

TVWS – KARAKTERISTIKE, STANDARDI I PRIMENA

Dejan Nemec¹

Rezime: TV White Space (TVWS) označava neiskorišćene delove radiofrekventnog spektra dodeljenog za televizijsko emitovanje, najčešće u UHF opsegu. Ovi slobodni kanali nastaju kao rezultat prelaska sa analogne na digitalnu televiziju i tehničkih zahteva za izbegavanje interferencije između TV stanica. Korišćenje TVWS omogućava sekundarnim, nereguliranim uređajima pristup spektru bez ometanja primarnih korisnika, čime se povećava efikasnost spektralne upotrebe. Zahvaljujući izuzetnim propagacionim karakteristikama, TVWS tehnologija omogućava širokopojasni pristup internetu u ruralnim i teško dostupnim područjima, kao i primenu u pametnim mrežama, IoT i pametnim gradovima. U radu su date osnovne karakteristike TVWS, navedeni su standardi koji mogu da podrže TVWS i neki primeri uspešnih realizacija TVWS tehnologije.

Ključne reči: TVWS, WSD, IEEE 802.11af, IEEE 802.22, VHF/UHF

TVWS - CHARACTERISTICS, STANDARDS AND IMPLEMENTATION

Abstract: TV White Space (TVWS) refers to unused portions of the radio frequency spectrum allocated for television broadcasting, most often in the UHF band. These free channels are created as a result of the transition from analog to digital television and technical requirements to avoid interference between TV stations. The use of TVWS allows secondary, unregulated devices to access the spectrum without interfering with primary users, thereby increasing the efficiency of spectrum use. Thanks to its exceptional propagation characteristics, TVWS technology enables broadband Internet access in rural and hard-to-reach areas, as well as applications in smart grids, IoT and smart cities. The paper presents the basic characteristics of TVWS, lists the standards that can support TVWS, and some examples of successful implementations of TVWS technology.

Key words: TVWS, WSD, IEEE 802.11af, IEEE 802.22, VHF/UHF

1. UVOD

Multimedijalne aplikacije današnjice zauzimaju veći propusni opseg, što može da dovode do nedostatka frekventnog spektra neophodnog za zadovoljavanje zahteva za propusnim opsegom ovih aplikacija. Nedostatak može takođe proizaći iz nedovoljnog korišćenja licenciranog spektra. Neiskorišćeni licencirani frekventni spektar u TV opsegu poznat je kao TV *White Space* (TVWS, televizijski beli prostor, beli spektar). U narednim godinama, za koje se očekuje da će doneti poboljšane multimedijalne aplikacije, potreba za optimalnim korišćenjem frekventnog spektra neiskorišćenog licenciranog spektra postaje neophodna [1], [2].

Obezbeđivanje kvalitetnih telekomunikacionih usluga u udaljenim ruralnim zajednicama uvek predstavlja izazovan zadatak u većini zemalja sveta. Zbog nedostatka kvalitetnog širokopojasnog interneta i digitalnih usluga sa internetom, udaljena područja se suočavaju sa situacijom poznatom kao „digitalni jaz“. Provajderi širokopojasnog interneta zasnovanog na optičkim vlaknima i mobilni operatori često nemaju robusnu telekomunikacionu i internet infrastrukturu u ruralnim regionima jer je teško i skupo proširiti mrežu do te mere. Gustina korisnika na tim mestima je preniska da bi se obezbedila i održiva marža profita. Pored toga, postoje geografski izazovi poput visokog drveća, visokih brda, planina, reka itd. u udaljenim lokalitetima koji ograničavaju broj tehnologija koje se tamo efikasno mogu implementirati. Pre skoro 20 godina, uočeno je da bi TVWS mogao biti rešenje za obezbeđivanje širokopojasne internet veze udaljenim neistraženim zonama [3]-[5].

