

# Metrika starosti informacije in njena vloga v vzdržnih omrežjih prihodnosti

Jernej Hribar, Martin Žust, Mihael Mohorčič

Institut "Jožef Stefan", Odsek za komunikacijske sisteme, Jamova c. 39, 1000 Ljubljana, Slovenija  
E-pošta: Jernej.Hribar@ijs.si

**Povzetek.** Različne aplikacije, namenjene avtomatizaciji v industriji, ter spremljanju in upravljanju pametnih omrežij, pametnih mest in drugih pametnih infrastruktur zahtevajo stalen pritok svežih informacij. Te informacije zajemajo različni senzori in jih v realnem času pošiljajo prek omrežja do strežnikov, kjer so dostopne aplikacijam za prikaz in odločitve. V realnih okoljih so te informacije lahko pogosto zastarele, saj najnovejši podatki niso na voljo ali pa še niso prispeli. Ta zastarelost informacij se lahko meri z nedavno definirano metriko starosti informacij, ki meri čas od nastanka informacije do njene uporabe. V tem prispevku predstavimo metriko starosti informacij in opišemo njene osnovne lastnosti. Analiziramo poenostavljen matematični model, sestavljen iz enega izvora informacij in enega ponora, ter s pomočjo teorije čakalnih vrst, pri čemer se osredotočamo na tipe  $M/M/1$ ,  $M/D/1$  in  $D/M/1$ , prikažemo, kako intenzivnost prihodov vpliva na starost informacij v sistemu. Prikažemo tudi razliko med zastarelostjo informacij in zakasnitvijo. V zadnjem delu prispevka analiziramo sistem, ki uporablja brezžično tehnologijo LoRaWAN za prenos informacij, in pokažemo, da lahko ta sistem z upoštevanjem nove metrike ob trikrat manjšem ogljičnem odtisu doseže enako starost informacij.

**Ključne besede:** Starost informacije, zakasnitev, čakalna vrsta, AoI, teorija vrst

## Age of Information and its Role in Building Sustainable Future Networks

In recent years, the number of applications requiring a response within a few milliseconds has significantly increased. These applications, such as industrial automation, smart grids, and traffic control in smart cities, etc., rely on a constant flow of new information recorded by sensors to support decision-making. The timeliness of this information is measured by the Age of Information (AoI) metric which measures the time from when the information is created to when it is used. It was first defined only a decade ago. The paper presents the AoI metric and describes its basic properties by analyzing a system model consisting of a single source and a single sink of information. Using the queueing theory, focusing on types  $M/M/1$ ,  $M/D/1$ , and  $D/M/1$ , we show how the arrival rate affects AoI in the system, as well as the difference between the timeliness of information and latency. In the final part, the paper analyzes a system that uses LoRaWAN wireless technology for the information transmission. It is demonstrated that the system can achieve the same timeliness of information while resulting in a threefold difference in the carbon footprint.

## 1 UVOD

Z uvajanjem koncepta digitalizacije se je izjemno povečalo število raznovrstnih aplikacij, ki zahtevajo odziv v nekaj milisekundah [1], kot so avtomatizacija v industriji, spremljanje in upravljanje pametnih energetskih omrežij ter nadzor prometa v pametnih mestih. Te aplikacije temeljijo na stalnem pritoku novih informacij,

kot so meritve, zajete s številnimi senzori v sistemu, da podprejo sprejemanje različnih odločitev. Tako je v aplikaciji za nadzor prometa ključno spremljati gibanje vozil in prometne razmere v realnem času za zagotovitev optimalne pretočnosti prometa. V takšnih primerih so pravočasne informacije, ki so bile zajete v trenutkih pred odločitvijo, na primer pred spremembo luči na semaforju, najbolj relevantne, saj zajemajo najbolj točne podatke o realnem stanju sistema, kot je število vozil v križišču. Za merjenje pravočasnosti informacije (angl. *timeliness of information*) se je v zadnjem desetletju pojavila metrika starosti informacije (angl. *Age of Information (AoI)*) [2]. AoI meri čas, ki je pretekel od trenutka, ko je bila informacija ustvarjena na izvoru, na primer na sensorju, do trenutka, ko je bila informacija uporabljena na ponoru, na primer na strežniku ali v aplikaciji.

V istem obdobju od začetka uvajanja digitalizacije globalne emisije ogljičnega odtisa (angl. *carbon footprint*) informacijskih in komunikacijskih tehnologij (IKT) naraščajo, od 1,9 % leta 2011 do 2,3 % leta 2020. Pri tem trenutno brezžične komunikacije prispevajo do 1 % globalnih emisij CO<sub>2</sub> [3], nezanemarljiv delež pa odpade tudi na vse obsežnejše zajemanje, obdelavo in hranjenje podatkov, katerih dovršen del se niti ne uporabi. Tako je skupna okoljska obremenitev sistemov IKT že primerljiva z letalskim prometom in še vedno narašča, zato je treba ta trend obrniti. Na področju neizogibnega uvajanja digitalizacije in brezžičnih senzorjev lahko k temu pripomore prav zmanjšanje zbiranja nepotrebnih

informacij prek iskanja ravnovesja med pravočasnostjo informacij, merjeno z matriko AoI, in vplivom omrežja na okolje. To ravnovesje lahko pomaga narediti omrežje bolj vzdržno za različne aplikacije, za katere je bila uporabnost metrike AoI že dokazana, kot so senzorska omrežja [4], [5], vodenje z visoko gostoto vozil [6] (angl. high-density platooning), veriženje blokov [7] (angl. blockchains) itd.

