

Zakasnitve v modernih komunikacijah

Tomi Mlinar¹

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Katedra za informacijske in komunikacijske tehnologije, Laboratorij za sevanje in optiko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana
tomi.mlinar@fe.uni-lj.si

Latency in modern communications

Abstract. This article briefly describes reasons for latencies in modern communications and gives short overview of required maximum latencies for selected services. There are several techniques in optical and radio communication systems that can lower total latencies below desired level. This article covers some of them, focusing on the fifth generation of mobile communications (5G).

1 Uvod

Zakasnitve v modernih komunikacijah postajajo vedno večji izziv. Govorne komunikacije počasi izgubljajo primat. Prevzemajo ga druge oblike komunikacij med napravami, tudi če za njimi stoji človek. Poleg sluha in vida prihaja od čutil v ospredje tudi tip (t.i. haptični odziv). Če želimo, da možgani razumejo usklajenost vseh treh čutil pri neki aplikaciji, se morajo stvari dogajati skoraj v realnem času oz. z minimalno zakasnitvijo. Drugo področje, kjer morajo biti zakasnitve zelo majhne, je področje kritičnih komunikacij in komunikacij med napravami. Dobra primera sta področji avtomatizacije v industriji in samovozeča vozila.

V tem prispevku se posvečamo vsem elementom komunikacijske verige, ki pri prenosu signala vnašajo določene zakasnitve.

2 Teoretična podlaga

V slovenski terminologiji se uporablja izraz »zakasnitev« za dva angleška izraza: »latency«, kar bi lahko prevedli tudi kot latenca oz. reakcijski čas, in »delay«, kar bolj direktno pomeni zakasnitev ali zamudo. Po eni od definicij pomeni izraz »delay« čas, ki ga porabi prvi bit informacije, da prepotuje pot od oddajnika do sprejemnika, medtem ko izraz »latency« pomeni čas, ki ga porabi celotno sporočilo (vsi biti informacije), da opravi isto pot.

Po danes splošno sprejeti fizikalni teoriji [1] se elektromagnetno valovanje v vakuumu širi s svetlobno hitrostjo 299.792.458 m/s ali prepotuje razdaljo enega metra v času 3,3 nanosekunde. Hitrost elektromagnetnega valovanja v vakuumu je določena z električno konstanto (dielektričnostjo) ϵ_0 in magnetno konstanto (permeabilnostjo) μ_0 . Določi se jo po enačbi (1).

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (1)$$

Hitrost v nekem mediju (npr. zrak, optično vlakno) je malo manjša od svetlobne in je odvisna od lomnega količnika medija, ki ga izračunamo po enačbi (2).

$$n = c/v \left[\frac{m}{s} \right], \quad (2)$$

kjer je c hitrost svetlobe v vakuumu in v hitrost svetlobe v mediju. Steklo ima lomni količnik približno 1,5, kar pomeni, da se elektromagnetni val širi po steklu s hitrostjo približno 200.000 km/s, medtem ko ima zrak lomni količnik 1,0003 in je hitrost širjenja približno 299.700 km/s [1].

Svetovna telekomunikacijska zveza ITU je v dokumentu [2] zapisala največje priporočene skupne vrednosti zakasnitev (E2E, End-to-End) na posameznih segmentih omrežja (preglednica 1). Že leta 2003, ko je nastal ta dokument, je bila največja priporočena skupna enosmerna zakasnitev v omrežju 400 ms, ciljna 150 ms, medtem kot naj bi bila za interaktivne podatkovne komunikacije ta vrednost manj kot 100 ms.

Preglednica 1. Zakasnitve prenosnih elementov po ITU

Prenosni sistem/element	Skupna zakasnitev (E2E)
Koaksialni kabel	4 μ s/km
Optično vlakno	5 μ s/km
Satelitski sistemi: -400 km (LEO ¹)	12 ms
-14.000 km (MEO ²)	110 ms
-36.000 km (GEO ³)	260 ms
Podmorski koaksialni kabelski sistem	6 μ s/km
Podmorski optični sistem: -oddajni terminal	13 ms
-sprejemni terminal	10 ms
Javni mobilni sistem	80-110 ms
Digitalna tranzitna centrala	0,45 ms
Digitalna lokalna centrala, DSL	0,825 ms
Predpomnilnik za kompenzacijo zakasnitev IP-paketov	25 ms

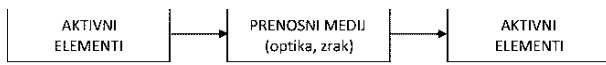
Največji vir zakasnitev v IP-komunikacijah so usmerjanja med oddajnikom in sprejemnikom.

