

# Open RAN – Kaj omogoča odprta arhitektura radijskega dostopnega omrežja

**Tomi Mlinar, Boštjan Batagelj**

*Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija  
E-pošta: tomi.mlinar@fe.uni-lj.si*

**Povzetek.** Radijsko dostopno omrežje (RAN) postaja vedno bolj kompleksno zaradi tehnoloških inovacij, kot so masovni MIMO, rezinjenje omrežja, dvojna povezljivost, dinamično dodeljevanje spektra itd. Kompleksnost omrežja narašča tudi zaradi raznolikosti izvedbe, različno velikih celic, opremljanja prostorov, fiksnega brezžičnega dostopa ter različnih načinov povezav. To vodi v visoke investicijske in operativne stroške za operaterje, ki se soočajo s težavami usklajevanja s tržnimi trendi in tehnološkim razvojem. Zaradi teh izzivov se mobilna omrežja premikajo iz zaprtih arhitektur v odprta radijska dostopna omrežja (Open RAN ali O-RAN). Članek obravnava tradicionalno porazdeljeno radijsko dostopno omrežje (D-RAN) in centralizirano radijsko dostopno omrežje (C-RAN), pri čemer poudarja razlike med njima. Sodobni koncept O-RAN uvaja razčlenitev bazne postaje, inteligentni nadzornik RAN, virtualizacijo in odprte vmesnike. Razčlenitev bazne postaje v O-RAN omogoča ločeno obdelavo radijskih virov in protokola ter optimizacijo omrežja. Inteligentni nadzornik RAN omogoča programsko nastavljenost, koordinacijo z drugimi omrežji in izvajanje optimizacijskih rutin. Virtualizacija prinaša možnost boljše izrabe virov, medtem ko odprti vmesniki omogočajo boljšo povezljivost in interoperabilnost med različnimi deli omrežja. Poudarjene so prednosti in slabosti O-RAN. Med prednosti spadajo interoperabilnost, odprti vmesniki, virtualizacija, razčlenitev funkcionalnosti ter hitreje inovacije. Slabosti vključujejo kompleksnost, varnostne izzive in potrebo po standardizaciji. Kljub tem izzivom pa O-RAN obljublja večjo prilagodljivost, boljše izkoriščanje virov in hitreje uvajanje inovacij v mobilna omrežja.

**Ključne besede:** odprta arhitektura, O-RAN, 5G

## Open RAN - What does an open architecture of the radio access network enable

Radio Access Network (RAN) is becoming increasingly complex due to technological innovations, such as massive MIMO, network slicing, dual connectivity, dynamic spectrum allocation, etc. The complexity of the network is growing also due to the diversity of its implementation, various cell sizes, spatial provisioning, fixed wireless access, and different connection methods. This leads to high investment and operational costs for operators who are coping with the challenges of aligning with the market trends and technological development. Mobile networks are therefore shifting from closed architectures to open radio access networks (Open RAN or O-RAN). The paper analyses the differences between the traditional distributed radio access network (D-RAN) and the centralized radio access network (C-RAN). The modern concept disaggregates the base station, intelligent RAN controller, virtualization and open interfaces. The disaggregation allows separate processing of radio resources and protocol, optimizing the network. The intelligent RAN controller enables programmability, coordination with other networks, and the execution of optimization routines. Virtualization brings the possibility of better resource utilization, while open interfaces enable better connectivity and interoperability between different parts of the network.

The paper emphasizes the advantages and disadvantages of O-RAN. Advantages include interoperability, open interfaces, virtualization, functional disaggregation, and faster innovation. Disadvantages include complexity, security challenges, and the need for standardization. Despite these challenges, O-RAN promises greater flexibility, better resource utilization, and faster introduction of innovations into mobile networks.

**Keywords:** open architecture, O-RAN, 5G

## 1 UVOD

Sodobna mobilna omrežja, kot jih poznamo danes, so prehodila večdesetletno pot razvoja in s peto generacijo (5G) [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8], ki se uvaja zdaj, stopamo v četrto desetletje digitalnih mobilnih omrežij. Razvoj in preoblikovanje omrežij so zaznamovale številne tehnološke inovacije. Tako postaja tudi radijsko dostopno omrežje (RAN, Radio Access Network) vse bolj kompleksno. Bistven prispevek k tej kompleksnosti je zgostitev omrežja na veliko majhnih celic za pokrivanje znotraj zgradb in zagotavljanje velikih zmogljivosti. Hkrati se omrežje širi na višje frekvence, kot so milimetrski valovne dolžine, teraherčne frekvence in celo valovne dolžine svetlobe [20].