V tem prispevku predstavimo metriko AoI in vzpostavimo povezavo med pravočasnostjo informacij in ogljičnim odtisom omrežja. V ta namen najprej opišemo osnovni matematični model sistema s pomočjo teorije čakalnih vrst. V analizi smo se osredotočili na čakalne vrste tipa  $M/M/1$ ,  $M/D/1$  in  $D/M/1$ , katerih lastnosti opišemo in numerično prikažemo njihov vpliv na metriko AoI. Prav tako ponazorimo razliko med AoI in zakasnitvijo. V nadaljevanju analiziramo sistem z enim izvorom in ponorom, ki uporablja brezžično tehnologijo LoRaWAN za prenos informacij. Prikažemo, da lahko pri takšnem sistemu z optimizacijo delovanja glede na metriko AoI dosežemo enako pravočasnost informacij ob tudi do trikrat nižjem ogljičnem odtisu, kar ponuja nove možnosti za izboljšanje vzdržnosti omrežij.

## 2 POVPREČNA STAROST INFORMACIJE

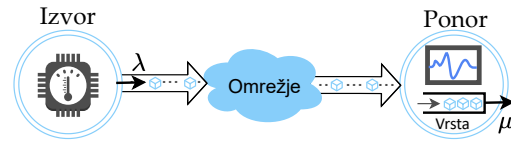
Za predstavitev metrike AoI vzemimo poenostavljen matematični model sistema, ki je sestavljen iz izvora in ponora informacij, kot je prikazano na sliki 1. Izvor informacij, na primer senzor, generira posodobitvene pakete (angl. *status updates*) z intenzivnostjo prihodov  $\lambda$ . Paketi vsebujejo podatke o merjeni količini na izvoru, na primer temperaturi, lokaciji, hitrosti itd., ter časovni žig (angl. *timestamp*). Časovni žig je ključnega pomena pri določanju AoI na ponoru. Ti posodobitveni paketi se nato prek omrežja prenašajo do ponora, na primer monitor, kjer se akumulirajo v vhodni čakalni vrsti. Število prispelih paketov, ki jih strežnik obdela v eni časovni enoti, predstavlja intenzivnost strežbe  $\mu$ . Opisani sistem predstavlja osnovni model [8], v katerem lahko analiziramo in merimo metriko AoI.

Metrika AoI se meri na ponoru in jo označujemo z  $\Delta$ . Ta meri čas, ki je pretekel od trenutka, ko je izvor obdelal in ustvaril najnovejši posodobitveni paket ter ga označil s časovnim žigom  $t_i$ :

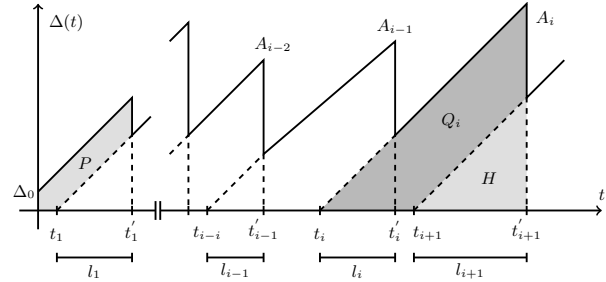
$$\Delta(t) = t - t_i. \quad (1)$$

V času med prihodom dveh naslednjih paketov do ponora AoI linearno narašča in pade, ko ponor prejme nov paket z bolj svežo informacijo. Zaradi tega ima graf AoI značilno žagasto obliko, kar prikazuje slika 2.

Na sliki 2 imamo primer časovnega poteka AoI  $\Delta(t)$  za sistem z eno vrsto. Ko izvor generira svoj  $i$ -ti posodobitveni paket ob času  $t_i$ , je ta posredovan do ponora in obdelan ob času  $t'_i$ . Čas, ki ga paket potrebuje od izvora do ponora, je označen s  $l_i$ . Ko ponor sprejme  $i$ -to posodobitev, je AoI v tistem trenutku enaka  $\Delta(t'_i) =$



Slika 1: Ilustracija osnovnega matematičnega modela sistema.



Slika 2: Primer poteka metrike AoI v odvisnosti od časa.

$t'_i - t_i$ . Razlika  $t'_i - t_i$ , ki je označena z  $l_i$  predstavlja zakasnitev v omrežju. Starost informacije nato raste do lokalnega maksimuma, ki je dosežen trenutek preden do ponora pride nov osvežitveni paket. To se lahko ujema s časom, ko je trenutni paket dokončno obdelan, vendar le v primeru, ko vrsta ni prazna.  $i$ -ti lokalni maksimum  $\Delta(t)$  doseže pri  $t'_{i+1}$ , njegova vrednost pa je na grafu označena z  $A_i$ .  $A_i$  dobimo kot razliko  $t'_{i+1}$  in  $t_i$ .

Na prvi pogled se zdi, da sta zakasnitev in AoI podobni metriki, saj obe merita čas, povezan s potovanjem paketov od izvora do ponora. Vendar pa med njima obstaja pomembna razlika, ki preprečuje neposredno primerjavo. Zakasnitev, na sliki 2 označena z  $l_i$ , se osredotoča na časovni interval, ki ga osvežitveni paket potrebuje za prenos od izvora do ponora, vključno s časom čakanja v vrsti in obdelave v ponoru. Po drugi strani AoI ne meri le časa do obdelave paketa v ponoru, ampak tudi obdobje po obdelavi in linearno narašča vse do trenutka, ko ponor uspešno obdela najnovejši osvežitveni paket. Ta razlika kaže, da AoI zagotavlja širši vpogled v svežino informacij v sistemu, saj upošteva celoten cikel življenjske dobe informacije, ne le časa potovanja in obdelave posameznega paketa.