¹ LEO (Low Earth Orbit)–nizka zemeljska orbita (160–2000 km)

² MEO (Medium Earth Orbit)–srednja zemeljska orbita (2000–35.000 km)

³ GEO (Geostationary Equatorial Orbit)–Geostacionarna zemeljska orbita (35.786 km)

3 Komunikacijski prenosni sistemi



Slika 1. Komunikacijski prenosni sistem

Vsak komunikacijski sistem (slika 1) je sestavljen iz aktivnih elementov na oddajni in sprejemni strani in prenosnega medija. Vsak od elementov vnaša določeno zakasnitev.

Čas, ki ga porabi elektromagnetni val, da opravi pot od točke A do točke B, je odvisen od razdalje med točkama in od medija, po katerem se širi (preglednica 2). K podaljšanju časa prenosa dodajo še aktivni prenosni elementi, kot npr. elektro-optični pretvorniki, filtri in drugi.

Preglednica 2. Prenosne hitrosti v prenosnih medijih

Prenosni medij	% svetlobne hitrosti
Vakuum	100 %
Zrak	99,7 %
Optično vlakno	67 %
Debel koaksialni kabel	77 %
Tanek koaksialni kabel	65 %
Prepleten bakreni par	59 %

Seveda bi se vse spremenilo, če bi prenos informacije lahko pospešili nad svetlobno hitrost, kar posega na področje t.i. »super luminalnih« komunikacij [3], ki pa presegajo vsebino tega prispevka.

Vsaka od tehnologij – električna ali optična – ima svoje prednosti [4]. Elektroni so s svojimi močnimi medsebojnimi interakcijami primerni za hitre preklope, kar je primerno za uporabo v logičnih vezjih in spominskih celicah. Fotoni, katerih interakcije so šibkejšje, pa so primerni za prenos signalov na večje razdalje.

3.1 Vrvični prenosni sistemi

Iz preglednice 2 je razvidno, da je hitrost gibanja signala po debelem koaksialnem kablu za 10 % bližje svetlobni kot pri optičnem vlaknu, vendar ima optično vlakno druge pomembne prednosti, kot npr. manjše slabljenje na večji prenosni razdalji in precej večjo pasovno širino.

Med najbolj zmogljive vrvične sisteme v modernih komunikacijah torej štejemo optična vlakna oziroma optične sisteme. Lomni količnik stekla v optičnem vlaknu je približno 1,5 pri valovni dolžini 1550 nm, kar pomeni širjenje signala po vlaknu s hitrostjo, ki je približno 33 % manjša od svetlobne. Lomni količnik se spreminja z valovno dolžino svetlobe in sestavo optičnega vlakna.

K skupni zakasnitvi v optičnem sistemu pa prispevajo naslednji elementi [5]: postavljanje bitov informacije v vrsto (serializacija), elektro-optična pretvorba, optično

vlakno, optično-električna pretvorba in sestavljanje bitov v besede (deserializacija).

Medtem ko aktivni elementi vnašajo fiksno zakasnitev, je zakasnitev medija (npr. optičnega vlakna) odvisna od njegove dolžine. Daljše kot je vlakno, večja je zakasnitev. Zakasnitev v običajnem optičnem vlaknu je 5 μ s na kilometer.

Zakasnitve v optičnih komunikacijah lahko zmanjšamo na več načinov. Najosnovnejša sta uporaba vlakna z najnižjim lomnim količnikom za dano valovno dolžino in načrtuje najkrajše možne trase optičnega vlakna. Drugi tehnološki postopki, ki so podrobneje opisani v [5], pa so: uporaba votlega vlakna, kompenzacija disperzije in uporaba Ramanovega ojačevalnika.

Današnje tehnologije [4] omogočajo prenosne hitrosti do 1 Tb/s po optičnih vlaknih v t.i. superkanalih. Zaradi nelinearne Shannonove meje pa je 12 Tb/s tudi vršna hitrost, ki jo lahko iztisnemo iz obstoječih optičnih vlaken, ki so bila v osnovi narejena za prenosne hitrosti do 10 Gb/s ali manj.

