

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET



mr Božimir M. Mišković

**POVEĆANJE BROJA PROGRAMA U
MULTIPLEKSIMA DVB-T2 SISTEMA**

doktorska disertacija

Beograd, 2015

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING



M.Sc. Božimir M. Mišković

**INCREASE IN NUMBER OF
PROGRAMMES IN DVB-T2 MULTIPLEXES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2015

PODACI O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE

Mentor:

Prof. dr Irini Reljin, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

Članovi komisije:

Prof. dr Aleksandar Nešković, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

Prof. dr Željko Trpovski, Univerzitet u Novom Sadu - Fakultet tehničkih nauka

Prof. dr Milan Prokin, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

Prof. dr Miroslav Lutovac, Univerzitet Singidunum - Fakultet za informatiku i računarstvo

Datum odbrane: _____.

ZAHVALNICA

Želeo bih da se zahvalim svima koji su doprineli da istraživanja i analize izvršeni u ovoj tezi budu uspešni.

Zahvalan sam, pre svih, mentorki, profesorki dr Irini Reljin na idejama, savetima, angažovanosti i podršci, kako pri pisanju radova za časopise i konferencija, tako i pri pisanju teze. Mnogo mi je značilo njeno poverenje u moj rad!

Zahvalio bih se i profesoru dr Miroslavu Lutovcu na jasnim smernicama, pomoći pri pisanju radova za konferencije i, posebno, kod simulacionih postupaka i analiza.

Iskrenu zahvalnost dugujem profesoru dr Žarku Markovu, koji me je uveo u svet stručnih i naučnih analiza i pisanje stručnih radova.

Želeo bih da se zahvalim članovima komisije na sugestijama i korisnim savetima, datim prilikom odbrana prijavljene teze, koji su doprineli kvalitetu disertacije.

Dragoceni su mi bili i informacije, saveti i iskustva u implementaciji DVB-T2 sistema u Srbiji, koje su mi nesebično preneli kolege iz preduzeća Emisiona Tehnika i Veze, i ja im se iskreno zahvaljujem.

Veliku podršku imao sam od kolega, profesora na Visokoj Školi Strukovnih Studija u Čačku, a posebno od direktora profesora dr Dojčila Sretenovića. Zahvalan sam im na pažnji i dragocenim stručnim savetima.

Drage kolege iz Telekom Srbija u Čačku, gde sam zaposlen, davali su mi veliku podršku, nadoknađivali moju zaokupljenost drugom problematikom, i doprineli da posao u našoj firmi, kao i uvek bude besprekorno obavljen.

Moji roditelji, nažalost, nisu dočekali da posao oko doktorske teze privedem kraju. Njima, posthumno, i svoj dragoj rodbini zahvaljujem na podršci i strpljenju.

Zahvalan sam starim drugovima, prijateljima i saradnicima, koji su trpeli moje odsustvo, ponekad i nervozu i moje odlutale misli.

Najveću zahvalnost zaslužuju supruga Branka i sin Nikola. I kada bih posumnjao u smisao celog ovog ogromnog napora, oni su mi davali snagu i motiv da dalje nastavim sa radom. Od sina sam dobio i divnu poruku: „Ako sam od njega od malih nogu tražio da uvek završava započete poslove, onda to moram završiti i ja“. Srećan sam što ga nisam razočarao!

Povećanje broja HD programa u multipleksima DVB-T2 sistema

Rezime

Predmet istraživanja prikazanog u ovoj doktorskoj tezi je emitovanje TV programa preko digitalnih sistema za prenos televizijskog signala putem zemaljskih predajnika druge generacije DVB-T2 (*Digital Video Broadcasting- Terrestrial*), koji se koristi u Evropi. DVB-T2 je savremeni sistem koji omogućava da se u multipleksu RF kanala opsega 8 MHz emituje 15-18 programa standardne definicije, SD (*Standard definition*), ali samo 4-6 programa visoke definicije, HD (*High Definition*), koji imaju mnogo veće bitske protoke. Poboljšanje kvaliteta nastaviće se kroz formate HD i 3D programa druge generacije, do formata ultra visokih definicija, UHD (*Ultra High Definition*) u budućnosti. Nove formate će karakterisati sve veći izvorni tok. Bez obzira na primenu efikasnih tehnika komprimovanja, kao što je HEVC (*High Efficiency Video Coding*), protok komprimovanog video signala će biti sve veći, a u multipleks jednog RF kanala će moći da se smesti sve manje TV programa.

Istraživanje se vrši u trenutku kada nadležne institucije postepeno smanjuju opseg namenjen DTT emitovanju (*Digital Terrestrial Television*), pa se sa očekivanih 3 do 9 multipleksa (još uvek nije definisano), moraju zadovoljiti očekivanja korisnika i zadržati konkurentnost na tržištu.

Cilj istraživanja je da se sagledaju mogućnosti DVB-T2 sistema i predlože rešenja za emitovanje što većeg broja HD i UHD programa. Na bazi dostupnih istraživanja, kako u zemaljskoj, tako i u drugim srodnim tehnikama emitovanja video sadržaja, kao i originalnih istraživanja, predložena su rešenja za povećanje broja emitovanih TV programa. Kroz kvantifikaciju i sprovedene proračune utvrđeni su pojedinačni dometi predloženih rešenja, kao i rezultat njihove istovremene primene.

Kao značajne za dalju analizu u razmatranje su uzete činjenice koje karakterišu sadašnje, nazovimo ga tradicionalno, smeštanje TV programa u DVB-T2 multiplekse:

- a) Frekvencijska karakteristika multipleksa digitalnih TV programa u RF kanalu je sasvim drugačija od karakteristike analognog TV programa.
- b) Multipleks TV programa se emituje preko RF kanala nasleđenog iz vremena analognih TV programa sa opsegom od 8MHz, od čega se efektivno koristi 7.61 do 7.77 MHz, a ostatak služi kao zaštitni frekvencijski interval na krajevima opsega. Ovaj opseg nije namenjen niti prilagođen potrebama digitalnog emitovanja, a pre svega nije dovoljan resurs za velike protoke HD i UHD programa.
- c) Komprimovani video signal ima promenljivi protok, VBR (*Variable Bit Rate*), pa je iskorišćenost kapaciteta kanala promenljiva i povezana sa brojem programa i primenjenim tehnikama njihovog multipleksiranja. U radu se pošlo od

opšteprihvaćene pretpostavke da su svojstva protoka komprimovanog HD i UHD video sadržaja ista kao i kod SD formata.

- d) Zbog frekvencijske i vremenske selektivnosti (promenljivosti) odziva bežičnog kanala, parametri sistema se podešavaju na prag prihvatljiv za emitovanje u mogućim lošim uslovima prenosa. Iz predostrožnosti veliki deo kapaciteta se koristi kao redundansa, za zaštitu na različitim nivoima.

U navedenim činjenicama leže slabosti koje, na odgovarajući način treba prevazići, ali i mogućnosti da emitovanje HD i UHD programa postane efikasnije. Pretpostavka je da nove tehnike obrade signala u DVB-T2 sistemu i povećana procesorska snaga opreme omogućavaju primenu rešenja kojima će se kapacitet kanala i protok multipleksa povećati, a destruktivni uticaj pomenutih karakteristika video sadržaja i radio kanala eliminisati ili umanjiti.

Važan deo teze posvećen je saobraćajnoj analizi. Polazne pretpostavke ove analize su:

- Procena očekivanih protoka HD i UHD programa, izvršena je konsultovanjem dostupne literature: na osnovu rezultata testiranja, eksperimentalnog rada, kao i uporednom analizom očekivanja i procena renomiranih autora i institucija.
- Za različite modove DVB-T2 mreže postoje definisani i prihvaćeni odgovarajući parametri, čime su određeni kapaciteti pojedinačnih (*Single*) RF kanala u tim mrežama.
- Postoji empirijski rezultati koji pokazuju efikasnost iskorišćenja (*channel efficiency*) kapaciteta pojedinačnog RF kanala u zavisnosti od broja i načina multipleksiranja TV programa.

U literaturi je poznata povezanost kapaciteta RF kanala, usvojenog protoka po pojedinom programu i efikasnosti iskorišćenja kapaciteta kanala, dobijena kao rezultat empirijskih istraživanja efekata statističkog multipleksiranja. Poštujući te zavisnosti u tezi je stvoren matematički model kojim se, na bazi usvojenog protoka za pojedine HD i UHD programe, određuju potrebni kapaciteti kanala za željenu (ili zadatu) efikasnost kojom multipleks taj kapacitet koristi. U tom smislu, po načinu primene i algebarskoj formi, ovaj model je nov i originalan, iako matematički jednostavan.

Jedan od doprinosa ove teze rezultat je analize frekvencijske karakteristike digitalnog signala i dat je kao predlog metode za povećanje kapaciteta RF kanala. DVB-T2 koristi OFDM tehniku multipleksiranja. Analiza je pokazala da se princip ortogonalnosti može iskoristiti za potpuno korišćenje celog opsega RF kanala, odnosno da se ortogonalnost postignuta u kanalu može primeniti i između susednih kanala (*adjacent channels*). To znači da na frekvencijskom prostoru namenjenom DVB-T2 (ili drugom DTT) sistemu emitovanja, mogu koegzistirati RF kanali koji u potpunosti zauzimaju frekvencijske opsege. Uslov je da kanali budu u potpunosti sinhronizovani, što se već primenjuje kod jednofrekvencijskog moda mreže, SFN (*Single Frequency Network*). Predloženo rešenje potvrđeno je rezultatima simulacione analize. Primena modela proračuna, međutim, pokazala je da, i sa potpuno iskorišćenim opsegom, RF kanal nema dovoljan kapacitet da prihvati dovoljno HD programa. Ovo poboljšanje dobiće smisao u novim načinima zauzimanja RF kanala, predloženim u nastavku rada.

U potrazi za većim kapacitetom istražene su metode za povezivanje (*channel combining*) više RF kanala u zajednički, širokopolasni (*broadband*) resurs, dovoljan za efikasno smeštanje (*allocation*) HD programa. Analizirana su hardverska rešenja već primenjena u novim

verzijama WLAN sistema, kao i planovi za povezivanje kanala u nekim drugim *broadcast* sistemima, kao što je DVB-C2 (*Digital Video Broadcasting - Cable*). Rešenje za hardversko povezivanje susednih RF kanala u DVB-T2 sistemu, predloženo u ovom radu, je prvi put objavljeno u radu autora i mentora pod nazivom "*Broadband DVB-T2 Channels at a Physical Level – Simulation Analysis*" (2015). Predložene su dve metode povezivanja RF kanala: metoda „*side by side*“ i metoda „*povećanog FFT bloka*“. Simulaciona analiza je potvrdila da ove metode daju iste rezultate, koji se ne razlikuju od standardnog zauzimanja RF kanala.

Deo teze posvećen je kvantifikaciji i saobraćajnoj analizi primene tehnike pod nazivom TFS (*Time Frequency Slicing*), koja je definisana u razvojnim specifikacijama DVB-T2 sistema kao opciona mogućnost. Temelji se na softverskom povezivanju standardnih RF kanala, čiji efekti na povećanje protoka nisu do kraja istraženi. U ovom radu je prepoznata kao kompatibilna sa pomenutim predlogom za povećanje kapaciteta pojedinačnog RF kanala. Veliki pilot projekti su pokazali da postoji višestruka korist od TFS povezivanja, a izražavaju se kao dva dobitka (*gain*).

Prvi je stvaranje dovoljnog resursa za velike protoke i veliki broj programa (*Multiplexing Gain*). Drugi, izuzetno važan, je rezultat raspršivanja delova pojedinih programa iz multipleksa po celom frekvencijskom prostoru povezanih kanala, čime se destruktivni uticaj odziva kanala ravnomerno raspoređuje na sve programe (*Planning Gain*). Zauzimanjem, takvih, širokopojasnih kanala, stvorenih hardverski ili softverski, postiže se virtuelno uravnoteženje uticaja kanala na ceo multipleks, a i pojedinačne programe. To stvara uslove za veću efikasnost tehnika za izbegavanje, smanjenje ili korekciju greške, kao što su: LDPC i BCH, Gray-ov kod, rotacija konstelacije, fazni pomak I i Q grane OFDM simbola, već pomenuto frekvencijsko i vremensko (unutar grupe sukcesivnog simbola i Transportnih strimova) raspoređivanje (*Interleaving*). U krajnjem, svođenjem grešaka u bitskom nizu nekog TV programa od redih grupnih na češće pojedinačne u svim TV programima, omogućava se CRC algoritmu da grešku potpuno eliminiše.

U toku analize uočen je i iskorišćen ostavljeni prostor da se kombinovanjem rezultata pomenutog pilot projekta i nekih drugih istraživanja i primenom odgovarajućih tabela datih u zvaničnim preporukama za implementaciju DVB-T2, može izvršiti materijalizovanje navedenih dobitaka, tako da se oni izraze, prvo u povećanom kodnom količniku FEC, odnosno u povećanom učešću korisnog sadržaja u ukupnom protoku multipleksa, a potom u povećanju kapaciteta RF kanala. Proračuni potpunog prevođenja (*trading*) ovih vrednosti do nivoa dodatnog broja programa u multipleksu, su originalni, a prvi put su objavljeni u radu "*DVB-T2: An Outline of HDTV and UHD TV Programmes Broadcasting*" (2015).

Imajući u vidu potencijale TFS i značaj rezultata koji su kroz pilot projekte postignuti cilj ovog dela istraživanja bio je takođe i da se:

- uporede sa rezultatima hardverskog povezivanja,
- proceni dobitak planiranja za hardverski povezane širokopojasne kanale.

Kao krajnji domet predloženo je rešenje TFS povezivanja hardverski proširenih pojedinačnih RF kanala, kao zajednički doprinos hardverskih i softveskih rešenja za omogućavanje dovoljnih resursa za efikasno emitovanje HD programa.

Primenom matematičkog modela definisani su potrebni kapaciteti širokopojasnih kanala za različite formate HD i UHD programa. Broj integrisanih RF kanala zavisi od načina njihovog formiranja, i određen je za fiksnu MFN, fiksnu SFN i Portabl/mobilnu mrežu. Posebno su

razmatrane opcije rada u DVB-T2 okruženju, gde je moguće sinhronizovati RF kanale, i eventualno, neDVB-T2 okruženju gde su RF kanali pomešani sa kanalima drugih mreža, pa se mora zadržati zaštitni frekvencijski interval.

Proračuni su pokazali suštinu svakog dobrog rezultata, udruživanje doprinosa više različitih efekata. Načelno, širokopolasni multipleksi već na dva povezana RF kanala omogućavaju efikasno emitovanje u formatima programa 720p i 1080p. Za 3DTV programe, zasnovane na 1080p formatu, potrebni su multipleksi na tri RF kanala.

Uz očekivano efikasnije kodovanje programa viših rezolucija, proračuni su pokazali da u manjem broju 4k programi mogu da se emituju u multipleksima od četiri, a sa zadovoljavajućom efikasnošću i u većem broju na pet RF kanala. Moguće je i emitovanje nekog UHD programa u 8k rezoluciji, posebno kada se i efikasnost HEVC kodovanja vremenom unapredi. Kada se, u malo daljoj perspektivi, tehnika komprimovanja dodatno unapredi, DVB-T2 ima predispozicije, ne samo da prihvati izazov emitovanja HD programa, uključujući i 3DTV, već i u određenim konfiguracijama efikasno emituje i UHD programe.

Sveukupno, u tezi je pokazano da postoji mogućnost da se poveća kapacitet pojedinačnog RF kanala, kao i načini da se ovi kapaciteti udruže tako da se poveća učešće korisnog sadržaja u ukupnom kapacitetu, odnosno podigne *Shannon-Hartley*-eva granica. Sa brojem povezanih RF kanala određuju se potrebni kapaciteti, tako da se, uz primenu statističkog multipleksiranja kapacitet u potpunosti iskoristi.

Doprinos istraživanja ogleda se u predlogu metode za proširenje kapaciteta RF kanala, kao i dve metode za povezivanje RF kanala u širokopolasni kanal. Predložena je i integracija sa poznatim tehnikama, koje još nisu u primeni. Takođe je izvršeno objedinjavanje rezultata različitih istraživanja, kvantifikovanje svih mogućih dobitaka, i njihovo pouzdano pretvaranje u povećanje kapaciteta kanala. Druga vrsta doprinosa odnosi se na izradu matematičkog modela za proračun broja programa i potrebnog kapaciteta za efikasno emitovanja programa zavisno od njihovog protoka, odnosno, formata.

Ključne reči: televizija visoke definicije (HDTV), televizija ultra visoke definicije (UHDTV), system za digitalno zemaljsko emitovanje druge generacije (DVB-T2), kompresioni standardi MPEG-4 i HEVC, statističko multipleksiranje, širokopolasni RF kanali, povezivanje kanala na fizičkom sloju, vremensko-frekvencijsko raspršivanje (TFS), dobitak planiranja, efikasnost multipleksiranja

Naučna oblast: telekomunikacije

Uža naučna oblast: televizija

UDK broj: 621.3

Increase in number of HD programmes in DVB-T2 multiplexes

Abstract

This doctoral thesis presents research of broadcasting TV programmes through the second generation terrestrial digital video systems DVB-T2 (*Digital Video Broadcasting - Terrestrial*), which has been used in Europe. DVB-T2 is a modern system which allows multiplexing 15-18 SD (*Standard definition*) programmes in single RF channel, but only 4-6 HD (*High Definition*) programmes of the first generation, due to their higher bit rate. Farther quality improvements of HD and 3D programmes will continue through the second generation of HD and UHD (*Ultra High Definition*), formats in the future. The services in the new formats will have more and more source rates. Regardless of the application of highly effective compression techniques, such as HEVC (*High Efficiency Video Coding*), the rate of the compressed video signal will be continuously increasing. Multiplex in single RF channel will be able to accommodate only a few TV programmes.

Research has been conducted during the time when the authorities are trying to decrease the spectrum accounted to the DTT broadcasting (*Digital Terrestrial Television*), so expected 3 to 9 multiplexes (not determined yet), need to satisfy the users expectations and maintain market demand.

The objective of the research was to examine the possibilities of DVB-T2 system, and propose solutions which would result in broadcasting a larger number of HD and UHD programmes. Based on available research, both in the terrestrial and in other related techniques of broadcasting, as well as on the results of original studies, some solutions have been proposed on how to increase the number of broadcasted TV programmes. Through quantification and implemented calculations, have been determined the individual achievements of the proposed solutions, as well as their simultaneous applications.

For the purposes of further analysis, it is important to analyze the facts that characterize the present, let's call it traditional, allocation of TV programmes in DVB-T2 multiplexes:

- a) Frequency characteristic of multiplex of digital TV programmes in the RF channel is quite different from the analog TV programme.
- b) RF channel bandwidth, for example 8 MHz, is inherited from the times of analog TV programmes. Only 7.61 to 7.77 MHz can be used effectively, while the rest of it is used as a protective (guard) frequency interval at the ends of the band. This bandwidth is not designed or tailored for the needs of digital broadcasting, especially for the HD and UHD programmes, since it does not have the necessary resources.
- c) The compressed video signal has a VBR (*Variable Bit Rate*) nature, and the utilization of the channel capacity is also variable and depends on a number of programmes and applied techniques of their multiplexing. It is generally accepted that the rate properties of compressed HD and UHD video content is the same as in SD format.
- d) Because of the frequency and time selective response of wireless channel, system parameters are set on the threshold for acceptable broadcasting in case of bad

conditions of transmission. As a precaution, large part of the capacity is used as a redundancy for protection at different levels.

In these facts lie the weakness that should be overcome in an appropriate manner and should create opportunities so broadcast of HD and UHD services becomes more effective. The assumption is that new signal processing techniques in DVB-T2 system and increased power of processing, allow the solutions which will: increase channel capacity and rate of the multiplex, but also eliminate or diminish the destructive impact of the mentioned characteristics of compressed video source and radio channel.

An important part of the thesis is dedicated to traffic analysis. Initial assumptions of this analysis are:

- Estimation of the expected HD and UHD programmes bit rate was accomplished by consulting the available literature: based on the results of testing, experimentation, as well as comparative analysis of the expectations and estimation of renowned authors and institutions.
- For the different modes of DVB-T2 networks, appropriate parameters are defined and accepted, which determine the capacity of the single RF channels in these networks.
- There are empirical results, which demonstrate the effectiveness of utilization of single RF channel capacity (channel efficiency), depending on both, the number and the format of multiplexed TV programmes.

In literature, there is already a recognized relationship between RF channel capacity, bit rate of a particular programme and the utilization of channel capacity. It was achieved through the empirical research of effects of the statistical multiplexing. Relying on and respecting these relationships, the thesis created a mathematical model to determine the required channel capacity for the desired (or given) efficiency of using this capacity. Capacities are determined on the basis of proposed bit rate for each HD and UHD format. In respect of application and algebraic form, this model is new and original, although mathematically not complicated.

One of contributions of the thesis is the result of the frequency characteristics analysis of the digital signal, and is given as a proposal for increase of RF channel capacity. DVB-T2 uses OFDM multiplexing technique. The analysis showed that the principle of orthogonality can be used to fill the entire RF channels bandwidth, which means that orthogonality achieved in the channel can be applied between adjacent channels too. It means that in the frequency spectrum, intended for DVB-T2 (or other DTT) broadcasting system, can coexist the RF channels using whole dedicated bands. The only requirement is that the channels must be completely synchronized, which is already applied in existing SFN (*Single Frequency Network*). Proposed method is supported by results of implemented, simulation analysis. The application of proposed mathematical model, however, shows that, even with a fully-exploited band, single RF channel does not have sufficient capacity to accommodate enough HD programmes. On the other hand, this improvement will be useful for the new proposals capturing RF channels, presented further in the research.

In search for a greater capacity, few methods are observed in order to connect (combine, bond) more RF channels in one, broadband resource, sufficient to effectively allocate HD programmes. Analyzed were also solutions of hardware connections, already implemented in new versions of WLAN systems, as well as plans for channel bonding in some other

broadcast systems, such as DVB-C2 (*Digital Video Broadcasting- Cable*). The solution for the hardware connection of adjacent RF channels in the DVB-T2 system is proposed by author and mentor of this work, and published in the paper entitled as "Broadband DVB-T2 Channels at the Physical Level - Simulation Analysis" (2015). There were proposed two methods of RF channel connecting: "side by side" and the "increased FFT block." Simulation analysis has confirmed that these methods give the same results, which do not differ from the results of standard captures of RF channels.

Part of the thesis is devoted to the quantification and traffic analysis of application technique called TFS (*Time Frequency Slicing*), which is defined in developing specifications of the DVB-T2 system as an optional feature. It is based on software connection of the RF channels. The effects of increased bit rate have not been studied enough. In this research, TFS has been recognized as compatible with the above-mentioned proposal for increasing the capacity of single RF channels.

Large pilot projects have shown that there are multiple benefits of TFS connectivity, and are expressed as two gains. The first is the creation of sufficient resources to increase the bit rate, thus the number of the programme. The gain is called Multiplexing Gain. The second, very important one, is a consequence of deployment (interleaving) of small sequences (slices) of each programme in multiplex over the frequency range of all associated channels, thus the destructive impact on the channels responses would be uniformly distributed among all programmes. This effect allows so-called Planning Gain. By filling such broadband channels, created by hardware or software process, channel response to the entire multiplex is virtually balanced, so it is for the individual programmes. It creates conditions for greater efficiency of DVB-T2 techniques for avoiding, reducing or errors correction, such as: LDPC and BCH error correction, Grays code, rotation of the constellation, the phase shift of the I and Q phases of OFDM symbols, mentioned frequency and time interleaving... Finally, by reducing errors in the bit sequence from rare group of bit errors in some TV programmes to the more single bit errors in all TV programmes, allows CRC algorithm to completely eliminates the errors.

During the analysis, it is observed and through research exploited the *white space*, to combine results of published researches and projects, and by applying tables from the official DVB-T2 recommendations for implementation, leads to materializing the above gains. Gains were then expressed as increased FEC code rate, ie. the increased participation of useful content in the total bit rate, and then as increased capacity of the RF channel. The calculations for the complete trading of these values to level of additional number of programmes in the multiplex, are original and first published in the paper "*DVB-T2: An Outline of HDTV and UHDTV Programmes Broadcasting*" (2015).

Taking into account the potential of TFS, and the significance of the results achieved through pilot projects, the objective of in this study was also to:

- compare its results with those of the hardware connection,
- estimate planning gain for hardware-related broadband channels.

As ultimate prospect, author proposes solution for TFS connectivity of expanded hardware single RF channels, as a joint contribution of hardware and software solutions to enable sufficient resources for broadcasting HD programmes.

With the application of a mathematical model, it is possible to define necessary capacity of broadband channels for different HD and UHD formats. Number of associated RF channels

depends on the mode of the network, and is designated for fixed MFN, for fixed SFN and Portable/ mobile network. Research separately considers working in DVB-T2 environment, where it is possible to synchronize the RF channels, and in nonDVB-T2 environment where the RF channels are mixed with the channels of other networks, so guard frequency intervals must be maintained.

Calculations have shown the essentials of any good result, joint contribution of several good effects. Basically, broadband multiplexes of two connected RF channels, enable efficient broadcasting in both 720p and 1080p formats. For 3DTV programmes, based on the 1080p format, multiplexes need three RF channels.

Considering expected more efficient source coding for higher resolution programmes, calculations showed that a small number of 4k programmes can be broadcast in the multiplex of four, and with satisfactory efficiency in five RF channels. It is possible to broadcast some UHD programmes in 8k resolution, especially if efficiency of HEVC encoding improves over time. In a slightly longer term, with further compression techniques improvements, DVB-T2 has a predisposition, not only to accept the challenge of broadcasting HD programmes including 3DTV, but in certain configurations to efficiently broadcasts UHD too.

Altogether, the research has shown that it is possible to increase the capacity of single RF channel. Combining these capacities increases payload participation of the total capacity, and raise the Shannon-Hartley limit. With an adequate number of connected RF channels, necessary capacity can be found, so by application of statistical multiplexing, capacity can be fully utilized.

The contribution of the research is the proposal of methods to increase capacity of the RF channel, and proposal of two methods for connecting the RF channels in a broadband channel. The integration of known techniques, which are not yet in use, is also proposed. Results of various studies and projects were taken into analysis as well. All possible gains have been properly quantified and by verified schemes turn into an increase in channel capacity. Another kind of contribution refers to the creation of a mathematical model for calculating both, the number of programmes and the required capacity for the efficient broadcasting, depending on their rate, ie, format.

