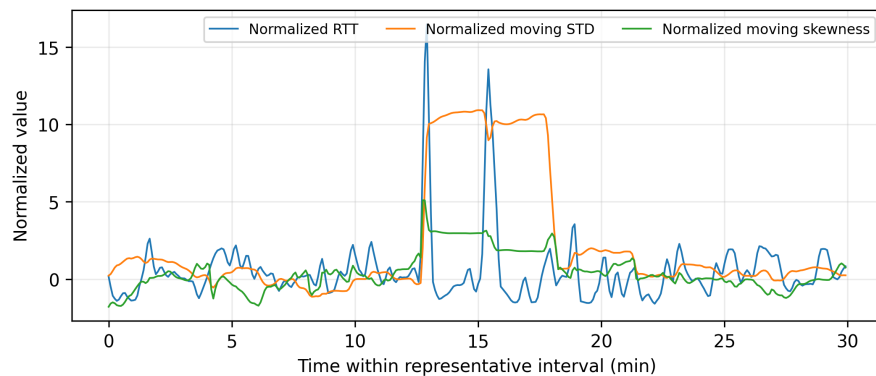
4.1. Az RTT statisztikai jellemzői

A mérési sorozat 159.592 aggregált sort és 159.588 érvényes RTT-értéket tartalmaz. Az átlagos RTT 22,92 ms, a medián 22,62 ms, a szórás 3,52 ms, a p95 és p99 percentilis rendre 28,82 ms és 33,54 ms, a maximum 80,97 ms. A globális ferdeség 1,680, a többletsúcsosság 9,067, tehát az eloszlás kifejezetten jobbra ferde és nehéz felső farkú. Az összesített mintavesztési arány mindössze 0,03%, de a sorok 1,11% arányában fordult elő nem nulla veszteség.



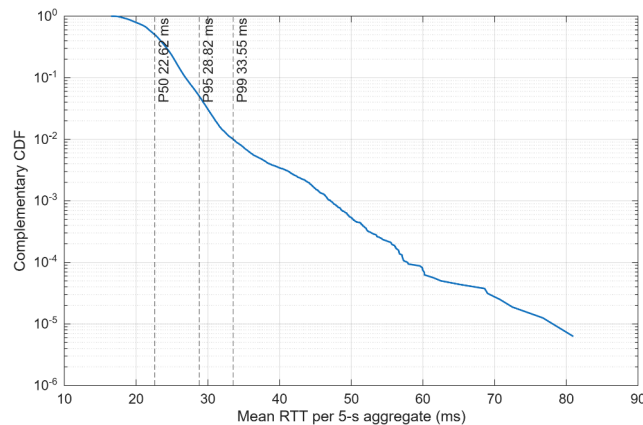
1. ábra. A mintavételezett RTT értékek

Az 1. ábra a mintavételezett RTT idősort (bal), illetve annak teljesítményspektrális sűrűségét szemlélteti. A 15 s-os periódus környezetében nem mutat spektrális csúcsot, hanem kifejezett minimum figyelhető meg, ezért a jelen, mintegy 5 s-os aggregált mintavételezés alapján a szakirodalomban jelzett közel 15 s-os periodicitás nem igazolható, miközben a spektrális energia elsősorban hosszabb időskálákon koncentrálódik.



2. ábra. Egy reprezentatív mérési szakasz RTT-, mozgó szórás- és mozgó ferdeség-idősora

Az 2. ábra egy erősen változó, kb. 30 perces szakaszt mutat. A rövid RTT-tűskék azonnal megjelennek az RTT-ben, míg a 150 s-os mozgó szórás tartósabban emelkedett marad, a mozgó ferdeség pedig különösen az izolált pozitív kiugrásokra reagál. Ez alátámasztja, hogy a három változó nem ugyanazt a QoS-jellemzőt méri.