3.2 Brezvrvični prenosni sistemi

V enačbi (3) so zapisani segmenti brezvrvičnega omrežja, ki vnašajo zakasnitve.

$$T = T_{Radio} + T_{Zaledne\ pov.} + T_{Jedro} + T_{Trnasport} \quad (3)$$

T_R je zakasnitev pri prenosu podatkov med bazno postajo in terminalom in je odvisen predvsem od lastnosti fizičnega sloja komunikacije. Ta zakasnitev je vsota prenosnega časa, zakasnitve zaradi razširjanja signala, časa obdelave (ocene kanala, kodiranja in dekodiranja) in morebitne ponovne oddaje, zaradi izgube paketov. Po ITU mora biti ta zakasnitev manj kot 0,5 ms. $T_{Zaledne\ pov.}$ je zakasnitev pri vzpostavljanju povezave med bazno postajo in jedrnim omrežjem. Odvisen je od lastnosti povezave, običajno je to optika. T_{Jedro} je zakasnitev, ki jo vnaša obdelava v jedrnem delu omrežja. $T_{Transport}$ je zakasnitev, ki jo vnesel komunikacija med jedrnim omrežjem in internetom/oblakom.

Skupna zakasnitev (E2E) je zapisana z enačbo (4).

$$T_{E2E} = 2 \times T \quad (4)$$

Generacije brezvrvičnih omrežij so glede zakasnitev napredovale, predvsem zaradi specifične zgradbe omrežja in razvoja tehnologije (preglednica 3).

Preglednica 3. Zakasnitve v omrežjih 2G do 5G [7]

Mobilno omrežje	Zakasnitve (E2E)
2G	500-1000 ms
3G	200 ms
4G	100 ms
5G	1 ms

Kmalu bodo aktualna omrežja pete generacije (5G), ki danes delujejo v testne namene, komercialno pa naj bi

zaživila v letu 2020. Po krovni definiciji priporočil 3GPP [8, 9] naj bi bil sistem 5G zgrajen tako, da bi omogočal optimalno podporo različnim, predvsem interaktivnim storitvam, kjer so zakasnitve izjemnega pomena. ITU in druge organizacije so izoblikovale tri glavne skupine storitev, ki naj bi zaznamovale 5G. To so: izboljšane širokopasovne komunikacije (eMBB, Enhanced Mobile Broadband), masovne komunikacije med napravami (mMTC, Massive Machine Type Communications) in zelo zanesljive komunikacije z majhnimi zakasnitvami (URLLC, Ultra Reliable Low Latency Communications).

Za tretjo skupino storitev (URLLC) je pomembno zmanjšanje skupnih zakasnitev na najmanjšo dopustno raven, za kar so potrebne izboljšave tako na fizičnem kot tudi na višjih slojih.

Zakasnitve na posameznih segmentih omrežja 5G so zajete v preglednici 4.

Preglednica 4. Zakasnitve v omrežju 5G [7, 8, 9]

Zakasnitve v omrežju 5G	
Zakasnitev v kontrolni ravnini	10 ms
Zakasnitev v uporabniški ravnini (UL ali DL):	0,5 ms za URLLC 4 ms za eMBB 50 ms RTT ⁴ (LEO) 180 ms RTT (MEO) 600 ms RTT (GEO)
Zakasnitve v fizični ravnini: -čas obdelave UE ⁵ -čas obdelave eNB ⁶ -minimalen TTI ⁷ -časi za prenos ACK/NACK	0,3 ms 0,3 ms 0,2 ms 0,06 ms (kratka razdalja) 0,25 ms (srednja razdalja) 0,50 ms (velika razdalja) 1,00 ms (ekstremno pokrivanje)

4 Storitve in zelene zakasnitve

4.1 Pomen zakasnitev

Izpolnjevanje določenih ključnih parametrov komunikacijskega sistema (predvsem zakasnitev) je predpogoj, da bo lahko ta zagotavljal prihodnje storitve, ki zahtevajo dober (hiter) haptičen odziv, kot npr. operacije na daljavo, aplikacije obogatene resničnosti (AR, Augmented Reality), navidezne resničnosti (VR, Virtual Reality), pa tudi druge, kot npr. nadzor zrakoplovov brez posadke (UAV, Unmanned Aerial Vehicle), komunikacijo med samovozečimi vozili, interaktivne spletne igre, avtomatizacijo in robotizacijo tovarn in podobno.