Frekvencijski spektar se dodeljuje u frekventnim blokovima koji opslužuju licencirane ili nelicencirane usluge. Ova statička dodela spektra ima ograničene resurse za podršku eksponencijalnom porastu bežičnih uređaja. TVWS odnosi se na neupotrebljene delove spektra u

¹Magistar tehničkih nauka, Stručni saradnik, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, denem@uns.ac.rs

VHF/UHF (*Very High Frequencies / Ultra High Frequencies*) zemaljskim televizijskim frekventnim opsezima. Prilikom alokacije i dodele frekvencija za televizijsko emitovanje, pretpostavljalo se da TV stanica emituje signale velike snage i da je neophodno široko razdvajanje spektra kako bi se sprečila interferencija između kanala emitovanja, što je podrazmevalo i postojanje frekventnih „zaštitnih opsega“ [4], [6].

Frekventni spektar radio signala je ograničen resurs a pokazuje se da može biti bolje iskorišćen. TVWS, koji je takođe poznat kao „Super Wi-Fi“, odnosi se na korišćenje neiskorišćenog spektra u televizijskim opsezima i pruža veliku mogućnost rešavanja ovih nedostataka.

2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE TVWS

White Space su neiskorišćeni spektralni resursi u određeno vreme i na određenim lokacijama koji se mogu iskoristiti deljenjem spektra. TVWS postoji u operativnim frekvencijama emitovanja televizije poznatim kao VHF/UHF opseg, tačnije u rasponu od 470-790 MHz u Evropi i nekontinualno u opsegu 54-698 MHz u SAD [6], a u nekim zemljama ovaj opseg se prostire do 960 MHz [1], [7]. Postojanje TVWS-a omogućava deljenje spektra između WSD (*White Space Devices*) nelicenciranih uređaja koji koriste *white space*, i licenciranih zaštićenih korisnika TVWS opsega. Kako TVWS opseg trenutno koristi veliki broj licenciranih zaštićenih servisa kao što je recimo radio-difuzni servis (digitalna terestrička TV) na primarnoj osnovi i PMSE (*Program Making and Special Events*) oprema na sekundarnoj osnovi, obaveza dobijanja licence štiti postojeće korisnike TVWS opsega od smetnji unutar njihovog područja usluge. Stoga, WSD-ovima koji rade u TVWS opsegu nije dozvoljeno da ometaju bilo kog zaštićenog postojećeg korisnika u njihovom određenom operativnom području [6].

Karakteristike prostiranja signala iz TVWS opsega čine ga poželjnim i pogodnim spektrom za mnoge usluge bežičnog prenosa. TVWS koristi frekvencije signala koje omogućavaju veći domet, veću otpornost na prepreke i težak i neravan teren, u odnosu na signale viših frekvencija, a troši malo energije. Sa sposobnošću da signal putuje na velike udaljenosti i prodire kroz prepreke, sa velikim propusnim opsegom, TVWS nudi usluge koje su teško ostvarive za 3G mobilne sisteme i Wi-Fi. Da bi se iskoristio ovaj potencijal, TVWS mora biti lako dostupan. Naravno, njegova dostupnost će varirati od regiona do regiona i zavisi od terena [1].

TVWS opseg se nalazi ispod frekvencija od 1 GHz, te materijalne prepreke su manje štetne nego na višim frekvencijama, što omogućava pokrivenost i van optičke vidljivosti. Tabela 1 prikazuje razlike u slabljenju signala između različitih materijala i frekvencija, gde su uočene razlike do 50 dB između 570 MHz i 5,7 GHz. TVWS opseg, takođe, u prednosti je kada se gledaju gubici na putanji u odnosu nelicencirane ISM (*Industrial, Science and Medical*) opsege (2,4 i 5,7 GHz) samo zbog radne frekvencije. Na primer, TV kanal 2 (54-60 MHz) ima 20 dB manje gubitke na putanji od TV kanala 30 (566-572 MHz), a koji sam po sebi ima pojačanje od 20 dB u odnosu na nelicencirani opseg na 5,7 GHz.