Keywords: high-definition television (HDTV) ultra-high definition television (UHDTV), second generation digital terrestrial broadcasting system (DVB-T2), compression standards MPEG-4 and HEVC, statistical multiplexing, broadband RF channels, channel combining on the physical layer, time frequency slicing (TFS), planning gain, efficiency of multiplexing

Scientific area: Telecommunications

Specific scientific area: Television

UDK number: 621.3

SADRŽAJ

	Str.
Spisak skraćenica.....	xiv
Spisak slika.....	xvi
Spisak tabela.....	xviii
1 Uvod.....	1
2 Karakteristike HDTV programa.....	8
2.1 Tredovi i očekivanja korisnika.....	8
2.2 Aktuelni HDTV formati.....	9
2.3 HDTV 1080p/50.....	11
2.4 3D HDTV.....	13
2.5 UHDTV 4k i 8k.....	15
2.6 Ostala poboljšanja u prikazivanju slike.....	16
2.6.1 Povećanje broja slika.....	16
2.6.2 Dimenzije slike.....	17
2.6.3 Povećanje hromatske rezolucije.....	17
2.6.4 Kodovanje sa više bita.....	18
2.6.5 Poboljšanje palete boja.....	18
Zaključak.....	18
3 Arhitektura DVB-T2 sistema.....	19
3.1 Zemaljsko emitovanje.....	19
3.1.1 Mreže za zemaljsko emitovanje.....	19
3.1.2 Digitalno zemaljsko emitovanje.....	20
3.2 Elementi DVB sistema.....	21
3.3 Funkcionisanje DVB-T2 sistema.....	23
4 Multipleksiranje HD programa.....	28
4.1 Multipleks programa.....	28
4.2 Kompresione tehnike.....	30
4.2.1 MPEG-2 (H.262) i MPEG-4 p.10 (H.264/AVC).....	31
4.2.2 H.265/HEVC.....	32
4.3 Statističko multipleksiranje.....	32
4.4 Bitski protoci HDTV programa.....	34
4.5 Multipleks jednog RF kanala DVB-T2 sistema.....	35
4.5.1 Zauzimanje multipleksa RF kanala– sadašnje stanje.....	35

4.5.2	Očekivani broj HD programa u MPEG-4 kodovanom multipleksu.....	36
4.5.3	Očekivani broj HD programa u HEVC kodovanom multipleksu.....	37
	Zaključak.....	39
5	TFS povezivanje RF kanala.....	40
5.1	Koncept TFS povezivanja.....	40
5.2	Dobitak u statističkom multipleksiranju.....	42
5.3	Dobitak u planiranju mreže.....	44
5.4	Merenja i proračun dobitka planiranja.....	46
5.4.1	Sprovedena merenja i analize dobitka planiranja.....	46
5.4.2	Primer određivanja dobitka planiranja.....	46
5.4.3	Povezanost dobitka planiranja i kapaciteta RF kanala.....	48
	Zaključak.....	49
6	Povezivanje susednih RF kanala.....	50
6.1	Objedinjavanje kanala na fizičkom sloju.....	50
6.2	COFDM tehnika multipleksa i modulacije.....	51
6.3	Planovi razvoja fizičkog sloja u DVB-C2.....	54
6.4	Mogućnosti razvoja fizičkog sloja u DVB-T2.....	55
6.5	Simulacija i analiza povezivanja RF kanala.....	57
6.5.1	Povećanje FFT bloka.....	57
6.5.2	Spajanje susednih RF kanala.....	60
6.5.3	Dobitak planiranja kod spajanja na PHY sloju.....	61
	Zaključak.....	62
7	Smeštanje programa u širokopolasne multiplekse.....	63
7.1	Kapacitet širokopolasnog RF kanala.....	63
7.1.1	Kapacitet u ne-DVB-T2 okruženju.....	63
7.1.2	Kapacitet u DVB-T2 okruženju.....	67
7.2	Povećanje broja programa po osnovu dobitka planiranja.....	66
7.2.1	Povećanje kapaciteta u ne-DVB-T2 okruženju.....	67
7.2.2	Povećanje kapaciteta u DVB-T2 okruženju.....	68
	Zaključak.....	69
7.3	Proračun broja HD i UHD programa.....	69
7.3.1	TFS širokopolasni kanali u fiksnoj MFN mreži.....	69
7.3.2	FI širokopolasni kanali u fiksnoj MFN mreži.....	70
7.3.3	TFS širokopolasni kanali u fiksnoj SFN mreži.....	72
7.3.4	FI širokopolasni kanali u fiksnoj SFN mreži.....	73
7.3.5	TFS širokopolasni kanali u Portabl/mobilnoj mreži.....	74
7.3.6	FI širokopolasni kanali u Portabl/mobilnoj mreži.....	75
7.4	Primer smeštanja UHD programa u velike širokopolasne kanale.....	76

7.5	Analiza ukupnih efekata povezivanja.....	77
7.6	Primer tehno-ekonomske analize.....	78
8.	Zaključak.....	80
9.	Literatura.....	84
	Biografija.....	86

SPISAK KORIŠĆENIH SKRAĆENICA

Skraćenica	Puni naziv	Objašnjenje (na srpskom)
ASO	Analogue Switch-Off	Isključivanje analognog signala
AVC	Advanced Video Coding	Unapređeno video kodovanje
BCH	Bose-Chaudhuri-Hocquenghem multiple error correction binary block code	Konkatentрани ciklični kod za korekciju višestrukih grepaka
BER	Bit Error Rate	Bitska greška
COFDM	Coded OFDM	Kodovana OFDM
DAB	Digital Audio Broadcasting	Digitalno audio emitovanje
DVB	Digital Video Broadcasting	Digitalno video emitovanje
DVB-C	DVB-Cable	DVB standard za kablovsko emitovanje
DVB-H	DVB-Handheld	DVB standard za prenosive uređaje
DVB-S	DVB-Satellite	DVB standard za satelitsko emitovanje
DVB-S2	DVB-Satellite, version 2	DVB standard druge generacije za satelitsko emitovanje
DVB-SH	DVB-Satellite services to Handhelds	DVB standard za satelitski prijem na prenosivim uređajima
DVB-T	DVB-Terrestrial	DVB standard za zemaljsko emitovanje
DVB-T2	DVB-Terrestrial, version 2	DVB standard druge generacije za zemaljsko video emitovanje
DMB	Digital Multimedia Broadcasting	Standard za digitalni prenos multimedijalnih podataka do pokretnih uređaja
DTT	Digital Terrestrial Television	Digitalna zemaljska televizija
EN	EN European Norm	Evropska norma
EPG	Electronic Program Guide	Elektronski vodič kroz programe
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	Evropski telekomunikacioni institut za standarde
FFT	Fast Fourier Transform	Furijeova transformacija
HDTV	High Definition Television	Televizija visoke definicije
HEVC	High Efficiency Video Coding	Video kodovanje visoke efikasnosti
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform	Inverzna Furijeova transformacija
ITU	International Telecommunication Union	Međunarodna unija za komunikacije
IPTV	Internet Television	Televizija putem Interneta
ISI	Intersymbol Interference	Međusimbolska interferencija
ICI	Interchannel Interference	Međukanalska interferencija
ITU-T	International Telecommunication Union Telecommunication Sector	Međunarodna unija za komunikacije Sektor za telekomunikacione standarde

LDPC	Low Density Parity Check (codes)	Kod za proveru parnosti sa niskom koncentracijom
Mbps	Mega Bits per Second	Mega bita u sekundi
MFN	Multi-Frequency Network	Mreža koja radi na više frekvencija
MIMO	Multiple Input Multiple Output	Više prijemnih više otpremnih kanala
MHP	Multimedia Home Platform	Kućna multimedijalna platforma
MPEG	Moving Picture Expert Group	Grupa eksperata za pokretnu sliku
PLP	Physical Layer Pipe	Kanali podataka na fizičkom nivou
PSD	Power Spectral Density	Spektralna gustina
PSI/SI	Program Specific Information / Service Information	Zavisni podaci pridruženi video programu
RF	Radio Frequency Channel	Radiofrekvencijski kanal
RRC06	Regional Radiocommunication Radio Frequency Conference 2006	Regionalna konferencija o radio-komunikacijama 2006.
SDTV	Standard Definition Television	Televizija standardne definicije
SHDTV	Super High Definition Television	Televizija super visoke definicije
SFN	Single Frequency Network	Jednofrekvencijska mreža
STB	Set Top Box	Uređaj čijim dodavanjem se omogućava prijem digitalnih televizijskih i radio signala
SVC	Scalable Video Coding	Skalabilno video kodovanje
T-DAB	Terrestrial-Digital Audio Broadcasting	DVB standard druge generacije za zemaljsko audio emitovanje
TFS	Time Frequency Slicing	Vremensko frekvencijsko odsecanje
TS	Transport Stream	Transportni strim
TV	Television	Televizija
UHDTV	Ultra High Definition Television	Televizija ultra visoke definicije
UHF	Ultra High Frequency	Spektar ultra visokih frekvencija
VBR	Variable Bit Rate	Promenljiva bitska brzina
VHF	Very High Frequency	Spektar veoma visokih frekvencija

SPISAK SLIKA

Br.		Strana
Slika 2.1.	Vizuelno poređenje između TV formata sa različitom rezolucijom.....	9
Slika 2.2.	Razlika u kvalitetu slike formata 1080p/50 u odnosu na formate 720p/50 i 1080i/25.....	11
Slika 2.3.	Evolucija formata slike od SD preko HDTV do 4 x HDTV (4k).....	15
Slika 2.4.	TV prijemnik po 8k UHD TV standardu.....	16
Slika 3.1.	Struktura DVB paketa.....	21
Slika 3.2.	Blok šema uobičajenog DVB-T2 lanca.....	25
Slika 3.3.	Ulazna obrada više TS za prenos preko zajedničkog PLP i grupe PLP-ova podataka.....	26
Slika 4.1.	Šema određivanja potrebnog radio-frekvencijskog spektra.....	29
Slika 4.2.	Dobitak u efikasnosti sa primenom statističkog multipleksiranja.....	33
Slika 4.3.	Broj MPEG-4 kodovanih programa u multipleksu RF kanala sa i bez primene statističkog multipleksiranja.....	37
Slika 4.4.	Broj HEVC kodovanih programa u multipleksu RF kanala sa stepenom komprimovanja $k_1=0.5$	38
Slika 4.5.	Broj HEVC kodovanih programa u multipleksu RF kanala sa stepenom komprimovanja $k_2=0.4$	39
Slika 5.1.	Formiranje rama za TFS.....	41
Slika 5.2.	Primer TFS preko tri RF kanala.....	42
Slika 5.3.	Dobitak statističkog multipleksa HD programa sa kodovanjem MPEG-4 AVC	43
Slika 5.4.	Izmerene distribucije TFS dobitka.....	47
Slika 6.1.	Paralelni prenos simbola preko više podnosilaca.....	51
Slika 6.2.	Razmeštanje podnosilaca oko centralne frekvencije.....	51
Slika 6.3.	Mapiranje QAM modulisanih simbola na ulaze IFFT bloka.....	52
Slika 6.4.	Formiranje OFDM simbola.....	53
Slika 6.5.	Frekvencijska karakteristika OFDM signala u okviru RF kanala.....	53
Slika 6.6.	Ilustracija mogućnosti kombinovanja u OFDM tehnici prenosa.....	55
Slika 6.7.	PSD za jedan i četiri FFT pomnožena kanala.....	59
Slika 6.8.	BER za jedan, dva i četiri FFT pomnožena kanala.....	59
Slika 6.9.	PSD za jedan i dva kanala <i>leđa uz leđa</i>	60
Slika 6.10.	BER za jedan i dva kanala <i>leđa uz leđa</i>	60

Slika 6.11.	PSD za četiri FFT pomnožena i četiri <i>leđa uz leđa</i> RF kanala.....	61
Slika 6.12.	BER za četiri FFT pomnožena i četiri <i>leđa uz leđa</i> RF kanala.....	61
Slika 7.1.	Broj programa u dva, tri i četiri TFS povezana RF kanala u fiksnoj MFN mreži.....	70
Slika 7.2.	Broj programa u dva, tri i četiri FI povezana RF kanala u fiksnoj MFN mreži	71
Slika 7.3.	Broj programa u dva, tri i četiri TFS povezana RF kanala u fiksnoj SFN mreži.....	72
Slika 7.4.	Broj programa u dva, tri i četiri FI povezana RF kanala u fiksnoj MFN mreži	73
Slika 7.5.	Broj programa u dva, tri i četiri TFS povezana RF kanala u Portabl/mobilnoj mreži.....	74
Slika 7.6.	Broj programa u dva, tri i četiri FI povezana RF kanala u Portabl/mobilnoj mreži.....	75
Slika 7.7.	Broj UHD programa u četiri, pet i šest TFS povezanih RF kanala u fiksnoj MFN mreži.....	77
Slika 7.8.	Analiza dividende, dobijene TFS povezivanjem četiri RF kanala fiksne MFN mreže u ne-DVB-T2 okruženju, u poređenju sa pojedinačno zauzetim kanalima.....	78

1. Uvod

Emitovanje širokopoljasnih usluga, proisteklo je iz zahteva korisnika za većim kvalitetom postojećih servisa i potrebe za novim servisima, ali i napretka tehnologije i stvaranja većih tehničkih mogućnosti. Ovo je trajan proces, pa i razvoj treba sagledavati dinamički, u skladu sa potrebama, tehničkim mogućnostima, ali i ekonomskom opravdanosti investiranja i eksploatacije. Kako za druge, ovo se odnosi i na razvoj digitalnih mreža za distribuciju i emitovanje televizijskog signala putem zemaljskih predajnika, DTT (*Digital Terrestrial Television*). Pored emitovanja standardnog televizijskog signala (video, audio, servisne informacije, teletekst podaci...) kao primarne uloge, širokopoljasni DTT prenos, na duži rok, ima aspiracije da bude nosilac interaktivnih servisa, kao i širokog spektra multimedijalnih i internet servisa.

DVB-T2 (*Digital Video Broadcasting - Terrestrial*) je jedan od najnovijih predstavnika poslednje, druge, generacije DTT sistema. Namenjen je emitovanju digitalnog video signala putem zemaljskih predajnika u Evropi i nekim drugim zemljama, i javlja se kao naslednik prethodne generacije, DVB-T. Unosi niz značajnih poboljšanja koja se manifestuju kroz povećanje kapaciteta i robusnosti prenosa. Razvijen je sa ciljem zadovoljavanja narastajućih potreba za emitovanjem video servisa visoke definicije (*High Definition*, HD). To je veoma težak i izazovan zadatak i postoji mnogo faktora koje treba razmotriti u razvoju i primeni mreža za digitalno emitovanje televizijskog signala, pa i DVB-T2. U nastavku će se razmotriti neki od njih.

Poslednjih godina značajno se povećalo učešće drugih vidova distribucije TV sadržaja, posebno putem kablovskih i satelitskih mreža. Korisnici mogu doći do sadržaja i putem interneta, a i mobilne mreže imaju aspiracije da emituju TV programe. Tako, iz nekada monopolskog, DTT mreže ulaze u oštru borbu na otvorenom tržištu servisa. Počela je i redukcija raspoloživog frekvencijskog prostora, pa je već odlučeno da se frekvencije iznad 800 MHz dodele mobilnim mrežama, a vrlo je verovatno da će na sledećoj konferenciji WRC-15 (*World Radiocommunication Conference 2015*) biti odlučeno ili preporučeno da se izvrši prenamena i područja iznad 700 MHz.

Emitovanje programa visoke definicije, kao novog televizijskog standarda je prevashodni cilj. Očekuje se da će u dogledno vreme mnogi, ako ne i svi servisi da migriraju na HD. Kao i kod

svih značajnih promena, mora postojati prelazni period, gde će većina HD servisa nastaviti da se istovremeno emituje i u formatu standardne definicije (*Standard Definition, SD*) kako bi se osiguralo da mogu biti primljene od strane svih gledalaca. Postoji i više različitih HD formata slike. Već su u primeni formati prve generacije HD: 720p/50 i 1080i/25, a u vremenu smo kada kreće i emitovanje u formatu druge generacije, 1080p/50. Zato se moraju donositi odluke o vrsti korišćenog formata, njihovom paralelnom korišćenju i kombinovanju, kao i postepenoj migraciji ka 1080p/50 kao, u ovom trenutku najboljem, ali najzahtevnijem od njih. Sve ove promene se moraju uklopiti u raspoložive kapacitete, i tu nastaje problem, jer HD programi imaju daleko veće bitske protoke.

Već dugo se iščekuje da emitovanje trodimenzionalne 3DTV (3D) slike doživi ekspanziju. Sporadično emitovanje programa u ovom formatu, emitovanje u posebnim prilikama kao što su velika sportska takmičenja i druge javne manifestacije, i emitovanje filmova iz memorijske opreme, trebalo bi uskoro da se proširi sa nešto većim brojem programa emitovanih sa TV predajnika. Dosta se radilo na unapređenju 3D servisa u kombinaciji sa tehnikom njihovog komprimovanja, jer se videlo da je to ključ za kvalitetniji prenos trodimenzionalne slike.

Standard za televizijske programe ultra visoke definicije, UHD (*Ultra High Definition*), već je razvijen kao tehnologija i programi se eksperimentalno emituju. Primera radi na nekoliko izabranih lokacija širom sveta prenošene su Letnje olimpijske igre iz Londona. Tzv. 4k format (4 puta HD1080p), kao sledeći korak u povećanju rezolucije slike zahteva značajno veće prenosne kapacitete, i u DTT prenosu se ne očekuje njegova skora masovnija primena. Postoji i 8k format (8 puta HD1080p), koji se često svrstava u SHD (*Super High Definition*) formate. Industrija, koja uvek prednjači, već kreće sa proizvodnjom tzv. 4k prijemnika, iako će u ovoj fazi kad se emituju niži formati, korist biti vrlo mala.

Tehnologije kodovanja kanala kao što su DVB-T2 ili druge, praćene su i paralelnim poboljšanjem postojećih i razvojem novih tehnika kompresionog kodovanja. Nova tehnika za kompresiju video sadržaja H.265/HEVC (*High Efficiency Video Coding*) razvijena je sa izazovnim zadatkom da uz isti kvalitet smanji protok po programu na polovinu ili ispod toga. U početku implementacije DTT, pa i DVB mreža primenjivana je MPEG-2 (*Moving Picture Expert Group*) kompresiona tehnika za kodovanje SD programa, dok su HD programi kodovani koristeći MPEG-4 (H.264/AVC, *Advanced Video Coding*). U vreme pisanja ovog rada (2015. godina) uglavnom se koristi MPEG-4, većina programa je u SD formatu uz manji napredak u procentu emitovanih HD programa u formatima 720p/50 i 1080i/25, i očekivanje da će prvo emitovanje 1080p formata krenuti u satelitskom emitovanju, DVB-S2.

Iako je razvoj u potpunosti završen, H.265/HEVC bi trebalo da u masovnu primenu krene sa formatom 1080p. Testiranja pokazuju da će se već na startu ostvariti dvostruko povećanje stepena kompresije. Vremenom će se učinak postepeno poboljšavati, a očekuje se da efekti u odnosu na MPEG-4 budu nešto veći kod programa sa većom rezolucijom. Postoji i zajednički rad ekspertske grupe koja se bavi kompresionim kodovanjem sa grupom koja razvija tehnike 3D prenosa na projektu pod nazivom JCT-3V (*Joint Collaborative Team on 3D Video Coding Extension Development*). Cilj je da se istovremeno unapredi i kvalitet prikaza (displej sa više pogleda) i tehnika kodovanja 3D sadržaja. Razvoj je praktično završen i predstoji verifikacija i dalje unapređenje u eksploataciji.

Primena MPEG-4, a uskoro i HEVC-a za kodovanje izvornog video sadržaja, kao i DVB-T2 mreža za emitovanje po kanalima (kanalsko kodovanje), ne znači da su oni nužno u skladu sa svom postojećom opremom u prijemu, i zahteva ulaganja na strani korisnika čiji prijemnici nisu osposobljeni za ove tehnike. Zbog toga i postoji potreba za periodom paralelnog rada sa postojećim tehnikama (*simulcast*), kako bi se korisnicima dala mogućnost da kupe novu neophodnu opremu – prijemnik ili odgovarajući adapter. Treba imati u vidu da to korisnici

verovatno neće učiniti dobrovoljno ukoliko kvalitet u ponudi nove tehnologije nije značajno poboljšan i nema dovoljno interesantnih novih servisa.

Nakon definisanja broja SD i HD programa koje neka DVB-T2 (ili druga) platforma treba da prenose, kalkulacijom koja uzima u obzir ponuđeni izvorni saobraćaj i način na koji se vrši kompresiono i kanalsko kodovanje može se utvrditi očekivani bitski protok i potreban kapacitet prenosa. Suštinski problem, ili bolje reći, izazov, jeste kako što veći broj programa HD formata preneti do krajnjih korisnika. Ovo postaje trajni izazov pošto, kao što je već pomenuto, aktuelni SD programi, u cilju povećanja kvaliteta, treba postepeno da migriraju na neki od navedenih HD formata. Potom će se proces nastaviti prelaskom HD programa prve generacije na formate za većom rezolucijom. Povećani kvalitet, pre svega povećana rezolucija, ali i drugi elementi emitovanja video i audio signala, zahtevaju izuzetno veliko povećanje bitskog protoka. DVB-T2 mreže koje su na početku rada, moraće se suočiti sa tim izazovom, i kroz eksploataciju unapređivati, paralelno sa sve većim procentualnim učešćem digitalnih programa visoke rezolucije. Na kraju se, dakle, problematika svodi na stalno vaganje u vremenu povećanja izvornog protoka HD programa, poboljšavanja efikasnosti kompresionih tehnika i performansi digitalnih mreža, u ovom radu, DVB-T2 mreže.

Grupe TV programa i, eventualno, drugi sadržaji se integrišu u multipleks, celinu čiji je kapacitet tako odmeren da se DVB-T2 tehnikom emitovanja može preneti po jednom RF kanalu. Tako, od broja smeštenih programa u jedan multipleks i broja multipleksa, što zavisi od raspoloživog spektra zavisi, dakle, i ukupan broj prenetih programa. Sada su to uglavnom SD programi koji komprimovani sa MPEG-4 imaju protoke od 2-3 Mb/s. U multipleks se može smestiti veliki broj, obično 13-18 SD programa. Postepeno se povećava i broj HD programa prve generacije, u formatima slike 720p/50, 1080i/25 sa tipičnim protokom od 6-8 Mb/s. Zavisno od formata, žanra i željenog kvaliteta u multipleks se može smestiti od 4-6 HD programa. Emitovanje HD programa u formatu 1080p/50 sa dvostruko većom rezolucijom u odnosu na aktuelne HD formate zahteva protok od oko 10 Mb/s po programu. Zavisno od primenjene tehnologije i kompresionog kodovanja 3D programi će zahtevati protoke od 1,4 do 2 puta veće od dvodimenzionalnog HD programa istog formata. Novi 4k i 8k formati zbog mnogo veće rezolucije, zahtevaju da njihovo emitovanje bude podržano sa novom kompresionom tehnikom H.265/HEVC, a očigledno je da će broj programa u multipleksu, zavisno od UHD formata, i tada biti relativno mali.

Treba imati u vidu da se osim rezolucije kod novih formata uvode i druga poboljšanja. Prelazi se sa 8-bitnog na 10-bitno i 12-bitno kodovanje signala, povećava se frekvencija slika, povećava se broj tačaka koje prikazuju boju (hromatska rezolucija), unapređuje se paleta boja i sl. Važno je da kompresione tehnike MPEG-4 i HEVC to podržavaju, što se postiže dodatnim razvojem, radom ekspertske grupe za te oblasti.

Ako se povuče paralela sa ranijim, analognom emitovanjem TV programa logično je postaviti pitanje: zašto je broj programa u multipleksu problem kad se po jednom RF kanalu u svakom slučaju prenosi više ili mnogo više od jednog programa, koji je emitovan u analognom sistemima? Postoje makar dva jaka razloga. Ako žele da budu konkurentni DTT sistemi moraju da emituju broj programa koji je makar približan onom kod drugih mreža (kablovske, satelitske, IPTV...), dakle, mnogo veći broj programa nego sada. Drugi razlog je, već pomenuto smanjenje dodeljenog frekvencijskog spektra. Monopol koji su DTT sistemi decenijama imali na najveći deo opsega do 1 GHz mora pasti pod naletom razvoja drugih bežičnih mreža, pre svega mreže mobilnih korisnika. Tako DTT operateri upadaju u zamku: povećanje broja programa i njihove rezolucije vapi za sve većim brojem RF kanala (multipleksa), a institucije nadležne za dodelu spektra će postupno oduzimati deo po deo spektra kao *digitalnu dividendu*. Utoliko će problem efikasnog korišćenja spektra, u uslovima

prenosa sadašnjih i budućih HD programa sa sve većom rezolucijom, pa samim tim i protokom, biti sve više aktuelan.

Zadatak je, dakle, da se maksimalno iskoristi (preostali) raspoloživi spektar? Treba povećati kapacitet RF kanala (u bit/s/Herz) i taj kapacitet u potpunosti iskoristiti.

Što se kapaciteta tiče, u literaturi se može pročitati da se DVB-T2 po performansama približio teorijskoj, Šenonovoj (*Shannon*) granici prenosa (pravilno bi bilo *Shannon-Hartley*-eva granica), posebno u uslovima prijema sa optičkom i približno optičkoj vidljivosti. Čak i neke značajnije promene u tehnikama kodovanja i modulacije ne mogu mnogo poboljšati osobine. Međutim, prenos u uslovima većeg fadinga nije dovoljno istražen i to može biti aktuelna tema za istraživanje. U uslovima u kojima DTT sistemi rade, impulsni odziv kanala je frekvencijski i vremenski promenljiv, pa je praktično promenljiva i *Shannon*-ova granica. Da bi se zadržao odgovarajući kvalitet u svakom trenutku, prag se postavlja na donju granicu prihvatljivog odziva kanala. Postavlja se pitanje: postoji li način da se prag signal/šum postavi na niži nivo, bez obzira što će u *nekom trenutku* na *nekoj frekvenciji* on biti ispod granice, dok je na ostalim frekvencijama, ili makar većem delu, on znatno bolji? I pitanje koje sledi: može li se *virtuelno* stabilizovati, ili bolje reći, uprosečiti odziv za sve RF kanale na kojima DTT sistem emituje programe sa određene platforme? Jedan od ciljeva ovog rada odnosi se na tu problematiku.

Povećanje kapaciteta samo po sebi nije dovoljno ako se istovremeno ne poboljša efikasnost korišćenja resursa, odnosno ako se resursi u svakom trenutku u potpunosti ne koriste. Već je rečeno da se u multipleks jednog RF kanala može smestiti od 4-6 HD programa prve generacije. Priroda komprimovanog video sadržaja je da, nezavisno od formata, protok programa stalno varira. Iako je njegova srednja vrednost 5 Mb/s, on realno osciluje od 2 do 10 Mb/s. Ako se programu obezbedi kapacitet od, recimo, 7 Mb/s postojaće trenuci kada kapacitet nije dovoljan i dolazi do degradacije kvaliteta, kao i trenuci kad je iskorišćenost kapaciteta mala. Postoje tehnike kojima se istovremeno komprimuje i multipleksira video sadržaj programa u multipleksu. Tako se postiže izvanredan efekat na velikom broju programa, npr. u SD formatu. Na malom broju HD programa u multipleksu ukupan protok će i dalje ostati promenljiv (ne može se uspostaviti statistička ravnoteža), što zahteva mnogo veću redundanciju u kapacitetu, znači manje programa, a da pritom iskorišćenje kapaciteta kanala nije potpuno. Za efikasnu primenu ove tehnike treba obezbediti kapacitet koji će moći da smesti dovoljno programa, i koji se od formata do formata HD programa razlikuje.

U vezi potrebnog kapaciteta kanala od interesa je sagledati i frekvencijski opseg RF kanala. Sadašnji opseg od 7 ili 8 MHz je nasleđe iz analognih sistema. Očigledno je ovo mali opseg za smeštanje dovoljno HD programa kako bi zajedničkim komprimovanjem i multipleksiranjem dobili ujednačen ukupan protok, kao uslov za efikasno korišćenje kapaciteta. Isto tako treba razmotriti i potrebu zaštitnog intervala između kanala u uslovima potpuno drugačije frekvencijske karakteristike multipleksa digitalnog (OFDM) signala.

Očigledna je povezanost protoka HD programa, kapaciteta kanala i stepena iskorišćenja, pa se efekti koji se eventualnim promenama postižu ne mogu sagledati pojedinačno. Potrebno ih je kvantifikovati i proračunom doći do rezultata, broja programa.

U nastavku je dat presek stanja, analize i dometi savremenih istraživanja iz ove oblasti.

Uvođenjem DVB-T2 generacije digitalne zemaljske televizije specificirane preporukama [6], poboljšane su performanse u odnosu na DVB-T i preko očekivanih 50%, [3] i [4]. U smernicama za implementaciju DVB-T2 sistema [4], kao i drugoj literaturi, analiziraju se i pojedinačni učinci novih tehnika primenjenih u DVB-T2. Kroz eksploataciju je uočeno u kojim uslovima svaka od njih daje najbolje rezultate, pa će se u analizi i predlozima datim u ovom radu, težiti da se i ove mogućnosti iskoriste.

Zavisno od moda rada DVB-T2 mreže postižu kapacitete i preko 40 Mb/s po jednom RF kanalu. Postoji velika saglasnost oko izbora parametara, a time i ostvarenog kapaciteta za različite modove mreže. Očekuje se najveća primena Multifrekvencijske mreže, MFN (*Multi-Frequency Network*), Jednofrekvencijske SFN (*Single-Frequency Network*) i mreže za prenosive uređaje, Portabl (*Portable*). Dobre analize primene ovih mreža izvršene su u [3] i [9], gde su dati i kapaciteti kanala. Aktuelna je analiza i testiranje performansi mreže za sve popularnije dopremanje DVB-T2 signala do mobilnih prijemnika. Rezultati dati u [23] i [29] pokazuju da parametri izabrani za Portabl mrežu odgovaraju i ovoj nameni. Namena, odnosno izbor moda emisije mreže, automatski određuje kapacitet multipleksa na RF kanalu, kao jednog od osnovnih faktora za proračun potrebnog frekvencijskog spektra. Kod fiksnih mreža veći kapacitet omogućavaju MFN mreže (40,2 Mb/s), ali SFN mreže sa manjim kapacitetom (37 Mb/s), mnogo bolje koriste frekvencijski opseg. Portabl i mobilne mreže imaju zadatak da emituju signal korisnicima sa lošijim uslovima prijema, pa su im i kapaciteti po kanalu mali (do 26.2 Mb/s). U ovom radu analiziraće se tri pomenuta moda mreže (portabl i mobilne DVB-T2 mreže analizirane su sa istim parametrima), i koristiće se navedeni kapaciteti kanala.

Dobro poznata tehnika za povećanja efikasnosti iskorišćenja kapaciteta je statističko multipleksiranje (*Statistical multiplexing*). Zasniva se na saradnji multipleksa i kompresionih kodera, kojim se stepen kompresije pojedinih usluga prilagođava trenutnom ukupnom protoku multipleksa. U kojoj meri se time prevazilazi problem promenljivosti protoka komprimovanog video signala (*Variable Bit Rate*, VBR) analizirano je i simulirano u radu [25]. Grupa programa koji se emituju u okviru jednog RF kanala zajednički se koduje (komprimuje), a nivo dostignute statističke ravnoteže direktno zavisi od broja programa. Ova zavisnost je prikazana u različitoj literaturi, a najčešće se pozivaju na eksperimentalne rezultate kompanije ZetaCast [7]. Pokazuje se da će zbirni protok svih programa biti ujednačen, a kapacitet kanala u zadovoljavajućoj meri iskorišćen, tek kada broj zajednički multipleksiranih programa bude veći od 15. U sadašnjim uslovima ovo je ostvarljivo kod multipleksiranja SD programa, a ni blizu kod programa bilo kog HD formata.