Nadaljujemo z definicijo povprečne AoI za časovni interval  $\tau$ :

$$\Delta_\tau = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \Delta(t) dt. \quad (2)$$

Ker je določeni integral ekvivalenten računanju ploščine pod krivuljo, lahko  $\Delta_\tau$  izračunamo alternativno s pomočjo vsote ploščin trapezov  $Q_i$  s slike 2. Pri tem moramo upoštevati tudi lika, ki se pojavita na obeh robovih intervala. Kot primer si pogledjmo izračun  $\Delta_{t'_{i+1}}$  na sliki 2. Najprej izračunamo ploščino pod krivuljo, ki je enaka vsoti ploščin petkotnika  $P$ , trapezov  $Q_1, Q_2, \dots, Q_i$  in trikotnika  $H$ . Slika 2 prikazuje, da je

$Q_j$  omejen s točkami  $(t_j, 0)$ ,  $(t_{j+1}, 0)$ ,  $(t'_{j+1}, \Delta(t'_{j+1}))$  in  $(t'_j, \Delta(t'_j))$ . Dobljeno vsoto ploščin vseh teh likov nato delimo z  $\tau$ . Če bi namesto  $\tau$  izbrali vrednost, kjer se informacija ne osveži, bi morali namesto zadnjega trapeza  $Q_i$  vzeti nekoliko odsekan trapez in primerno odsekan trikotnik  $H$ .

Povprečno AoI na dolgi rok  $\bar{\Delta}$  nadalje definiramo kot:

$$\bar{\Delta} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \Delta_{\tau}. \quad (3)$$

V naslednjem razdelku uporabimo povprečno AoI, da numerično prikažemo razliko med AoI in zakasnitvijo ter kako se AoI obnaša v različnih tipih čakalnih vrst.

### 3 ANALIZA STAROSTI INFORMACIJ

V nadaljevanju analiziramo AoI za različne temeljne modele čakalnih vrst\*, kot so  $M/M/1$ ,  $M/D/1$  in  $D/M/1$ . Uvodoma predstavimo analitično formulacijo za izračun intenzivnosti prihodov, ki rezultira v minimalno povprečno vrednost AoI za model čakalne vrste  $M/M/1$ . Nato analiziramo značilnosti AoI na podlagi treh numeričnih eksperimentov. Sprva izvedemo numerično primerjavo med povprečno AoI in povprečnim časom zakasnitve. Nadaljujemo s primerjavo AoI med tremi različnimi tipi čakalnih vrst. Razdelek sklenemo z demonstracijo vpliva načina obdelave zahtevkov v čakalni vrsti, pri čemer primerjamo običajen pristop, tj. pristop "prvi prišel, prvi postrežen" (angl. *First Come First Served - FCFS*), z alternativnim pristopom "zadnji prišel, prvi postrežen" (angl. *Last Come First Served - LCFS*)†.

#### 3.1 Minimalna povprečna AoI za vrsto $M/M/1$

Po članku [8] povzamemo, da se povprečna starost vrste  $M/M/1$  analitično izraža kot:

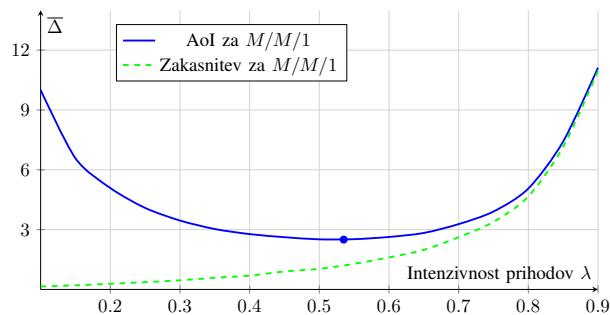
$$\bar{\Delta} = \frac{1}{\mu} \left( 1 + \frac{\mu}{\lambda} + \frac{\lambda^2}{\mu^2 - \lambda\mu} \right). \quad (4)$$

Želimo poiskati minimum izraza (4) pri fiksnem  $\mu$ . Funkcija  $\Delta(\lambda)$  gre v neskončnost, ko se  $\lambda$  približuje 0 ali  $\mu$ . Pričakujemo torej lokalni minimum nekje na intervalu  $(0, \mu)$ . Odvod funkcije  $\Delta(\lambda)$  je

$$\begin{aligned} \bar{\Delta}'(\lambda) &= \frac{1}{\mu} \left( -\frac{\mu}{\lambda^2} + \frac{2\lambda(\mu^2 - \lambda\mu) + \mu\lambda^2}{(\mu^2 - \lambda\mu)^2} \right) = \\ &= -\frac{1}{\lambda^2} + \frac{-\lambda^2 + 2\lambda\mu}{(\mu^2 + \lambda\mu)^2} = \\ &= \frac{-(\mu^2 + \lambda\mu)^2 + (-\lambda^2 + 2\lambda\mu)\lambda^2}{\lambda^2(\mu^2 + \lambda\mu)^2} \end{aligned}$$

\* Simbol  $M$  označuje Markovski ali brezspominski proces, kjer so prihodi paketov ali časi strežbe podvrženi eksponentni porazdelitvi. Nasprotno, oznaka  $D$  predstavlja determinističen proces, kjer so prihodi ali časi strežbe konstantni. Na primer, čakalna vrsta, ki ima eksponentno porazdeljene prihode paketov, determinističen čas strežbe in eno strežno enoto, se označi z  $M/D/1$ .

† V tem članku LCFS način obdelave označujemo z oznako \* na koncu zapisa vrste, na primer  $M/M/1^*$ .



Slika 3: Razlika med AoI in zakasnitvijo.

Izraz v prejšnji vrstici bo enak 0 natanko tedaj, ko bo števec ulomka enak 0 in imenovalec različen od 0. Imenovalec je različen od 0 za vse  $\lambda$ , ker sta  $\lambda$  in  $\mu$  pozitivni števili. Tako je dovolj poiskati ničlo zgornjega polinoma. Predpostavimo še, da je  $\mu = 1$ . Torej za lokalni minimum rešujemo enačbo:

$$-\lambda^4 + 2\lambda^3 - \lambda^2 + 2\lambda - 1 = 0. \quad (5)$$

Z uporabo numeričnega orodja določimo:

$$\lambda = 0,53101, \quad (6)$$

oziroma splošneje, če za  $\mu$  ne predpostavimo da je 1, je rezultat:

$$\lambda = 0,53101\mu. \quad (7)$$

V tej točki funkcija  $\Delta(\lambda)$ , opredeljena na intervalu  $(0, \mu)$ , doseže stacionarno točko. Argument, ki podkrepi trditev, da omenjena točka predstavlja tako lokalni kot tudi globalni minimum, izvira iz opažanja, da funkcija oba konca intervala omejuje proti neskončnosti in ker gre za povsod definirano elementarno funkcijo, je ta tudi povsod zvezno odvedljiva. To implicira, da je edino možno mesto za globalni minimum prav v stacionarni točki.