Slika 1 prikazuje superiorne faktore propagacije TVWS opsega [6]. Komponente kapaciteta i udaljenosti upoređene su za mobilne TVWS uređaje sa niskom snagom prenosa, uređaje od 2,4 GHz i uređaje od 5,5 GHz, kao i za fiksne TVWS uređaje velike snage. Širi kanali u visokofrekventnim opsezima, kao što su kanali od 80 MHz koji se koriste u ISM opsegu od 5 GHz, pružaju veći kapacitet na kratkom dometu, ali zahtevaju više infrastrukture da bi se postigla pokrivenost širokog područja. Nasuprot tome, TVWS signal širine 6 MHz od 4 W je robusniji i propagira se na većim udaljenostima sa značajnim kapacitetom.

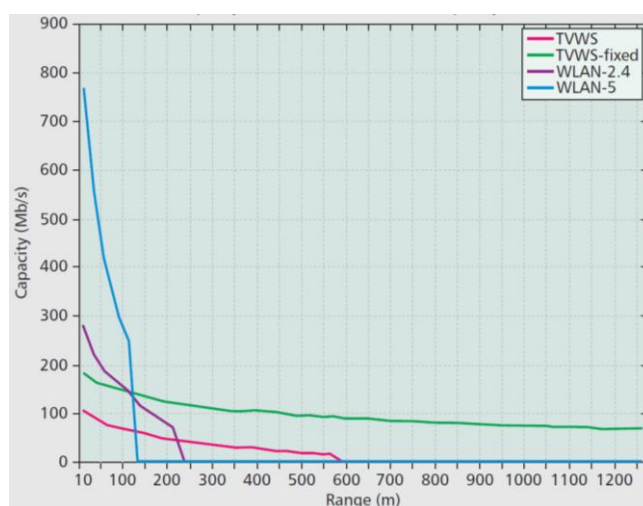
Odlične karakteristike propagacije TVWS opsega, zajedno sa nedovoljnom iskorišćenošću na mnogim lokacijama, predstavljaju poželjne potencijalne mogućnosti deljenja spektra. Da bi se postiglo deljenje između WSD-ova i licenciranih TV emitera i korisnika PMSE sistema, mnogi izazovi moraju biti rešeni zajedničkim standardom. Jedan od glavnih izazova je garantovanje zaštite postojećih korisnika TVWS opsega od smetnji u njihovom operativnom regionu. WSD-ovi su dužni da rade u nezauzetom spektru, koji može varirati po veličini, lokaciji i vremenu. To znači da WSD-ovi moraju

da podržavaju različite širine kanala i da budu u stanju da uče iz odobrene baze podataka o geolokaciji koji su kanali dostupni i u kom vremenskom periodu.

TVWS baza podataka, takođe poznata kao (TV) geolokaciona baza podataka, je entitet koji kontroliše korišćenje TV spektra od strane nelicenciranih WSD uređaja unutar određenog geografskog područja. Njen jedini cilj je da omogući nelicencirani pristup WS spektru, uz zaštitu postojećih radiodifuznih servisa. TVWS baza podataka je prvobitno nastala kao način da se prevaziđu tehničke prepreke sa kojima se suočavaju tehnike detekcije spektra radi preciznog otkrivanja veoma slabih primarnih signala [8]. Kada počnu da rade u dostupnom kanalu, WSD-ovi su dužni da ne ometaju postojeće uređaje u susednim kanalima. Konačno, WSD-ovi su dužni da odmah prekinu prenos kada ih baza podataka obavesti da prestanu.