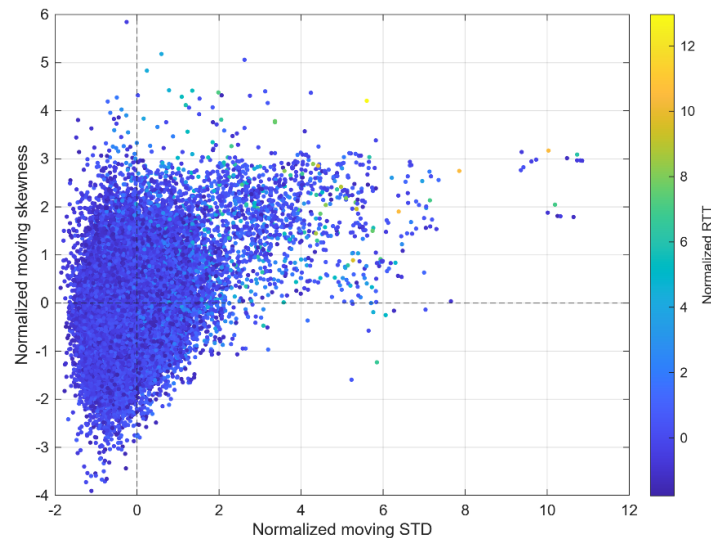


3. ábra. Az RTT empirikus eloszlása, a medián, a p95 és p99 percentilis jelölésével

A 3. ábra CCDF-je jól látható felső farkat mutat: az RTT-medián 22,62 ms, a P95 28,82 ms, a P99 33,55 ms, míg ritka események 80 ms fölé is kerülnek. A jobbra ferde eloszlás összhangban áll a nagy időfelbontású Starlink-vizsgálatokban leírt felső-farki késleltetési eseményekkel [3], [5].

4.2. A késleltetés, a dzsitter és az aszimmetria közös viselkedése

A három fő megfigyelhető mennyiség Pearson-korrelációi mérsékeltek: $\rho(\text{RTT}, \text{STD}) = 0,255$, $\rho(\text{RTT}, \text{ferdeség}) = 0,109$ és $\rho(\text{STD}, \text{ferdeség}) = 0,393$. Ez különösen a ferdeség önálló információtartalmát támasztja alá. A veszteséges sorokban az átlagos RTT 24,58 ms, szemben a veszteségmentes 22,90 ms-mal; a P99 még erősebben, 33,35 ms-ról 50,68 ms-ra nő. A mozgó szórás átlaga 2,72-ről 3,03 ms-ra, a mozgó ferdeségé 0,384-ről 0,461-re emelkedik. A terminál 5 s-os natív dzsitterének mediánja nem nő ugyanilyen egyértelműen, ugyanakkor veszteséges soroknál a p99 1,92 ms a veszteségmentes 1,46 ms-hoz képest, ami a rövid idejű szélsőséges ingadozások szerepét jelzi.

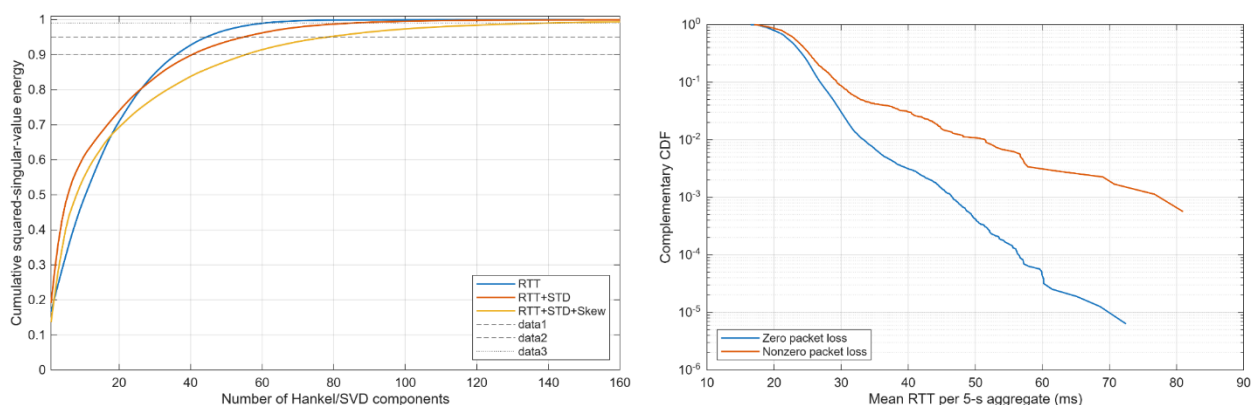


4. ábra. QoS-állapotter: normalizált mozgó szórás és ferdeség, az RTT értékével színezve