Postoje dosta usaglašene procene potrebnog protoka za HD, [1], i [9] i 3D programe [1] i [28], kodovane MPEG-4 tehnikom, koje uzimaju u obzir i sadašnje stanje i očekivanja za sledećih nekoliko godina. U njima se uzima u obzir i stalni napredak tehnika kompresije signala i različite vrednosti potrebnog protoka zavisno od vrste emitovanog programa. Za očekivano uvođenje formata 1080p, kao i 3D na bazi ovog formata u nešto drugačijoj formi procenjeni su protoci u publikaciji [8], a dalji razvoj i dinamika implementacije formata visoke rezolucije razmotreni su u [10]. U ovoj disertaciji su, imajući u vidu i druge procene, predloženi protoci u [10] prihvaćeni ili blago korigovani.

Iako je kapacitet po jednom DVB-T2 kanalu značajno povećan u odnosu na DVB-T standard u velikom broju radova se analizira problem malog broja digitalnih programa u multipleksu, formiranom u frekvencijskom prostoru RF kanala opsega 7 ili 8 MHz, pa i sama sudbina DTT sistema u budućnosti. Posebno je izražena bojazan da će smanjenje raspoloživog spektra dodatno smanjiti konkurentnost DVB-T2 (i drugih DTT sistema) u odnosu na druge operatore. U radovima [3], [21] i [29] analizirane su perspektive korišćenja frekvencijskog spektra, modovi mreža, broj multipleksa i istaknuta potreba za što efikasnijim korišćenjem ovog resursa. Sve ove analize istovremeno vode i ka neophodnosti primene efikasnije tehnike komprimovanja video signala.

Razvoj HEVC-a je zaokružen i kompletiran. U novijim radovima i izveštajima prikazuju se rezultati objektivne i subjektivne analize primene HEVC na HD programe u odnosu na MPEG-4 [22], kao i poboljšanja koja donosi dodatni razvoj HEVC [26]. Zajednički je rađeno na razvoju HEVC-a i dva moguća 3D modela, MV HEVC i 3D HEVC. Početni rezultati su optimistički u pogledu potrebnih protoka za mnogo kvalitetniji 3D prikaz, gde se 3D slika

formira od više pogleda u odnosu na sadašnja dva [30]. Očekuje se da protok bude najviše 50% veći od protoka odgovarajućeg dvodimenzionalnog programa. Rezultati subjektivne analize primene HEVC na 4k u odnosu na MPEG-4 kodovanje dati su u [12], a izazovi proizvođača u masovnoj primeni HEVC za UHDTV dati su u radu [2]. Postoji i eksperimentalno emitovanje 4k i 8k kodovanih HEVC-om, gde se mogu videti izabrani parametri i protoci po programu. U radovima [22] i [27] se potvrđuju očekivanja da se efikasnost HEVC-a povećava sa povećanjem rezolucije, te da će stepen komprimovanja 4k i 8k biti veći u odnosu na HD formate.

Na početku ovog poglavlja naveden je broj MPEG-4 kodovanih HD programa koji se može smestiti u multipleks jednog RF kanala. Ako se primenom HEVC-a protok po programu dvostruko smanji, on je i dalje značajno veći od sadašnjeg protoka MPEG-4 kodovanih SD programa, čak i kod HD programa prve generacije. Na malom broju programa statističko multipleksiranje nema puni efekat, pa ni kapacitet nije dovoljno iskorišćen. U radu će se analizirati koji su kapaciteti potrebni za pojedine formate, a potom tražiti rešenja za stvaranje takvih resursa.

Postoje razmatranja, da se do većih kapaciteta dođe objedinjavanjem kapaciteta više pojedinačnih RF kanala, i stvaranjem, nazovimo ga tako, širokopojasnog RF kanala, sa širokopojasnim statističkim multipleksom na njemu. U DVB-T2 preporukama [6] i smernicama za implementaciju [4] predložen je način povezivanja RF kanala na MAC sloju referentnog OSI modela, poznat pod nazivom *Time Frequency Slicing* (TFS), koji se grubo može prevesti kao „vremenski-frekvencijsko cepkanje“. TFS omogućava disperziju saobraćaja na više susednih ili nesusednih RF kanala. To je relativno složen softverski metod raspršivanja protoka, koji zahteva dodatnu opremu i kod samih korisnika. Iako je kao tehnika standardizovan, dat je samo opciono i nije deo obaveznih DVB-T2 specifikacija. Značajan deo razmatranja u disertaciji biće posvećen analizi i proračunima svih efekata primene TFS na poboljšanje iskorišćenja kapaciteta DVB-T2 kanala, koristeći rezultate originalne simulacione analize [25], kao i eksperimentalne rezultate i merenja iz radova [3] i [14]. U literaturi ne postoje primeri kompletne kvantitativne analize primene TFS, utvrđivanja dobijenih kapaciteta i procene povećanja broja HD programa. Deo rezultata analize, dat je u radovima u kojima je učestvovao i autor ove disertacije [17] i [18].

Kao korisna, analiziraće se mogućnost da se i u DVB-T2 prenosu koriste tehnike udruživanja kanala na fizičkom sloju OSI modela razmatrane u dokumentima iz kablovskog prenosa, DVB-C2, [11] i radovima vezanim za kablovski prenos [13] i [15]. Ova tehnika je primenjena i u novijim verzijama WiFi i mrežama mobilnih korisnika. Povezivanje na fizičkom nivou se zasniva na spajanju susednih RF kanala, uz dodatnu korist da se frekvencijski prostor koji je služio kao zaštitni interval iskoristi za aktivan prenos. Počiva na osobini ortogonalnosti podnosilaca u OFDM tehnici multipleksiranja, koja se u DVB-T2 sa uvođenjem 16k i 32k (I)FFT blokova dodatno povećala [16]. Pošto ima drugačiju koncepciju realizacije na fizičkom sloju predlog i način primene u DVB-T2 tehnici je nov i biće predmet razmatranja u disertaciji. Korišćenje zaštitnog frekvencijskog intervala može da omogući povećanje kapaciteta kanala s jedne strane, ali i efekte po osnovu objedinjavanja kapaciteta više RF kanala s druge strane. Obzirom da predstavlja novu metodu, u objavljenom radu [20] je pokazano da ovo nije samo teorijska opcija. Analiza je podržana originalnom Matlab simulacijom, sa parametrima na fizičkom sloju čija se primena planira u realnim mrežama. Za simulaciju u objavljenom radu, kao i dodatne analize koje će se izvesti u disertaciji koristi se adaptirani i nadograđeni softverski paket [19].

Kroz poređenje i sagledavanje prednosti i mana, mogu se uočiti razlike u efektima razmatranih tehnika integracije kanala. Kao i uvek, poželjno je istražiti mogućnost sinergije obe navedene tehnike. Generalno, rešenja se nalaze na dva različita sloja OSI modela, pa će

završna analiza u disertaciji biti posvećena upravo modelu kojim se istovremeno postižu dobri efekti obe tehnike.

Jedan od ciljeva je da analize u radu budu praćene kvantifikacijom i proračunima, a deo proračuna je već dat i radu [18]. Proračuni na bazi procena, nose rizik moguće greške. Ali, da bi se nešto što neminovno dolazi planiralo, mora se, makar aproksimativno, doći do očekivanih kapaciteta i očekivanog broja servisa koji se mogu realizovati, da bi se, ako ništa drugo, to uporedilo sa procenom broja programa, koje se sada emituju i koji se očekuje u sledećih nekoliko godina. U tom smislu će se koristiti procene relevantnih institucija i autora, i ti izvori će u radu biti navedeni. U radu će biti primenjen prilično jednostavan, ali originalan matematički model kojim će se za određeni (ili željeni) broj programa različitih formata, određivati potrebni kapacitet kanala, posmatrajući istovremeno i postignuti stepen efikasnosti korišćenja tog kapaciteta.

Rezultati proračuna mogu poslužiti kao osnova za ekonomsko-tehničke analize pri razvoju opreme i planiranju mreža, pa u tom smislu daju originalan doprinos daljem razvoju. Koliko je značajno emitovanje svakog dodatnog programa pokazuje ekonomsko-tehnička analiza sprovedena na modelu u radu [24]. U radu će poslužiti kao ilustracija finansijskih efekata primene predloženih metoda za povećanje broja emitovanih programa.

Sadržaj disertacije je organizovan u šest poglavlja. Posle uvoda u drugom poglavlju rad se bavi upravo HD programima, novim formatima i ostalim promenama koje se očekuju. Posmatra se protok izvornog signala, razvoj kompresionih tehnika i na kraju definišu očekivani protoci koje odgovarajuće DVB-T2 platforme treba da prenesu i emituju. U trećem su sagledani osnovne odlike, arhitektura i mogućnosti DVB-T2 sistema. Posebno su analizirane pretpostavke za unapređenje performansi, koje će biti neophodne sa porastom broja programa visoke definicije. U četvrtom poglavlju razmatraju se mogućnosti i vrši proračun broja HD programa koje može da prihvati multipleks u jednom RF kanalu, sa utvrđivanjem slabosti i problema koji mogu nastati ovakvim načinom korišćenja resursa. Analiza je smeštena u period od sledećih nekoliko godina, odnosno pretpostavljeni trenutak veće primene DVB-T2 kao emisione tehnike, formata HD 1080p i primene HEVC tehnike komprimovanja paralelno sa standardnom MPEG-4. Za ovakav način zauzimanja kapaciteta nema smisla posmatrati niti proračunavati emitovanje programa u 4k i 8k rezoluciji. Peto poglavlje posvećeno je TFS povezivanju, kvantifikovanju mogućih dobitaka i njihovom pretvaranju u odgovarajuće povećanje kapaciteta. U poglavlju šest istražuju se mogućnosti za bolje korišćenje potencijala COFDM tehnike modulacije i DVB-T2 tehnike emitovanja u cilju poboljšanja iskoristivosti kapaciteta RF kanala. Analiziraće se mogućnosti za proširenje kapaciteta RF kanala na fizičkom sloju OSI modela, objedinjavanje resursa u skladu sa potrebama pojedinih formata, i potom primena dobro razrađenih mehanizama u okviru jednog RF kanala na grupu RF kanala. Cilj je stvaranje odgovarajućeg širokopojasnog kanala, odnosno da se formira *broadband in broadcast* po meri HD formata, odnosno njihovih protoka. Sedmo poglavlje je posvećeno kombinovanju dve predložene tehnike u cilju postizanja najboljih efekata. Definišaće se scenariji za rad u realnom okruženju i proračunima pokazati koji su kapaciteti potrebni za efikasno emitovanje HD i UHD programa, za MFN, SFN i portabl/mobilne mreže.

Na kraju rada doneće se zaključci o trenutnim mogućnostima DVB-T2 sistema u emitovanju programa visoke rezolucije, sa predlozima da se primene istražena unapređenja. U disertaciji će se na izvestan način izvršiti i provera potencijala koje ova tehnika ima kad je u pitanju emitovanje HD i UHD formata televizijskih programa.

2. Karakteristike HDTV programa

2.1. Trendovi i očekivanja korisnika

Kvalitet slike se stalno poboljšava, pa se može govoriti o trendovima koji se javljaju zahvaljujući interakciji unapređenja koja nude provajderi sadržaja i proizvođači opreme s jedne strane i odziva korisnika sa druge strane.

Prvi uočljiv trend, koji se u potpunosti odomaćio, je isporuka prijemnika sa ravnim ekranom (displejom) u plazma, LCD (*Liquid Crystal Display*) i sve više u LED (*Light Emitting Diode*) tehnologiji. Rade tako što se električna struja dovodi na ekran koji se sastoji od određenog broja piksela, poređanih ispred nekog svetlosnog izvora. Kao svetlosni izvor služe plazma, tečni kristal (LCD) ili svetleće diode (LED). Ovi poslednji imaju i verziju OLED (*Organic Light Emitting Diode*). Koriste organske materijale i imaju dobre karakteristike kao što su širok spektar radnih temperatura, dobra provodljivost i fleksibilnost. Proizvode se sa blago zakrivljenim ekranom koji poboljšava ugao posmatranja. Takođe je činjenica da se veličina ekrana stalno povećava, sa sve većim procentom aparata dijagonele preko 40 inča. Sa stanovišta rezolucije na tržištu se odavno isporučuju prijemnici koji podržavaju standard 1080p poznat kao potpuni HD (*full HD*), bez obzira što programi u ovom formatu tek počinju da se emituju. Industrija je već razvila i ima u ponudi i 4k UHD sa četiri puta većom rezolucijom od 1080p. Povećanje rezolucije prate i druga poboljšanja kao što su povećana frekvencija osvežavanja slika na ekranu i kvalitetnija pobude elemenata slike (pikseli). Primenjuju se ili planiraju i sistemska unapređenja vezana bolje uzorkovanje (10 ili 12 bita po uzorku), novu prirodnu paletu boja, poboljšanje osvetljaja, dimenzionisanja ekrana u tzv. „bioskopskom“ formatu 21:9 za koji se tvrdi da više odgovara nameni i sl.

Navedena poboljšanja podižu kvalitet prikazanih sadržaja. Uglavnom su prvo predmet usaglašavanja, pa ih potom uvode proizvođači opreme za generisanje i prikaz slike, a vremenom ih prihvataju i emiteri sadržaja, kad tržište bude u stanju opremljenosti da to masovnije prihvati. U početnoj fazi poboljšanja se mogu iskoristiti lokalno, za prikaz

memorisanih (Blu-ray) i tzv. „streaming“ video sadržaja, ili pak slika u realnom vremenu koje generišu kućni računari ili specijalizovane grafičke mašine, platforme za video igre i sl. Tako se tehnička unapređenja na opremi za generisanje video sadržaja mogu primeniti i na neki način proveriti pre nego što se primene u distribuciji i na platformama za radiodifuzno emitovanje. Sada smo svedoci da se na takav način prikazuju sadržaji u 1080p, 3DTV ili UHD formatima. Emiteri i distributeri sadržaja mogu tako da „oslušnu tržište“, stvore mogućnosti i prilagode dinamiku razvoja svojih platformi.

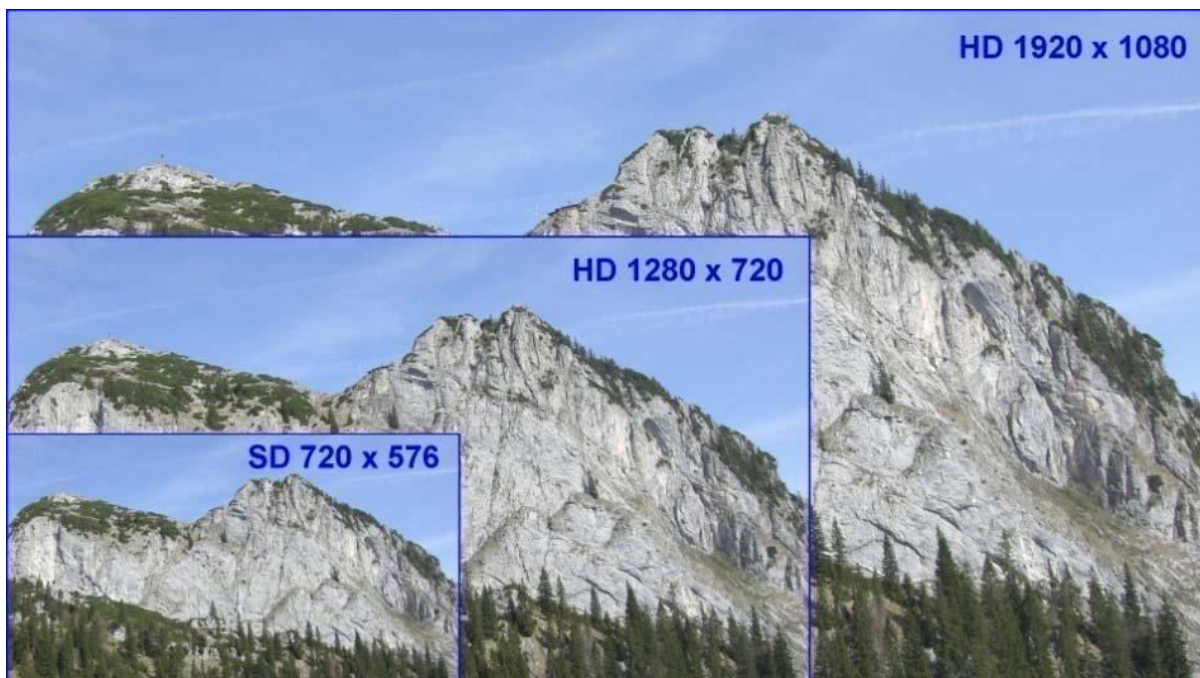
U nastavku ovog poglavlja biće razmotreni aktuelni i budući formati HD programa, kao i ostala očekivana poboljšanja. Od interesa je da se sagleda i koliki je njihov uticaj na povećanje bitskih protoka. Protoci su, opet, u tesnoj vezi sa očekivanim razvojem tehnika kompresionog kodovanja, i imaju ključni uticaj na mogućnost i dinamiku emitovanja TV programa.

2.2. Aktuelni HDTV formati

Iako su preporukama definisana četiri, dva formata tzv. prve generacije se dominantno koriste u današnjoj distribuciji i emitovanju TV slike do korisnika. To su HD 720p/ i HD 1080i, pri čemu:

- "720p" sadrži slike (okvire, kadrove) sa 720 linija i 1280 emisionih tačaka po liniji (piksela), prikazujući 50 slika/s (progresivno),
- "1080i" sadrži slike sa 1080 linija i 1920 emisionih tačaka po liniji (piksela), prikazujući 25 slika/s (preplitanje).

Važno je napomenuti da skoro svi HD prijemnici u Evropi podržavaju oba ova formata, kao i da je novi format HD 1080p/50, čija se primena očekuje, kompatibilan sa oba.



Slika 2.1. Vizuelno poređenje između TV formata sa različitim rezolucijom

Prvi utisak je, da najveća razlika između dva formata slike treba da proistekne iz prostorne rezolucije, odnosno broja piksela po slici. Mnoge publikacije koriste dijagrame poput ovog na Slici 2.1 da vizualizuju razliku u pikselima i da promovišu jedan format u odnosu na drugi.

Konkretno, dijagram na slici se koriste da promovišu format 1080i/25 u odnosu na 720p/50, ali to nije cela priča. Slučajevi za koje ova vrsta dijagrama važi su prikazi nepokretnih ili malo pokretnih slika, kao što su slike mrtve prirode. Tada se ignoriše činjenica da je televizija u biti prenos pokretnih scena i da ima za cilj da dovede i realnost pokreta kod npr. sportskih i drugih manifestacija u dom korisnika.

Sa 1080i/25 formatom, prenosi se 50 poluslika u sekundi. Polusliku čini polovina, dakle 540 linija. Naizmenično se prenose poluslike sa parnim i neparnim linijama, Format je označen slovom *i* da ukaže na analizu slike sa proredom (*interlaced*). Sve linije se tako prenese 25 puta u sekundi. Prenos u poluslikama je nasleđe iz ranijih formata i analognog emitovanja TV programa.

Format 720p/50 prenosi 50 punih slika sa 720 linija u sekundi i označen je slovom *p*, (*progressive*). Kao posledicu 720p/50 nudi dvostruki broj slika u sekundi u odnosu na 1080i/25 format. Sa većom frekvencijom slika 720p/50 pruža detaljan prikaz pokreta i povećava oštrinu pri prikazivanju pokretnih scena. Ipak pojedinačna slika ima manju rezoluciju.

Danas, ravni ekrani i projektori prikazuje kompletne slike, koji sadrže sve linije koje čine sliku, to su tzv. progresivni ekrani. Prikazivanje dopremljenog sadržaja zahteva da se formati sa proredom, kao što su HD 1080i/25 ili SD 576i/25 "raspletu", odnosno popuni svaka druga linija, unutar uređaja ekrana (ili set-top boksa), pre nego što se preda elektronicu ekrana. „Rasplitanje“ opisuje proces koji se primenjuje na digitalnu sliku da izračuna (*i*, u najgorem slučaju, proceni) kako da se pune prazne linije iz sukcesivnih polja. Najjednostavnije je da se prazne susedne linije ponove, ili se manje ili više složenim postupcima izračunavaju vrednosti tih linija za tzv. prelazne slike. U zavisnosti od kvaliteta primenjene obrade, rasplitanjem slika, naročito pri prikazivanju pokretnih objekata, smanjuje se oštrina. Može se dogoditi i da postignuta vertikalna rezolucija primljenog 1080i/25 formata posle obrade bude manja nego od formata 720p/50. Ovi efekti se nazivaju *artefakti* kretanja.

Progresivni 720p/50 format ima manje elemenata po slici, ali primenjuje vremensku rezoluciju od 50 slika u sekundi (sa 720 linija). Rasplitanje nije neophodno i artefakti pokreta izazvani isprepletanim skeniranjem ne postoje. Mora se napomenuti, međutim, da prijemnik sa rezolucijom 1920 x 1080 piksela zahteva da se HD signal koji emituje u formatu 1280 x 720 piksela na prijemniku podesi (prilagodi) na rezoluciju ekrana. Slično se npr. podešava i emitovani signal 1440 x 1080i/25 na rezoluciju ekrana, koji se dodato i raspliće.

Koristan pokazatelj za upoređivanje različitih video formata je broj elemenata slike (protok piksela) po sekundi, obično izražen u Mpixel/s. Pomenuti HDTV programi generišu približan broj piksela:

- "720p", odnosno 1280 piksela x 720 linija x 50 slika/s (progresivno) - 46 MPixel/s
- "1080i", odnosno 1920 piksela x 1080 linija x 25 slika/s (preplitanje) - 52 MPixel/s

Protok je kalkulisan za odnos rezolucija osvetljaja i boje 4:2:0 koji se koduje sa 8 bita po pikselu. U slučaju da se ovaj odnos promeni na planirani 4:2:2, 10 bita po pikselu, protoci bi se povećali.

Često se format 1080i emituje sa smanjenom horizontalnom rezolucijom od 1440 piksela x 1080 linija, što odgovara protoku od 39 Mpixel/s. Bitska brzina za ovu smanjenu verziju rezolucije 1080i je manja od brzine potrebne za format 720p, ali se ta korist brzo gubi manjom efikasnošću kompresije, koja je tipična za formate sa preplitanjem linija.

Dilemu o budućnosti primene formata prve generacije razrešio je Tehnički Komitet EBU (*European Broadcasting Union*) 2004. Godine. Za buduću primenu preporučeno je format 720p.

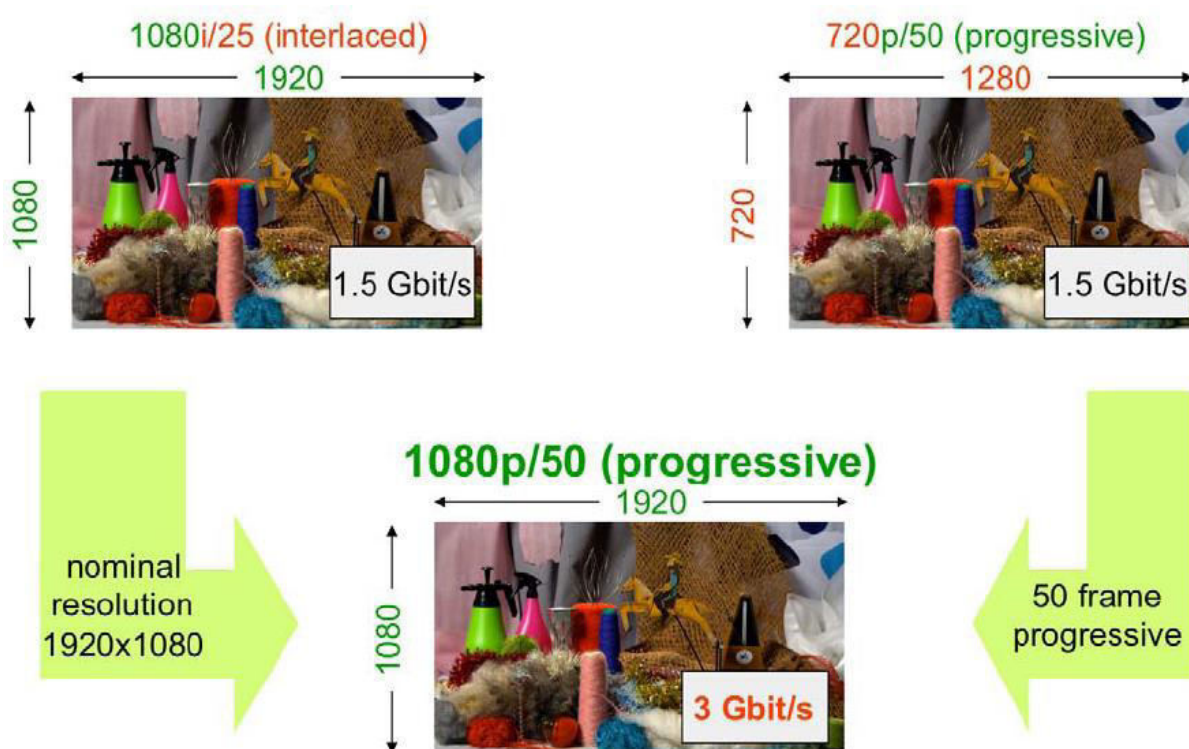
Zato će u radu uz novije HD i UHD formate, ovaj format biti predmet proračuna prilikom kalkulacija broja programa koji buduće platforme treba da emituju.

2.3. HDTV 1080p/50

Sa stanovišta dobavljača sadržaja postojanje dva HDTV formata prve generacije je neželjena komplikacija. Najbolji način da se obezbedi emitovanje kvalitetnijeg sadržaja, a kompatibilnog sa oba sadašnja formata je da u formatu druge generacije on sublimira oba prethodna. To je format HD 1080p:

- "1080p" sadrži slike sa 1080 linija sa 1920 emisionih tačaka (piksela) po liniji, prikazujući 50 slika/s (progressivno), sa protokom od 104 MPixel/s.

Slika 2.2, preuzeta iz [10], ilustruje vidljivu razliku izmedju aktuelnih 1080i/25 i 720p/50 HDTV formata koji se koriste u digitalnoj distribuciji i emitovanju, i punog HDTV formata 1080p/50.



Slika 2.2. Razlika u kvalitetu slike formata 1080p/50 u odnosu na formate 720p/50 i 1080i/25

Bitne odlike ovog formata, koji pretenduje na dugoročnu upotrebu su:

- izbegavanjem isprepletanog skeniranja pojednostavljeno je generisanje signala, a kvalitet je poboljšan,
- primenjuje dobru prostornu rezoluciju formata 1080i/25 sa dobrom vremenskom rezolucijom 720p/50.

Tako kombinuje najbolje karakteristike aktuelnih HD formata. Mana ili, bolje reći, cena poboljšanja je veća bitska brzina nekomprimovanog signala, npr. dvostruko veća od 1080i/25. To, naravno, nikako ne znači da će se u tom odnosu povećati i potreban protok komprimovanog sadržaja.

Format 1080p/50 je tehnički zreo i potpuno standardizovan. Iako su distribucija i emitovanje, posebno difuzno danas veoma ograničeni kapacitetom, a oprema veoma skupa, raspoloživa je osnovna infrastruktura (kablovi, ruteri, svičevi) sa potencijalno dužim ekonomskim životom, koji podržavaju produkciju 1080p/50 signala. Savremeni ekrani vrhunskog kvaliteta namenjeni su i za 1080p formate slike, pa se kao glavna prepreka za emitovanje program u 1080p formatu pojavljuju ograničenja dekodera i potreban kapacitet. Naime, 1080p dekodera zahteva dupli memorijski kapacitet u odnosu na 1080i, što je značajan tehnički problem u odnosu na zahteve kada su trenutni HDTV oprema osmišljena. Iako to uopšte nije tehnički izazov za proizvodnju opreme danas, ovo je stvorilo problem za najveći deo ranije proizvedenih prijemnika, koji su danas u upotrebi. Takođe se postavlja i ozbiljan zadatak za mrežne emitere, kako da obezbede kapacitet kanala za programe sa ovako velikim protokom, a da ne redukuju broj emitovanih programa.

Generisani 1080p/50 signal će obezbediti viši nivo kvaliteta, čak i ako se u distribuciji i emitovanju koriste postojeći HD formati 1920 x 1080i/25 i 1280 x 720p/50. Već je pomenuto da je konverzija formata pojednostavljena, što je korist od univerzalne primene progresivnih signala, pa i 1080p/50.

Sve u svemu, proizvodnja programa u formatu 1080p/50 je evolutivni napredak, koji zahteva veću bitsku brzinu, unapređenje studijskih kompresionih formata i povećanje memorijskih kapaciteta, a uzrokuje i znatno povećanje opterećenja mreže. Zahteva dodatni razvoj kodeka koji uključuju 1080p/50 kao opciju.

U potrošačkom domenu skoro svi novi ekrani sa ravnim displejom sa HDMI 1.3 interfejsom mogu da prikažu 1080p/50 signal. Međutim, trenutno ne postoji 1080p/50 emitovanje ni preko digitalne zemaljske televizije, SAT, IP, ali se očekuje početak u ovoj 2015. godini.