Dobro poznan je primer borznega trgovanja. Borzniki se dobro zavedajo, da je hitrost njihovih sistemov in komunikacijskih povezav ključnega pomena za dobiček ali izgubo. Zato najemajo svoje prostore čim bližje prostorom borze oz. borznim računalnikom. Če so ti prostori v sosednjih stavbah ali celo bolj oddaljeni,

velikokrat uporabijo mikrovalovne zveze namesto optičnih vlaken, saj so te bistveno hitrejše (glej preglednico 2).

4.2 Zakasnitve po panogah

Organizacija 3GPP je v različici 15 [8] predvidela največje zakasnitve, ki še omogočajo kakovostne storitve. V nadaljevanju so za posamezne panoge zajete nekatere storitve in priporočene zakasnitve.

1. Promet

V prometu se velikostni razredi največjih dovoljenih zakasnitev razlikujejo od vrste operacije. Vse zakasnitve veljajo med končnima točkama (E2E):

- srednje/dolgo-ročno modeliranje okolice (npr. dinamično osveževanje digitalne karte visoke razločljivosti): 100 ms;
- kratkoročno modeliranje okolice (npr. senzorji): <20 ms;
- sodelovanje (npr. koordiniran nadzor):
< 3 ms (vožnja v konvoju),
< 10 ms (sodelovalni manever),
< 100 ms (običajna vožnja);
- upravljanje vozila na daljavo: 10-30 ms.

2. Transport

V transportu, logistiki in internetu stvari (npr. odčitavanje senzorjev in poročanje, sledenje blagu, nadzor, posredovanje informacij glede na vsebino ...) so priporočene naslednje največje zakasnitve (vse E2E):

- množična povezljivost, kritično odčitavanje in posredovanje informacij: < 30 ms;
- upravljanje dronov na daljavo in sodelovalno upravljanje skupine strojev: 10-30 ms;
- upravljanje diskretnih avtomatiziranih procesov v realnem času: < 1 ms.

3. Pametna mesta in medicina

Na področju pametnih mest in medicine, npr. posredovanje video posnetkov razločljivosti UHD za daljinsko zdravstveno oskrbo, pomoč pri operaciji, upravljanje medicinskih naprav v realnem času, nadzor in usmerjanje v mestih in podobno, veljajo naslednje največje zakasnitve (vse E2E):

- teleprisotnost, obogatena resničnost, pomoč pri operacijah, nadzor in usmerjanje: 100 ms;
- upravljanje medicinskih naprav v realnem času (pri operacijah): 10-100 ms;
- pametne mreže: < 5 ms za prenosno omrežje/hrbtenično omrežje in < 50 ms za distribucijsko omrežje;
- časovno kritično zaznavanje in poročanje v pametnih mestih: 30 ms.

4. Medijske in razvedrilne vsebine

Dostopanje do medijskih in razvedrilnih vsebin na strežniku ali prenos vsebin med uporabniki, npr. sodelovanje v spletnih igrah, pretakanje informacij v živo ob večjih dogodkih (vse E2E) zahteva največjo zakasnitev 20 ms.

V preglednici 5 so zajete zakasnitve za nekatere časovno občutljive storitve [5, 7].

⁴ RTT (Round Trip Time)–obhodni čas

⁵ UE (User Equipment)–uporabniška oprema

⁶ eNB (e Node B)–bazna postaja 5G

⁷ TTI (Transmission Time Interval)–prenosni čas

Preglednica 5. Zahtevane zakasnitve za nekatere storitve 5G

Navidezna/obogatena resničnost	
Zakasnitev osveževanja slike pri premiku glave	7-15 ms (ohrani se prenosna hitrost 1 Gb/s)
Zakasnitev osveževanja zvoka pri premiku glave	< 20 ms
Zakasnitev pri kodiranju govora	100 ms (enosmerno ustauhu)
Sinhronizacija video-avdio	
- avdio zakasnen	125-5 ms
- avdio prehiteva	45-5 ms
Inteligentni transportni sistemi	
Največja zakasnitev E2E	30 ms
Razpoložljivost komunikacijske storitve	99,9999 %
Lokalizacija	
<i>Zakasnitev (razpoložljivost)</i>	<i>Točnost lokacije horizontalna/vertikalna</i>
1 s (95 %)	10/3 m
1 s (99 %)	3/3 m
1 s (99 %)	1/2 m
15 ms (99,9 %)	1/2 m
1 s (99 %)	0,3/2 m
10 ms (99,9 %)	0,3/2 m
1 s (99 %)	0,2/0,2 m
Automatizacija procesov v tovarnah	
Zakasnitev	0,25-10 ms
Stopnja izgubljenih paketov	10 ⁻⁹
Robotika in teleprisotnost	
Zakasnitve	nekaj ms
Medicinske aplikacije	
Zakasnitev obe smeri)	1 ms
Resne igre (izobraževanje, trening...)	
Zakasnitev obe smeri)	1 ms
Pametne mreže	
Zakasnitev (E2E) pri preklopu med virom energije	100 ms
Zakasnitev (E2E) pri sinhronizaciji virov enegije (generatorjev)	1 ms
Izobraževanje in kultura (otipljiv internet)	
Zakasnitev (obe smeri) za vizualne, govorne in haptične interakcije	5-10 ms