Tabela 1 - Pojačanje snage primljenog signala u dB u odnosu na različite prepreke [6]

Materijal	0,57 Hz (dB)	1 GHz (dB)	2 GHz (dB)	5,7 GHz (dB)	0,57 to 5,7 GHz (Δ dB)
Cigla 89 mm	-1,5	-3,5	-5,4	-15,0	13,5
Cigla 267 mm	-4,8	-7,0	-10,5	-38,0	33,2
Betonski zid 102 mm	-12,0	-14,0	-18,0	-42,0	30,0
Betonski zid 203 mm	-21,5	-25,0	-33,0	-71,5	50,0
Staklo 6 mm	-0,4	-0,8	-1,4	-1,1	0,7
Staklo 19 mm	-2,5	-3,1	-3,9	-0,4	-2,1
Suva šperploča 6 mm	-0,15	-0,49	-0,9	-0,1	-0,05
Suva šperploča 32 mm	-0,85	-1,4	-2,0	-0,9	0,05
Armirani beton 203 mm/ 1% metal	-23,5	-27,5	-31,0	-56,5	33,0
Armirani beton 203 mm/ 2% metal	-27,5	-30,0	-36,5	-60,0	32,5



Slika 1 - Poređenje kapaciteta u odnosu na udaljenost za različite bežične sisteme [6]

3. STANDARDI KOJI PODRŽAVAJU TVWS

Postoje dva najzanimljivija IEEE standarda za tehnologije koje bi mogle biti primenjene u VHF i UHF frekventnim opsezima, odnosno koji bi mogli da budu podrška za TVWS [9]-[11]:

- IEEE 802.11af,
- IEEE 802.22.

3.1. IEEE 802.11af

IEEE 802.11af je bežični mrežni standard koji je projektovan za rad bežične lokalne mreže (WLAN – *Wireless Local Area Network*) male potrošnje energije i velikog dometa za pametne domove i IoT (*Internet of Things*) uređaje. Radi u frekventnom opsegu TVWS, koristeći neiskorišćeni TV spektar na frekvencijama između 54 i 790 MHz tokom kratkih vremenskih perioda. 802.11af

koristi tehnike kognitivnog radija kako bi obezbedio domet u zatvorenom prostoru od nekoliko stotina metara i domet na otvorenom do i preko jednog kilometra. Takođe se naziva „*Super Wi-Fi*“ ili „*White-Fi*“ zbog svoje mogućnosti da koristi neiskorišćeni radio spektar ili *white spaces* unutar televizijskih opsega [10]-[13].

U IEEE 802.11af standardu velikog dometa, koji podseća na tradicionalni Wi-Fi, pristupna tačka, AP (*Access Point*) emituje signal male snage unutar područja koje pokrivaju drugi, glavni, emiteri signala. Ove AP projektovane su da obezbede WLAN bez ometanja već postojećih usluga. Pošto su 802.11af AP raspoređene unutar područja pokrivenosti glavnog predajnika, veoma je važno osigurati da sistem ne stvara smetnje postojećim televizijskim prenosima. Tehnologije prilagođene da se ovo postigne jesu [12]:

- Tehnika kognitivnog radija (*cognitive radio*) – Ova tehnika omogućava IEEE 802.11af sistemu da detektuje signale na određenim frekvencijama i da pređe na alternativne kanale.
- *Geographic Sensing* – Ova tehnika pomaže u kreiranju geolokacione baze podataka o tome koji su kanali dostupni za upotrebu u kom regionu.

Prednosti IEEE 802.11af standarda jesu:

- Standard 802.11af pruža iskustvo slično Wi-Fi mreži na velikim dometima sa pristojnim brzinama prenosa podataka (do 35,6 Mbit/s – može i više uz korišćenje povezivanja kanala).
- Sistem 802.11af koristi neiskorišćene frekvencije u spektru TVWS, što rezultira efikasnim korišćenjem raspoloživog spektra.

IEEE 802.11af omogućava postizanje maksimalne brzine prenosa podataka od 35,6 Mbit/s po prostornom toku pri širini kanala od 8 MHz. Propusni opsezi kanala od 6 i 7 MHz mogu postići brzine prenosa podataka do 26,7 Mbit/s po prostornom toku. Ukoliko se koristi povezivanje kanala, maksimalna brzina prenosa podataka raste na 426,7 Mbit/s u kanalima od 6 i 7 MHz. Pod istim uslovima, režim od 8 MHz dostiže 568,9 Mbit/s.