U familiju DVB standarda, počev od DVB specifikacija TS 101 154 V1.9.1, uključen je i 1080p/50 format zajedno sa specifikacijama za primenu kompresionih tehnika H.264/AVC i SVC (*Scalable Video Coding*). Primenom kodera H.264/AVC visokih performansi dobijaju se na izlazu bitske brzine, koje su oko 30% veće od formata 1080i/25. Razlog je primena kvalitetnije kompresione tehnike, veći dobitak kompresije kod progresivnog signala, kao i izbegavanje potrebe neutralisanja efekta preplitanja na displeju prijemnika. SVC, pruža skalabilnost, odnosno aktivno podešavanje više nivoa kvaliteta, a samim tim i protoka po programu. Naravno, za smeštanje većeg broja programa moraće se primeniti nova tehnika, H.265/HEVC, opisana u sledećem poglavlju.

Kvalitet slike sa povećanom rezolucijom će biti značajno bolji. Posebno primetno poboljšanje kvaliteta slike će biti na displejima većih dimenzija. Postoje promene i na polju zvuka, jer je jasno da zvuk mora da prati visoki kvalitet slike. U televiziji visoke definicije moguće je emitovati zvuk u 5.1 ili 7.1 *Dolby Digital Surround* ili u AC3 formatu, a razvijaju se i novi digitalni standardi.

Primena 1080p/50, kao dodatak postojećem formatu (720p ili 1080i) može zahtevati *simulcasting*, dakle zajedničko emitovanje istog programa u dva različita formata. U takvom scenariju poželjno je smanjenje troškova emitovanja kanala. Da se isti sadržaj ne bi emitovao dva puta u istom RF kanalu u oba programa se koristi isti sadržaj u 720p formatu, a nezavisno se koduju dodatni pikseli za 1080p format. U principu su moguće dve metode:

- koristiti H.264/AVC Visokog Profila za bazni nivo signala 720p/1080i (osnovni sloj, *Base Layer, BL*) i Scalable Video Coding (SVC) na Skalabilnom Visokom Profilu nivoa 4.2 za unapređenje na 1080p/50 (obogaćeni sloj, *Enhancement Layer, EL*),
- ili H.264/AVC Visokog Profila za bazni nivo signala 720p/1080i i HEVC za unapređenje nivoa na 1080p/50.

Za obe metode stopa smanjenje protoka kanala je oko 20 - 30 % u odnosu na *simulcast* slučaj sa nezavisnim korišćenjem 720p/1080i i 1080p, kodovanih sa H.264/AVC Visokog Profila za signale oba formata.

U distribuciji, posle kompresionog kodovanja, format signala 1080p/50 zahteva 30-40% veći bitski protok nego današnji 720p i 1080i/25 (sa MPEG -4 AVC/H.264 kodekom). U sekciji 4.4 data je procena potrebnog bitskog protoka za SD i različite formate HD televizijskih programa, što će biti osnova za procenu protoka formata interesantnih za razmatranja u nastavku rada.

2.4. 3D HDTV

Mada je proizvodnja i distribucija 3D programa uveliko počela, za dalji ubrzani razvoj u ovoj oblasti neophodna je bila standardizacija u oblastima razvoja, izrade i razmene 3D programa. Glavni elemenat standardizacije je vezan za komprimovanje sadržaja, a rad je uspešno završen u toku 2015. godine. Suština je da se dobije što prirodniji utisak dubine slike, a da protok ne bude enormno povećan u odnosu na odgovarajući kod dvodimenzionalnog HD emitovanja. Trodimenzionalnost je veliki skok napred u TV emitovanju. Ako je u prvoj fazi digitalizacije fokus bio na proizvodnji i emitovanju 720p i 1080i/p HDTV formata programa, pa i 3D programa koji u osnovi ima ove formate, početak primene 1080p i HEVC-a, treba da budu zamajac i za 3D koji za osnovu ima 1080p. Standardizacija treba da ubrza napredak u pogledu kvaliteta slike, dubine slike i nivoa komfora posmatranja.

Šta zapravo podrazumeva 3D emitovanje. To je televizijski sistem koji je dizajniran da prenese na što prirodniji način dubinu scene sadržaja koji se prenose, pružanjem različitih prostornih pogleda (slika scene) za jedno i drugo oko gledaoca. U svom najjednostavnijem obliku gledalocu su omogućena dva fiksna ili "statička" stereoskopska pogleda na scenu, tako da se sa pomeranjem (glave) gledaoca efekat treće dimenzije ne bi uočavao. Koristi se poznata činjenica da čovek trodimenzionalnost scene koju posmatra doživljava na bazi različitosti pogleda (razlika u viđenoj slici) levog i desnog oka. Složeniji oblik, 3D sa više pogleda, omogućava gledaocu da pri pomeranju uočava promenu perspektive posmatrane scene u diskretnim koracima. U svom konačnom obliku, "hologramska" trodimenzionalna prezentacija bi trebalo da omogući gledaocu koji se pomera promenu perspektive na neprekidan način, koji se može uporediti sa prirodnim viđenjem scene u stvarnom životu.

U ovom trenutku prikaz trodimenzionalne slike za masovno tržište je vrlo aktuelan, ali je tehnološki u početnoj fazi i to je oblast kojoj predstoji razvoj. Razvijeni standardi će taj razvoj sigurno ubrzati. U praksi se primenjuju dva osnovna načina, aktivni i pasivni, a zasnovani su na dve različite tehnologije. Obe omogućavaju normalan prikaz klasičnog 2D programa, filmova i igara, a trodimenzionalna slika se kreira uz pomoć specijalnih 3D naočara.

Aktivni 3D uređaji poseduju 3D sistem koji se gleda preko naočara sa blendom. Naočare rade tako što prikazuju punu sliku prvo za jedno, pa za drugo oko u HD rezoluciji. Imaju bateriju ili se pune preko USB kabla.

Pasivni 3D sistemi rade na principu polarizacije. Poseduju naočare sa polarizovanim staklima, ne moraju da se pune i višestruko su jeftinije od aktivnih, jer ne poseduju elektroniku. Oba oka vide istovremeno sliku na TV-u.

Predviđa se da tehnologija 3DTV sistema, kao i svih drugih medijskih sistema, napreduje i razvija se od jedne generacije na drugu, u periodima od nekoliko godina. Tako se može očekivati da će buduće generacije sistema verovatno povećati količinu prenetih vizuelnih

informacija, ukinuti upotrebu naočara, i povećati slobodu kretanja bez negativnog uticaja na kvalitet stereoskopske dubine slike.

U tom smislu se može očekivati da razvoj 3DTV sistema ide sledećim koracima:

Sistemi sa naočarima

Početni oblik ovih sistema se i sada koristi, zasnovan je na "plano-stereoskopskom" prikazivanju, pri čemu se slike odvojeno šalju ka levom i desnom oku. Koriste se različite metode koje zahtevaju naočare da bi se izolovali jedan od drugog dva različita pogleda na datu scenu. Tu je tzv. "binokularni disparitet" ili binokularni paralaksa. Takvi sistemi imaju ograničenja u poređenju sa "prirodnim pogledom". Sa pažljivom proizvodnjom, prenosom i prikazivanjem mogu se postići solidni rezultati. Obično se za gledanje koriste specijalne naočari, mada postoje rešenja i za gledanje bez naočara (auto-stereoskopski), ako se elementi za 3D prikazivanje ugrade u sam ekran, ko ji onda i veoma skup.

Autostereoskopski sistemi sa više pogleda

Ovi sistemi su takođe namenjeni "plano-stereoskopskim" (ili nevolometrijskim) displejima, što znači da se slike ponovo formiraju i šalju ka levom i desnom oku. Koristeći različite metode omogućava se da dva pogleda na datu scenu budu izolovani, ali bez upotrebe naočara. Razvojem po novim standardima ova generacija sistema će moći da pruži više pogleda na posmatranu scenu, tako da će gledaoci moći slobodno da menjaju ugao gledanja i postepeno dobijaju vizuelni pristup delovima scene iza objekata. Tehnologija druge generacije se zasniva na snimanju, dopremanju i emitovanju slika sa još više pogleda. Ovo omogućava više razlika u pogledima, što oči koriste za stvaranje vernije trodimenzionalnosti i osećaj gledanja čini bliži prirodnom. Gledanje je sasvim normalno, bez naočara, na auto-stereoskopskom displeju.

Holografski sistem (integralno snimanje)

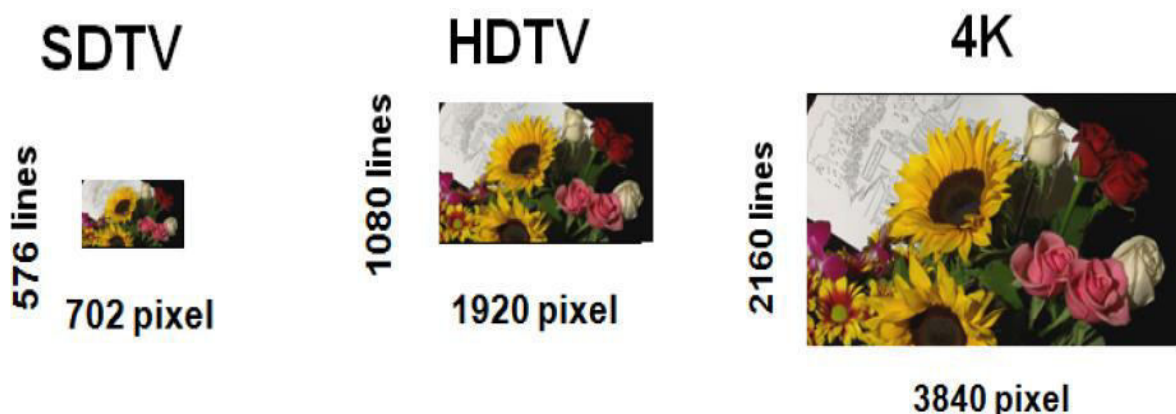
Ovi sistemi su zasnovani na talasnom snimanju objekata (holografija) ili integralnom snimanju. Na objekte koji se snimaju se šalje snop monohromatske svetlosti, a snimanje se vrši na osnovu svetlosnog polja koje se od njih odbija i koje ima sve informacije o snimanim objektima. Dakle, omogućeno je slobodno gledanje iz različitih pozicija bez korišćenja bilo kakvih naočara. Pored toga, svetlosno polje pruža vizuelne informacije (fokusni snopovi) za podešavanje okulara objektivna kako da se pravilno fokusira na rastojanje koje je jednako udaljenosti na kojoj se postiže konvergencija. Ovo obezbeđuje mnogo prirodnije gledanje nego sistemi prethodnih generacija koji zahtevaju održavanje fokusa na ekranu bez obzira na konvergentnu udaljenost.

Ne može se predvideti sa sigurnošću da li će i kada generacija opreme za holografsko snimanje biti razvijena i spremna za masovnu primenu. Ali, može se konstatovati da se krupni generacijski koraci javljaju svakih desetak godina, kao i da je sve kraće vreme od neke ideje do komercijalne eksploatacije. Do tada će postupno i u fazama biti primenjivane prethodno navedene tehnike. Napredak koji je postignut sa povećanim brojem pogleda i korišćenjem korelacije između njih da se smanji protok koje prenos i emitovanje 3D signala zahteva, je rezultat zajedničkog rada eksperata za 3D i za kompresiono kodovanje. Ovaj tim radeći na projektu pod nazivom JCT-3V (*Joint Collaborative Team on 3D Video Coding Extension Development*) razvio je dva modela pod nazivima 3D HEVC i MV HEVC [30]. Prvi rezultati govore da protok 3D sadržaja neće biti dramatično povećan u odnosu na isti 2D format. Zato su procene potrebnog protoka za ovu vrstu usluga u poslednje vreme smanjen sa 1,8 na 1,6, pa potom i na 1,5 puta uvećani 2D protok. To je i vrednost usvojena u sekciji 4.4, i koja je korišćena u saobraćajnoj analizi. Analiza se odnosi na period od sledećih nekoliko godina, a

procenjen je protok 3D programa na bazi 2D programa 1080p i primenu H.264/AVC i H.265/HEVC enkodera.

2.5. UHDTV 4k i 8k

Veliki napredak u televizijskom emitovanju, koji će stvoriti sasvim drugačije televizijsko okruženje, predstavljaće digitalna televizija ultra visoke rezolucije, UHD. Preporukama ITU-R postavljeni su standardi za razvoj UHD u dva koraka. Oni su logičan nastavak prelaska sa SD na HD standard. HD podržava sliku od oko 2 megapiksela (sistem sa 1920 piksela x 1080 linija). Prvi nivo kvaliteta ima sliku od oko 8 megapiksela (sistem sa 3840 x 2160 linija), a sledeći oko 33 megapiksela (sistem sa 7680 piksela x 4320 linija). Popularno se ovi sistemi nazivaju UHD-1 i UHD-2. Još češće se koristi naziv 4k i 8k sistemi, imajući i vidu broj piksela koje sadrži jedna horizontalna linija slike. U literaturi se za 8k sreće i termin SHDTV (*Super High Definition Television*). Takođe, postoje i neke podvarijante ovih formata, tako da 4k može da se koristi i sa rezolucijom 4096 piksela x 2048 linija, 4096 piksela x 2304 linija ili 4112 piksela x 2168 linija. Vizuelni osećaj povećanja rezolucije HD programa od 720p do 4k može se steći posmatranjem Slike 2.3. Na Slici 2.4 se može videti prijemnik u 8k formatu, kao potvrda spremnosti proizvođača za buduće izazove.



Slika 2.3. Evolucija formata slike od SD preko HDTV do 4 x HDTV (4k)

Kvalitet UHDTV biće upotpunjen kroz poboljšanje vernosti i širu skalu boja, konstantnu osvetljenost ekrana i opcije sa većim brojem slika, do 120 u sekundi, u odnosu na današnje televizijske sisteme. Čini se da tek sa povećanjem rezolucije do izražaja dolazi potreba za poboljšanjima koja su navedena, a koja na manjoj rezoluciji nisu mogla da daju uočljivo poboljšanje. U sekciji 2.6 biće kratko objašnjena suština tih poboljšanja i njihov uticaj na povećanje protoka.

Povećanje broja tačaka (piksela) stvara uslove i za povećanje veličine ekrana. Postoji trend da se u kućnim uslovima postigne „bioskopski doživljaj“. Puni HD 1080p, pokazuje nadmoć kod ekrana preko 50 inča, ali već kod ekrana preko 65 inča počinje da pokazuje svoja ograničenja. Tehnološka poboljšanja doprinose da puni HD sadržaj izgleda sve bolje i na veoma velikim ekranima, ali će tek UHD postići potpuni efekat. U tom smislu se očekuje da faktor odluke da li koristiti 1080p ili 4k format, bude u suštini potreba da se koristi ekran veličine manje ili veće od 60 ili 65 inča. Procena je da će se, u tom smislu, HD 1080p sasvim komotno koristiti za duži vremenski period.

Osim rada sa eksperimentalnih predajnika distribucija programa u 4k formatu, naravno, nije počela preko TV mreža. Jedan od razloga je svakako i zahtevana bitska brzina, četiri puta

veća od izvornog toka HD, koju ove mreže ni u novoj, drugoj generaciji ne mogu da podrže. Osim rezolucije na protok će u manjoj ili većoj meri uticati i druga pomenuta poboljšanja.



Slika 2.4. TV prijemnik po 8k UHDTV TV standardu

Primena kompresionog standarda HEVC i kontinuirani napredak koji se, poučeni iskustvom predhodnika, i kod ove tehnike očekuje, će biti od suštinskog značaja za primenu 4k. Ispitivanja HEVC-a pokazuju da je efikasnost na programima 4k formata veća nego na HD formatima. Posebno su optimistični rezultati subjektivnih ispitivanja [12] i [27]. U ovom trenutku 4k još uvek nije uključen u DVB standarde.

U saobraćajnoj analizi, sprovedenoj u poglavlju 4 procenjen je, ilustracije radi, protok 4k programa kodovan sa MPEG-4, a procene protoka kodovanih HEVC-om i proračun broja UHD programa dat je u poglavlju 7. Pretpostavlja se je da emitovanje u ovom formatu početi posle primene 1080p formata kodovanog HEVC-om i iskustava i unapređenja koja će to emitovanje doneti.

2.6. Ostala poboljšanja u prikazivanju slike

U ovoj tački data su neka od očekivanih poboljšanja u kvalitetu TV slike sa procenom o eventualnom uticaju na povećanje zahtevanog protoka, što je bitno za proračun broja programa koji se mogu smestiti u kapacitete budućih radiodifuznih sistema.

2.6.1. Povećanje broja slika

Učestanost od 50 poluslika u sekundi (tj. 25 slika) se koristila za analogni televizijski prenos u Evropi. Iako sa pojavom digitalne tehnologije u TV prijemnicima frekvencija više nije važno pitanje, ova „istorijska“ učestanost je zadržana, tako da je svet danas podeljen na oblasti koje koriste familiju 50Hz (gde je i Evropa) i one koje koriste 60Hz (gde je i Amerika).

Kada se polazi od analize sa proredom u SD i ide ka progresivnim formatima, kao što su HD 720p ili 1080p, učestanost slika se u prijemnicima udvostručava sa 25Hz na 50Hz. Ovo omogućava poboljšano prikazivanje pokreta, što je posebno uočljivo kod sportskih sadržaja, i

pokazalo se važnijim od prostorne rezolucije, barem u formatima prve generacije HD programa.

Prilikom uvođenja UHD, može se očekivati da će se ponovo razmotriti dupliranje brzine kadrova do 100Hz. Mnogi Vrhunski HDTV displeji već danas udvostručuju unutrašnji prikaz slika na 100Hz i više. Ova tehnika na zadovoljavajući način smanjuje treperenja u statičnim oblastima slike, a ako bi se ceo lanac emitovanja slika povećao na 100Hz ovo poboljšanje bi se odrazilo i na prikazivanje slika sa pokretima. Drugim rečima, UHDTV može da se iskoristi kao prilika da se pokrene nova familija učestanosti prikazivanja slika. Npr. sa familijom učestanosti 75Hz, 150Hz i 300Hz može da se obezbedi put do konvergencije između tradicionalnih familija 50Hz i 60Hz.

2.6.2. Dimenzije slike

Sa prelaskom sa analognog na digitalno emitovanje signala stari format 4:3 za analogne televizore zamenjen je "širokim" formatom 16:9. To je bliže odnosu širine i visine slike koji se koristi u bioskopu, ali neslaganje ostaje. Odnos 16:9 odgovara razmeri 1,78, dok većina bioskopskih prikazivanja koristi dužu sliku, *ultra widescreen* odnos od 2,33 odnosno 2,39. HDTV gledalac posmatra filmove snimljene u ovim formatima, pa stoga mora da prihvati ili crne trake na vrhu i dnu ekrana ili pak odsecanje dela slike na levoj i desnoj strani ekrana.

U principu, ne postoji razlog da u budućnosti i ekrani u domovima korisnika ne pređu na *ultra widescreen* format. Odnos 21:9 značio bi u televiziji visoke definicije povećanje broja piksela na (2560 × 1080), sa ciljem da se u kuću prenese pravi *anamorphni* doživljaj bioskopskog gledanja. Kada se takav displej koristi za prikazivanje normalnog HD sadržaja, potrebno je ili da se 16:9 video slika razvuče da bi se popunio ekran ili da se dodaju crne trake sa strane. Odluke će se, naravno, donositi na bazi zainteresovanosti korisnika za ovu promenu, pa i realne mogućnosti smeštanja i onako sve većih ekrana u njihove domove.

Sa aspekta protoka jasno je da povećanje dužine slike, odnosno broja tačaka u liniji povećava protok. U navedenom primeru povećanje bi bilo preko 30%, što takođe ima veliku ulogu u odlučivanju.

2.6.3. Povećanje hromatske rezolucije

Ustanovljena je praksa da se video sadržaj koji predstavlja hromatske informacije prenosi do gledaoca sa pola rezolucije u odnosu na rezoluciju lumentne komponente, kako u horizontalnom tako i u vertikalnom smeru.

Video sadržaj je u studijskim uslovima, međutim, prvobitno omogućavao istu vertikalnu rezoluciju za dve hrominentne i lumentnu komponentu, ali sa upola smanjenom horizontalnom rezolucijom, što se označava kao 4:2:2. Filmski sadržaj se uglavnom prikazuje sa istom rezolucijom hrominentne i lumentne komponente, označenom relacijom 4:4:4.

U principu, u budućem emitovanju se može povećati rezolucija hromatskih informacija na 4:2:2 ili čak na 4:4:4. U ovom radu ćemo pretpostaviti da će rezolucija 4:2:0 nastaviti da se koristi u bližoj budućnosti, mada nije isključeno da će se u UHD formatima uočiti potreba za povećanjem rezolucije hrominentne komponente. U tom slučaju bi došlo do osetnog povećanja protoka video sadržaja po programu.

2.6.4. Kodovanje sa više bita

Video informacija se u sistemima za digitalno TV emitovanje trenutno koduje sa osam bita, iako se u proizvodnji ovih sadržaja obično koristi kodovanje sa 10 ili 12 bita. Uticaj kvantizacije sa korakom za osmobaritno kodovanje postaje najvidljiviji u slikama u kojima postoji kontinualna promena boje, na primer, u oblasti vedrog neba u sumrak.

Efekti kvantizacije će, verovatno, postajati sve jasniji kako se video rezolucija bude povećavala. Uvođenje 1080p ili UHD emitovanja moglo bi se kombinovati sa povećanjem broja bita za kodovanje, i verovatno će se koristiti neki oblik adaptivnog kodovanja. To ne bi trebalo da zahteva značajnije povećanje protoka komprimovanog signala.

2.6.5. Poboljšanje palete boja

Paleta boja za HDTV sistema je zasnovana na ITU-R preporukama BT.709 iz davne 1990. godine. Kasnije je i usvojen od strane kompjuterske industrije kao " sRGB ". Preporuka je prilagođena osobinama i ograničenjima primene fosfornih displeja u tehnologiji katodnih cevi i zato ne omogućava vernu reprodukciju boja.

Mnogi displeji savremenih aparata za prikazivanje slike su već u stanju da prikažu širu paletu boja nego što je planirano po Rec. 709. Još 2006. godine, IEC je usvojila " xwYCC " paletu boja, koja je kompatibilna sa ITU-R Rec. 709, ali omogućava da se reprodukuje širi opseg boja. Postoje neke oblasti u prostoru boja gde su razlike u odnosu na prirodne boje bile primetne. Ovaj standard je podržan od strane velikih proizvođača ekrana, a očekuje se da će dobijati sve veći zamah. Ne očekuje se da ovo poboljšanje ima primetan uticaj na povećanje bitske brzine.

Zaključak

Poboljšanje kvaliteta emitovanih video sadržaja postiže se, pre svega, kroz povećanje rezolucije, ali i dodatno povećanje hromatske rezolucije, frekvencije osvežavanja, kao i kroz broj kvantizacionih nivoa uzoraka, proširenje palete boja...

Razvoj TV prijemnika je odavno omogućio, a TV emisije mreže sve više prelaze sa SD na HD programa prve generacije, 1080i i 720p, a u vremenu smo početka emitovanja HD programa druge generacije, 1080p. U budućnosti se očekuje dugoročna primena 1080p i 720p formata, i postepeno uvođenje 3D programa, zasnovanih na 1080p, i to sa mnogo prirodnijom dubinom slike, primenom tehnike sa više pogleda.

UHD sistemi će početi da se emituju sporadično, a efekti poboljšanja kvaliteta će biti vidljivi samo na većim ekranima. Za širu primenu UHD formata moraće da se još više unaprede tehnike komprimovanja i emitovanja signala. Do tada će se njihova primena uglavnom ograničiti na prikaze na velikim displejima u velikim uslužnim centrima, prilikom javnih manifestacija ili značajnih sportskih događaja.

Paralelno sa poboljšanjem videa poboljšava se i kvalitet audio signala. Stereo kanalima dodaje se sve veći broj *surround* kanala uz obavezni kanal za duboke tonove.

Stoga je neophodno istaći da sva poboljšanja imaju zajednički imenitelj u povećanju količine informacija i samim tim u povećanju protoka, pa se naponi moraju usmeriti na poboljšanje tehnika komprimovanja i povećanje kapaciteta sistema za emitovanje.

3. Arhitektura DVB-T2 sistema

3.1. Zemaljsko emitovanje

3.1.1. Mreže za zemaljsko emitovanje

Sistemi za emitovanje televizijskih programa i drugih usluga putem zemaljskih predajnika (zemaljsko emitovanje) čine mrežu koja sadrži jedinstvenu kombinaciju karakteristika kao što su tehnička savršenost i efikasnost, zavidnu pokrivenost i podršku uslugama, fleksibilnost, uspeh na tržištu, kao i široku podršku od strane industrije i javnosti. Kao rezultat toga, mreža za zemaljsko emitovanje predstavlja značajan socijalni i ekonomski faktor društva.

Digitalizacija zemaljske mreže je složen proces prelaska sa analognog na digitalno emitovanje ASO (*Analogue Switch-Off*). Pošto se radi o velikom sistemu, sa mnogo uložениh sredstava, proces je dugo trajao, jer se morao izvoditi vrlo organizovano, po razumnoj ceni za korisnike i emitere. U mnogim zemljama, zemaljsko emitovanje je dominantni način dopremanja signala do korisnika. Digitalizacija podjednako služi za emitovanje sadržaja emitera javnih servisa i komercijalnih emitera, a u proces je uključen niz drugih aktera u lancu vrednosti.

Zemaljska mreža je važna za radiodifuznu industriju, čak i u onim tržištima na kojima su dominantne druge vrste mreža. Ona stimuliše konkurenciju između mreža, ali takođe može da bude komplementarna sa drugim mrežama. Stoga je u interesu i radiodifuzne industrije i društva u celini da mreža za zemaljsko emitovanje ostane održiva, atraktivna i konkurentna, kao alternativa drugim mrežama za isporuku usluga gledaocima i slušaocima.

Mreža za zemaljsko emitovanje je široko podržana od strane svih: proizvođača, mrežnih operatera, emitera, regulatornih tela i javnosti. Za nastavak ovakve podrške potrebna je ažurnost, jasnoća i sigurnost regulative, kako bi se omogućilo javnosti, emiterima i uključenoj industriji da prave investicije u buduće tehnologije i usluge.

Radiofrekvencijski spektar je bitan resurs za zemaljsko emitovanje. Neophodno je obezbediti dovoljno spektra, ali i razviti i primeniti tehnologiju koja će dodeljeni spektar maksimalno koristiti, kako bi sada i u budućnosti mogle da se zadovolje rastuće potrebe zemaljskog emitovanja i zaštitile investicije emitera, mrežnih operatera, pa i korisnika. Veliki pritisak

konkurencije kao što su kablovske mreže, satelitsko emitovanje programa, IPTV, kao i razne vrste dopremanja video sadržaja putem interneta i mobilnih mreža, smanjuje tržište i ugrožava zemaljsku mrežu. Pod pritiskom drugih operatora postoji tendencija smanjenja frekvencijskog spektra koji je tradicionalno bio namenjen ovim sistemima. Zato je pred zemaljskim sistemima za digitalno emitovanje, DTT, važan zadatak da se nametne na tržištu, posebno na onom delu na kome ima komparativne prednosti.

Zaostajanje u razvoju zemaljske mreže bi verovatno podrazumevalo velike migracije na druge sisteme emitovanja. Ovo bi neminovno izazvalo vrlo visoke troškove korisnika. Mreže za zemaljsko emitovanje optimizovane za isporuku linearnih medijskih usluga velikom auditorijumu i stoga veoma važne u pružanju ovih usluga u budućnosti. DTT je upravo tehnologija koja ima potencijal da omogućiti razvoj zemaljske televizije.

3.1.2. Digitalno zemaljsko emitovanje

Prihvatanje DTT stalno raste, a prelazak sa analogne mreže, započet 1999. godine se intenzivirao i privodi se kraju u celom svetu. Da bi opstao na tržištu DTT treba da pruži široku i atraktivnu ponudu programa i ispuni očekivanja gledalaca u pogledu kvaliteta audio i video sadržaja. Ukupan broj programskih usluga na DTT mrežama raste kao posledica prelaska sa analogne na digitalnu televiziju, povećane spektralne efikasnosti (mogućnost prenosa više programa u istom frekventnom opsegu) ali i poboljšanog kvaliteta.

Potrošači sve više ulažu u televizore sa velikim ekranima, što je rezultiralo većim zahtevima za kvalitet slike. U prethodnom poglavlju je navedeno da se u budućnosti očekuje da većina, ako ne i svi TV programi budu proizvedeni i distribuirani u HD kvalitetu. HD programi su već dostupni na DTT mrežama u formatima prve generacije, i emituju se uglavnom paralelno sa odgovarajućim SD programima. Očekuje se da će HD postati standard za televizijsko emitovanje, u različitim formatima. Osim toga, očekuje se da će veličina TV ekrana, smeštenog u dnevnoj sobi korisnika, nastaviti da raste. Ovo će rezultirati u potražnji za još većom rezolucijom slike. Sve relevantne TV mreže za distribuciju, uključujući i DTT, će morati da budu u stanju da podrži nove tehnologije, kao što su UHD i 3DTV.