#### 3.2 Razlika med AoI in zakasnitvijo

Razliko med povprečno AoI in zakasnitvijo si oglejmo na primeru sistema  $M/M/1$ . V eksperimentu smo nastavili  $\mu$  na 1 in spreminjali  $\lambda$  v intervalu  $(0, 1)$ . S tem bomo raziskali vsa možna razmerja  $\frac{\lambda}{\mu}$ , pri katerih je sistem stabilen, to je  $\lambda < \mu$  oziroma se čakalna vrsta na dolgi rok ne podaljšuje v neskončnost.

Slika 3 prikazuje povprečno AoI in zakasnitev v odvisnosti od intenzivnosti prihodov posodobitvenih paketov  $\lambda$ . S slike je razvidno, da je v sistemu  $M/M/1$  za majhne vrednosti  $\lambda$  zakasnitev bistveno manjša od AoI. Ko  $\lambda$  povečujemo, pa se graf zakasnitve vse bolj približuje grafu AoI. Ključna ideja je, da je pri nizkih vrednostih  $\lambda$  vrsta večinoma prazna, zaradi česar skoraj vsak paket nemudoma doseže strežnik, njegova zakasnitev pa je zato tako rekoč ničelna. A ker zaradi redkih prihodov novih paketov dolgo čakamo na naslednji paket,

je AoI visoka, saj med prihodom dveh zaporednih paketov linearno narašča z vrednosti zakasnitve. Pri visokih vrednostih  $\lambda$  je vrsta redko prazna, zaradi česar se AoI bolj približa zakasnitvi. Dejansko se AoI in zakasnitev zblížata zaradi relativno majhne razlike med vrednostmi v lokalnih maksimumih in minimumih funkcije AoI v primerjavi z vrednostmi v lokalnih maksimumih.

Kot smo ugotovili v prejšnjem podrazdelku, povprečna AoI za čakalno vrsto  $M/M/1$  doseže svojo minimalno vrednost pri 0,53. To je potrjeno tudi na sliki 3, ki je bila pridobljena s pomočjo numerične simulacije.

### 3.3 Primerjava AoI za sisteme $M/M/1$ , $M/D/1$ in $D/M/1$

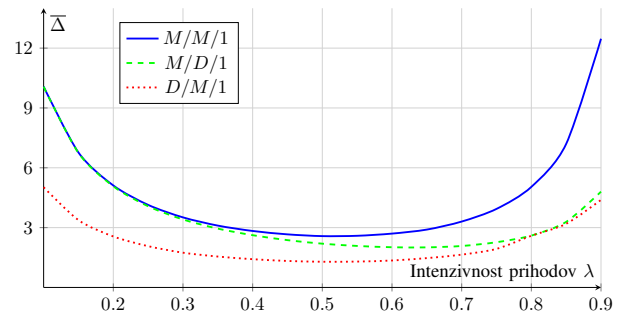
V tem podrazdelku podrobneje analiziramo in primerjamo AoI v sistemih  $M/M/1$ ,  $M/D/1$  in  $D/M/1$ . Analiza temelji na različnih intenzivnostih prihodov  $\lambda$ , ki so ključne za razumevanje dinamike in učinkovitosti posameznih sistemov, ko gre za ohranjanje svežine informacij.

Iz rezultatov na sliki 4 je razvidno, da sistem  $M/M/1$ , kjer tako časi prihodov kot časi strežbe sledijo eksponentni porazdelitvi, kaže najvišjo povprečno AoI za vse vrednosti  $\lambda$ . To pomeni, da je v okolju, kjer so tako prihodi kot obdelave paketov nepredvidljivi, težje vzdrževati nizko AoI. Nasprotno sistema  $M/M/1$  je sistem  $D/M/1$ , kjer so prihodi paketov deterministični, časi strežbe pa sledijo eksponentni porazdelitvi. Ta sistem ima najnižjo povprečno AoI za vse vrednosti  $\lambda$ , kar kaže na prednosti predvidljivih prihodov v smislu zmanjševanja AoI kljub nepredvidljivosti v časih obdelave. Sistem  $M/D/1$ , ki združuje eksponentno porazdeljene prihode z determinističnimi časi strežbe, zavzema vmesni položaj. Pri nizkih vrednostih  $\lambda$  je vrednost AoI tega sistema podobna vrednosti AoI sistema  $M/M/1$ , kar pomeni, da pri redkih prihodih paketov prevladuje vpliv variabilnosti časov strežbe. Pri visokih vrednostih  $\lambda$ , ko postanejo prihodi pogostejši, pa se AoI sistema  $M/D/1$  približa tisti v sistemu  $D/M/1$ , kar nakazuje, da v scenarijih z gostimi prihodi predvidljivost časov strežbe pomembno prispeva k zmanjšanju AoI.