Povečano kompleksnost radijskega dostopnega omrežja lahko pripišemo vzpostavljanju raznovrstnih novih tehnologij, kot so masovni MIMO, rezinjenje omrežja, združevanje nosilnikov, dvojna povezljivost, dinamično dodeljevanje spektra in podobno. Vse to je namenjeno podpori širokemu naboru primerov uporabe storitev, kot so izboljšani mobilni širokopasovni prenos, masovne strojne komunikacije, ultra zanesljive komunikacije z zelo majhnimi zakasnitvami, fiksni brezžični dostop, komunikacija med vozili ali vozili in preostalo infrastrukturo in podobno. Ne nazadnje narašča kompleksnost RAN tudi zaradi raznolikosti izvedbe omrežja, kot so različno velike celice (makro celice, piko celice in femto celice), opremljanje notranjih prostorov in fiksni brezžični dostop. Mobilna omrežja se gradijo v različnih oblikah, pri čemer danes izstopajo samostojni način 4G, nesamostojni način 4G/5G, samostojni način 5G in povezava mobilnega omrežja z WiFi ter druga zasebna mobilna omrežja. Kompleksna izvedba RAN povečuje investicijske in operativne stroške mobilnih operaterjev pri vzdrževanju in nadgrajevanju infrastrukture. Usklajevanje s tržnimi trendi, tehnološkim razvojem in zahtevami strank postaja vse težje.

Pri vseh arhitekturnih izvedbah RAN (tradicionalnih, porazdeljenih in centraliziranih), kot je podrobneje opisano v naslednjem poglavju, so enote BBU implementirane kot monolitne enote, kar omejuje prilagodljivost in operaterja veže na proizvajalca. To ne ustreza trendom gradnje sodobnih mobilnih omrežij, ki zahtevajo prilagodljivo uvajanje, inteligentno avtomatizacijo, obsežno koordinacijo med vozlišči RAN, hitro uvajanje inovativnih funkcionalnih rešitev ter nižanje stroškov – radijsko dostopno omrežje predstavlja od 60 do 70 % investicijskih in operativnih stroškov telekomunikacijskega operaterja.

Od tradicionalno zaprtih omrežij se mobilna omrežja zdaj razvijajo v odprta radijska dostopna omrežja (Open RAN ali O-RAN). Članek predstavlja koncept odprtega radijskega dostopnega omrežja, ki pomeni bolj odprto arhitekturo omrežja, kot jo imajo tradicionalna telekomunikacijska podjetja.

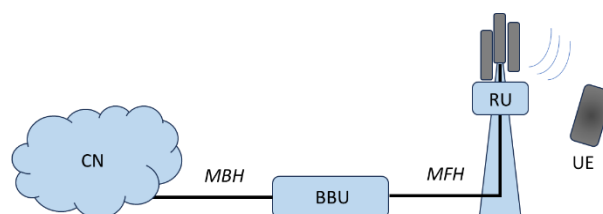
Specifikacije za Open RAN objavlja Zaveznitvo O-RAN (O-RAN Alliance) [9], katerega naloga sta tudi izdaja različic odprte programske opreme ter podpora svojim članom pri integraciji in testiranju lastnih izdelkov. Pred letom dni pa je na podlagi specifikacij, ki jih je pripravilo Zaveznitvo O-RAN, tudi Evropski telekomunikacijski standardizacijski institut (ETSI) izdal prve tehniške specifikacije [10], ki urejajo uporabniško in sinhronizacijsko ravnino O-RAN.

Open RAN predstavlja splošen koncept, ki sledi nenehnemu premiku tradicionalnih zaprtih arhitektur v smeri programske in strojne razčlenitve ter nelastniških omrežnih elementov in vmesnikov. Po [11] imamo več ključnih stebrov odprtega radijskega dostopnega omrežja: odprte vmesnike, združljivost opreme več različnih dobaviteljev v enem omrežju, inteligentni nadzor nad RAN in oblachno strukturo RAN. Pri

razčlenitvi posameznih elementov RAN na radijsko enoto (RU), porazdeljeno enoto (DU) in centralno enoto (CU), ki so bile do nedavnega integrirane, se močno poveča potreba po medsebojnih zmogljivih optičnih povezavah [12], ki so ključne, da takšno omrežje deluje. Ker se s tem povečata cena in kompleksnost omrežja, sta potrebna previdnost pri načrtovanju in razvejeno optično omrežje. Kot bomo videli v nadaljevanju, je ključni element v omrežju O-RAN t. i. inteligentni nadzornik RAN (RIC, RAN Intelligent Controller).

## 2 TRADICIONALEN KONCEPT RADIJSKEGA DOSTOPOVNEGA OMREŽJA

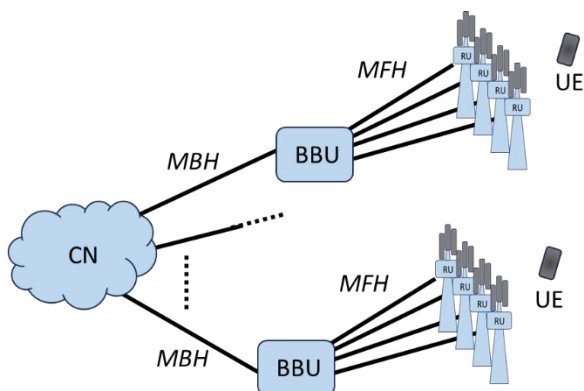
Radijsko dostopno omrežje (RAN) je del mobilnega telekomunikacijskega omrežja med jedrnim omrežjem (CN, Core Network) in uporabniško opremo (UE, User Equipment), kot prikazuje slika 1.