Prijem emitovanog sadržaja na prenosive, mobilne i ručne (*handheld*) uređaje će postati sve važniji u budućnosti, kako se društva kreće sve više ka potrošnji mobilnih sadržaja. Na primer, veliki broj ljudi putuje svakodnevno između kuće i posla, provodeći sate u pokretu, i logično će izabrati da vreme utroši slušajući i gledajući emitovani sadržaj. DTT je, u Evropi u prvoj generaciji sistema, uveden preko DVB-T tehnologije i MPEG-2 kodovanja. Od tada su razvijeni efikasniji standardi prenosa i kodovanja, i obezbeđen prostor za povećanje efikasnosti i kapaciteta DTT mreža. DVB-T2 je, na primer, već uveden u mnogim zemljama. Povećan kapacitet DVB-T2 će biti neophodan za prelazak sa postojećih SD na HD formate programa.

DVB-T2, kao nova tehnologija podrazumeva dogradnju i investicije u mrežama, i što je još značajnije, zahteva od potrošača da kupi novi prijemnik. Kao što je pokazalo i iskustvo pri prelasku sa analognog emitovanja, ovo nije jednostavan proces i generalno će zahtevati dosta vremena. To je osetljivo pitanje i iz političke i tržišne perspektive, da tražite od svih gledalaca da ponovo unaprede opremu svog (digitalnog) prijemnika, ubrzo nakon prelaska sa analognog na digitalno emitovanje.

Nova tehnologija, generalno, treba da bude uvedena paralelno sa postojećom, da potrošačima pruži mogućnost investiranja u novu opremu u skladu sa njihovim željama, kao i da se postojeće usluge zadrže, paralelno, tokom prelaznog perioda. Može se očekivati da će se DTT

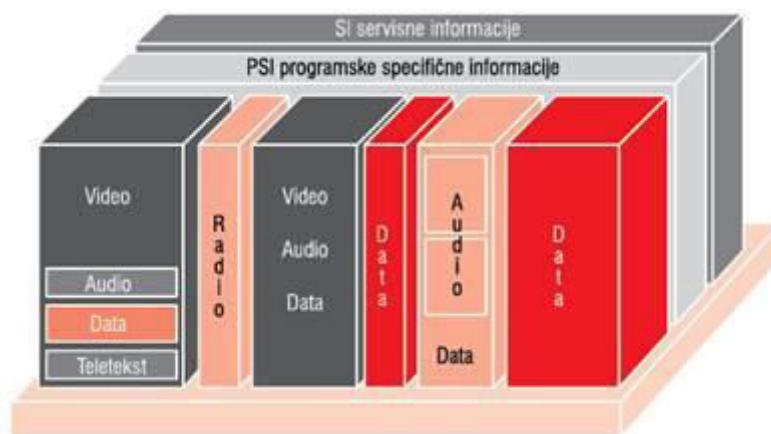
tehnologija i usluge dalje razvijati, što će stvarati periodične potrebe za nadogradnju i paralelno emitovanje postojećih usluga. Ovo zahteva odgovarajuće resurse u spektru.

Prelazak na digitalno emitovanje TV programa otvara vrata novom razvoju i novim izazovima. Može se zaključiti da uspeh DTT ne bi trebalo da bude ugrožen ograničenim mogućnostima za razvoj, ali će se problemi neminovno pojaviti ako raspoloživi spektar bude dodatno smanjen. Utoliko će problem efikasnog korišćenja spektra, u uslovima prenosa sadašnjih i budućih HD i UHD programa sa sve većom rezolucijom, pa samim tim i protokom, biti sve više aktuelan.

3.2. Elementi DVB sistema

DVB (*Digital Video Broadcasting*) su DTT sistemi koji se koriste u Evropi i još nekim zemljama u svetu. Tri najviše korišćena DVB standarda za prenos su DVB-S za satelitski, DVB-T za zemaljski i DVB-C za kablovski sistem. Ovo je i redosled kojim su razvijani. Pored DVB-T razvijene su i verzije za pokretne prijemnike kao DVB-H standard. Postoje jasni principi na kojima su ovi sistemi zasnovani, a koji su zadržani i u sistemima druge generacije DVB-S2, DVB-T2 i DVB-C2.

U postupku digitalizacije se formira izvorni signal koji ima veoma veliki protok, primera radi, 270 Mb/s u slučaju televizije SD rezolucije, odnosno 1,5 Gb/s za sadašnje formate HD programa. Prenos takvog signala do krajnjeg korisnika zahteva značajnu redukciju protoka, pa se mora izvršiti kompresija video i audio signala. Zato se u nekoliko ključnih opredeljenja za razvoj digitalnih sistema prenosa televizijskog signala, jedno od najvažnijih odnosilo na način kompresije video i audio signala. U prvoj generaciji DVB sistemi su opredeljeni za precizno definisani MPEG-2 i MPEG-4 p.10 (H.264 AVC) kompresione standarde kod prenosa SD programa. Zbog većeg protoka, komprimovanje HD servisa se najčešće vrši MPEG-4/AVC tehnikom, koja omogućava dvostruko veći stepen kompresije za isti postignuti kvalitet, a u ovom vremenu se očekuje i primena nove kompresione tehnike HEVC, koja treba da omogući emitovanje HD programa druge generacije, a kasnije i UHD programa.



Slika 3.1. Struktura DVB paketa

Važna zajednička pretpostavka prve generacije DVB sistema je paket sa zajedničkom strukturom, Slika 3.1. U njemu se komprimovani video signal multipleksira sa komprimovanim audio signalom. Dodaju im se servisni podaci i informacije vezane za televizijski program. Multipleksirani signal se prenosi u vidu paketa fiksne dužine, koji ulaze u sastav tzv. transportnog strima (*transport stream*, TS). Paketi predstavljaju „kontejnere informacija” jednakog kapaciteta, koji se kontinuirano, pa time i sinhrono šalju ka bloku za

zaštitno kodovanje. U transportni strim se ubacuju paketi više programa, kao i različiti drugi podaci. Više programa u jednom TS čine tzv. „buket multipleksa”, odnosno multipleks koji je namenjen za prenos po jednom RF kanalu. Multipleks se, generalno, može formirati na mestu produkcije programa (ako se proizvodi veći broj programa), ili kod vlasnika distribucionih kapaciteta, gde se objedinjava više programa različitih proizvođača.

U bilo kojoj varijanti, transportni strim se mora zaštititi pre emitovanja. U tu svrhu se primenjuje kanalsko kodovanje, čiji osnov predstavlja tzv. energijsko raspršivanje (*energy dispersal*), čime se postiže transparentnost sekvence bita, „nezavisna” od izvora signala. Zatim sledi Reed-Solomon kodovanje, kao zaštita od šuma, a koje dodaje izvesnu količinu bajtova svakom paketu. Time se povećava neophodni protok u prenosu. Radi zaštite od dugih sekvenci grešaka, koristi se *interleaver* (raspršivač), koji omogućava promene redosleda bajtova transportnog strima za vreme prenosa. Najzad, na izlazu, se koristi konvolucionni koder, koji dodatno omogućava zaštitu transportnog strima. Ovakvom pripremom se formira kanal sa verovatnoćom greške koja treba da bude manja od 10^{-11} . Detaljan opis mehanizma zaštitnog kodovanja biće dat u okviru analize DVB-T2 transportnog strima.

Zaštićeni signal se šalje ka predajnicima. U DVB standardima prve generacije se koriste QPSK i QAM modulacije. Prva od njih, kao robusnija, primenjuje se u satelitskom DVB-S standardu. U ostalim standardima, kablovskom DVB-C (QAM) i zemaljskom DVB-T (QAM ili QPSK), moguće je primeniti i višenivoske modulacije. Modulacijom se povorka bita pretvara u nizove simbola, pogodnih za dalji prenos.

DVB-T, kao što je rečeno, definiše emitovanje televizijskog signala zemaljskim vezama u slobodnom prostoru. S obzirom da u takvom prenosu signal od predajnika do prijemnika može doći po više različitih putanja (višestruka propagacija emitovanog signala), mogu se pojaviti smetnje koje generiše sopstvena replika (eho) signala. Kao zaštita od ove pojave usvojena je ideja proširivanja trajanja simbola. Stoga je za pristup multipleksu odabrana COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) tehnika i prenos sa velikim brojem nosilaca (2k ili 8k). Većem broju nosilaca odgovara veća dužina simbola, koja je uporediva sa raspršivanjem kašnjenja koje postoji u okruženju mreže za terestrički prenos televizijskog signala. Kako bi se pouzdano obezbedilo da kašnjenja pojedinačnih komponenta u višestrukoj propagaciji ne bi proizvela sopstvene interferencije, dodaje se zaštitni vremenski interval tako što je početni deo simbola replika kraja simbola. Ovako prošireni simbol obezbeđuje da posledice eha, koji nastaje kao kašnjenje zbog odbijanja signala o različite i različito udaljene objekte, može da se odstrani metodom smanjenja interferencije simbola. Kasnijim odstranjivanjem proširenog dela, uticaj eha, koji se manifestuje kao interferencija od prethodnih simbola, više ne predstavlja destruktivnu smetnju.

Tehnika koja obezbeđuje veliki kapacitet prenosa je COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), modulacija sa više (pod) nosilaca u kojoj se, na predajnoj strani, serijski strim podataka velike brzine transformiše u paralelne strimove podataka male brzine. Dostupni opseg kanala podeljen je na određeni broj podnosilaca (nosilaca, podkanala), gde je svaki podnosilac ortogonalan u odnosu na druge. Strimovi podataka male brzine su modulirani na ovim podnosiocima. Predajni sistem ima mnogo paralelnih elemenata podataka u bilo kom trenutku vremena, tako da će spektar svakog elementa podatka modulisanog na podnosiocu OFDM sistema zauzeti veoma mali deo dostupnog opsega. Podnosioci su modulirani u frekvencijskom domenu, a zatim se konvertuju u vremenski domen, nakon čega se dodaje zaštitni interval pre predaje. Radi potpunog eliminisanja intersimbolske interferencije, trajanje zaštitnog intervala mora biti veća od širine kašnjenja kanala. U praksi, neki podnosioci se koriste za podešavanje (estimaciju) kanala.

Tabela 3.1. Kapacitet multipleksa na jednom RF kanalu, primer scenarija fiksnog MFN, fiksnog SFN i prenosivog SFN moda DVB-T mreže

	Fiksna MFN	Fiksna SFN	Portabl SFN
Kapacitet kanala	8 MHz	8 MHz	8 MHz
FFT mod	8k	8k	8k
Zaštitni interval	1/32 (28 μ s)	1/4 (224 μ s)	1/4 (224 μ s)
Modulacija	64 QAM	64 QAM	16 QAM
Kodni količnik	2/3	2/3	2/3
C/N	19.3 dB	19.3 dB	14.2 dB
Kapacitet (protok) po multipleksu	24.1 Mbit/s	19.9 Mbit/s	13.3 Mbit/s

U DVB-T standardu broj ortogonalnih podnosilaca može biti 8k (u slučaju terena koji izaziva veća kašnjenja), ili 2k. U prvom slučaju za korisne sadržaje koristi se 6817 a drugom 1705 podnosilaca, koji su razdvojeni sa približno 4kHz odnosno 1kHz. Modulacijske šeme koje se ovde koriste su QPSK, 16QAM i 64QAM. Primer parametara DVB-T višefrekvencijske mreže za fiksni prijem signala (MFN), DVB-T jednofrekvencijske mreže za fiksni prijem signala (SFN) i DVB-T mreže u SFN režima za prenosivi prijem prikazani su u Tabeli 3.1. a preuzeti su iz [9].

3.3. Funkcionisanje DVB-T2 sistema

Sistem druge generacije DVB-T2 je razvijen sa ciljem da unapredi emitovanje, a pre svega omogući veći protok za emitovanje HD programa, Namenjen je korisnicima sa fiksnim i pokretnim antenama. Postavljeni ciljevi odnosili su se na povećanje kapaciteta u odnosu na DVB-T za 30%, unapređenje SFN mreže i uvođenje novih frekvencijskih opsega. Rezultati koje je novi sistem pokazao u mnogome su prevazišli očekivanja.

DVB-T2 je uveo nove mehanizme za unapređenje robusnosti sistema. Omogućio je nekoliko nivoa zaštite, koji se mogu kombinovati u zavisnosti od servisnih zahteva. Primera radi mogu se istovremeno emitovati programi sa robusnošću za fiksne antene, a drugi sa (mnogo većom) robusnošću za portabl ili mobilni prijem.

U odnosu na DVB-T dodat je još jedan, viši nivo modulacione konstelacije 256-QAM, uvedeni su IFFT i FFT modovi sa 16k i 32k OFDM podnosilaca, tri nove dužine zaštitnih intervala, nove šeme pilota i novi frekvencijski opsezi. U sprezi sa ovim predlozima povećana je robusnost sistema novim tehnikama kao što su: rotacija konstelacije i vremensko pomeranje u prenosu realne i imaginarne komponente signala. Smišljena su i dva načina smanjenja PAPR, prevelikog odnosa vršne i srednje snage OFDM multipleksiranog signala. Predložen je i MISO transmisioni mod istovremenog prijema sa dva predajnika.

Na fizičkom sloju (*PHY layer*), uvedene su tehnike grupisanja programa sa istim emisionim zahtevima, kao i dodatne mogućnosti vremenskog i frekvencijskog raspršivanja podataka nekog programa. Raspršivanje (*Interleaving*), kao zaštita od selektivnih smetnji postoji na nivou bita, ćelije u vremenu i prostoru.

Posebno se korisnim pokazalo novo (a od ranije poznato) kanalsko kodovanje već utemeljeno DVB-S2 standardom, koji se pojavio 2003. godine. U teoriji poznat kod za proveru parnosti sa niskom koncentracijom (LDPC – *Low Density Parity Check*), kao jedna od metoda za prenos signala u prisustvu šuma, predložen je za zaštitu komprimovanog video i audio signala. LDPC ne može da garantuje savršen prenos, ali je verovatnoća gubitka podataka značajno smanjena. LDPC je kod koji obezbeđuje kapacitet kanala blizak Shannon-ovoj granici. Razvio ga je Gallager 1963, a zatim je skoro potpuno zaboravljen. Sledećih trideset godina u teoriji informacija se nije pojavio nijedan kod približne efikasnosti. Godine 2003. LDPC je izabran, između šest turbo kodova, za novi DVB-S2 standard. Da bi se uklonile sve preostale greške nakon LDPC dekodovanja, podaci se štite dodatnim kratkim kodom BCH (*Bose, Chaudari, Hocquenghem*), koji spada u grupu cikličnih kodova, i služi za korekciju višestrukih grešaka. Konkatenirani BCH spoljašnji kod je uveden kako bi se postigla što manja verovatnoća greške, BER (*Bit Error Ratio*).

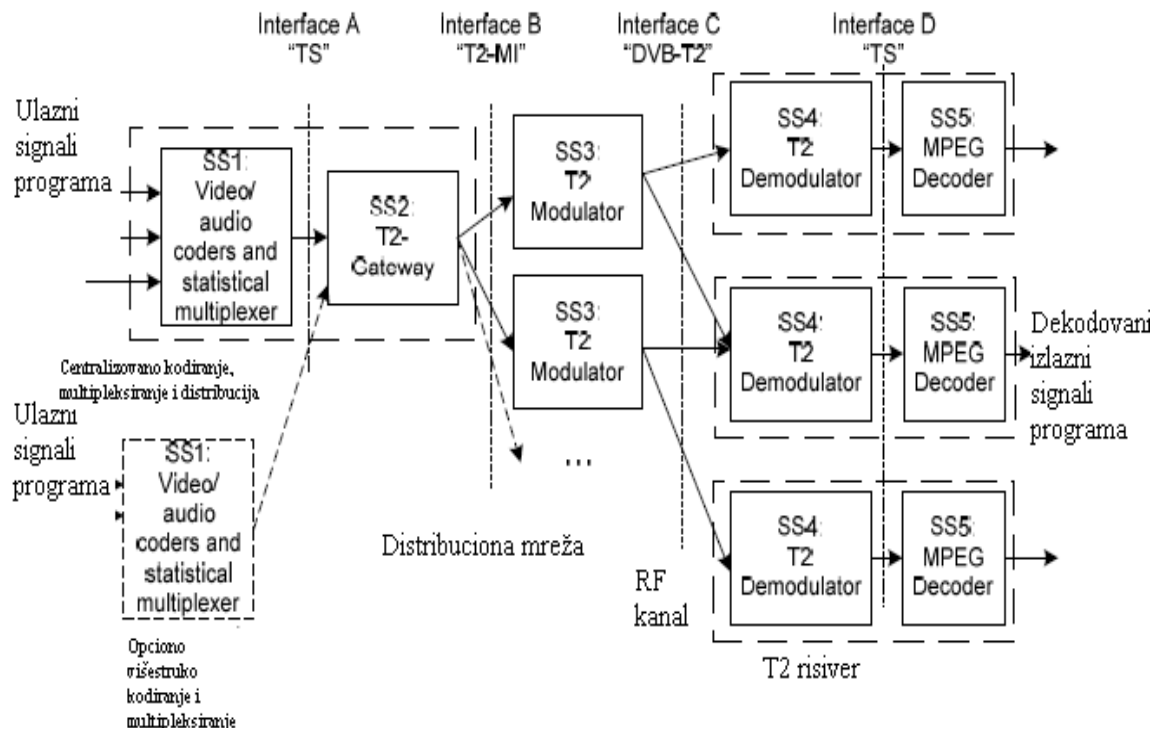
Tabela 3.2. Kapacitet multipleksa na jednom RF kanalu, primer scenarija fiksnog MFN, fiksnog SFN i prenosivog SFN moda DVB-T2 mreže, procena za nekoliko godina

	Fiksna MFN	Fiksna SFN	Portabl SFN
Kapacitet kanala	8 MHz	8 MHz	8 MHz
FFT mod	32k	32k	16k
Mod podnosilaca	Prošireni	Prošireni	Prošireni
Shema rasejanih pilota	PP7	PP4	PP3
Zaštitni interval	1/128 (28μs)	1/16 (224 μs)	1/8 (224 μs)
Modulacija	256 QAM	256 QAM	64 QAM
Kodni količnik	2/3	2/3	2/3
C/N	20.0 dB	20.8 dB	17.9 dB
Kapacitet (protok) po multipleksu	40.2 Mbit/s	37.0 Mbit/s	26.2 Mbit/s

DVB-S2 je omogućio povećanje protoka u televizijskom kanalu za 30%, u odnosu na prethodnu generaciju. Taj iznos poboljšanja je postavljen kao uslov u razvoju zemaljskog standarda druge generacije, DVB-T2. Imajući u vidu mogućnost povećanja broja nosilaca u COFDM prenosu, kao i druga poboljšanja o kojima će biti reči, može se objasniti neverovatno dobar rezultat od preko 50% povećanja protoka. Stoga se smatra da je DVB-T2 jedan od najefikasnijih načina prenosa digitalnog video sadržaja. Eksperimenti su potvrdili taj rezultat. Primeri parametara DVB-T2 za MFN i SFN mreže, kao i DVB-T2 mreže u SFN režimu za portabl ili mobilni prijem prikazani su u Tabeli 3.2 i preuzeti su takođe iz [1] i [3]. Treba napomenuti i da ispitivanja prijema mobilnih korisnika uz primenu parametara portabl mreža daje dobre rezultate [23].

Struktura T2 sistema je predstavljena na Slici 3.2. Ulaz sistema može biti jedan ili više MPEG-2, MPEG-4 ili budućih HEVC transportnih strimova, ili jedan ili više generičkih strimova (sa nekom drugom vrstom podataka). Ulazni predprocesor, koji nije deo T2 sistema,

može da sadrži i razdelnik programa ili demultiplekser za transportne strimove (TS) za razdvajanje i demultipleksiranje programa na ulazu T2 sistema. Potom se formira više logičkih strimova, tako da svaki strim nosi programe koji imaju iste zahteve. Svaki logički strim se prenosi posebnim logičkim kanalom, PLP-om (*Physical Layer Pipes*).



Slika 3.2. Blok šema uobičajenog DVB-T2 lanca

Izlaz sistema je obično jedan signal koji se, preko jednog seta antena, prenosi na jednom RF kanalu. Opciono, sistem može da generiše drugi set izlaznih signala, koje će se prenositi po drugom setu antena, što se zove MISO (*Multi Input Single Output*) način prenosa. Primenljiv je kod SFN mreža i podrazumeva da se signal u jednom obliku šalje na jednu grupu SFN predajnika, a namenski modifikovan (slično Alamouti načinu) drugi signal paralelno i sinhronizovano se šalje na drugu grupu predajnika. Prijemnik (prijemna antena) prima signale sa obe grupe predajnika. Ovakvo kombinovanje signala teorijski omogućava da se poboljšaju performance prijema u pogledu odnosa signal-šum za oko 3 dB, ali u praksi ovakav efekat još nije potvrđen.

Osnovni DVB-T2 dokument EN 302 755 definiše profil koji uključuje vremensko segmentiranje (deljenje), tzv. slajsovanje (*Slicing*). Podaci (a potom i signali koji ih prenose) nekog programa se dele i raspoređuju (razbacuju) i u vremenskom i frekvencijskom domenu. Ovo se radi u cilju zaštite od impulsnih smetnji (neki uređaji kratkog dometa npr. *bluetooth* rade na ovom principu). U dokumentu EN 302 755 je detaljno razrađen, ali nije obavezujući, i princip vremensko-frekvencijskog cepanja (segmentiranja, „slajsovanja“) TFS (*Time Frequency Slicing*). To podrazumeva da se princip cepanja primeni ne samo u okviru jednog RF kanala, već da se proširi na grupu RF kanala, čime se postiže zaštita od frekvencijski selektivnih smetnji. Rad opreme koja bi dozvolila buduću implementaciju TFS-a može se naći u Aneksu E. TFS nije predviđen za prijemnike sa jednim tjunerom.

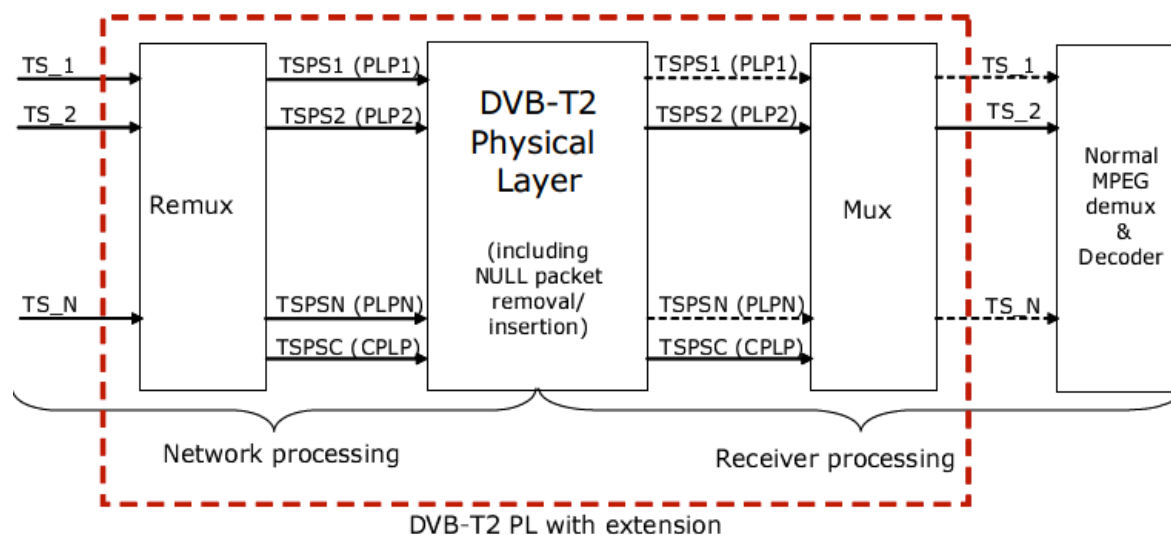
Ulazni strimovi sa podacima podležu ograničenju da, tokom trajanja jednog rama fizičkog sloja (T2 ram), ukupan kapacitet podataka (u smislu protoka ćelija, nakon brisanja null-paketa, ako su bili potrebni, a posle kodovanja i modulacije), ne može biti veći od

raspoloživog memorijskog kapaciteta T2 prijemnika, u smislu ćelija koje se privremeno memorišu za vreme prijema T2 rama. Tipično, to se može postići organizovanjem PLP-ova u grupe PLP-ova koji sadrže programe koji koriste iste modulacije i kodovanja (MODCOD) i istu dubinu interleavinga (učešljavanja). Jasno je da dubina interlivinga direktno utiče na zauzimanje memorije.

Svaka grupa PLP-ova može da sadrži jedan zajednički PLP, kao što neke grupe PLP-ova ne moraju da sadrže zajedničke PLP-ove. Zajednički PLP nosi, signalne i druge podatke koji su isti, a kao važni moraju se preneti robusnijom modulacijom i boljom FEC zaštitom. Kada DVB-T2 signal nosi jedan PLP tada nema zajedničkog PLP-a. Pretpostavlja se da će prijemnik uvek biti u stanju da primi jedan PLP i njegov zajednički PLP, ako ih ima.

Statističko multipleksiranje je unapređeni način rada gde se na ulazu u T2 sistem prati ukupan protok i protok po svakom programu, na bazi čega multiplekser šalje upravljačke poruke kompresionim koderima kako bi se u realnom vremenu podesio stepen komprimovanja izvornog toka, tako da u svakom trenutku bude iskorišćen ceo kapacitet multipleksa.

Uopšteno, grupa statistički multipleksiranih usluga može koristiti različito kodovanje i modulaciju za različite programe, i imati stepen komprimovanja primeren trenutnim saobraćajnim zahtevima programa, pod uslovom da generiše konstantan ukupan izlazni kapacitet. Na Slici 3.3, preuzetoj iz Aneksa D razvojne DVB-T2 specifikacije [1], je ilustrativno prikazan prenos više TS preko grupe PLP, od kojih svaki može imati različite parametre u skladu sa zahtevima. Naravno u okviru svakog PLP programi se emituju sa istim parametrima. Kada se više ulaznih MPEG-2 (MPEG-4) transportnih strimova prenosi preko grupe PLP-ova, ulazni strimovi se dele u tzv. TSPS strimove (*Transport Stream Partial Stream*) koji se prenose preko PLP-ova podataka i TSPSC strim (*Transport Stream Partial Stream Common*) koji se prenosi preko pripadajućeg zajedničkog PLP-a. Ova ulazna obrada se vrši u predprocesoru, koji je onda sastavni deo proširenog DVB-T2 sistema.



Slika 3.3. Ulazna obrada više TS za prenos preko zajedničkog PLP-a i grupe PLP-ova podataka

U DVB-T2 razvojnoj specifikaciji [1], sekcija 4.1 je navedeno i da maksimalni ulazni protok bilo kog transportnog strima (uključujući pakete sa nulama) za kanal opsega 8 MHz iznosi 72 Mbit/s, a nakon brisanja paketa sa nulama preko 50 Mbit/s. Rezultati pokazuju da ako je primljeni signal iznad C/N+I praga (*Carrier-to-(Noise+Interference) ratio*), usvojena tehnika korekcije greški, FEC, će omogućiti prijem bez greške (QEF - *Quasi Error Free*).

Za neke od analiza u ovom radu od interesa su mogućnosti DVB-T2 sistema, nasleđene od DVB-T i dodatno unapređene, da formiraju SFN mreže. Ove mreže mogu biti manje ili veće i formiraju se u skladu sa geografskim, ekonomskim, političkim ili nekim drugim uslovima, na lokalnom, regionalnom ili nacionalnom nivou. Predajnici u okviru mreže se moraju sinhronizovati tako da emituju signal na istoj frekvenciji, u istom trenutku i u istoj strukturi. Za ovu namenu koriste se SFN adapteri, koji u TS ubacuju tzv. MIP pakete (*Megaframe Initialization Packet*) koji sadrže potrebne signalizacije i sinhronizacione parametre i informacije. Emitovanje signala na istoj frekvenciji znači uštedu u korišćenju frekvencijskih resursa i povećanje spektralne efikasnosti sistema. S druge strane sinhronizacija zahteva složeniji i skuplji sistem za emitovanje. U pogledu kapaciteta kanala na pojedinačnom predajniku, u Tabelama 3.1 i 3.2 je vidljivo da je, u odnosu na MFN mreže, produžen zaštitni interval u okviru OFDM simbola. Time se smanjuje kapacitet za nekoliko Mb/s u pojedinačnom RF kanalu, ali se dobija na raspolaganje veći broj RF kanala.

Postoje razmatranja koja su usmerena na to da se navedene, izuzetno korisne tehnike, uvedene u DVB-T2, maksimalno iskoriste u funkciji povećanja kapaciteta kanala.