Fizički sloj (PHY) sloj u 802.11af zasniva se na OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). 802.11af poboljšava 802.11 WLAN PHY kako bi podržao rad u TVWS spektru u VHF i UHF opsezima. Uvodi *Television Very High Throughput* (TVHT) PHY kako bi se prilagodio uskim TV kanalima koji su dostupni u TVWS spektru. Pored OFDM-a, 802.11af koristi i druge tehnike koje su usvojili noviji IEEE 802.11 standardi, kao što su MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) i povezivanje kanala. Konkretno, IEEE 802.11af ima mogućnost povezivanja do četiri kanala širine 6 do 8 MHz, u zavisnosti od regulatornog domena. Može se implemetirati do četiri MIMO toka i mogu raditi u MU-MIMO (*Multiple User – MIMO*) ili STBC (*Space-Time-Block-Code*) režimu.

U SAD su dozvoljeni samo propusni opsezi kanala od 6 MHz na TV kanalima 2, 5, 6, 14-35 i 38-51 za maksimalno 48 sati neprekidne upotrebe. SAD takođe koristi internet za upite u geolokacionu bazu podataka koja obično ažurira sistem o svim regionalnim propisima koji su na snazi. U Evropskoj uniji dozvoljen je rad TVWS na kanalima od 8 MHz između 490 i 790 MHz, pri čemu geolokacionu bazu podataka odobrava upotrebu do 2 sata [11]-[13].

3.2. IEEE 802.22

IEEE 802.22 standard razvijen je za bežične regionalne mreže WRAN (*Wireless Regional Area Network*) koje koriste TVWS spektar kako bi obezbedile vezu u oblastima koje su teško dostupne. IEEE 802.22 bi se mogao opisati kao naslednik IEEE 802.16 standarda, poznatog kao WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) [11], [14], [15].

IEEE 802.22 koristi mrežnu topologiju od tačke do više tačaka, što znači da jedna bazna stanica (BS) može da pruži uslugu većem broju pretplatničkih uređaja (CPE – *Customer Premise Equipment*). Odnos između BS i CPE je *master-slave*. Bazna stanica koristi funkciju upravljanja spektrom za upit u bazu upravljanja spektrom u cilju kontrole kanala koji se mogu koristiti. Bazna stanica vrši RF detekciju u definisanim redovnim intervalima, i CPE uređaju šalje izveštaje o frekvencijama i kanalima koji će se koristiti. Na osnovu izveštaja, BS odlučuje koji slobodan kanal spektra mora da se

koristi za komunikaciju sa CPE. CPE su projektovane sa dve antene. Jedna antena se koristi za komunikaciju sa baznom stanicom. Druga omnidirekciona antena se koristi za prikupljanje izveštaja i merenja [11], [15].

Prema datim propisima, WRAN interfejs ka bazi podataka CPE uređaja mora biti direktno povezan između bazne stanice i servisa baze podataka, a ne sa pojedinačnim CPE uređajem. To je zato što bazna stanica mora pronaći slobodan kanal zajednički za sve CPE uređaje, osim za pojedinačne CPE uređaje.

IEEE 802.22 koristi OFDM i TDMA (*Time Division Multiple Access*) na PHY i definiše MAC (*Media Access Control*) sloj. Standard definiše nekoliko klasa kvaliteta usluge (QoS – *Quality of Service*) od *best-effort* servisa, preko prenosa u realnom vremenu do emuliranih TDM (*Time-Division Multiplexing*) servisa. Dostupne klase usluga omogućavaju planerima da kombinuju različite usluge i da optimizuju raspoloživi protok. Maksimalna snaga signala je do 4 W, kako za BS tako i za CPE, kako bi se obezbedilo adekvatno pokrivanje područja [11].

IEEE 802.22 koristi kanale širine 6, 7 i 8 MHz u frekventnom opsegu 56-810 MHz. Praktična implementacija se trenutno izvodi u UHF frekventnom opsegu, dok VHF do sada nije korišćen [11].