Slika 1: Tradicionalna arhitektura radijskega dostopnega omrežja (RAN). Sestavljena je iz jedrnega omrežja (CN), enote v osnovnem pasu (BBU) in radijske enote (RU).

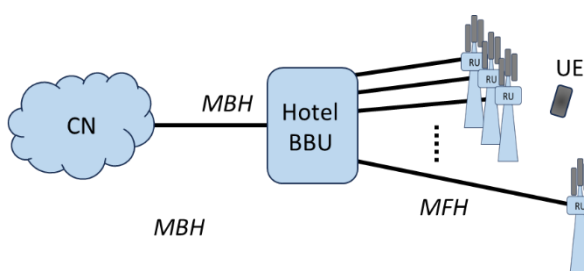
V tradicionalnem konceptu je RAN bazna postaja, katere arhitektura se je z razvojem generacij spreminjala. Kot prikazuje slika 1, je bazna postaja sestavljena iz enote v osnovnem pasu (BBU, Baseband Unit) in radijske enote (RU, Radio Unit), ki sta lahko združeni v eni enoti ali pa ločeni za nekaj metrov in povezani s koaksialnim ali optičnim kablom [13]. Ta del omrežja imenujemo mobilna sprednja transportna povezava (MFH, Mobile Fronthaul).

BBU je omrežni element v arhitekturi bazne postaje, ki obdeluje radijske protokole. Z večanjem števila baznih postaj se je RAN preoblikoval tako, da ena enota v osnovnem pasu lahko oskrbuje več radijskih enot, ki so lahko na istem radijskem stolpu ali kot porazdeljene majhne celice znotraj stavb ali na uličnih drogovich. Tako obliko radijskega dostopnega omrežja imenujemo porazdeljeni RAN (D-RAN, Distributed RAN), kar je prikazano na sliki 2. Pri D-RAN imamo porazdeljene enote RU in BBU. To ob velikem številu majhnih celic pomeni izziv pri združevanju nosilnikov, ki je ena od rešitev za povečanje pasovne širine in s tem bitne hitrosti. Za učinkovito delovanje združenih nosilnikov je pomemben kratek obhodni čas, ki je zahtevan med enotami BBU, kar pa je nemogoče zagotoviti, če je uporabnik med dvema enotama BBU, kot prikazuje slika 2.



Slika 2: Porazdeljeno radijsko dostopno omrežje (D-RAN).

Zakasnitve lahko zmanjšamo, če radijsko dostopno omrežje centraliziramo in dobimo arhitekturo porazdeljenega RAN (C-RAN, Centralized RAN) [14, 15], kot prikazuje slika 3. V tej arhitekturi se mobilna dostopna povezava (MFH) podaljša z nekaj deset metrov na nekaj deset kilometrov. Za takšno povezavo moramo uporabiti optično vlakno ali zmogljivo radijsko zvezo. Navadno se prek optičnega vlakna prenašajo radijski signali v digitalni obliki, s protokoli CPRI (Common Public Radio Interface), eCPRI (enhanced CPRI) [16, 17] ali NGFI (Next Generation Fronthaul Interface).



Slika 3: Centralizirano radijsko dostopno omrežje (C-RAN).

Namesto večjega števila enot v osnovnem pasu (BBU) se uvede t. i. »hotel BBU«, ki oskrbuje večje število radijskih enot (RU) [18]. Zaradi statističnega multipleksa ima BBU v tej arhitekturi manjše zmogljivosti kot v porazdeljenem RAN. Motivacija za prehod iz porazdeljenega (D-RAN) v centralizirano (C-RAN) radijsko dostopno omrežje je torej varčevanje z opremo [19].

### 3 SODOBEN KONCEPT RADIJSKEGA DOSTOPOVNEGA OMREŽJA

Ideja odprtega dostopnega radijskega omrežja (O-RAN) ni samo v tem, da postanejo operaterji manj odvisni od enega dobavitelja opreme, ampak pomeni velik razvojni korak v smeri nadgradnje arhitekture razčlenjenega radijskega dostopa. Razvoj gre v smeri popolnoma ločenih in virtualiziranih omrežij, implementiranih z nelastniškimi gradniki RAN. Pri tem