4. *Multipleksiranje HD programa*

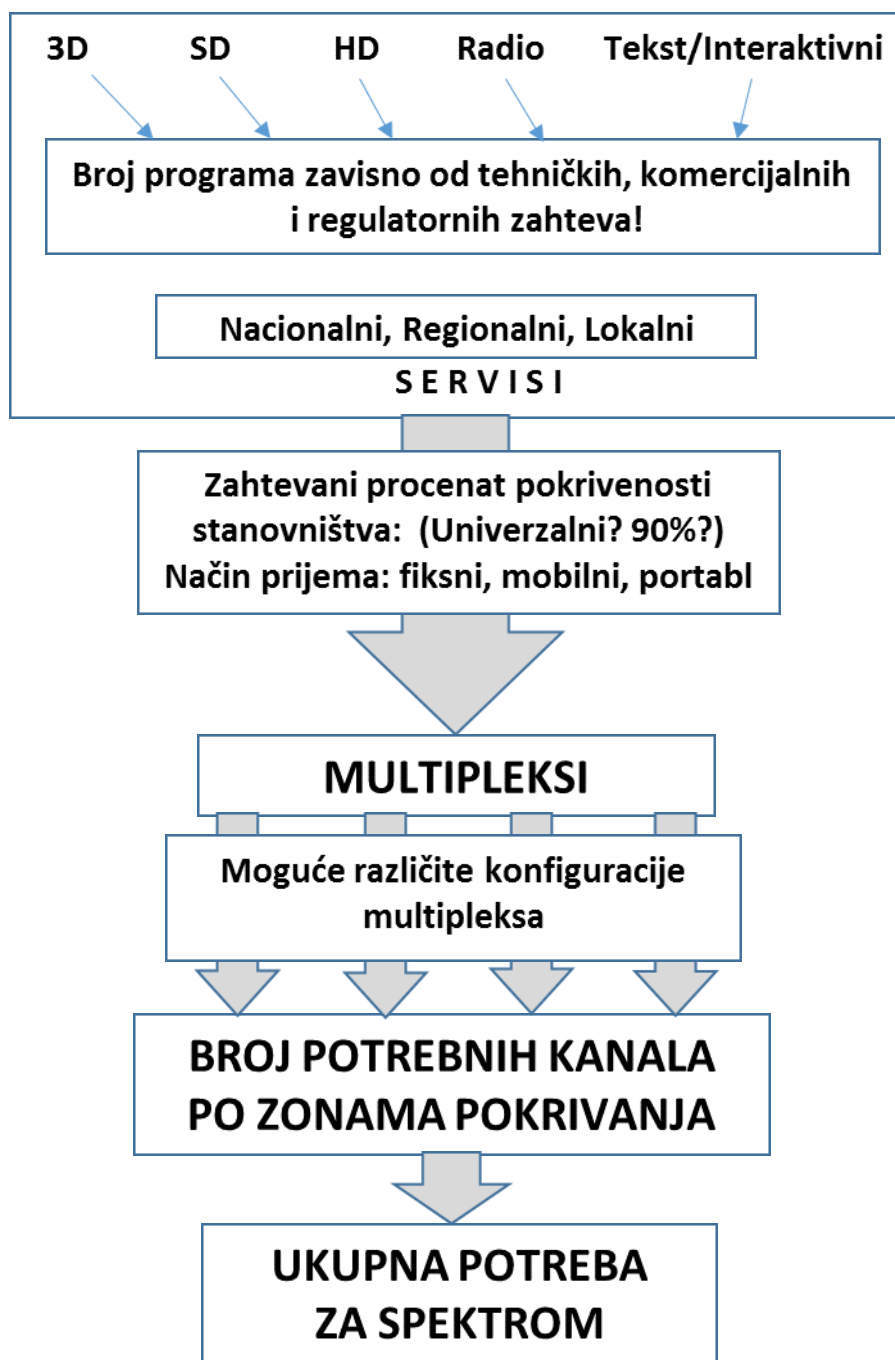
4.1. Multipleks programa

Broj televizijskih programa koji se prenose terestrički u najvećoj meri zavisi od frekvencijskog spektra, raspoloživog za TV emitovanje. Osim spektra, treba da se uzmu u obzir i način prijema (prenosni/ mobilni/ fiksni) i zahtevana pokrivenost (univerzalna, 90% ili druge). TV programi i, eventualno, drugi sadržaji se grupišu u multiplekse, celine čiji je protok tako odmeren da se tehnikom prenosa, npr. DVB-T2, može emitovati po jednom RF kanalu. Tako, od broja smeštenih programa u multipleks i raspoloživog spektra (broja multipleksa) zavisi i ukupan broj prenetih programa.

Slika 4.1, preuzeta iz [1], grubo pokazuje faktore koje treba razmotriti prilikom proračunavanja potrebnog spektra. Nakon definisanja broja SD i HD programa, kao i ostalih usluga na nacionalnom, regionalnom i lokalnom nivou, koje neka platforma treba da prenese vrši se kalkulacija potrebnih kapaciteta. U obzir se, osim broja i formata programa, uzima i način na koji se vrši kompresiono kodovanje. Na osnovu plana pokrivanja terena, namene mreže i vrste prijemnika, biraju se parametri za kanalsko kodovanje, u ovom slučaju DVB-T2. Očekivanom ukupnom protoku se dodeljuje potreban kapacitet. Kapacitet je izražen kroz broj multipleksa koji će biti emitovani po istom broju RF kanala, čime definišemo frekvencijski opseg potreban za prenos planiranih usluga.

SD programi imaju relativno male protoke i savremenim tehnikama koje koristi DVB-T2 može se u okviru jednog multipleksa preneti 14-18 programa i postići zadovoljavajuća efikasnost iskorišćenja kapaciteta RF kanala. Već je rečeno da programi u aktuelnom SD formatu, u cilju povećanja kvaliteta usluga, treba postepeno da migriraju na neki od ranije navedenih HD formata. Suštinski problem, ili bolje reći, izazov, jeste kako što veći broj programa HD formata preneti do krajnjih korisnika. Povećani kvalitet, odnosno, povećana rezolucija zahteva 2-3 puta veći bitski protok. DVB-T2 mreže, premda najmoćnije u ovom

trenutku, će se morati suočiti sa tim izazovom, i kroz eksploataciju unapređivati, paralelno sa sve većim procentualnim učešćem HD programa.



Slika 4.1. Šema određivanja potrebnog radio-frekvencijskog spektra

Problematika budućeg emitovanja TV programa se svodi na procenu povećanja izvornog protoka HD usluga, poboljšavanja efikasnosti kompresionih tehnika i performansi digitalnih mreža koje se koriste za prenos. U ovom radu će se posmatrati mogućnosti DVB-T2 mreže, a u kontekstu procene ostala dva faktora: povećanja broja HD programa i razvoja kompresionih tehnika.

Već je rečeno da tehnike za kodovanje izvornog video i audio sadržaja nisu deo specifikacija mreža za emitovanje po kanalima (kodovanje kanala). DVB-T2 podržava obe aktuelne tehnike MPEG-2 i MPEG-4, kao što će podržavati i očekivani HEVC. Ali sve ove tehnike, npr. MPEG-4 sada i HEVC u neposrednoj budućnosti, nisu nužno u skladu sa postojećom opremom u prijemu, što zahteva ulaganja na strani korisnika. O navedenim tehnikama i mogućnostima DVB-T2 sistema da odgovore povećanim saobraćajnim zahtevima biće reči u nastavku ovog rada.

4.2. Kompresione tehnike

Praksa pokazuje da nove kompresione tehnike počinju da se primenjuju svakih 10 godina. U početku implementacije DTT, pa i DVB mreža primenjena je MPEG-2 kompresiona tehnika za kodovanje SD programa, koja datira, načelno, iz 1993. godine. HD programi kodovani koristeći MPEG-4 (H.264/AVC) su punu primenu počeli 2003. U vreme pisanja disertacije (2015. godina) uočljiv je stalni napredak u procentu emitovanih HD programa u formatima 720p/50 i 1080i/25 i primene MPEG-4. Emituje se po neki 3DTV program, koji za osnovu ima navedene HD programe. Očekuje se početak emitovanja programa u formatu 1080p/50, kao i da će to biti format koji će po performansama moći da u dužem periodu zadovolji zahteve korisnika. Uz emitovanje ovog formata vezuje se i početak primene HEVC standarda, usvojenog 2013. godine.

Od svake nove tehnike kodovanja se očekuje da dvostruko smanji potreban protok u odnosu na prethodnu verziju kompresionog standarda, zadržavajući pri tome perceptualno isti kvalitet videa. To se očekuje i od HEVC-a, a eksperimentalni rezultati ispitivanja to i potvrđuju. Ulažu se napor i da se istovremeno unapredi i kvalitet prikaza tehnika kodovanja 3D sadržaja. Definisane su specifikacije koje omogućavaju prikaz sa više pogleda, što bi sliku približilo prirodnom načinu trodimenzionalnog opažanja. Tehnike kompresije, i stare i nove, se kroz primenu unapređuju, evoluiraju. To se očekuje i od HEVC-a, naročito u pogledu efikasnosti kompresije 3D i programa u UHD rezoluciji.

U digitalnim komunikacijama, pa i u prenosu video signala, signali se komprimuju kako bi se efikasno iskoristio propusni opseg. U video kompresiji video sekvenca može biti kodovana na konstantnu vrednost bitskog protoka (*Constant Bit Rate*, CBR) ili na promenljivi protok bita (*Variable Bit Rate*, VBR). Sa sličnom srednjom vrednosti protoka VBR bitski potoci troše više resursa u pogledu propusnog opsega i unose veće kašnjenje od CBR protoka.

U CBR strimu kontroler strogo kontroliše protoke podešavanjem kvantizacionog parametra (QP) kojim se direktno utiče na kvalitet kodovanog video sadržaja, odnosno protok kodovane video sekvence. Svakom programu se dodeljuje fiksni, sopstveni, kapacitet u okviru ukupnog kapaciteta RF kanala. Generalno, CBR zahteva velike varijacije QP, pa samim tim i varijacije u video kvalitetu, posebno ako je dozvoljeni kapacitet protoka nizak. Ako je ta margina veća onda postoji bojazan da će efikasnost korišćenja kapaciteta biti mala.

VBR kodovanje video sekvence može da se obavlja sa ili bez kontrolera protoka. U neupravljanoj VBR kompresiji koristi se konstantna vrednost QP, koji omogućava kvazi-konstantan i veoma dobar vizuelni kvalitet komprimovanog videa. U upravljanoj VBR, kontroler podešava QP sa ciljem da umanjí oscilacije u protoku, a da zadrži kvalitet prenosa. Generalno, u poređenju sa CBR, upravljani VBR može da obezbedi bolji kvalitet prikaza, ali ima i veće varijacije protoka. S druge strane, u poređenju sa neupravljanim VBR, upravljani VBR ima manje varijacije u protoku, ali i veće promene u kvalitetu.

U emitovanju TV signala, izvori se koduju na više načina. Standardan način kodovanja je sa CBR protokom. Naravno poželjno je kodovati sa VBR bitskim potokom da bi se obezbedio bolji prosečni kvalitet emitovanih usluga. To onda povlači potrebu za više resursa u pogledu kapaciteta prenosa, kao i veći kapacitet memorije (više kašnjenja) u odnosu na CBR kodovanje. Međutim, situacija se menja kada se istovremeno emituje više VBR video usluga, i kako do izražaja dođu statistička svojstva VBR kodovanog sadržaja. Zbir više zajedno kodovanih VBR sadržaja sa statistički nezavisnim promenama protoka, što i jeste slučaj kod različitih TV programa, ima mnogo manju disperziju od pojedinačnih VBR kodovanih programa. Iskustva u primeni [7] i rezultati simulacije [25] pokazuju da ova osobina može da obezbedi visoke performanse u pogledu efikasnosti korišćenja kapaciteta kanala, smanji kašnjenje s kraja na kraj, i poboljša kvalitet videa u sistemima za emitovanje HD usluga. Efekti ovakvog multipleksiranja u zavisnosti od broja programa biće razmotreni u sekciji 4.3.

Za video signal proces dekodovanja u prijemniku je standardizovan. Pošto postoji više tehnika koje se koriste u procesu kodovanja i prijemnik mora da ih sve podrži. U početnim implementacijama novih tehnika enkodera, međutim, zbog tehničkih ograničenja, npr. procesorske snage, nisu sve tehnike na raspolaganju, ili pak nisu sve mogućnosti dekodera u potpunosti iskorišćene. Vremenom se sve ovo usaglasi, što onda omogućava smanjenje bitskog protoka, održavajući istovremeno isti kvalitet slike ili, alternativno, zadržavajući isti bitski protok, pri čemu se povećava kvalitet slike.

4.2.1. MPEG-2 (H.262) i MPEG-4 p.10 (H.264/AVC)

MPEG-2 i MPEG-4 p.10 imaju istu osnovnu arhitekturu kodovanja. Međutim, oni se razlikuju u detaljima sastavnih delova te arhitekture: kompenzaciji pokreta, blokovskoj transformaciji, promenljivoj dužini kodovanja, itd. Noviji, MPEG-4 ima sposobnost da se dobije isti kvalitet videa sa upola manjim bitskim protokom. To je važno tehnološko poboljšanje za prenos, pre svega HD usluga, kroz bilo koji medijum, a naročito za zemaljsko radiodifuzno emitovanje.

MPEG-4 kodeci koriste različite profile za kodovanje videa. Postoji više tehnika kodovanja i algoritama. Osnovni kompromis za većinu od njih je poboljšan kvalitet, ali i složeniji izlazni bitski niz, koji je teže dekodovati. Kvalitetnije kodovanje zauzima veći memorijski prostor i unosi veće kašnjenje.

Izborom profila se precizira koji se od raspoloživih tehnika i algoritama mogu koristiti za kreiranje bitskog niza. Profili predstavljaju pogodnu tačku konvergencije za proizvođače uređaja i video sadržaja. Na primer, Osnovni profil (*Baseline profil*) je najjednostavniji profil i pretežno se koristi kod uređaja malog protoka, ne uključuje upotrebu B-ramova ili CABAC (*Context-based Adaptive Binary Arithmetic Coding*). B-ramovi (*Bi-directional predicted frames*) dodatno poboljšavaju predikciju na osnovu većeg broja susednih ramova, a CABAC je prilagodljivo binarno aritmetičko kodovanje bazirano na sadržaju, koje postiže veću kodnu efikasnost primenom kompleksnijih algoritama. Kvalitet kompresije kod osnovnog profila je i dalje dobar, ali ne toliko kao kod protoka proizvedenih korišćenjem Glavnog (*Main*) ili Visokog (*High*) profila, koji primenjuju obe navedene tehnike.

MPEG-4 p.10 standard je predvideo da se multimedijalni sadržaj koji se njime koduje može prenositi internetom. Skalabilnost se postiže tako što je na raspolaganju povratni kanal kojim se šalje informacija o zagušenjima na mreži i tako vrši podešavanje protoka kodovanog signala. Komprimovani podaci se prenose u dva nivoa, odnosno preko dva bitska pod-strima, osnovnom i obogaćenom, koji doprinosi poboljšanju kvaliteta, ali i povećava ukupni protok. Protok na ovom drugom će zavisiti od opterećenja Internet mreže. Prijemnici koji ne podržavaju ovaj drugi nivo primaće samo komprimovane podatke u osnovnom nivou. Za

razmatranja u ovom radu je interesantno da se na sličan način, kroz saradnju kanalskog koda i kompresionog koda izvora signala, postižu efekti statističkog multipleksiranja u DVB-T2 mrežama. Ova tematika je razmotrena u tački 4.3.

4.2.2. H.265/HEVC

Moving Picture Experts Group (MPEG) je razvio novi standard za kodovanje video signala visoke efikasnosti, HEVC (*High Efficiency Video Coding*), čija se primena upravo očekuje, a treba da postane dominantna u sledećih nekoliko godina. Eksperimentalna istraživanja daju osnova da se očekuje dvostruko veća kompresija od MPEG-4 standarda. Sa namerom da postane naslednik MPEG-4, MPEG grupa je razvila specifikacije za skalabilno video kodovanje, SVC, (*Scalable Video Coding*) kojim će se omogućiti distribucija i emitovanje HD, ali i UHD programa u više nivoa kvaliteta, zavisno od odluke emitera i mogućnosti da se obezbedi odgovarajući protok.

U ovom trenutku se protok 4k formata kodovanog HEVC koderima spustio na 20-25 Mbit/s, dok je protok 8k na oko 40-50 Mbit/s. Ovo su i dalje veoma visoki protoci. Kapaciteti multipleksa koji prenose ove programe se kreću orijentaciono od 25-50 Mb/s. Postavlja se pitanje: da li će HEVC uspeti da učini mogućim masovnije emitovanje programa UHD formata? Realno je uzeti u obzir dinamiku, tj. da će distribucija i emitovanje HD 1080p uskoro započeti, kao i da će uvođenje UHD ići kasnije i postupno, prvo u formatu 4k. Treba očekivati da će se, kao i kod MPEG-4, tehnika HEVC stalno usavršavati. Takođe ne treba ispustiti iz vida da se kompresiona tehnologija razvija u ciklusima i da se do masovne upotrebe 4k formata i upotrebe 8k može očekivati razvoj nove generacije kompresionih sistema.

Krajem 2014. i u prvoj polovini 2015. god. završen je razvoj HEVC koji treba da omogući kodovanje 3D programa. Cilj je da se omogući skalabilno kodovanje, video kodovanje sa više pogleda (*Multi-View*, MV-HEVC), kao i da se omogući analiza dubine slike (*Additional 3D-HEVC*). Očekuje se da će stereoskopski 3D HEVC kodovani programi zahtevati oko 140-170 % od bitske brzine odgovarajućeg 2D programa, tako da će, okvirno, protok potreban za dve 3D usluge biti isti kao za tri normalne 2D usluge.

U tačkama 2.3 i 2.4 je rečeno da će format 1080p za duži period obezbediti izuzetan kvalitet slike. Poboljšanje kvaliteta u korišćenju 4k formata, sa aspekta povećanja rezolucije se može osetiti na izuzetno velikim ekranima i eventualno, na prenosivim uređajima koji imaju veće displeje, a slika se posmatra iz neposredne blizine.

U svetlu procene o skorom početku emitovanja formata 1080p, u analizama i proračunima koji slede posmatraće se MPEG-4 i HEVC kodovani programi u formatima 720p, 1080p, 3DTV na bazi 1080p i 4k formati. Nezavisno će se izvršiti i analiza smeštanja 4k i 8k programa u malo daljoj budućnosti, kad HEVC kodovanje postigne još bolju efikasnost.

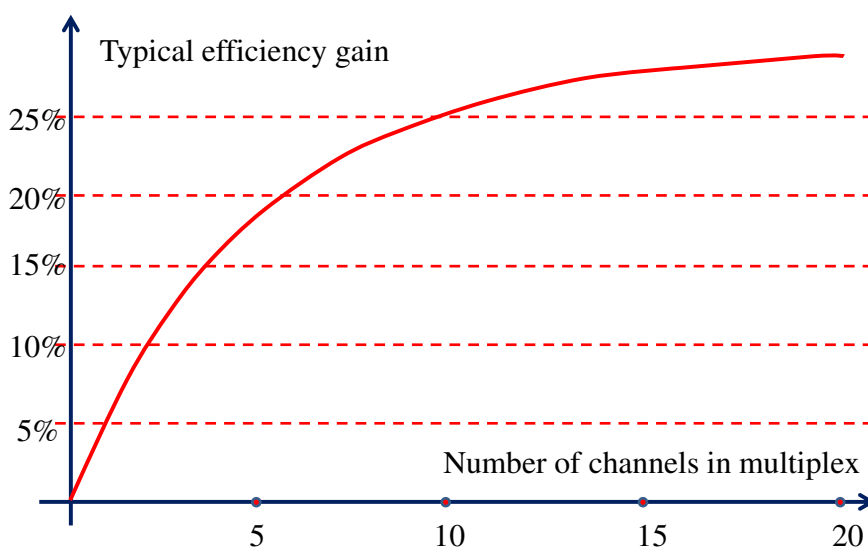
4.3. Statističko multipleksiranje

Bitska brzina izvornog toka svakog programa je konstantna, i zavisno od formata, može imati protoke i od više Gbit/s. Međutim, u zavisnosti od video sadržaja, protok komprimovanog signala varira u vremenu, pa je neophodno tako ga i preneti, ako želimo da prenos bude bez gubitka kvaliteta.

Kao što je navedeno u tački 4.2 različiti programi u jednom paketu multipleksa u određenom trenutku imaju različite, nezavisne promene protoka. Osim toga, sadržaje prenošenih

programa (sport, informativne emisije, slike prirode i sl.) karakteriše različito ponašanje komprimovanog bitskog protoka u vremenu, kako u smislu varijacije tako i u smislu prosečnog intenziteta protoka. Zavisnost protoka programa od „žanra“ se koristi za izbor programa u pojedine multiplekse, a varijabilnost protoka za primenu tehnike Statističkog multipleksiranja programa (*Statistical Multiplexing, StatMux*).

Kao što je kratko objašnjeno u poglavlju 2, saradnjom opreme multipleksera i kompresionih koda postiže se da ukupan protok u multipleksu ima manju disperziju, što doprinosi boljem korišćenju kapaciteta dodeljenog RF kanala i povećanju broja programa koji se u njega smeštaju. Koristi se činjenica da su oscilacije protoka pojedinih programa nezavisne, i da, uz veliki broj programa i postizanje statističke ravnoteže, ukupan zbirni protok u multipleksu postaje uravnotežen i skoro konstantan, iako je protok pojedinih programa promenljiv. U krajnjem je potrebno da se statistički multipleksira dovoljno programa, kako bi protok imao skoro konstantnu vrednost. Ukupan protok zavisi od protoka pojedinačnih programa, pre svega od njihovog formata, a u izvesnoj meri i od prirode video sadržaja koji se prenosi (žanra). Ako su nam te vrednosti protoka poznate može da se definiše kapacitet kanala, u koji se može smestiti multipleks programa tako da kapacitet bude potpuno iskorišćen. Suštinski se tradicionalni princip kompresionog kodovanja sa fiksnim protokom po programu, CBR, menja u kodovanje sa promenljivim protokom po programu, VBR. Pri tome je protok na nivou multipleksa konstantan, CBR i približno jednak kapacitetu koji omogućava RF kanal.



Slika 4.2. Dobitak u efikasnosti sa primenom statističkog multipleksiranja

Proces se usložnjava potrebom za dekomprimovanjem protoka dolaznih programa, koji se, naravno, dopremaju komprimovani, radi njihovog zajedničkog komprimovanja i multipleksiranja, Eventualni problemi mogu se pojaviti ako je taj program zaštićen (skremblovan). Sve ovo zahteva veću procesorsku snagu opreme i potpunu saradnju sa proizvođačima sadržaja.

Statističko multipleksiranje svodi protok video podataka koji treba dodeliti svakom programu na srednju vrednost protoka tog programa, dok se u sistemu CBR svakom programu mora dodeliti veći kapacitet od srednje vrednosti zbog promenljivosti njegovog protoka. Ovaj efekat naziva se Dobitak u efikasnosti ili Dobitak statističkog multipleksiranja. Na Slici 4.2, preuzetoj iz [7], sekcija 3.3.2, prikazana je, na osnovu praktičnih rezultata izvedena, zavisnost ovog dobitka od broja programa. U istom radu je potvrđeno da su vrednosti dobitaka nezavisne od formata programa. Dakle, statističke karakteristike protoka HD ili UHD

programa iste su kao i kod SD programa. Ova zavisnost je prihvaćena i u radovima [1] i [9], pa će se koristiti u proračunima i u ovoj disertaciji. U literaturi postoje i optimističnije procene [3] sa većom stopom efikasnosti.

Slika 4.2 pokazuje da se može očekivati dostizanje saobraćajne ravnoteže sa više od 15 programa u multipleksu. Kako se slika tumači? Ako se, primera radi, u multipleks smešta 10 programa, onda će za isti kvalitet prenosa pri primeni statističkog multipleksiranja biti potrebno obezbediti za 25% manji kapacitet prenosa u odnosu na multipleks u kome se programima dodeljuje fiksna vrednost protoka. Kada je kapacitet RF kanala definisan, što je slučaj kod prenosa DVB-T2 kanalima, dobitak se onda pretvara u dodatni broj programa. U razmatranju u ovom radu tretirano je da se sa 15-20 programa postiže zadovoljavajuća, a sa preko 20 programa potpuna efikasnost iskorišćenja kapaciteta.

4.4. Bitski protoci HDTV programa

Nakon definisanja koliko SD i HD programa treba da se emituje sa nekog predajnika, potrebno je izvršiti analizu i proračun ukupnog bitskog protoka koji ti programi zahtevaju s obzirom na izvorni protok i izabrano kompresiono kodovanje. Već je konstatovano da je u ovom trenutku implementacija DTT usluga najčešće povezana sa izborom MPEG-2 ili MPEG-4 za kodovanje SD programa, dok su HD programi skoro isključivo kodovani MPEG-4 tehnikom. Kanalsko kodovanje se vrši uglavnom DVB-T, a u porastu je uvođenje nove, DVB-T2 generacije.

Tabela 4.1, preuzeta iz [1], pokazuje tipične bitske protoke za MPEG-4 kodovane programe SD i HD formata prve i druge generacije. Iako video signal zauzima daleko najveći deo raspoloživog bitskog protoka, postoji drugi podaci koji takođe treba da se prenose:

- Audio: 0,2 do 0,5 Mb/s (0,3 Mb/s je uzeto u Tabeli 4.1) - zavisi od broja audio kanala (stereo/surround zvuk/višejezično emitovanje).
- Servisne informacije i EPG : (SI) od 0,1 do 0,3 Mb/s (0,15 Mb/s koristi u Tabeli 4.1).
- Interaktivnost/Teletext: 0,1 do 1,0 Mb/s (0,2 Mb/s je uzeto u Tabele 4.1).
- Pristup uslugama (prevodi/audio opisi/titlovi govora): 0,2 Mb/s.

Tabela 4.1. Tipični bitski protoci za SD i HD formate prve i druge generacije

Format	Način komprimovanja	Bitska brzina videa (Mbit/s)	Brzina podataka pridruženih programu (Mbit/s)	Ukupna bitska brzina programa (Mbit/s)
SD	H264/AVC	1.80	0.85	2.65
HD 720p/50	H264/AVC	7.00	0.85	7.85
HD 1080i/25	H264/AVC	7.50	0.85	8.35
HD 1080p/50	H264/AVC	10	0.85	10.85

U Tabeli 4.1 svi ovi protoci su sabrani i smatraju se protokom programski povezanih podataka. Vidljiva je ogromna razlika u protocima SD i HD programa, i potreba da se novom tehnikom komprimovanja protoci HD programa dodatno smanje. Takođe je uočljivo da, iako ima dvostruko veću rezoluciju, format 1080p ima tek 30-40% veći protok od formata 720p i 1080i. Ovo je posledica boljih efekata komprimovanja signala kod viših rezolucija.

Tabela 4.2, formirana je na osnovu komparativne analize procena raznih izvora i rezultata eksperimentalnih istraživanja, datih u radovima [1], [8], [9] i [28] za HD programe, a [10] za programe ultra visoke rezolucije. Tabela daje očekivane protoke za sledećih nekoliko godina, uzimajući u obzir nastavak razvoja MPEG-4 opreme za kodovanje i početak primene HEVC-a [22] i [27]. Pri tome su uzete dve mogućnosti: da HEVC redukuje protoke na 50%, ($k_1=0.5$) od protoka komprimovanog sa MPEG-4, što je bliže rezultatima objektivnih istraživanja, ili optimistički, da se protok svede na 40%, ($k_2=0.4$), što odgovara rezultatima subjektivnih istraživanja. Procenjeni su potrebni protoci i za 3D na bazi 1080p formata, kao i za 4k format. To su vrednosti koje su usvojene i biće korišćene u proračunima u nastavku rada. Dat je ukupan očekivani protok video i programski povezanih podataka. Za 3DTV format, kao što je već rečeno, u proračunu je pretpostavljeno da će protok odgovarati vrednosti 1,5 puta uvećanom protoku HD1080p formata [26].

Tabela 4.2. Očekivani bitski protoci HD programa za sledećih nekoliko godina

Format	HD 720p	HD 1080p	3DTV	HD 2160p
H.264	7.00	10.00	15.00	40.00
H.265, $k=0.5$	3.50	5.00	7.50	20.00
H.265, $k=0.4$	2.80	4.00	6.00	16.00

Procena protoka za 4k format, osim za probno emitovanje, nema mnogo smisla za MPEG-4 kompresiju i data je da ilustruje kako sadašnje tehnike kompresije i kapacitet jednog RF kanala ne mogu da prenose ove formate.

Cifre date u tabelama treba posmatrati kao tipične zahteve za protokom koje treba obezbediti za program sa CBR načinom kompresionog kodovanja. Različiti programski materijali imaju različite bitske protoke. Pošto emiteri mogu napraviti i neke kompromise u kvalitetu emitovanog video signala pojedinih programa tabele pokazuju predložene srednje granične vrednosti uprosečenog protoka programa različitih žanrova. Moguće je vršiti i kvalitetniji prenos programa, sa većim protocima za video, što povlači da će broj programa u multipleksu biti smanjen.

4.5. Multipleks jednog RF kanala DVB-T2 sistema

4.5.1 Zauzimanje multipleksa RF kanala— sadašnje stanje

Svaki radiofrekvencijski kanal nosi jedan multipleks programa. Kapacitet koji se može obezbediti multipleksu po jednom kanalu zavisi od kanalskog kodovanja. EBU Tech 3348 [3] navodi neke primere scenarija za DVB-T2 kodovanje, uzimajući tipične kombinacije parametara kodovanja. Primeri parametara DVB-T2 višefrekvencijske mreže za fiksni prijem signala (MFN), DVB-T2 jednofrekvencijske mreže za fiksni prijem signala (SFN), i DVB-T2 mreže u SFN režima za prijem na prenosivim i mobilnim uređajima prikazani su u Tabeli 3.2 u sekciji 3.2, i biće korišćeni u daljim proračunima.