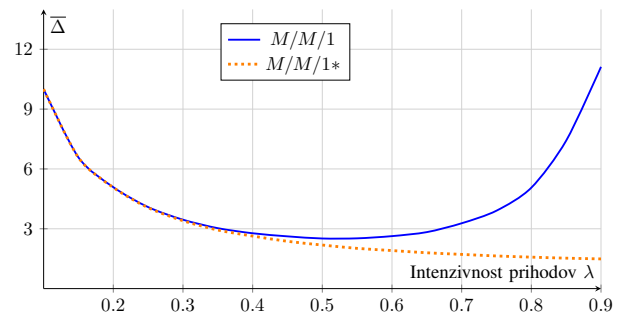
Iz teh ugotovitev lahko sklepamo, da so za doseganje nizke povprečne vrednosti AoI boljši sistemi s predvidljivimi komponentami – bodisi prihodi ali časi strežbe. Sistem  $M/M/1$ , kjer sta oba elementa naključna, se sooča z največjimi izzivi pri ohranjanju nizke AoI, medtem ko imajo sistemi, ki vključujejo vsaj en determinističen element ( $M/D/1$  in  $D/M/1$ ), boljše rezultate. To poudarja pomen strukturiranja procesov obdelave in prihodov v realnih sistemih za minimizacijo vrednosti AoI.

### 3.4 Prednost pristopa LCFS

Na povprečno AoI vpliva tudi vrstni red, v katerem so paketi obdelani. Tipično se paketi obdelujejo v enakem



Slika 4: AoI za čakalne vrste  $M/M/1$ ,  $M/D/1$  in  $D/M/1$ .



Slika 5: Razlika povprečne AoI za FCFS in LCFS.

vrstnem redu, kot so prišli v vrsto. Tak vrstni red obdelave imenujemo FCFS. Prednost takega sistema je, da ne izgubimo nobene informacije, saj vsak paket v končnem času pride do ponora. Vendar pa lahko paket, ko se končno obdela v ponoru, vsebuje že precej zastarelo informacijo. Alternativni pristop je, da pakete v ponoru obdelujemo v obratnem vrstnem redu, kot so prišli v vhodno čakalno vrsto. Pri tem načinu, ko je strežnik prost in vrsta ni prazna, vzamemo iz vrste najnovejši osvežilni paket, torej tistega, ki je zadnji prišel v vrsto, to je LCFS, predhodne pakete iz istega izvora pa zavržemo.

Slika 5 prikazuje graf AoI za vrsti  $M/M/1$  in  $M/M/1^*$ . Pri nizki intenzivnosti prihodov  $\lambda$  lahko opazimo, da vrstni red obdelave nima vpliva na vrednost povprečne AoI. Razlog je, da izvor ne ustvari dovolj paketov, da bi se naredila vrsta na ponoru. Z drugimi besedami, vsak paket, ki pride v vrsto, je edini in se lahko takoj obdela. Z večanjem intenzivnosti prihodov pa opazimo spremembo, in sicer pri pristopu FCFS povprečna AoI pada do minimuma pri intenzivnosti  $\lambda = 0,53$ , nato pa ponovno narašča. Nasprotno se pri načinu obdelave LCFS z nadaljnjim povečevanjem intenzivnosti prihodov povprečna vrednost informacije AoI v sistemu še naprej zmanjšuje. Razlog za takšen obrat je dejstvo, da ko obdelujemo pakete, ki so zadnji prispeli v vrsto, pridejo bolj sveže informacije prej do obdelave in uporabe, informacije v predhodnih paketih pa postajajo še bolj zastarele. Za doseg minimalne povprečne vrednosti AoI v vrsti so v literaturi dokazali, da je najboljši pristop za vrsto  $M/M/1^*$  LCFS z brisanjem predhodnikov (angl. preemption) [9].

#### 4 VPLIV PRAVOČASNOSTI INFORMACIJ NA VZDRŽNOST SISTEMA

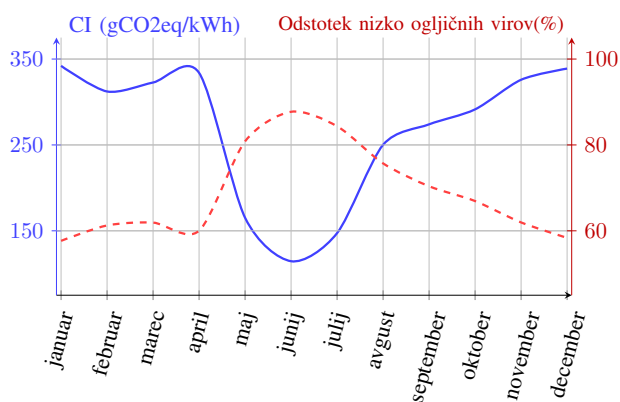
Za nadaljnjo obravnavo predpostavimo, da vsak posodobitveni paket porabi energijo, ki je premosorazmerna z ogljičnim odtisom  $CF$  (angl. *carbon footprint*), ki ga paket ustvari. Ogljični odtis paketa ni odvisen le od količine porabljene energije, ampak tudi od ogljične intenzitete  $CI$  (angl. *carbon intensity*), ki meri, koliko  $CF$  je energetski sistem izpustil v okolje za eno  $kWh$  energije. Torej,  $CI$  se meri v enoti  $\frac{gCO_2eq}{kWh}$ , v kateri  $gCO_2eq$  predstavlja količino izpuščenega ogljikovega dioksida, ki ima ekvivalenten učinek kot količina vseh toplogrednih plinov, ki jih energetski sistem proizvede.

$CI$  se spreminja s časom in geografsko lokacijo, saj je odvisen od vrst uporabljenih energijskih virov v energetskem sistemu. Premog, nafta in plin so energijski viri z visoko  $CI$ . Srednjo  $CI$  ima biomasa, nizko pa jedrska, geotermalna, vetrna in sončna energija ter hidroenergija. Ko sistem pridobiva energijo iz virov z nizkim ogljičnim odtisom, je  $CI$  nizek, in obratno, ko je odstotek teh majhen. Takšno spreminjanje  $CI$  v Sloveniji skupaj z odstotkom nizkoogljičnih virov v letu 2021 prikazujemo na sliki 6. V poletnih mesecih, ko sistem pridobiva več energije iz virov z nizkim ogljičnim odtisom, kot so sončni paneli, je  $CI$  nizek, medtem ko je v zimskih mesecih več kot dvakrat višji.