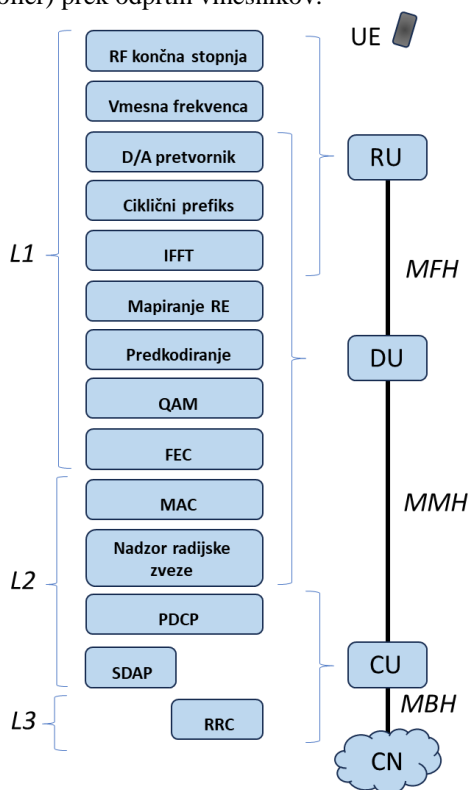
kot gradnike razumemo strojno opremo, programsko opremo in vmesnike, ki povezujejo te gradnike.

Glavne prednosti odprtega radijskega dostopnega omrežja (O-RAN) so: razčlenitev bazne postaje, inteligentno podatkovno vodeno krmiljenje, virtualizacija in odprti vmesniki [22, 23, 24]. Ti elementi so podrobno pojasnjeni v naslednjih podglavjih.

#### 3.1 Razčlenitev bazne postaje

Klasična bazna postaja, ki je ključni element radijskega dostopnega dela, je v arhitekturi mobilnega sistema sestavljena iz radijske enote (RU), imenovane tudi oddaljena radijska enota (RRU) ali oddaljena radijska glava (RRH), in enote v osnovnem pasu (BBU). V sodobnih radijskih sistemih se slednja imenuje porazdeljena enota (DU).

Tehnične specifikacije O-RAN [10] opisujejo nove principe funkcionalne delitve elementov RAN za radijska omrežja 4G LTE in 5G NR. V razčlenjenem radijskem dostopnem omrežju se bazna postaja deli na centralno enoto (CU), porazdeljeno enoto (DU) in radijsko enoto (RU), podrobneje pa ta del omrežja lahko razčlenimo na funkcionalne podsklope, ki zajemajo razpon od prve (L1) do tretje (L3) plasti (slika 4). Te enote so povezane z inteligentnimi krmilniki (RIC, RAN Intelligent Controller) prek odprtih vmesnikov.

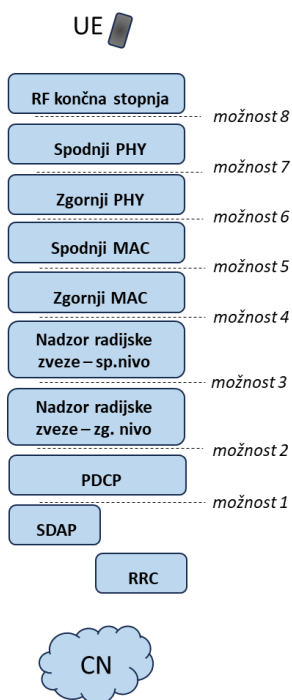


Slika 4: Arhitektura razčlenjenega radijskega dostopa (O-RAN).

Centralna enota je z jedrnim delom omrežja (CN, Core Network) povezana z zalednim transportnim omrežjem (MBH, Mobile Backhaul) dolžine od 10 do 120 km. Med CU in DU se razteza srednje transportno omrežje (MMH,

Mobile Midhaul) dolžine od 10 do 80 km, med RU in DU pa je srednje transportno omrežje (MFH, Mobile Fronthaul) dolžine od 300 m do 20 km.

Organizacija 3GPP je v tehničnem poročilu TR 38.801 [21] predlagala skupno osem možnosti razdelitve radijskega dostopovnega omrežja (slika 5), da bi s tem izboljšala njegovo prilagodljivost na različne potrebe omrežij. Izbira načina razdelitve funkcij radijskega dela med centralne in porazdeljene enote je odvisna od scenarijev gradnje radijskega omrežja, omejitev in predvidenih podprtih storitev.



Slika 5: Funkcionalna razdelitev radijskega dostopovnega omrežja O-RAN. Imamo osem možnosti, glede na katere se odločimo, katero funkcijo bomo dodelili posamezni enoti (CU, DU in RU).

Od osmih delitev sta najbolj aktualni dve, to sta opcija 2 – razdelitev zgornje plasti (HLS) in opcija 7 – razdelitev spodnje plasti (LLS) [22].