5 Sklep

Prispevek obdeluje pomen zakasnitev v sodobnih komunikacijah. Mnoge storitve, kot npr. AR/VR, operacije na daljavo, samovozeča vozila in podobno, ki jih bomo predvidoma uporabljali v prihodnje, bodo zelo občutljive na zakasnitve.

V sistem vnašajo zakasnitve predvsem prenosne poti in aktivni elementi med oddajno in sprejemno stranjo. V brezvrvičnem omrežju so to radijsko dostopovno omrežje, jedrno omrežje in povezave med njimi. Optično vlakno, ki se v sodobnih komunikacijah uporablja za transportne povezave, vnaša določene zakasnitve, ki pa se merijo v mikrosekundah. Večje

zakasnitve dodajo optični ojačevalniki in drugi elementi.

Za zagotavljanje izjemno majhnih zakasnitev v 5G so potrebne drastične spremembe v arhitekturi omrežja, predvsem na fizični ravni. V omrežje 5G se uvajajo tehnologije, kot so programsko nastavljivo omrežje, virtualizacija omrežnih funkcij in obdelava podatkov na mobilnem robu. Slednje pomeni, da se procesorska moč iz centralne lokacije prenese na rob omrežja (v bazno postajo), torej bliže uporabniku. Podobno velja za predpomnilniško zmogljivost na strani bazne postaje, kjer moramo imeti dobre algoritme za preslikavo pravih podatkov iz centralnih strežnikov na rob omrežja, ker za velike količine podatkov enostavno ni prostora. Zmanjšanje zakasnitev je mogoče, ker so programske nastavitve funkcionalnih delov omrežja dinamične in se prilagajajo trenutnim razmeram.

Dodatno zmanjšanje zakasnitev bodo prinesle tehnologije, ki so še v razvojni fazi, kot npr. novi radijski vmesniki s kratkimi časovnimi prenosnimi intervali, majhnimi paketi, novimi valovnimi oblikami, novimi modulacijami in kodnimi shemami.

Dodatna prednost zmanjšanja zakasnitev na radijskem vmesniku bo tudi manjša poraba energije in daljše trajanje baterij terminalnih naprav [7].

Literatura

- [1] Svetlobna hitrost in lomni količniki (Wikipedia), https://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_light
- [2] ITU-T G.114 (05/2003): SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS, International telephone connections and circuits – General Recommendations on the transmission quality for an entire international telephone connection A Survey on Low Latency Towards 5G: RAN, Core Network and Caching Solutions
- [3] Komunikacije z nadsvetlobno hitrostjo (Wikipedia), https://en.wikipedia.org/wiki/Faster-than-light_communication
- [4] Jeff Hecht: Is Keck's Law Coming to an End?, <https://spectrum.ieee.org/semiconductors/optoelectronics/is-kecks-law-coming-to-an-end>, 26 Jan 2016
- [5] Latency in optical fiber systems, Compscope White Paper, 2017
- [6] Vesna Eržen, Boštjan Batagelj: »Zakasnitev signala na fizični ravni optičnega omrežja«, Elektrotehniški vestnik, 2015, letn. 82, št. 3, str. 111-116, ilustr. <http://ev.fe.uni-lj.si/3-2015/Erzen.pdf>
- [7] Intiaz Parvez, Ali Rahmati, Ismail Guvenc, Arif I. Sarwa, and Huaiyu Dai: »A Survey on Low Latency Towards 5G: RAN, Core Network and Caching Solutions«, IEEE Communications Surveys & Tutorials, August 2017
- [8] 3GPP TR 38.913 V15.0.0 (2018-06), 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies; (Release 15)
- [9] 3GPP TS 22.261 V16.8.0 (2019-06): 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Service requirements for the 5G system; Stage 1 (Release 16)