4. PRIMENA TVWS U SVETU

Dosadašnja implementacija TVWS sistema u svetu se može okarakterisati kao još uvek eksperimentalna i na osnovu koje se izučavaju mogućnosti tehnologije a manje kao komercijalni sistemi koji se odlikuju jasno definisanim standardima i primenama. Implementacija TVWS sistema može se podeliti u više kategorija na osnovu izbora tehnologije koja je primenjena u okviru TVWS sistema i namene TVWS sistema. Dosadašnji razvoj TVWS sistema karakteriše primena različitih tehnoloških rešenja i standarda [2].

Postojeći TVWS sistemi su uglavnom pilot projekti ili projekti koji imaju i komercijalnu primenu ali je njihova instalacija potpomognuta značajnim donacijama velikih kompanija poput Microsoft-a ili uz pomoć zvaničnih državnih institucija. Glavna karakteristika ovih instalacija je da su lokalnog regionalnog karaktera, sa ograničenim uticajem. Najčešći razlozi instalacije TVWS sistema su obezbeđivanje širokopojasnog radio-pristupa u ruralnim sredinama ili u školama. Takođe, primetna su i rešenja za pojedine konkretne probleme u komercijalnim sistemima i pri rešavanju određenih ekoloških pitanja [2].

Na primer, nekoliko TVWS sistema implemetirano je u Velikoj Britaniji. U Londonskom zoološkom vrtu TVWS je implementiran u sklopu projekta zaštite životinja gde je preko TVWS sistema prenošen *video stream* na Youtube-u u okviru kojeg su zainteresovani mogli da gledaju prenos dešavanja u zoološkom vrtu. Drugi primer je pilot projekat za ispitivanje komunikacije TVWS uređaja sa bazom podataka upotrebom ETSI 301598 standarda, odnosno IETF PAWS (*Protocol to Access White Space*) protokola, a sistem je zasnovan na IEEE 802.11af standardu. *King's College* u Londonu sproveo je još niz pilot projekata u julu 2014. godine koristeći opremu različitih proizvođača, sa različitim partnerima u okviru ovih projekata, sa ciljem testiranja TVWS opreme u kontinuiranom radu u raznim delovima Londona kao i na nekoliko lokacija izvan Londona, u ruralnim sredinama Velike Britanije. Međutim, 2024. kompanija Ofcom objavila je da TVWS baza podataka nije više dostupna, jer ne postoji veliko interesovanje za ovom tehnologijom koja ostvaruje relativno male brzine u odnosu na alternativne pristupe [16].

Pored ovoga, TVWS sistemi su implementirani i širom sveta, najčešće u manje razvijenim delovima gde drugi sistemi nisu toliko prisutni, ali i u razvijenim zemljama. Primeri država gde je TVWS implemtiran u nekim delovima jesu Mozambik, Bocvana, Namibija, Južnoafrička republika, Filipinima, Butanu, Singapur, Urugvaj, SAD, Meksiko i druge [2].

5. ZAKLJUČAK

Korišćenje TVWS spektra predstavlja inovativan pristup optimizaciji upotrebe radiofrekventnih resursa, posebno u UHF opsegu, koji je poznat po izuzetnim propagacionim karakteristikama i velikoj vrednosti za širokopojasne i IoT primene. TVWS omogućava sekundarnim korisnicima pristup neiskorišćenim frekvencijama bez ometanja primarnih servisa, što je naročito značajno za ruralna i manje pokrivena područja, gde može doprineti smanjenju digitalnog jaza i unaprediti dostupnost bežičnog interneta i drugih servisa. Međutim, uspešna implementacija TVWS tehnologije zahteva pažljivo upravljanje interferencijom, preciznu regulativu i kontinuirano praćenje spektra kako bi se zaštitili postojeći korisnici, uključujući TV emitere i PMSE opremu. Korišćenje geolokacijskih baza podataka i naprednih metodologija za izračunavanje dozvoljene snage i zaštitnih odnosa ključno je za bezbedan rad ovih sistema. Iako je TVWS spektar često fragmentisan i manje dostupan u urbanim sredinama, njegova upotreba u ruralnim područjima ima veliki potencijal za razvoj novih servisa i tehnologija. Dalji napredak u ovoj oblasti zavisice od razvoja regulatornog okvira, tehnoloških inovacija i uspešnih pilot projekata, uz stalno balansiranje između efikasnosti spektra i zaštite postojećih servisa.