Razdelitev zgornje plasti (HLS) pomeni prvi korak k virtualizaciji RAN (vRAN). Ta izraz se v industriji pogosto uporablja za opis arhitekture, kjer je virtualizirana centralna enota. S to razdelitvijo je centralna enota razdeljena na dve logični ravni, nadzorno (CU-CP) in uporabniško (CU-UP). Ta ločitev je pomembna za zagotavljanje prilagodljive razširljivosti omrežja in učinkovitega rezinjenja. Razdelitev višje plasti omogoča razbremenitev centralne enote z ločeno obdelavo radijskih virov in protokola za konvergenco paketnih podatkov. Zmogljivosti ene centralne enote si deli več porazdeljenih enot. Centralno enoto je mogoče preprosto virtualizirati na strežniku, ki ni namenski, temveč je komercialno dostopen gotov izdelek, kar zagotavlja vrsto prednosti, kot so ločevanje programske

in strojne opreme, učinkovito prilagajanje zmogljivosti radijskega dostopovnega omrežja in izboljšano sodelovanje med radijskim in jedrnim omrežjem.

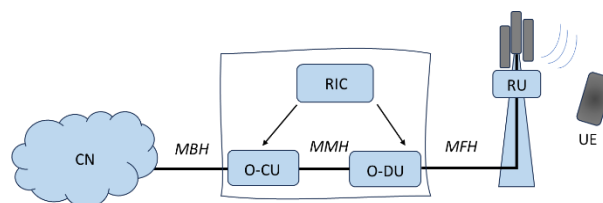
Razdelitev spodnje plasti (LLS) pomeni razdelitev funkcij fizične plasti (PHY). S to delitvijo se določene funkcije spodnje fizične plasti (PHY-), npr. IFFT, oblikovanje snopa in podobno, izvajajo v radijski enoti, medtem ko se funkcije zgornje fizične plasti (PHY+) v porazdeljeni enoti. Funkcije spodnje fizične plasti lahko omogočijo pogoje za zelo visoke prenosne hitrosti (zlasti v primeru masovnega MIMO) z zelo strogimi časovnimi zahtevami, zato takšna decentralizacija sprosti zahteve glede zmogljivosti in zakasnitev v radijski enoti ter zmanjša računsko kompleksnost v porazdeljeni enoti. Organizacija 3GPP je določila tri možnosti razdelitve spodnje plasti, ki jih označimo s 7.1, 7.2 in 7.3. Razlikujejo se v porazdelitvi funkcij fizičnega nivoja med radijsko in porazdeljeno enoto [26].

### 3.2 Inteligentni krmilnik radijskega dostopovnega dela (RIC)

Nova arhitektura omogoča programsko nastavljalnost in inteligenen nadzor v radijskem dostopnem omrežju. Funkcionalnosti, ki so bile prej odvisne od proizvajalca opreme in fiksno vključene v porazdeljeno in centralno enoto, so zdaj odprte in uporabniki imajo možnost izbire.

Na sliki 6 je prikazana dopolnjena arhitektura dostopovnega omrežja, ki ji je dodan nov element. To je inteligenčni krmilnik radijskega dostopovnega omrežja (RIC, RAN Intelligent Controller), ki upravlja odprto porazdeljeno enoto (O-DU) in odprto centralno enoto (O-CU). Glede na odzivnost omrežja lahko RIC deluje v nerealnem času in skoraj realnem času. Nova arhitektura O-RAN vključuje dva inteligenčna krmilnika, ki izvajata upravljanje in nadzor omrežja v realnem času (od 10 ms do 1 s) in v nerealnem času (več kot 1 s).

Druga inovacija zadeva RIC, ki uvajajo programabilne komponente, te pa lahko izvajajo optimizacijske rutine s krmiljenjem v zaprto zanko in usklajujejo delovanje RAN.



Slika 6: Dodajanje novega elementa – inteligenčnega krmilnika radijskega dostopovnega omrežja (RIC) – v koncept O-RAN.

RIC omogoča enostavno koordinacijo z drugimi radijskimi omrežji (razčlenjenimi in centraliziranimi). Odprtost vseh vmesnikov pa omogoča možnost popolne integracije z drugimi programskimi gradniki v nadzorni plasti. To omogoča programsko nastavljalnost med končnima točkama ter daje možnost dinamične in hitre prekonfiguracije omrežja.

Glavna prednost odprtega radijskega dostopnega omrežja je odprti trg gradnikov različnih proizvajalcev opreme, kar lahko pomembno zniža stroške omrežja. Vežanje na zgolj enega proizvajalca opreme ni potrebno. Za operaterje je pomembno, da lahko zaradi premika funkcij iz namenske strojne opreme v programsko opremo hitreje gradijo in nadgrajujejo svoja omrežja. Poleg novih možnosti, ki jih prinašata umetna inteligenca in strojno učenje, bodo tu tudi številne že poznane možnosti, kot je na primer prilagodljivost modulacijskih formatov na okoljske zahteve in namen uporabe.