A 4. ábra állapottere alapján a nagy mozgó szórású tartományokban a ferdeség széles skálán változhat, ezért a magas dzsitter önmagában nem azonos a pozitív felső-farki aszimmetriával. A legnagyobb normalizált RTT-értékek jellemzően a pozitív szórás- és/vagy ferdeségtartományban jelennek meg, de a pontfelhő nem egyetlen egyenes mentén koncentrálódik. Ez vizuálisan is megerősíti a mérsékelt páronkénti korrelációkat.

4.3. A Hankel-mátrix szingulárisérték-szerkezete

A $d = 150$ beágyazásnál az RTT-only modellben 36, 45 és 61 komponens szükséges a 90, 95 és 99%-os energia eléréséhez; az effektív rang 37,35. Az RTT+STD modellnél ugyanezek 41/55/85, miközben az első tíz komponens már az energia 60,7%-át hordozza és az effektív rang 33,44. A lokális variabilitás tehát erősen strukturált, alacsonyabb dimenziós komponenseket is bevezet.



5. ábra. Bal: Normalizált szingulárisérték-spektrum vagy kumulatív energia RTT, RTT+STD és RTT+STD+ferdeség beágyazás esetén. Jobb: RTT-eloszlásának CCDF-je

A ferdeség hozzáadásakor a 90/95/99%-os küszöbök 56/78/139 komponensre, az effektív rang 47,22-re változik, az első tíz komponens energiárészesedése pedig 54,6%-ra csökken. Mivel mindhárom bemeneti változó külön-külön egységnyi szórásra normalizált, ez a változás nem egyszerű mértékegység-hatás: a ferdeség a domináns RTT+dzsitter altéren kívüli, strukturált időbeli irányokat ad hozzá. A lépésköz 2 és 20 közötti változtatása mellett az energiadimenziók gyakorlatilag változatlanok maradtak.

A 5. ábra (bal) ezért a cikk egyik fő eredményét szemlélteti: a dzsitter hozzáadása növeli a vezető komponensek koncentrációját, míg az aszimmetria ismét szélesebb spektrumot hoz létre. Ez nem azt jelenti, hogy a nagyobb modell minden alkalmazásban jobb, hanem azt, hogy a ferdeség elhagyása mérhető dinamikai információt távolít el a QoS-állapot reprezentációjából. Az 5. ábra (jobb) a nem zérus csomagvesztéssel járó 5 s-os intervallumok RTT-eloszlásának komplementer eloszlásfüggvénye (CCDF) következetesen magasabb késleltetési farokrészt mutat, ami arra utal, hogy a csomagvesztéses időszakokban a nagy RTT-értékek előfordulási valószínűsége lényegesen nagyobb, mint veszteségmentes működés esetén

4.4. Az időablak és a késleltetési dimenzió hatása

A fő elemzésben $w = 30$, vagyis kb. 150 s-os mozgó statisztikai ablakot és $d = 150$, vagyis kb. 12,4 perces Hankel-időhorizontot alkalmazunk. A mozgó statisztikák ablaka és a késleltetett beágyazás erős átfedést okoz, ezért az alacsony rangot nem szabad teljes egészében fizikai hálózati dinamikaként értelmezni. Ezt a Hankel-oszlopok ritkítására végzett érzékenységi próba részben ellenőrzi, de további w - és d -söprés indokolt. Kiegészítő spektrális vizsgálatot is végeztünk a kb. 5 s-os aggregált RTT-soron.