Izbor nekog od navedenih modova prenosa automatski određuje kapacitet multipleksa, i važan je činilac za proračun potrebnog spektra. Na osnovu podataka o potrebnom protoku programa datog u Tabeli 4.1. i kapaciteta RF kanala za sva tri moda mreže, Tabela 3.2, izračunat je

broj programa koji se može preneti po multipleksu jednog RF kanala, Rezultati su dati u Tabeli 4.3, takođe preuzetoj iz [1]. Podrazumeva se primena statističkog multipleksiranja pa su na rezultate uticali i dobici prikazani na grafikonu sa Slike 4.2.

Tabela 4.3. Broj programa koji se mogu smestiti u DVB-T2 multipleks jednog RF kanala za modove fiksne MFN, fiksne SFN i prenosive SFN mreže sa primenjenim statističkim multipleksiranjem

Broj programa u multipleksu				
Format	Način komprimovanja	Fiksna MFN DVB-T2	Fiksna SFN DVB-T2	Portabl SFN DVB-T2
SD	H264/AVC	18	16	12
HD 720p/50	H264/AVC	6	5	3
HD 1080i/25	H264/AVC	5	5	3
HD 1080p/50	H264/AVC	4	3	2

Tabela 4.3 daje sliku trenutnih mogućnosti zauzimanja multipleksa. Vidi se da, osim velikog broja SD programa (12 do 18), u DVB-T2 multipleks može da se smesti malo HD programa. Time je i efekat statističkog multipleksiranja umanjen, a kapacitet nedovoljno iskorišćen. U najboljem slučaju može se smestiti šest 720p programa. Što se tiče smeštanja programa formata 1080p, za koje se očekuje da u budućnosti budu najzastupljeniji u emitovanju, mogu se smestiti samo 2-4 programa u zavisnosti od moda mreže. U svetlu ovakvih rezultata i procene o skorom početku emitovanja HD 1080p, u analizama i proračunima koji slede, a koji se odnose na očekivano stanje za nekoliko godina, osim MPEG-4 posmatrača se i HEVC kodovani HD programi.

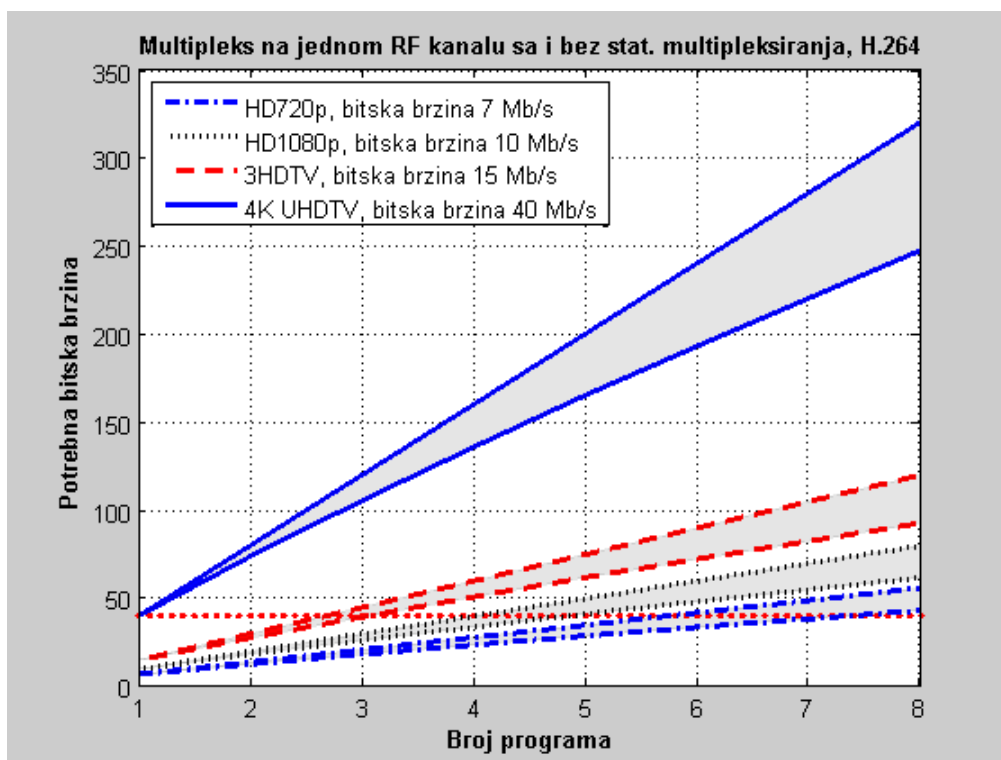
4.5.2 Očekivani broja HD programa u MPEG-4 kodovanom multipleksu

Računajući na izvestan napredak u MPEG-4 kodovanju HD programa, koristiće se procenjene vrednosti protoka po formatima iz Tabele 4.2. Zbog jednostavnosti proračun će se vršiti samo za MFN mod mreže, odnosno protok od 40.2 Mbit/s, imajući u vidu da je u ostalim modovima mreže efekat multipleksiranja značajno manji. Dobitak statističkog multipleksiranja će se računati prema grafikonu na Slici 4.2. Radi lakšeg proračuna napravljen je matematički model, koji koristi funkciju zavisnosti protoka od broja smeštenih programa, svih formata koji se uzimaju u razmatranje. Proračun će se vršiti u Matlab programskom paketu.

Slika 4.3, napravljena po tom modelu, pokazuje potreban kapacitet za svaki od razmatranih HD formata sa porastom broja programa, ako se primenjuje MPEG-4 kompresija. Gornja kosa linija prikazuje potrebne kapacitete za CBR dodelu kapaciteta, a donja za VBR sa primenom statističkog multipleksiranja. Osenčena polja između ovih linija istog formata pokazuju kako se ta razlika povećava sa povećanjem broja programa.

Horizontalna linija prikazuje kapacitet RF kanala od 8 MHz, u ovom slučaju 40.2 Mbit/s. Kapaciteti multipleksa u SFN i portabl/mobile DVB-T2 mrežama su još manji i zbog preglednosti nisu prikazani. U preseku sa kosim linijama može se odrediti broj programa po formatima koji se može smestiti u multipleks. Taj broj je, naravno, veći kod formata sa

manjim protokom po programu. Kod tih programa je istovremeno veći i dobitak statističkog multipleksiranja. U najboljem slučaju, kod najmanje zahtevnog formata 720p, može se smestiti 7 do 8, u odnosu na 5 do 6 programa sa CBR alokacijom. Ukupno gledano broj programa u multipleksu je mali, a zbog toga i efekat statističkog multipleksiranja. Ne postiže se dovoljan stepen iskoristivosti kapaciteta, promene protoka u multipleksu su velike, a samim tim i oscilacije u kvalitetu sadržaja koji se emituje. Slika, ilustracije radi, pokazuje smeštanje jednog programa 4k formata ili dva 3DTV, što realno nema velikog smisla.



Slika 4.3. Broj MPEG-4 kodovanih programa u multipleksu RF kanala sa i bez primene statističkog multipleksiranja

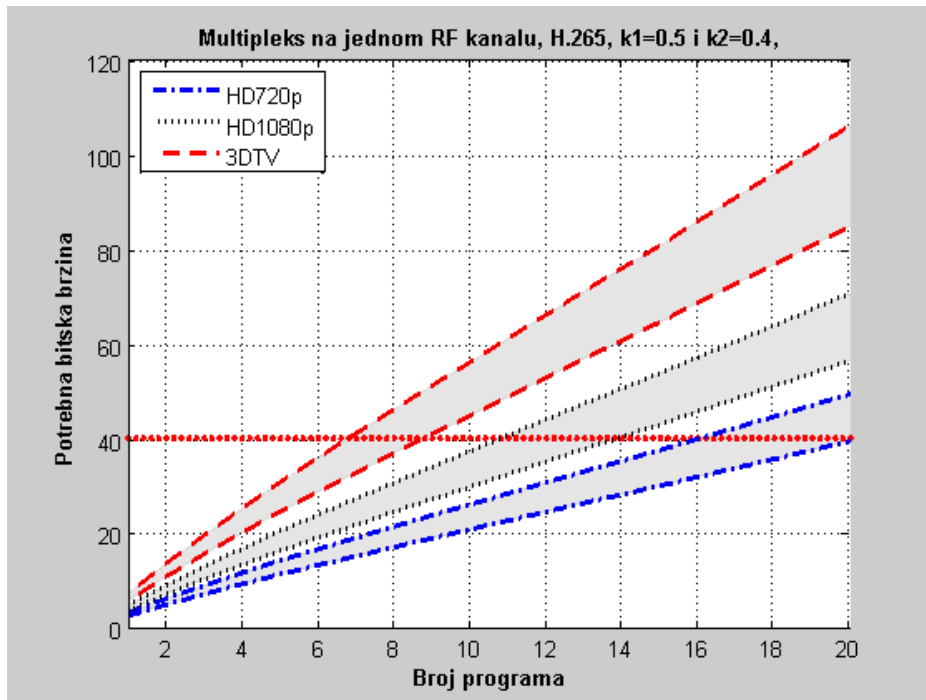
Jasno je da primena MPEG-4 kompresione tehnike u multipleksu jednog RF kanala, osim za SD programe, nije pogodna za formate HD programa. Čak ni emitovanje SD programa u potrabl i mobilnim DVB-T2 mrežama ne daje zadovoljavajuću efikasnost. Svako dodavanje HD programa značajno smanjuje efikasnost korišćenja kapaciteta i pogoršava kvalitet emitovanih programa.

4.5.3. Očekivani broj HD programa u HEVC kodovanom multipleksu

Multipleksiranje HD programa postaje mnogo efikasnije sa primenom HEVC kompresionog kodovanja. Ispitivanja objektivnim metodama pokazuju da je za isti kvalitet moguće smanjenje protoka za oko 40-50% u odnosu na H.264 [22], dok ispitivanja subjektivnim metodama pokazuju da je protok moguća smanjiti čak za preko 60% [22] i [27]. Realno je poći od toga da će u početnoj komercijalnoj upotrebi biti ispunjen zahtev da stepen kompresije bude udvostručen, a da će se vremenom stanje blago poboljšavati. Stoga su u proračunu koji sledi uzete dve vrednosti stepena komprimovanja i protoka po HD programu koje su i date u Tabeli 4.2.

Broj statistički multipleksiranih HD programa će, u odnosu na MPEG-4, biti povećan više nego dva puta, jer se sa brojem programa povećava efikasnost korišćenja multipleksa. Na

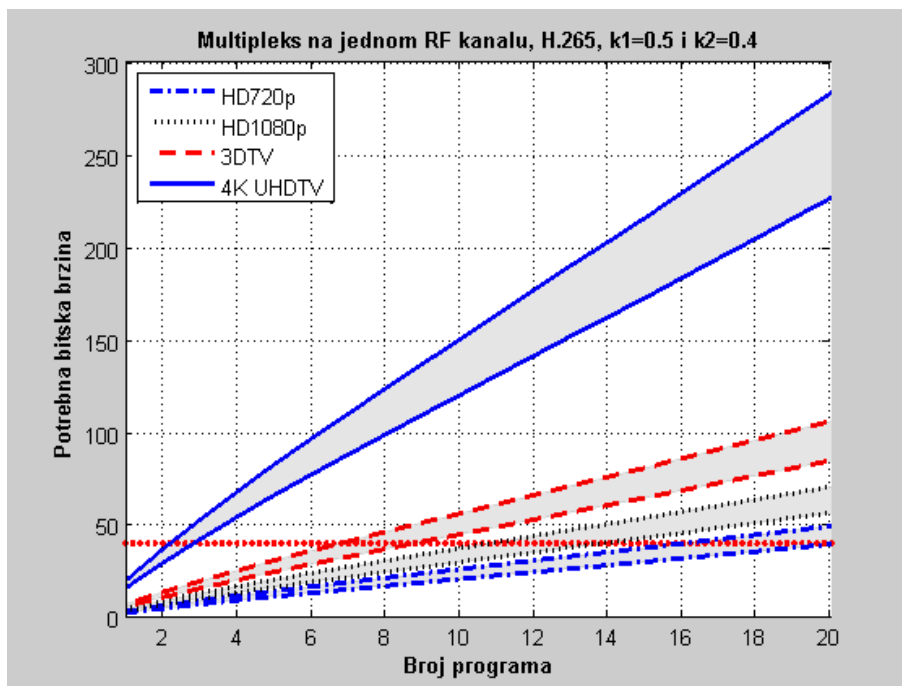
Slici 4.4 gornje linije osenčenih polja, sa redukcijom protoka $k_1=0.5$ (50% od MPEG-4 protoka), pokazuju da se može smestiti šestnaest 720p, jedanaest HD1080p ili sedam 3DTV programa, odnosno neka od kombinacija ovih programa. Očigledno da osim dvostruko manjeg protoka po programu povećanju broja programa značajno doprinosi i efikasnost statističkog multipleksiranja većeg broja programa. Situacija je mnogo povoljnija, ali iskorišćenost kapaciteta multipleksa, osim za 720p i, u nešto manjoj meri za format 1080p, još uvek nije dovoljna. Zbog preglednosti nisu ni prikazani programi u 4k formatu, a mogu se smestiti samo dva ova programa. Gledajući Sliku 4.2. povećanje efikasnosti po osnovu statističkog multipleksiranja se kreće od 8% za 4k do 27% za HD720p programe. Stanje se popravlja sa poboljšanjem stepena kompresije na $k_2=0.4$, što će biti pokazano u analizi Slike 4.5 koja samo na pogodniji način zumira ovu situaciju.



Slika 4.4. Broj HEVC kodovanih programa u multipleksu RF kanala sa stepenom komrimovanja $k_1=0.5$ i $k_2=0.4$

Iskustvo sa kodnim tehnikama MPEG-2 i MPEG-4 pokazuje njihov stalni evolutivni napredak kroz čitav period eksploatacije. Zato se može očekivati da HEVC takođe poboljšava svoje performace i u pogledu protoka i u pogledu kvaliteta komprimovanog video sadržaja.

Na Slici 4.5. koja se od Slike 4.4. razlikuje utoliko što je dodatno prikazano stanje za 4k programe, donja kosa linija pokazuje broj programa kada je stepen komprimovanja $k_2=0.4$. Osenčena polja između linija kod istog formata pokazuju koliko se ta razlika povećava sa poboljšanjem stepena kompresije. Iako je protok po programu smanjen za samo 10% u odnosu na MPEG-4 protok, broj programa se, zbog dodatnog efekta statističkog multipleksiranja još više povećao. Broj 720p programa već postaje potpuno optimizovan i ovde dolazi do broja 20. Broj 1080p programa raste sa 11 na 14 sa povećanim stepenom efikasnosti na 26%. Broj 3DTV programa raste sa 7 na 9, a porast kod 4k formata sa 2 na 3, i uz stepen efikasnosti oko 12%, ne donosi očekivano poboljšanje.



Slika 4.5. Broj HEVC kodovanih programa u multipleksu RF kanala sa stepenom komrimovanja $k_1=0.5$ i $k_2=0.4$

Zaključak

U početnoj fazi implementacije HEVC-a, osim zadovoljavajuće efikasnosti za smeštaj prve generacije HD programa, multipleks može prihvatiti i nekoliko 1080p programa, i to sa umanjnim stepenom efikasnosti. Sa napretkom HEVC-a broj programa 1080p će doći na prag pune, a 1080p zadovoljavajuće efikasnosti, dok se za 3DTV i, posebno, 4k programe moraju tražiti nova rešenja.

Treba napomenuti da je statističko multipleksiranje sadržaja različitih formata moguće, kao što se i sada primenjuje kod mešovitih multipleksa sa SD i HD programima prve generacije. Zaključci u pogledu efikasnosti korišćenja kapaciteta sa povećanjem broja HD programa su isti. Ovakav scenario može da umani korist koja se postiže, jer će malo veći „pik“ na HD programu višeg formata zahtevati relativno veliko smanjenje protoka na ostalim programima. Posebno se mora izbegavati slučaj da se zajedno multipleksiraju različiti formati istog programskog sadržaja, jer se vrhovi protoka poklapaju. Ovde mogu da se primene tehnike objašnjene u sekciji 2.3.

Što se tiče povećanja kapaciteta pri pojedinačnom zauzimanju RF kanala, ne može se očekivati veliki napredak u budućnosti. Moguće je, i u nastavku rada biće predloženo kao nova metoda, povećanje kapaciteta RF kanala tako što će se koristiti potpuni opseg RF kanala, npr. svih 8MHz, umesto sadašnjih 7.61 do 7.77 MHz. To je povećanje kapaciteta od 3-5%, koje nije zanemarljivo, ali u svetlu proračuna prikazanih u ovoj sekciji samo po sebi ne može da donese bitniji napredak. Za efikasno smeštanje 4k, 3DTV, pa i 1080p programa potrebni su značajno veći kapaciteti. Zato se fokus logično usmerava na stvaranje multipleksa na nivou grupe RF kanala, što će biti razmatrano u nastavku rada.

5. TFS povezivanje RF kanala

5.1. Koncept TFS povezivanja

Vremenski frekvencijsko cepanje, TFS (*Time-Frequency-Slicing*) omogućava da se sadržaji programa distribuiraju preko različitih RF kanala, formirajući tako virtuelni zajednički kanal velikog kapaciteta, dovoljan za efikasno statističko multipleksovanje većeg broja HD programa. Izborom razmaknutih RF kanala povećava se i otpornost sistema na frekvencijski selektivne promene u kanalima, što se može iskoristiti ili za povećanje područja pokrivanja ili za povećanje protoka, smanjenjem količnika zaštitnog kodovanja. To je softversko povezivanje kanala (susednih ili nesusednih) na MAC sloju OSI modela, od koga se očekuje da obezbedi visoke performanse sistema u pogledu korišćenja resursa i kvaliteta usluga.

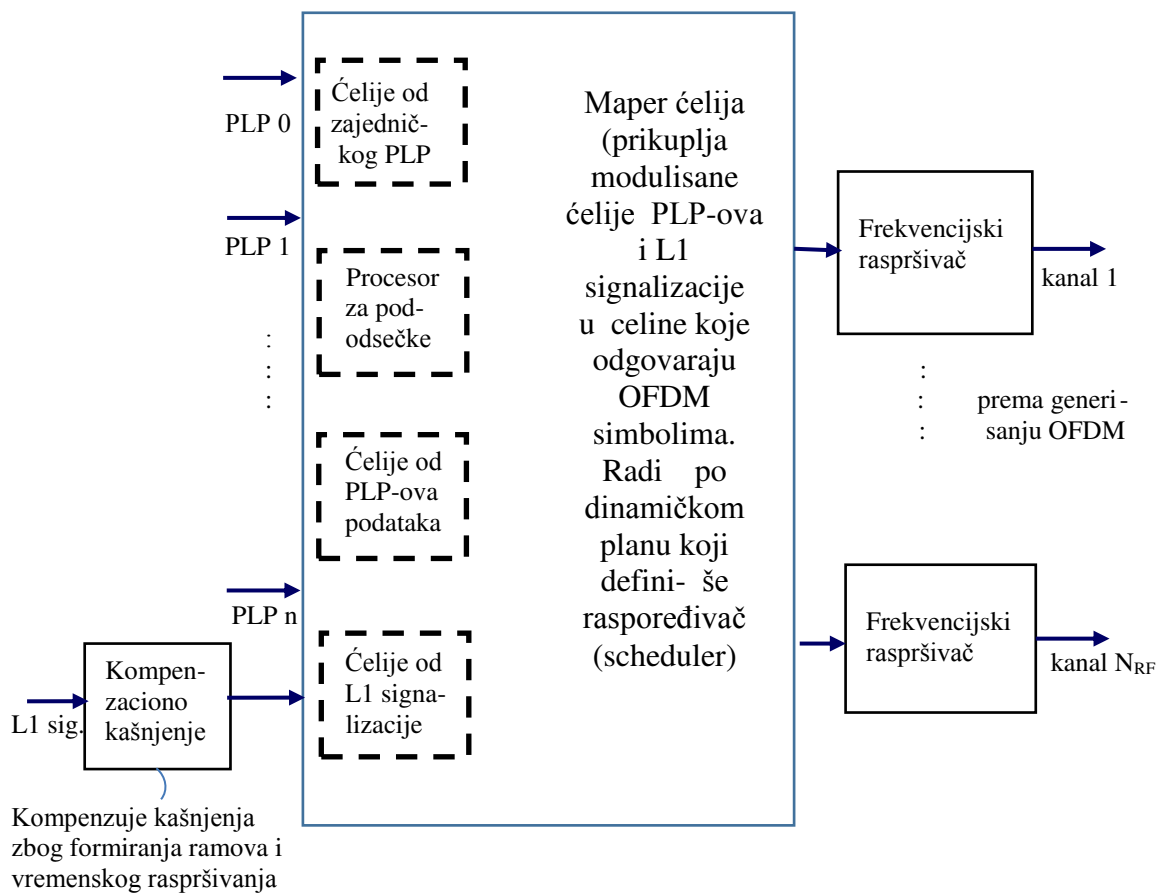
TFS je metod gde se pododsečki (*subslices*) od PLP grupa programa tokom T2 rama šalju preko više RF frekvencija. Kao što je rečeno u Poglavlju 3 PLP je grupa programa sa istim zahtevima u pogledu emitovanja, za koju se definiše zajednički logički tunel fizičkog sloja (*pipe*). Učešljavanje (*interliving*) se primenjuje kako tokom vremena, u okviru nekoliko susednih T2 ramova, tako i po frekvencijama, u okviru izabраниh RF kanala koji čine TFS grupu. U DVB-T2 preporukama je TFS dat opciono. Razlog za takav status leži u proceni da u početnoj fazi primene DVB-T2 prenosa, kada je većina programa u SD formatu, nije neophodno dodatno povećavati troškove, koji su i onako značajni, jer zahtevaju promenu opreme na strani korisnika. TFS povećava troškove prijelnika pošto zahteva najmanje dva tjunera, plus poseban demodulator, jer je za prijem nekog programa potrebno istovremeno deo podataka preuzimati iz zajedničkog PLP, a deo iz PLP gde se prenose podaci za taj program. Generalno, treba stalno prelaziti spektar između razuđenih DVB-T2 kanala povezanih u TFS grupu. A cilj jeste da RF kanali budu što razmaknutiji, da bi se postigao veći dobitak u smanjenju uticaja frekvencijske selektivnosti kanala, što će u nastavku biti detaljno analizirano.

Pod-odcepci imaju trajanje reda nekoliko stotina milisekundi (obično 180 ms), pa se najviše šest RF kanala može upotrebiti za zajednički prenos vremenski izdellenih podataka, što se uklapa u potrebno vreme u prijelniku za prelazak (frekvencijsko preskakanje) sa kanala na kanal. Na početku svakog rama ubačena su dva sinhronizaciona simbola. Osim sinhronizacije

rama oni nose i podatke o načinu multipleksiranja programa u vremenskom i frekvencijskom domenu DVB-T2 signala.

Performanse statističkog multipleksa zavise od ukupnog broja povezanih RF kanala, frekvencijskog opsega u okviru koga su ti kanali raspoređeni (razuđenosti kanala), kao i broja multipleksiranih programa i statističkih osobina njihovog protoka. Važnu ulogu imaju i karakteristike opreme za kodovanje i primenjeni metod upravljanja izlaznim tokom kodera.

Osnovni blokovi definisani za slanje po jednom RF kanalu primenjuju se i kada se koristi TFS, ali se moduli za formiranje rama i generisanje OFDM-a moraju modifikovati da uključe dodatne lance, tako da postoji jedna grana za svaki od RF kanala koji je uključen u TFS sistem, kao što je prikazano na Slici 5.1, preuzete iz DVB-T2 specifikacije, Anex E [6].

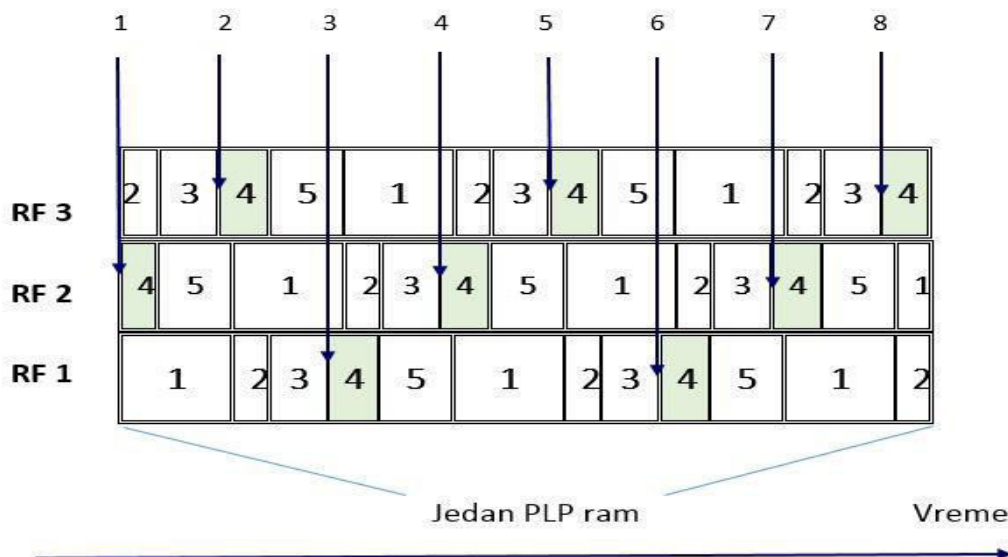


Slika 5.1. Formiranje rama za TFS

TFS, dakle, omogućava da se različite statistički multipleksirane usluge (npr. TV programi) prenose preko više od jednog RF kanala. Svaka usluga, odnosno njeni pod-odcepci "skaču" preko raspoloživih frekvencija, čineći delove logičkog tunela fizičkog sloja (PLP) kroz koje se vrši prenos. Treba napomenuti da PLP objedinjava prenos više usluga sa istim parametrima, kao što je objašnjeno u poglavlju 3.

Na Slici 5.2 svaki PLP se raspršuje preko svih, na ovoj slici, 3 RF kanala. U vremenskom domenu raspršivanje se sprovodi između nekoliko sukcesivnih OFDM simbola. Svaki PLP je prošaran kroz tzv. ram vremenskog raspršivanja, nekoliko sukcesivnih T2 ramova koji čine grupu na nivou fizičkog sloja. Tako podaci koje prenose pododsečki dobijaju mnogo bolju vremensku i frekvencijsku raspšenost nego da su u okviru jednog RF kanala.

Sa aspekta protoka, sa TFS povezivanjem je moguć statistički multipleks preko znatno većeg opsega, nego što je multipleks po jednom RF kanalu. Na primer, u slučaju šest RF kanala u fiksnoj SFN mreži sa protokom od 37 Mbit/s po RF kanalu, raspoloživ je protok od 222 Mbit/s. Statističko multipleksiranje na opsegu ove veličine je više nego dovoljno za aktuelne i očekivane formate HD kanala, uključujući tu i HD 1080p i 3DTV zasnovan na ovom formatu, a verovatno će biti dovoljno i za UHD formate.



Slika 5.2. Primer TFS preko tri RF kanala

Mogu se uočiti dve, praktično nezavisne, grupe korisnih efekata primene TFS. Jednu grupu čini povećanje efikasnosti statističkog multipleksiranja, a druga se odnosi na robusnost, odnosno, dobitak u planiranju mreže. Ovi efekti se mogu i kvantifikovati kao TFS dobitak, koji se sastoji od dobitka u statističkom multipleksiranju i dobitka u planiranju mreže i biće objašnjeni i kvantifikovani u nastavku rada.

5.2. Dobitak u statističkom multipleksiranju

Dobitak u statističkom multipleksiranju na nivou cele TFS grupe u poređenju sa odgovarajućim zbirom statističkih multipleksa na pojedinačnim RF kanalima ogleda se u:

- velikom protoku, koji dozvoljava multipleksiranje različitih servisa, bez bojazni da će neki od njih biti ugrožen,
- prenosu znatno više servisa, npr. većeg broj TV programa,
- pružanju boljeg i stabilnijeg kvaliteta prenetog video (i ostalih) sadržaja.

Sve ovo se može kvalifikovati i kvantifikovati kao TFS dobitak u statističkom multipleksiranju (*TFS Statistical Multiplexing Gain*), i predstavlja jednu od dve komponente TFS dobitka (*TFS Gain*). Druga komponenta vezana je za poboljšanje robusnosti i biće kvalifikovana i kvantifikovana u sekcijama koje slede.