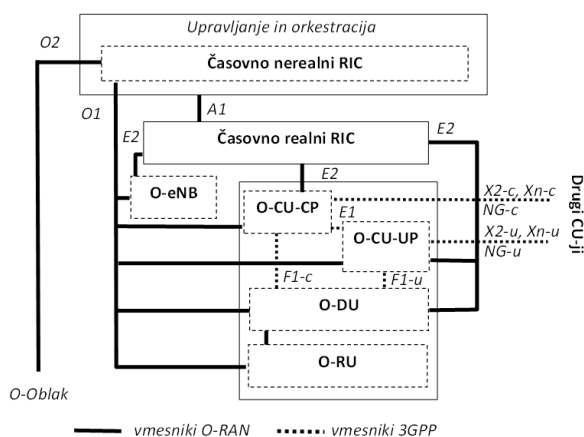
### 3.3 Virtualizacija

V arhitekturo O-RAN se uvajajo nove komponente za upravljanje in optimizacijo omrežja. Vse komponente arhitekture O-RAN lahko razporedimo na hibridno oblako platformo, imenovano O-Cloud. Gre za nabor računskih zmogljivosti, ki so v enem ali več fizičnih podatkovnih centrih. Na tej platformi so združena fizična vozlišča, programske komponente (npr. operacijski sistem) ter upravljanje in orkestracija. Oblačna platforma omogoča ločevanje strojne in programske opreme, standardizirane strojne zmogljivosti za O-RAN infrastrukturo, deljenje strojne opreme med več uporabnikov in avtomatizirano razporejanje in vzpostavljanje funkcionalnosti RAN.

Vpeljava virtualizacije komponent radijskega dostopnega omrežja lahko z enostavnim in dinamičnim prilagajanjem računskih zmogljivosti omogoči prihranke pri porabi energije. K temu prispeva kombinacija virtualizacije in inteligentnega krmiljenja, ki omogoča izpopolnjene dinamične cikle mirovanja RF-komponent bazne postaje, ki so navadno največji porabniki energije v mobilnih omrežjih.

### 3.4 Odprti vmesniki

Odprte vmesnike, ki povezujejo komponente arhitekture O-RAN, je pripravilo Zavezništvo O-RAN.



Slika 7: Arhitektura O-RAN s komponentami in vmesniki iz O-RAN in 3GPP. Vmesniki O-RAN so narisani s polnimi črtami, vmesniki 3GPP pa s črtkanimi črtami.

Na sliki 7 so prikazani novi odprti vmesniki, ki jih določa O-RAN (polne črte), in vmesniki RAN, ki izhajajo iz specifikacij 3GPP (črtkane črte). Vmesniki O-RAN omogočajo presežanje tradicionalnega razumevanja »črnih škatel«, saj prek inteligentnih krmilnikov omogočajo podatkovno analitiko in različne vrste krmiljenja in avtomatizacije.

RIC, ki deluje v realnem času, je z vmesnikom E2 povezan z vozlišči RAN. RIC, ki deluje v realnem času, je povezan z RIC, ki ne deluje v realnem času, z vmesnikom A1. RIC, ki ne deluje v realnem času, je z vmesnikom O1 povezan z drugimi komponentami radijskega dostopnega omrežja za upravljanje in orkestracijo funkcij omrežja. RIC, ki ne deluje v realnem času, se v O-oblak povezuje z vmesnikom O2, transportni sprednji vmesnik pa povezuje porazdeljene (DU) in radijske (RU) enote O-RAN.

Zavezništvo O-RAN je določilo vrsto standardiziranih testnih procedur za preverjanje medsebojne usklajenosti.

Zahvaljujoč odprtosti vmesnikov, omogoča opisana arhitektura O-RAN razporejanje na različne omrežne lokacije (v oblak, na rob, v celične postaje) za različne dele opreme in različne konfiguracije.

Brez novih elementov O-RAN bi bila upravljanje radijskih virov in optimizacija virtualnih in fizičnih omrežnih funkcij zaprta in neprilagodljiva. Operaterji bi imeli precej manj možnosti (ali nobenih) za dostopanje do svoje opreme.

Standardizacija novih vmesnikov je tako ključna, saj omogoča, da se npr. inteligentni krmilnik enega ponudnika, ki deluje v realnem času, lahko poveže z baznimi postajami drugega ponudnika ali ima omogočeno medsebojno sodelovanje med centralnimi (CU), porazdeljenimi (DU) in radijskimi (RU) enotami različnih proizvajalcev.

## 4 PREDNOSTI IN SLABOSTI O-RAN

### 4.1 Prednosti O-RAN

Prednosti arhitekture O-RAN so:

- Interoperabilnost: O-RAN omogoča medsebojno sodelovanje med različnimi komponentami različnih proizvajalcev, kar zmanjšuje odvisnost od enega samega dobavitelja opreme.
- Odprti vmesniki: O-RAN uvaja odprte vmesnike, ki omogočajo boljšo povezanost med različnimi deli omrežja, kar pripomore k večji prilagodljivosti in hitrejšemu uvajanju novih tehnologij.
- Virtualizacija: Arhitektura O-RAN podpira virtualizacijo, kar omogoča boljšo uporabo virov, prilagodljivost omrežja ter učinkovitejše upravljanje in optimizacijo.
- Razčlenitev funkcionalnosti: O-RAN razčlenjuje funkcionalnosti baznih postaj na več komponent (CU, DU, RU), kar omogoča boljše prilagajanje in optimizacijo posameznih delov omrežja.
- Hitrejše inovacije: Z odprtimi vmesniki in razčlenitvijo omogoča O-RAN hitrejše uvajanje

inovacij, saj omogoča lažje posodabljanje posameznih komponent brez vpliva na celotno omrežje.