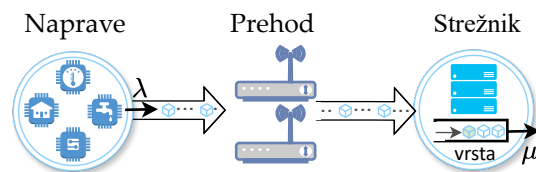
##### 4.1 Poraba energije za posodobitveni paket

Za določitev porabljene energije posodobitvenega paketa predpostavimo, da vir informacij za prenos paketov uporablja brezžično tehnologijo LoRaWAN [11]. Slika 7 prikazuje arhitekturo omrežja, kjer končna vozlišča (angl. *end nodes*) predstavljajo vire informacij, strežnik pa ponor informacij. Arhitektura je podobna kot osnovni matematični model za proučevanje AoI na sliki 1.

Predpostavimo, da vsak posodobitveni paket, ki ga



Slika 6: Primerjava  $CI$  (označeno z modro celo črto z enotami na levi strani) in deleža nizkoogljičnih virov (označeno z rdečo prekinjeno črto in enotami na desni strani) za Slovenijo v letu 2021 [10].



Slika 7: Arhitektura omrežja LoRaWAN.

Tabela 1: Parametri obravnavanega omrežja LoRaWAN.

parameter	vrednost	parameter	vrednost
$U$	3,3V	$T_{CAD}$	1,97ms
$I_{CAD}$	5,9mA	$T_{TR}$	189,7ms
$T_{LoRa}$	20s	$I_{TX}$	90mA
$I_{SBY}$	1,4mA	$T_{DL}$	50ms
$I_{RX}$	10,8mA	$E_{tr}$	69,183mJ
$SF$	7	$BW$	125kHz

ustvari vir informacij, potrebuje določeno energijo  $E_{tr}$ , da prenese informacije iz vira do ponora. Potrebno energijo za prenos paketov v omrežju LoRaWAN so v [14] izpeljali kot:

$$E_{tr} = U(T_{CAD}I_{CAD} + T_{TR}I_{TX} + 2I_{SBY} + 2T_{DL}I_{RX}). \quad (8)$$

Pri tem so  $U$  konstantna napetost v sistemu,  $T_{CAD}$  čas porabljen za preverjanje stanja sistema,  $I_{CAD}$  tok v tem času,  $T_{TR}$  čas paketa v zraku,  $I_{TX}$  tok ob prenosu paketa po zraku,  $I_{SBY}$  tok, ki teče v času mirovanja,  $T_{DL}$  čas povratnega prenosa in  $I_{RX}$  tok v času povratnega prenosa. Predpostavimo, da v našem modelu LoRaWAN uporablja razširitveni faktor  $SF$  (angl. *spreading factor*) enak 7 in pasovno širino  $BW$  (angl. *bandwidth*) 125 kHz. Za izračun časa v zraku  $T_{TR}$  smo uporabili spletni kalkulator [12] in ugotovili, da je za paket velikosti 100 B čas oddajanja 189,7 ms. Preostale parametre smo povzeli po [14] in jih navedli v tabeli 1. Ko te podatke vstavimo v enačbo 8, dobimo rezultat  $E_{tr} = 69,183 \text{ mJ}$ .

##### 4.2 Ogljični odtis in povprečna starost informacij

Na podlagi izračunane energije za prenos paketa od izvora do ponora v nadaljevanju izračunamo in primerjamo povprečno vrednost AoI  $\bar{\Delta}$  in ogljični odtis  $CF$  za vrste  $M/M/1$ ,  $D/M/1$  in  $M/D/1$ , nato pa primerjamo vpliv različnih ogljičnih intenzitet  $CI$  na ogljični odtis  $CF$  v vrsti  $M/M/1$ . Izračun ogljičnega odtisa smo pripravili za eno leto delovanja, tako da smo za izbrano intenzivnost prihodov  $\lambda$  določili število vseh oddanih paketov  $N$  v enem letu. Skupna porabljena energija je torej:

$$E = N \cdot E_{tr}. \quad (9)$$

V našem izračunu upoštevamo samo energijo na izvoru informacij, ne pa tudi energije, ki jo omrežje porabi

za prenos od prehoda (angl. *gateway*) do strežnika. Ta energija je sicer za faktor 1000 manjša in se meri v  $\mu J$  [13].

Predpostavimo najprej, da je ogljična intenziteta  $CI$  konstantna ves čas. Za to konstanto bomo vzeli povprečno ogljično intenziteto  $CI$  v Sloveniji v letu 2021, ki je enaka  $268,20 \frac{gCO_2}{kWh}$  [10]. Za število prihodov  $N$  vzamemo število  $N_0 \cdot \lambda$ , kjer je  $\lambda$  intenziteta prihodov,  $N_0 = 31536000$  pa število sekund v enem letu. Nadalje upoštevamo, da ima omrežje LoRaWAN omejitve, kar zadeva delež časa, ko je izvor lahko aktiven (angl. *duty cycle*). Zato izberemo zelo majhno intenziteto prihodov  $\lambda$ , saj jo moramo normalizirati za omrežje LoRaWAN:

$$\lambda = \frac{\alpha}{T_{LoRa}} \quad (10)$$

kjer se  $\alpha$  giblje med 0 in 1,  $T_{LoRa}$  pa je 20 sekund. S tem poskrbimo, da delež aktivnosti sistema pri nobenem  $\alpha \in (0, 1)$  ne preseže 1 %, kar je predpisana vrednost za tehnologijo LoRaWAN, saj je čas prenosa paketa  $T_{TR}$  enak 189,7 ms.