A szakirodalomban leírt 15 s-os Starlink-újrakonfiguráció [4], [8] ezen az adatsoron nem jelenik meg markáns teljesítmény-spektrum csúcsként. A 15 s-os periódusnak megfelelő spektrális komponens teljesítménye a 10–300 s-os sáv mediánjánál is jóval kisebb. Ez nem cáfolja a nagy időfelbontású mérések eredményét: három aggregált pont/ciklus és az öt másodperces átlagolás jelentősen csillapíthatja vagy átfedheti (alias) ezt a jelenséget, amire a finom felbontású késleltetési vizsgálatok is felhívják a figyelmet [5].

5. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

A vizsgált 159.592 Starlink QoS-aggregátum alapján az RTT önmagában nem írja le teljesen a késleltetés minőségét. Az átlagos RTT 22,92 ms, de a jobbra ferde felső farok, a változó lokális szórás és a csomagvesztéssel együtt növekvő p99 külön dinamikát mutatnak. A háromdimenziós, normalizált RTT–dzsitter–ferdeség Hankel-reprezentációban a ferdeség bevonása a 95%-os energiaszinthez szükséges komponensszámot 55-ről 78-ra, az effektív rangot 33,44-ről 47,22-re növeli, tehát érdemi, nem redundáns információt ad.

További munka szükséges a mozgóablak és a Hankel-dimenzió szisztematikus optimalizálásához, a nagy időfelbontású nyers RTT-minták elemzéséhez, valamint a QoS-állapotok műholdváltásokkal, veszteséggel, átviteli sebességgel és geometriai információkkal való összekapcsolásához.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezt a munkát a Debreceni Egyetem QoS-HPC-IoT Laboratórium és a TKP2021-NKTA-34 projekt támogatta. A TKP2021-NKTA-34 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NKTA pályázati program finanszírozásában valósult meg. A munkát az OMAA 121öu2 projekt is támogatta.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Bhosale V., Bhardwaj K., Saeed A. Astrolabe, *Modeling RTT Variability in LEO Networks*. In: Proceedings of the 1st ACM Workshop on LEO Networking and Communication (LEO-NET '23), ACM, 2023, 7–12. doi: 10.1145/3614204.3616104.
- [2] Brunton S. L., Brunton B. W., Proctor J. L., Kaiser E., Kutz J. N. *Chaos as an intermittently forced linear system*. In: Nature Communications, Nature Portfolio, 2017, 8, Article 19. doi: 10.1038/s41467-017-00030-8.
- [3] Casparsen A., Jakobsen J. E., Nielsen J. J., Popovski P., Leyva-Mayorga I. *Statistical characterization and prediction of E2E latency over LEO satellite networks*. In: npj Wireless Technology, Nature Portfolio, 2026, 2, Article 36. doi: 10.1038/s44459-026-00044-z.
- [4] Garcia J., Sundberg S., Caso G., Brunström A. *Multi-Timescale Evaluation of Starlink Throughput*. In: Proceedings of the 1st ACM Workshop on LEO Networking and Communication (LEO-NET '23), ACM, 2023, 31–36. doi: 10.1145/3614204.3616108.

- [5] Garcia J., Sundberg S., Brunström A. *A Detailed Characterization of Starlink One-way Delay*. In: Proceedings of the 3rd Workshop on LEO Networking and Communication (LEO-NET), ACM, 2025, 43–49. doi: 10.1145/3748749.3749090.
- [6] Ma S., Chou Y. C., Zhao H., Chen L., Ma X., Liu J. *Network Characteristics of LEO Satellite Constellations: A Starlink-Based Measurement from End Users*. In: IEEE INFOCOM 2023 – IEEE Conference on Computer Communications, IEEE, 2023, 1–10. doi: 10.1109/INFOCOM53939.2023.10228912.
- [7] Michel F., Trevisan M., Giordano D., Bonaventure O. *A First Look at Starlink Performance*. In: Proceedings of the 22nd ACM Internet Measurement Conference (IMC '22), ACM, 2022, 130–136. doi: 10.1145/3517745.3561416.
- [8] Mohan N., Ferguson A. E., Cech H., Bose R., Renatin P. R., Marina M. K., Ott J. *A Multifaceted Look at Starlink Performance*. In: Proceedings of the ACM Web Conference 2024 (WWW '24), ACM, 2024, 2723–2734. doi: 10.1145/3589334.3645328.