#### 4.2 Slabosti O-RAN

Slabosti arhitekture O-RAN so:

- Kompleksnost: Razčlenitev funkcionalnosti in uporaba odprtih vmesnikov lahko prinese večjo kompleksnost v upravljanju in vzdrževanju omrežja.
- Varnost: Z odprtimi vmesniki in večjo raznolikostjo komponent se povečujejo tudi varnostni izzivi, ki jih je treba skrbno upravljati.
- Potreba po standardizaciji: Da bi v celoti izkoristili prednosti O-RAN, je ključno zagotoviti standardizacijo, kar pa lahko zahteva čas in usklajevanje med različnimi deležniki.
- Zamenjava obstoječe opreme: Za implementacijo O-RAN je morda treba zamenjati obstoječo opremo, kar lahko prinese dodatne stroške in logistične izzive.
- Potreba po izobraževanju: Uvajanje nove arhitekture zahteva tudi izobraževanje in usposabljanje kadra, kar lahko pomeni dodaten napor za operaterje omrežij.

### 5 ZAKLJUČEK

Odrpno radijsko dostopovno omrežje (O-RAN) prinaša osvežujočo dinamiko v tradicionalno okolje mobilnih komunikacij. Inovativne standarde vodi Zaveznštvo O-RAN, ki ga namesto tradicionalnih velikih proizvajalcev opreme usmerjajo operaterji mobilnih omrežij. Nekateri vidijo O-RAN kot ključnega igralca pri prihodnjem razvoju mobilnih omrežij, zlasti v smeri šeste generacije (6G). Brez dvoma bo koncept odprtega RAN omogočil manjšim podjetjem vstop na trg radijskega dostopnega omrežja ter predstavil nove uporabniške scenarije. To bo spodbudilo konkurenčnost na trgu, inovacije, hitrejša cikle posodabljanja in povečevanja zmogljivosti ter olajšalo oblikovanje in uvedbo novih programskih komponent v ekosistem RAN.

Uvedba O-RAN pa prinaša tudi številne izzive, kot so visoki investicijski stroški, kompleksnost izvedbe, varnostni izzivi in bojazen pred povečanjem operativnih stroškov. Poleg tega še ni povsem jasno, ali bodo vlogo integratorja odprtega RAN prevzeli operaterji, tradicionalni veliki proizvajalci opreme ali specializirana podjetja.