Povprečno vrednost AoI za vrsto  $M/M/1$  določimo s pomočjo formule, povzete po članku [8]:

$$\bar{\Delta}_{M/M/1}(\alpha) = T_{LoRa} \cdot \left( 1 + \frac{1}{\alpha} + \frac{\alpha^2}{1 - \alpha} \right) + T_{TR} \quad (11)$$

Nekoliko bolj kompleksna je formula za izračun povprečne vrednosti AoI za vrsto  $D/M/1$  v omrežju LoRaWAN. V njej je uporabljena neelementarna Lambertova  $W$  funkcija, ki je inverz funkcije  $f(x) = xe^x$ . Uvedemo funkcijo  $b(x)$ , ki jo definiramo kot:

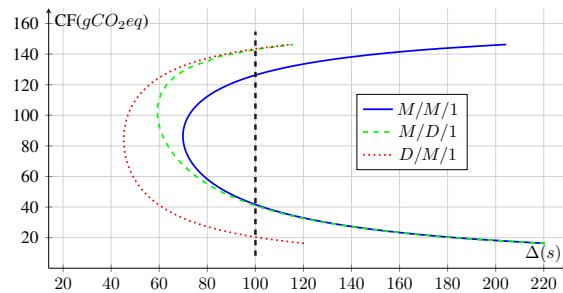
$$b(x) = -x \cdot W \left( -\frac{1}{x} \cdot e^{-\frac{1}{x}} \right) \quad (12)$$

S pomočjo te funkcije se povprečna vrednost AoI za vrsto  $D/M/1$  izračuna po formuli, povzeti iz članka [8]:

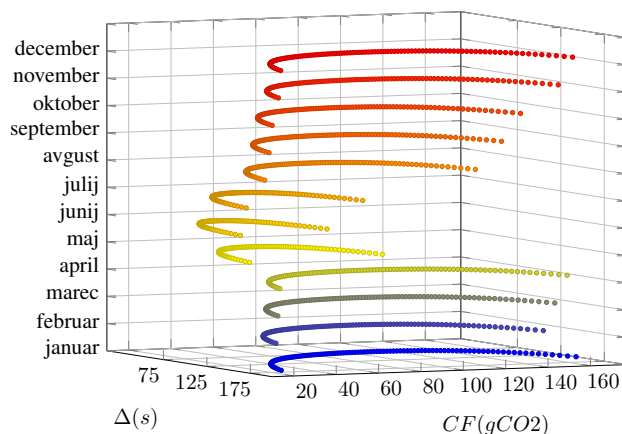
$$\bar{\Delta}_{D/M/1}(\alpha) = T_{LoRa} \cdot \left( \frac{1}{2\alpha} + \frac{1}{1 - b(\alpha)} \right) + T_{TR}. \quad (13)$$

Povprečno vrednost AoI za vrsto  $M/D/1$  pridobimo s pomočjo numerične analize, saj za dani primer ni mogoče podati formule, kot je opisano v članku [8].

Rezultate, ki smo jih pridobili s spreminjanjem spremenljivke  $\alpha$  v korakih med (0, 1), prikazuje slika 8 za vse tri vrste. Na abscisni osi so povprečne vrednosti AoI, na ordinatni osi pa  $CF$ , ki ga senzor ustvari v enem letu. Pridobljeni rezultati so izjemno zanimivi in razkrivajo podoben trend za vse tri vrste; za isto povprečno vrednost AoI je lahko  $CF$  majhen ali pa zelo velik. Na primer, pri povprečni vrednosti AoI 100 sekund za vrsto  $M/M/1$  je lahko  $CF$  okoli 40 g ali pa okoli 125 g na leto. Sistem ima torej lahko isto vrednost AoI, vpliv na okolje pa je lahko trikrat večji. Podobna ugotovitev velja za vrsti  $D/M/1$  in  $M/D/1$ . Pridobljeni rezultat razkriva, da lahko z upoštevanjem metrike AoI



Slika 8:  $CF$  in povprečna AoI za vrste  $M/M/1$ ,  $D/M/1$  in  $M/D/1$  v omrežju LoRaWAN.



Slika 9: Mesečna  $CF$  in povprečna AoI za vrsto  $M/M/1$  vrsto v letu 2021.

ustvarimo mnogo bolj vzdržne sisteme brez poslabšanja kakovosti oziroma pravočasnosti informacij.

Podobno velja v bolj dinamičnem primeru, kot prikazuje slika 9. V tem primeru smo na z-os postavili mesečno komponento in uporabili mesečni povprečni  $CI$  za leto 2021 ter izrisali 12 mesečnih krivulj za vrsto  $M/M/1$ . Rezultati razkrivajo, da so v mesecih, ko je  $CI$  nižji (maja, junija in julija, kot izhaja s slike 6), razmerja med minimalnim in maksimalnim  $CF$  pri isti povprečni AoI manjša kot takrat, ko je  $CI$  višji. Hkrati lahko opazimo, da je  $CF$  manjši (zamaknjen levo v y-dimeziji). Na sliki 9 je ta razlika najbolj vidna pri juniju in decembru, pri čemer je slednji izrazito širok v y-dimeziji ( $CF$ ), prvi pa zelo ozek. Ta rezultat razkriva, da večji kot je  $CI$ , pomembnejša je izbira strategije pošiljanja paketov na izvoru informacij, da bo sistem vzdržen.

Predstavljena analiza razkriva, da sistem lahko postane bolj vzdržen, če upošteva metriko AoI. To ponuja nove možnosti izboljšanja vzdržnosti v omrežjih s strategijami pošiljanja podatkov, ki upoštevajo  $CI$ . Zaradi spreminjajočega  $CI$  se mora strategija prilagajati spremembam, saj v primerih z nižjim  $CI$  energetska učinkovitost ni tako kritična, medtem ko je v obdobjih z visokim  $CI$  način pošiljanja podatkov ključnega po-

mena, saj mora biti informacija ne le pravočasna, temveč tudi vzdržna. Čeprav posamezen senzor ne vpliva bistveno na okolje, saj je njegov vpliv na izpuste CO<sub>2</sub> merjen v gramih, pa je v omrežjih z deset tisoči senzori skupni vpliv merjen v tonah. Iskanje ravnovesja med pravočasnostjo informacij in vplivom omrežja na okolje je tako zanimiv raziskovalni izziv.