6. ZAHVALNICA

Ovaj rad podržan je od strane Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, Departmana za energetiku elektroniku i telekomunikacije, u okviru projekta pod nazivom „Razvoj i primena savremenih alata i metoda istraživanja u energetici, elektronici i telekomunikacijama”.

7. LITERATURA

- [1] A. N. Adefela, Y. O. Olasoji, K. B. Adedeji: *Evaluation of TVWS Availability: A Step Towards Frequency Spectrum Utilization*, Journal of Engineering Advancements Vol. 03(02) 2022, pp 50-56
- [2] V. Crnčević i drugi: *Studija izvodljivosti uvođenja white space uređaja u UHF opsegu (između 470-790 MHz)*, Regulatorna agencija za elektronske komunikacije i poštanske usluge, RATEL, Beograd, jun 2018.
- [3] MD Z. Islam, J. F. O'hara, D. Shadoan, M. Ibrahim, S. Ekin: *TV White Space Based Wireless Broadband Internet Connectivity: A Case Study With Implementation Details and Performance Analysis*, IEEE Open Journal of the Communications Society, Volume 2, 2021.
- [4] K. M. Radsliff, E. E. Te, D. Means: *TV Whites Spaces in Public Libraries: A Primer*, Information Technology and Libraries, Vol. 36, No. 1, March 2017.
- [5] *White spaces (radio)*: Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/White_spaces_\(radio\)](https://en.wikipedia.org/wiki/White_spaces_(radio)), pristupljeno April 2025.
- [6] A. B. Flores, R. E. Guerra, E. W. Knightly, P. Ecclesine, S. Pandey: *IEEE 802.11af: A Standard for TV White Space Spectrum Sharing*, IEEE Communications Magazine, October 2013.
- [7] *Television channel frequencies*, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Television_channel_frequencies, pristupljeno April 2025.
- [8] *TV White Space Database*, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/TV_White_Space_Database, pristupljeno April 2025.
- [9] O. Ülgen, T. Baykaş and S. Erküçük: *A new approach for coexistence of IEEE 802.11af and IEEE 802.22 systems*, 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Izmir, Turkey, 2018, pp. 1-4, DOI: 10.1109/SIU.2018.8404410.
- [10] S. Yuan, L. Li, C. Chigan: *A Selfishness-aware Coexistence Scheme for 802.22 and 802.11af Networks*, 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) - Workshop – International Workshop on Smart Spectrum, March 2015, pp. 194-199, DOI: 10.1109/WCNCW.2015.7122553
- [11] D. Vujić, Miroslav Dukić: *Comparison of TVWS Standards*, International Scientific Conference of IT and Business-Related Research – Synthesis 2015
- [12] Editorial Team, *What is 802.11af?*, Tehnical Artical, EverythingRF, <https://www.everythingrf.com/community/what-is-802-11af>, pristupljeno April 2025.

- [13] *IEEE 802.11af*, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11af, pristupljeno April 2025.
- [14] Apurva N. Mody, G. Chounard: *IEEE 802.22 Wireless Regional Area Networks*, IEEE, June 2010, doc.: IEEE 802.22-10/0073r03
- [15] *What is WRAN (Wireless Regional Area Network)?*, GeeksforGeeks, <https://www.geeksforgeeks.org/what-is-wran-wireless-regional-area-network/>, pristupljeno April 2025.
- [16] M. Jackson: *End of the Line for TV White Space Broadband Tech in the UK UPDATE*, ISPreview, Feb 9th, 2024, <https://www.ispreview.co.uk/index.php/2024/02/end-of-the-line-for-tv-white-space-broadband-tech-in-the-uk.html>, pristupljeno April 2025.