### LITERATURA

- [1] Batagelj Boštjan, Mlinar Tomi, »Open RAN – nov model arhitekturno odprtega radijskega dostopnega omrežja, Zbornik enaintridesete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2022, Portorož, Slovenija, 19. - 20. september 2022, str. 113–117, ISSN 2591-0442. <https://erk.fe.uni-lj.si/2022/erk22.pdf>.
- [2] Mlinar Tomi, Batagelj Boštjan, »2020 - leto razcveta pete generacije?«, Avtomatika, 2020, št. 180, str. 10–13, ISSN 1580-0830.
- [3] Batagelj Boštjan, Sodobna javna mobilna omrežja, Elektrotehniški vestnik 89(3): 133-141, 2022
- [4] Mlinar Tomi, »Peta generacija že trka na vrata«, Monitor, dec. 2018, letn. 28, št. 12, str. 28–33, ISSN 1318-1017.
- [5] Mlinar Tomi, Robnik Ana, »Omrežja 5G za popolno digitalno preobrazbo«, Delo, 18. maj 2017, leto 59, št. 112, str. 15, ISSN 0350-7521. <http://www.delo.si/arhiv/omrezja-5g-za-popolno-digitalno-preobrazbo.html>.
- [6] Mlinar Tomi, »NR - nova radijska tehnika, ki jo bo uporabljal 5G«, Avtomatika, 2017, št. 158, str. 39-43, ISSN 1580-0830.
- [7] Mlinar Tomi, Batagelj Boštjan, »5G: ali je na razpolago dovolj frekvenčnega spektra?«, Avtomatika, 2015, št. 138, str. 25–27. ISSN 1580-0830.
- [8] Mlinar Tomi, Batagelj Boštjan, »Naslednja generacija komunikacij – tehnološki in družbeni presežek?«, Avtomatika, 2014, št. 126, str. 16–17, ISSN 1580-0830.
- [9] <https://www.o-ran.org/>
- [10] ETSI TS 103 859 V7.0.2 (2022-09), Publicly Available Specification (PAS); O-RAN Fronthaul Control, User and Synchronization Plane Specification v07.02; (O-RAN-WG4.CUS.0-v07.02) [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/103800\\_103899/103859/07.0\\_02\\_60/ts\\_103859v070002p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103800_103899/103859/07.0_02_60/ts_103859v070002p.pdf).
- [11] Open RAN Global Forum Key Findings Report, November 2023, <https://www.rcrwireless.com/>.
- [12] Prodnik Pepevnik Vesna, Mlinar Tomi, Tavčer Črt, Batagelj Boštjan, »Pregled protokolov za vključevanje 5G v GPON« Zbornik enaintridesete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK, Portorož, Slovenija, 19. - 20. september 2022, str. 94–99, ISSN 2591-0442. <https://erk.fe.uni-lj.si/2022/erk22.pdf>.
- [13] Chanclou P. et al., "Optical fiber solution for mobile fronthaul to achieve cloud radio access network," 2013 Future Network & Mobile Summit, 2013, pp. 1–11.
- [14] Checko A. et al., "Cloud RAN for Mobile Networks—A Technology Overview," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 1, pp. 405-426, Firstquarter 2015, doi: 10.1109/COMST.2014.2355255.
- [15] Alimi, I. A., Teixeira A. L. and Monteiro P. P., "Toward an Efficient C-RAN Optical Fronthaul for the Future Networks: A Tutorial on Technologies, Requirements, Challenges, and Solutions", IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 1, pp. 708–769, Firstquarter 2018, doi: 10.1109/COMST.2017.2773462.
- [16] Common Public Radio Interface (CPRI); Interface Specification, CPRI Specification V7.0 (2015-10-09).
- [17] Enhanced Common Public Radio Interface: eCPRI Interface Specification, eCPRI Specification V2.0 (2019-05-10).
- [18] Carapellese N., Shamsabardeh M., Tornatore M., Pattavina A.. Chapter 10: BBU Hotelling in Centralized Radio Access Networks, "Fiber Wireless Convergence" Chapter: 3.3, Publisher: Springer Optical Networks Series.
- [19] Ilgaz Mehmet Alp, Vuk Baliž Kristjan, Batagelj Boštjan, "Improved Next-Generation Radio Access Networks Using a Centralized Opto-Electronic Oscillator", Journal of Mobile Multimedia, vol. 18, iss. 5, 2022, DOI: <https://doi.org/10.13052/jmm1550-4646.1855>.
- [20] B. Batagelj, J. Capmany and E. G. Udvarý, "5th-Generation Mobile Access Networks Assisted by Integrated Microwave Photonics," 2019 International Workshop on Fiber Optics in Access Networks (FOAN), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/FOAN.2019.8933807.
- [21] 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on new radio access technology: Radio access architecture and interfaces (Release 14), 3GPP TR 38.801 V14.0.0, marec 2017.
- [22] NGMN Alliance, "NGMN Overview on 5G RAN Functional Decomposition", 24. februar 2018. [https://ngmn.org/wp-content/uploads/Publications/2018/180226\\_NGMN\\_RANFSX\\_D1\\_V20\\_Final.pdf](https://ngmn.org/wp-content/uploads/Publications/2018/180226_NGMN_RANFSX_D1_V20_Final.pdf).

- [23] O-RAN Working Group 1, “O-RAN Architecture Description 5.00”, ORAN.WG1.O-RAN-Architecture-Description-v05.00 Technical Specification, July 2021.
- [24] O-RAN Working Group 2, “O-RAN Non-RT RIC Architecture 1.0”, O-RAN.WG2.Non-RT-RIC-ARCH-TS-v01.00 Technical Specification, July 2021.
- [25] O-RAN Working Group 3, “O-RAN Near-RT RAN Intelligent Controller Near-RT RIC Architecture 2.00,” O-RAN.WG3.RICARCHv02.00, March 2021.
- [26] Yajima Anil, Umesh Tatsuro, Toru Uchino and Suguru Okuyama, “Overview of O-RAN Fronthaul Specifications.” NTT DOCOMO Technical Journal, vol.21, no. 1, pp. 46–59, 2019.

**Tomí Mlinar** je leta 1995 diplomiral in leta 2002 magistriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Doktoriral je leta 2012 na Fakulteti za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Na Fakulteti za elektrotehniko predava predmet radijske komunikacije. Njegovo raziskovalno delo zajema širše področje radijskih komunikacij. Je avtor več kot 150 znanstvenih, strokovnih in poljudnih prispevkov.

**Boštjan Batagelj** je izredni profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Predava predmete satelitske komunikacije in navigacija, optične komunikacije in radijske komunikacije. Njegovo raziskovalno delo obsega fizični nivo telekomunikacijskih omrežij, radijskih in optičnih tehnologij. Je avtor več kot 300 člankov, desetih patentov, soustanovitelj dveh zagonskih podjetij. Sodeluje pri domačih in tujih raziskovalnih projektih s področja radijskih in optičnih tehnologij in mikrovalovne fotonike.