## 5 ZAKLJUČEK

V prispevku smo predstavili koncept metrike AoI, s katero lahko merimo pravočasnost informacij v omrežju. Opisali smo osnovni model, kot je predstavljen v literaturi, in prikazali, da je metrika AoI konceptualno drugačna od zakasnitve. Prav tako smo za različne tipe osnovnih čakalnih vrst prikazali spremembo AoI v odvisnosti od prihodov informacij na izvoru. V zadnjem delu smo prikazali, da ima lahko sistem z isto vrednostjo AoI različen vpliv na okolje. To pomeni, da bo za razvoj omrežij prihodnosti pomembno, da so ta pravočasna in vzdržna, v takšnem sistemu pa ima lahko AoI pomembno vlogo.

## ZAHVALA

Raziskavo je delno sofinancirala Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije prek raziskovalnega programa P2-0016 Komunikacijska omrežja in storitve ter temeljnega projekta J2-50071 TIMIN6, delno pa Evropska skupnost prek projekta HORIZON-MSCA-IF TimeSmart (101063721).

## LITERATURA

- [1] J. Santos, T. Wauters, B. Volckaert, and F. De Turck, "Towards Low-Latency Service Delivery in a Continuum of Virtual Resources: State-of-the-Art and Research Directions," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 4, pp. 2557–2589, 2021.
- [2] R. D. Yates, Y. Sun, D. R. Brown, S. K. Kaul, E. Modiano, and S. Ulukus, "Age of information: An introduction and survey," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 39, no. 5, pp. 1183–1210, 2021.
- [3] L. Williams, B. K. Sovacool, and T. J. Foxon, "The Energy Use Implications of 5G: Reviewing Whole Network Operational Energy, Embodied Energy, and Indirect Effects," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 157, 2022.
- [4] J. Hribar, A. Marinescu, A. Chiumento and L. A. Dasilva, "Energy-Aware Deep Reinforcement Learning Scheduling for Sensors Correlated in Time and Space," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 9, pp. 6732–6744, 2022.
- [5] J. Hribar, M. Costa, N. Kamiński, and L. A. DaSilva, "Using Correlated Information to Extend Device Lifetime," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 2439–2448, Apr. 2019.
- [6] Peng, Z. Jiang, S. Zhang, and S. Xu, "Age of Information Optimized MAC in V2X Sidelink via Piggyback-Based Collaboration," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 1, pp. 607–622, Jan. 2020.
- [7] S. Lee, M. Kim, J. Lee, R. -H. Hsu and T. Q. S. Quek, "Is Blockchain Suitable for Data Freshness? An Age-of-Information Perspective," *IEEE Network*, vol. 35, no. 2, pp. 96–103, March/April 2021.

- [8] S. Kaul, R. Yates, and M. Gruteser, "Real-time status: How often should one update?" in *Proc. IEEE INFOCOM 2012*, pp. 2731–2735.
- [9] A. M. Bedewy, Y. Sun, and N. B. Shroff, "Minimizing the Age of Information Through Queues" *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 6, no. 8, pp. 5215–5232, Aug. 2019.
- [10] Electricity Map, "Electricity Map - Slovenia," dostopno na: <https://app.electricitymaps.com/zone/SI>.
- [11] J. Haxhibeqiri, E. De Poorter, I. Moerman, and J. Hoebeke, "A survey of LoRaWAN for IoT: From technology to application," *Sensors*, vol. 18, no. 11, p. 3995, Nov. 2018.
- [12] The Things Network, "Airtime Calculator," dostopno na: <https://www.thethingsnetwork.org/airtime-calculator>.
- [13] L. Krug, M. Shackleton in F. Saffre: "Understanding the environmental costs of fixed line networking" in *Proc. 5th Int. Conf. Future e-Energy Syst.*, 2014, pp. 87–95.
- [14] M. Costa, T. Farrell, and L. Doyle, "On Energy Efficiency and Lifetime in Low Power Wide Area Network for the Internet of Things," in *Proc. 2017 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, pp. 258–26

**Jernej Hribar** se je oktobra 2022 pridružil Odseku za komunikacijske sisteme na Institutu Jožef Stefan kot Marie Skłodowska-Curie Action Fellow. Med letoma 2020 in 2022 je bil podoktorski raziskovalec na raziskovalnem inštitutu CONNECT Centre for Future Networks and Communications, Trinity College Dublin, Irska. Leta 2014 je končal univerzitetni študij elektrotehnike na Univerzi v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, in leta 2020 doktoriral na univerzi Trinity College Dublin. Njegova raziskovalna področja vključujejo proučevanje metrike starosti informacije, globoko spodbujevalno učenje ter upravljanje pametnih omrežij.

**Martin Žust** je študent zadnjega letnika univerzitetnega študija matematike na Univerzi v Ljubljani. Njegova raziskovalna področja so verjetnost, slučajni procesi, starost informacije in teorija čakalnih vrst.

**Mihael Mohorčič** je znanstveni svetnik in vodja Odseka za komunikacijske sisteme na Institutu Jožef Stefan ter redni profesor na Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana. Njegove raziskovalne in delovne izkušnje vključujejo razvoj in proučevanje omrežnih protokolov, arhitektur ter upravljanja virov v mobilnih in brezžičnih komunikacijskih sistemih. V zadnjem obdobju je njegovo delo osredotočeno na vertikalno integracijo senzorskih, brezžičnih in podatkovnih tehnologij, uporabo metod strojnega učenja v mobilnih in brezžičnih omrežjih ter internet stvari za podporo digitalizaciji in avtomatizaciji procesov v pametni infrastrukturi. Poleg sodelovanja v vrsti mednarodnih projektov (trenutno MSCA-IF TimeSmart in DEP SiQUID) je tudi vodja raziskovalnega programa P2-0016 Komunikacijska omrežja in storitve ter temeljnega projekta J2-50071 TIMIN6.