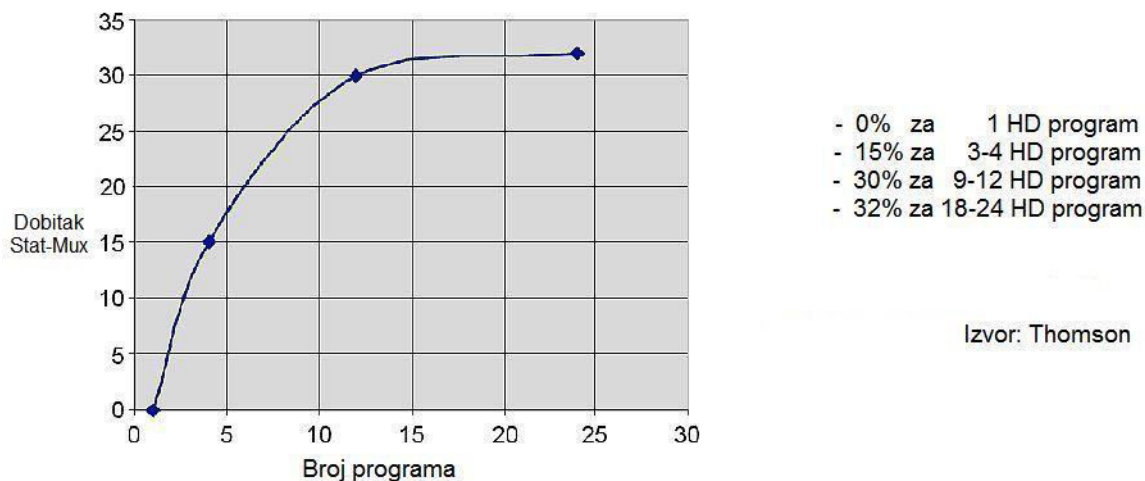
Matematički, dobitak se procenjuje u zavisnosti od broja programa, na isti način kao i u okviru multipleksa na jednom RF kanalu. Iako je očigledan, treba ga, ipak, jasno proceniti. Na primer, dobitak može biti predstavljen kao procenat smanjenja zahtevanog protoka bita ili procentualno povećanje broja servisa. Pri tom se mora biti oprezan u načinu kao se dobitak

definiše. Primera radi, vrednost od 50 % smanjenja zahtevanog protoka podrazumeva 100% dobitak u broju servisa. Ako se pogleda slika 5.3, preuzeta iz [3], tačka 4.4.3, vidi se da dobitak u efikasnosti statističkog multipleksiranja u funkciji broja programa ide i do 32%, što je nešto više od vrednosti datih na Slici 4.2, koja se koristi u proračunima u ovom radu.

Dobitak takođe može biti izražen i kao virtuelno povećanje protoka u poređenju sa statističkim multipleksiranjem unutar jednog RF kanala i za slučaj na Slici 5.3:

- za 3 RF kanala virtuelno povećanje brzine je 21 %,
- za 6 RF kanala virtuelno povećanje brzine je 25 %.

Već je u sekciji 4.3 navedeno da se efikasnost statističkog multipleksiranja povećava sa brojem programa, što je pokazano je eksperimentalno i literaturi [7]. Ovo je opšteprihvaćena zavisnost. Isto tako je prihvaćeno da je dobitak nezavisan od toga da li su u multipleksu SD ili HD programi bilo kog formata, kao i da li je kompresija MPEG-2, MPEG-4 ili HEVC. Grafikon na Slici 4.2 je precizniji i pogodniji za proračun statističkih multipleksa. On je i nešto pesimističniji od grafikona na Slici 5.3, sto je i razumljivo imajući u vidu da njega preporučuju institucije, a ovaj drugi Thomson, proizvođač opreme za kompresiono kodovanje i statističko multipleksiranje.



Slika 5.3. Dobitak statističkog multipleksa HD programa sa kodovanjem MPEG-4 AVC

Kako se koristi grafikon na slici 4.2 kod TFS povezivanja? U svim elementima na isti način kao i u jednom RF kanalu. Neka 10 programa u 3DTV formatu zahteva 150 Mbit/s konstantnog protoka bita, dakle sa 15 Mbit/s, koji se dodeljuju svakom programu pojedinačno. Prema ovom grafikonu isti kvalitet se postiže sa 25 % manjim protokom statistički multipleksiranih 10 programa, dakle sa 112.5 Mbit/s. I ovde se pretpostavlja da su sadržaji programa nekorelisani i da imaju slične srednje protoke.

Statističko multipleksiranje mešavine HDTV sadržaja različitih formata je takođe moguće i koristiće se kao i sada. Ranije je pomenuto da se na multipleksu jednog RF kanala u tom slučaju može postići manja korist, jer će malo veći pik na HD programu većeg protoka stvoriti relativno veliko smanjenje protoka na nekoliko programa manjeg protoka. Na velikom kapacitetu širokopojasnog multipleksa, sve ove pojave se eliminišu postizanjem visokog stepena statističke ravnoteže protoka.

Za emitere važna odlika TFS-a je ujednačenost kvaliteta slike i mogućnost finog regulisanja protoka bita svakog programa. Svi servisi ravnopravno, ili prema pripadajućim pravima, dele dodeljeni kapacitet i trpe eventualne gubitke ako je ponuđeni protok u nekom trenutku veći od

njega. Mogući problem može da bude potreba za različitom pokrivenošću DVB-T2 signalom, ako npr. javni servis treba da pokrije 95% područja, a komercijalni 90% područja. Ovo se na može rešiti softverski, definisanjem PLP grupa i podešavanjem parametara u okviru njih.

5.3. Dobitak u planiranju mreže

TFS mreže sa aspekta planiranja u poređenju sa mrežom sa istim brojem pojedinačnih RF kanala odlikuju:

- poboljšana frekvencijska diverzifikacija, jer se svaki program emituje preko nekoliko RF kanala,
- unapređen i ujednačen „budžet linka“ za prijem svih programa,
- niži troškovi mreže i/ili povećanje brzine prenosa podataka,
- koherentan prijem svih programa,
- poboljšana robusnost protiv vremenski selektivnih promena u kanalima i protiv interferencije.

Sve ovo se može kvalifikovati i kvantifikovati kao TFS dobitak u planiranju mreže (*TFS Planning Gain*), a može se obrazložiti kroz najznačajnije segmente: dobitak u pokrivenosti, dobitak u smanjenju interferencije, poboljšanje robusnosti i koherentnost pokrivenosti.

TFS dobitak u pokrivenosti

Suprotno ustaljenom verovanju nivo signala različitih DTT, pa i DVB-T2 multipleksa značajno varira u trenutku prijema, čak i kada je nivo signala na predajniku, ERP, isti. Razlozi za ove varijacije su kako frekvencijski promenljiv dijagram antene predajnika, tako i ostali frekvencijski zavisni elementi prenosnog puta:

- frekvencijski promenljiv uticaj terena (varijacija i direktnih i odbijenih signala),
- frekvencijski zavisne lokalne promene,
- frekvencijski zavisna efikasnost i dobitak prijemne antene (može da zavisi i od implementacije).

Kod individualnih prijemnika to može da dovede do velikih razlika između prijemnih nivoa DTT multipleksa. Može se, čak, dogoditi da jedan multipleks u nekom trenutku bude i izgubljen, jer je jačina polja suviše mala, a da istovremeno ostali multipleksi imaju više nego dovoljno marginu. Zato je kod emitovanja nezavisnim RF kanalima pokrivenost područja signalom na datoj lokaciji ograničena sa multipleksom (RF kanalom) sa najnižom jačinom signala, sa postavljenom marginom u skladu sa očekivanim oscilacijama.

Sa TFS-om, može se očekivati da će prijem na određenoj lokaciji biti određen prosečnom jačinom signala RF kanala uključenih u TFS. U najgorem slučaju, delovi programa koje se prenose pododsečcima dodeljenim RF kanalu koji trenutno ima nepovoljne karakteristike linka će biti primljeni pogrešno. Međutim, velika je verovatnoća da će se, na osnovu pododsečaka iz ostalih RF kanala koji imaju kvalitetniji prenos i, naravno, zaštitnog kodovanja, pogrešno primljeni biti rekonstruisati.

Može se smatrati da, zahvaljujući raznovrsnosti frekvencija koju nudi TFS, pokrivenost skupa DTT multipleksa nije ograničena nivoom signala „najslabijeg“ multipleksa, već prosečnim nivoom signala cele grupe. Na ovaj način se postiže bolje pokrivanje područja signalom, ili TFS dobitak pokrivanja. Pri ovome se pod „multipleksom“ podrazumeva protok koji se

prenosi jednim RF kanalom, ali koji je u saobraćajnom smislu deo jedinstvenog volumena usluga čiji se protok prenosi preko grupe TFS povezanih kanala.

Iz prethodnog se može zaključiti da sa brojem povezanih RF kanala robusnost na odziv kanala raste, a kvalitet emitovanja postaje ujednačeniji.

Za svaku lokaciju TFS dobitak pokrivenosti može biti izražen kao razlika (u dB) između prosečne jačine signala svih RF frekvencija i minimalne jačine signala nekog od tih RF kanala na toj lokaciji. U određenom trenutku to može biti bilo koji od posmatranih RF kanala.

$$TFS \text{ dobitak pokrivenosti} = P(\text{srednji}) - P(\text{minimalni}) \text{ [dB]}$$

Dakle, zahvaljujući TFS-u, jedan ili više pojedinačnih DTT multipleksa može imati nivo koji je niži od onoga koji može normalno da se koristi za prijem DTT, ukoliko postoji nekoliko multipleksa koji imaju nivoe koji prelazi granični nivo. Ovo daje veoma značajan opšti porast DTT pokrivenosti.

Dobitak pokrivenosti može da se, delimično ili u potpunosti, zameni za povećanje kapaciteta, birajući nešto veći kodni količnik (FEC). Ukoliko, npr. TFS dobitak pokrivenosti ima vrednost 4 dB, kasnije u radu će se pokazati da takvo povećanje odnosa C/N na nivou TFS grupe dozvoljava da se izabrani FEC sa 3/5 promeni na 3/4. Ovo znači povećanje kapaciteta od 25 %, samo po osnovu TFS dobitka pokrivenosti. Obzirom na zaista veliko povećanje važno je ove konverzije vršiti po tabelama iz proverenih dokumenata, kao što je poglavlje 14 u implementacionoj dokumentaciji EBU [5].

Dobitak u smanjenju interferencije

Sličan efekat prethodno opisanom TFS ima i na ometanje od drugih DTT signala. U tom slučaju ne samo da se snaga željenog signala menja u zavisnosti od lokacije i frekvencije, već se tako menja i interferirajući signal. Drugim rečima i on je frekvencijski selektivan. Ovo može izazvati čak i veće varijacije u odnosu željenog i interferirajućeg signala (C/I), jer su oba statistički promenljiva i zavise od frekvencije. Primenom TFS-a se ovaj uticaj umanjuje činjenicom da ostali RF kanali imaju manju interferenciju i da će pod-odcepci po njima biti preneti ispravno. Tehnika zaštitnog kodovanja, te primena Gray-ovog koda, rotacije konstelacije, faznog pomeraja između „I“ i „Q“ grane, primenjene u DVB-T2 kanalskom kodovanju, pomoći će da se prenese što manje pogrešnih bita i da se oni na kraju, primenom i odgovarajuće ekvilizacije, pravilno rekonstruišu.

Poboljšanje vremenske robusnosti

TFS poboljšava robusnost i protiv vremenskih varijacija u kanala, što je posebno važno za prenosivi i mobilni prijem. Efekat je sličan diverzifikaciji po osnovu većeg broja prijemnika.

Koherentnost pokrivenosti

Na velikom broju programa velika je i grupa koja pripada određenom PLP-u. Pokrivenost svih programa koji pripadaju istom PLP-u će biti ista. Dodatni aspekt je mogućnost "zajedničkog smanjenja pokrivenosti". TFS koristi nekoliko RF kanala istovremeno. Ako se na jednom RF kanalu dogodi kvar (kvar na predajniku), moguće je nedostajući kapacitet nadomestiti promenom parametara, čime će se pokriveno područje smanjiti, ali će se emitovanje svih TV programa nastaviti. Samo spoljašnji deo pokrivanog područja će biti pogođen u tom slučaju. Druga, realnija solucija je da, zbog smanjenog kapaciteta, statistički multiplekser može da poveća stepen kompresije, pa sve usluge pomalo trpe na kvalitetu. Naravno, još realnije je da se ove dve mogućnosti kombinuju. Što je više RF kanala koji se grupišu, manji je gubitak pokrivenosti područja kada je jedan kanal u kvaru.

Princip TFS dobitka planiranja i TFS dobitka statističkog multipleksiranja, kao i statističkog multipleksiranja uopšte, je isti. Na velikom kapacitetu postiže se statistička ravnoteža po osnovu velikog broja programa, a na velikom broju RF kanala ravnoteža u pogledu vremenskih i rekvenzijskih kolebanja u odzivu kanala. Zajedno, to daje mogućnost sigurnijeg planiranja i boljeg i ujednačenijeg kvaliteta usluge.

5.4. Merenja i proračun TFS dobitka planiranja

5.4.1. Sprovedena merenja i analize dobitka planiranja

U okviru projekata navedenih u [3] i [14] sprovedena su merenja na DVB-T2 mrežama i došlo se do rezultata koji su pogodni i za preliminarne saobraćajne i ekonomske analize. Za TFS dobitak planiranja u literaturi [14] koristi se termin TFS dobitak ili TFS dobitak pokrivenosti, pošto to i jeste najznačajnija komponenta TFS dobitka planiranja.

Posebno su indikativne analize sa stanovišta razlika između nivoa signala multipleksa u nekom trenutku. Rezultati pokazuju da je u pojedinim tačkama prijema postoje veoma značajne razlike u nivoima. Merenja pokazuju da je statistička raspodela dobitka TFS slična Rejlijevoj raspodeli. Istraživanja su pokazala da je raspodela ista za različite vrste antena, postavljene na raznim visinama.

Očekuje se da, zbog povećanog eha, TFS dobitak planiranja za prenosive prijemnike u zatvorenom prostoru bude veći. Samo postavljanje antene u optimalni položaj u zatvorenom prostoru, čak i za jedan DTT multipleks je složen zadatak, uzimajući u obzir vremenski promenljivu prirodu kanala izazvanu, između ostalog i pomeranjem ljudi u blizini antene. Kod većeg broja multipleksa skoro je neizbežno da bar jedan bude znatno oslabljen u odnosu na prosečan nivo prijema. Zbog toga se margina mora postaviti na viši, bezbedniji, nivo. Međutim, sa primenom TFS-a, pozicioniranje antene postaje manje kritično, jer frekvencijska diverzifikacija omogućava da prosečan nivo signala bude manje zavisn od preciznog pozicioniranja antene.

Merenja su potvrdila da se TFS dobitak planiranja povećava sa većom razudenošću (razmicanjem) RF kanala. Međutim, čak i za mali razmak, dobitak je značajan.

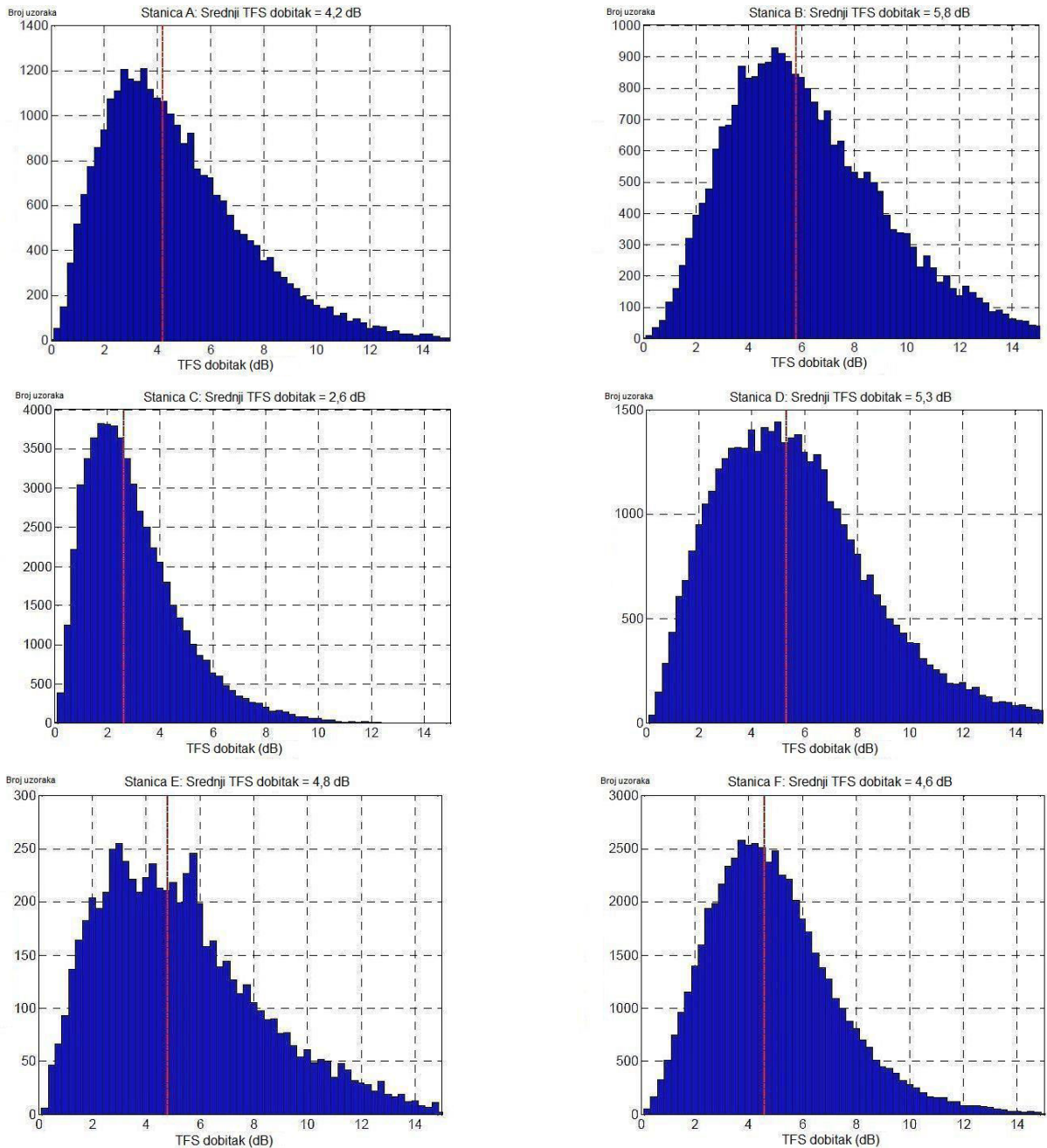
5.4.2. Primer određivanja dobitka planiranja

Potencijalni dobitak u TFS pokrivenosti može se izračunati na osnovu merenja jačine polja za svaki predajnik koji emituje signal na više od jednog RF kanala (multipleksa). U primeru urađenom u okviru projekta [14] terenska merenja su izvršena za:

- šest sajtova predajnika (bez SFN) sa po četiri multipleksa (RF kanala),
- isti ERP na sve četiri frekvencije,
- oko 40000 merenja na visini od 3 m po mernom mestu,
- konstantan dobitak predajne atene.

Proračunat je TFS dobitak na osnovu izmerenih primljenih signala na svakoj frekvenciji. Slika 5.4 (preuzeta Slika 4.17 iz [3]) prikazuje izmerenu raspodelu TFS dobitaka za šest stanica, A - F. Merenja se obavljena na 3m sa omnidirekionalnim zračenjem antena. Rezime je dat u Tabeli 5.1. Prosečno TFS pojačanje u svih šest oblasti je 4,5 dB. Posmatrajući sliku može se uočiti postojanje dosta sličnosti i utvrditi sa velikom tačnošću zavisnost dobitka planiranja od razmaka između povezanih RF kanala. Sasvim je logično da će dobitak u

pokrivenosti biti veći ako je broj povezanih RF kanala veći i ukoliko su oni razmaknutiji, jer se tako smanjuje uticaj frekvencijski selektivnog fedinga. U daljnim analizama [3] i merenjima na eksperimentalnim mrežama [14] ovo je potvrđeno.



Slika 5.4. Izmerene distribucije TFS dobitka

Rezultati za TFS dobitak su pokazali da se pri ukupnom rasponu od šest RF kanala dobitak u pokrivanju iznosi 2,5 dB, a prosečno izmereni dobitak planiranja na većim rasponima je 5,5 dB. U primeru proračuna potencijalnog dobitka TFS pokrivenosti, baziranom na merenjima obavljenim u Švedskoj na šest eksperimentalnih mreža sa po četiri multipleksa (RF kanala), rezultati su pokazali da je prosečan TFS dobitak 4,5 dB.

Za spajanje susednih kanala dobitak po osnovu smanjenja uticaja efekata selektivnog fedinga je znatno manji, dostižući maksimalno 2,5 dB, izmerenih kod šest povezanih kanala.

Tabela 5.1. Pregled rezultata merenja na 3 m (stacionarni spoljašnji prijem)

Stanica	Srednja vrednost TFS dobitka	Broj izvršenih merenja	Broj multipleksa	Razmak između RF kanala
A	4.2	27000	4	16
B	5.8	30000	4	34
C	2.6	58000	4	15
D	5.3	41000	4	32
E	4.8	6000	4	24
F	4.6	56000	4	26

Tabela 5.2. Potrebne vrednosti odnosa signal-šum $(C/N)_0$ da bi se dostigao BER od 1×10^{-7} posle LDPC dekodovanja blokova dužine 64 800 bita

			Zahtevani $(C/N)_0$ u dB za BER= 1×10^{-7} posle LDPC dekodovanja			
Konstelacija	Kodni količnik	Spektralna efikasnost	Gausov kanal	Rajsov kanal	Rejljev kanal	0 dB Eho kanal
QPSK	1/2	0,99	1,0	1,2	2,0	1,7
QPSK	3/5	1,19	2,3	2,5	3,6	3,2
QPSK	2/3	1,33	3,1	3,4	4,9	4,5
QPSK	3/4	1,49	4,1	4,4	6,2	5,7
QPSK	4/5	1,59	4,7	5,1	7,1	6,6
QPSK	5/6	1,66	5,2	5,6	7,9	7,5
16-QAM	1/2	1,99	6,0	6,2	7,5	7,2
16-QAM	3/5	2,39	7,6	7,8	9,3	9,0
16-QAM	2/3	2,66	8,9	9,1	10,8	10,4
16-QAM	3/4	2,99	10,0	10,4	12,4	12,1
16-QAM	4/5	3,19	10,8	11,2	13,6	13,4
16-QAM	5/6	3,32	11,4	11,8	14,5	14,4
64-QAM	1/2	2,98	9,9	10,2	11,9	11,8
64-QAM	3/5	3,58	12,0	12,3	14,0	13,9
64-QAM	2/3	3,99	13,5	13,8	15,6	15,5
64-QAM	3/4	4,48	15,1	15,4	17,7	17,6
64-QAM	4/5	4,78	16,1	16,6	19,2	19,2
64-QAM	5/6	4,99	16,8	17,2	20,2	20,4
256-QAM	1/2	3,98	13,2	13,6	15,6	15,7
256-QAM	3/5	4,78	16,1	16,3	18,3	18,4
256-QAM	2/3	5,31	17,8	18,1	20,1	20,3
256-QAM	3/4	5,98	20,0	20,3	22,6	22,7
256-QAM	4/5	6,38	21,3	21,7	24,3	24,5
256-QAM	5/6	6,65	22,0	22,4	25,4	25,8

Napomena1: Vrednosti upisane „italic“ fontom su približne.
 Napomena2: Spektralna efikasnost ne uzima u obzir gubitke zbog prenosa signalizacije, sinhronizacije, audio sadržaja i primene zaštitnog intervala.
 Napomena3: Vrednosti u obojenim ćelijama su jednom, a u neobojenim ćelijama su višestruko potvrđene.

5.4.3. Povezanost dobitka planiranja i kapaciteta RF kanala

Da bi se došlo do broja dodatnih programa treba utvrditi dodatni protok po osnovu dobitka planiranja. Put vodi preko promene kodnog količnika.

Polazeći od navedenih rezultata merenja, u skladu sa razmatranjem u tački 5. 3, moguće je da se postignuti dobitak iskoristi, zameni sa ekvivalentnim smanjenjem kodnog količnika. Na taj način se dobitak planiranja koristi za povećanje kapaciteta. Za ovu zamenu relevantni su dijagrami iz ETSI dokumenata, npr. A133 [4], dati u poglavlju 14, gde se analiziraju uticaji različitih tipova kanala, pri prenosu DVB-T2 signala. Za ilustraciju dobitka po osnovu poboljšanog pokrivanja koristićemo vrednosti preuzete iz Tabele 44 ovog dokumenta, koja je u ovom radu data kao Tabela 5.2.

Tabela 5.3. Razlike u odnosu signal-šum potrebne da se kodni količnik sa 2/3 promeni na novu vrednost u zavisnosti od primenjene modulacione šeme i procentualno povećanje kapaciteta

FEC	3/4		4/5		5/6	
Modulacija	QAM 64	QAM 256	QAM 64	QAM 256	QAM 64	QAM 256
Δ (C/N) [dB]	1,6 - 2,1	2,2 - 2,5	2,6 - 3,7	3,5 - 4,2	3,3 - 4,9	4,2 - 5,3
Dobitak pokrivanja	12,5%		20%		25%	

U Tabeli 3.2, u okviru parametara koje će DVB-T2 koristiti u narednim godinama, planiran je kodni količnik 2/3, u fiksnim, portabl i mobilnim mrežama. Povoljnije vrednosti kodnog količnika su 3/4, 4/5 i 5/6, a u Tabeli 5.3 su date razlike u odnosu signal-šum $\Delta(C/N)$ u dB, potrebne da se kodni količnik sa 2/3 promeni na novu vrednost. Ove razlike, uzete iz Tabele 5.2 imaju određeni dijapazon u zavisnosti od toga da li je dominantan Gausov, Rajsov ili Rejljev šum.

Zaključak

Navedena razmatranja biće dovoljna da TFS dobitak planiranja za različite slučajeve povezivanja RF kanala pretvorimo u protok, a potom i u dodatni broj programa. Vrednosti dobitaka u kapacitetu od 12.5 do 25% su izuzetno velike. Posebno što posledično povećavaju i dobitak statističkog multipleksiranja. U Poglavlju 7 izvršiće se proračuni i doći do broja programa koji se u razmatrane multiplekse mogu smestiti.

6. Povezivanje susednih RF kanala

U poglavlju 4 je pomenuta mogućnost da se primena OFDM tehnike multipleksiranja može iskoristiti za potpuno zauzeće opsega RF kanala. Obzirom da to zahteva analizu uticaja na susedne RF kanale, ta analiza će se izvršiti u ovom poglavlju, paralelno sa analizom mogućnosti povezivanja susednih RF kanala u zajednički širokopolasni kanal. Za razliku od TFS, gde se povezivanje vrši softverski, ovde bi se kanali povezali fizički, spajanjem susednih frekvencijskih opsega u celinu. Ideja je zasnovana na činjenici da se princip ortogonalnosti OFDM podnosilaca zastupljen unutar jednog RF kanala primeni i između RF kanala, omogućavajući dodatno i korišćenje zaštitnog frekvencijskog intervala između RF kanala.

6.1. Objedinjavanje kanala na fizičkom sloju

U uvodnim poglavljima istaknut je inovativni pristup u razvoju DVB-T2 sistema. Generalno je u izradi specifikacija za drugu generaciju DVB sistema, hronološki, DVB-S2, DVB-T2 pa DVB-C2, postojala težnja za unifikacijom, gde god je to bilo moguće. Iskorišćena su dostignuća savremene tehnologije komunikacija, koja, pre toga, nisu korišćena u dopremanju TV signala, a koje se sada primenjuju i u drugim mrežama za širokopolasni prenos. Koristi se COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex*) šema multipleksa i modulacije, sa povećanim brojem podnosilaca u odnosu na prethodne generacije sistema. Osnovna modulaciona šema je podržana sa, već pomenutim, dvodimenzionalnim učešljavanjem (i po frekvenciji i po vremenu) i LDPC i BCH mehanizmom za zaštitu od greške. FEC kodirani podaci se modulišu širokim spektrom višenivoskih (QAM) konstelacija. Potom se vrši mapiranje na pojedinačne podnosioce OFDM simbola. Postignuta spektralna efikasnost (dB) je blizu *Shannon*-ove granice, koja predstavlja teorijski optimum. Od mreže do mreže, postoje znatne razlike u ponašanju medijuma kroz koji se signal prenosi, pa samim tim i u realizaciji fizičkog nivoa.

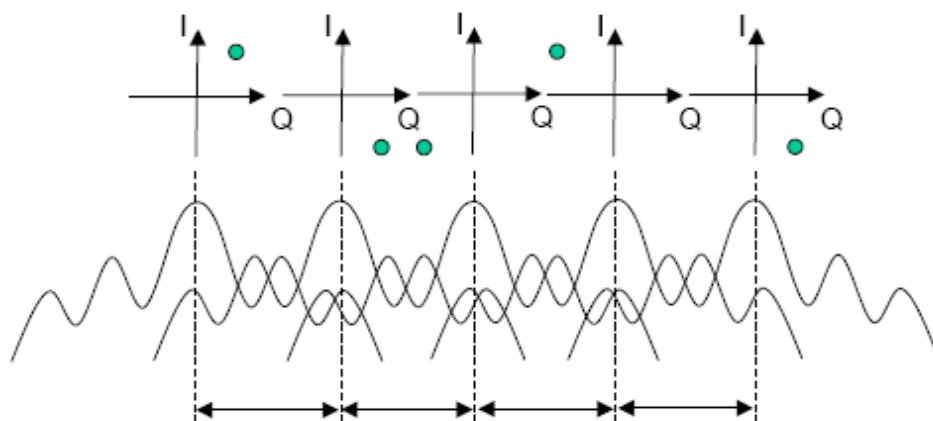
Postavlja se pitanje, da li ima razloga da se razvija novi fizički nivo za radiodifuzno emitovanje, pošto DVB druge generacije počne da se široko primenjuje? U oblasti kablovske distribucije TV signala, u okviru razvojnog projekta *ReDeSign* predstavljeni su rezultati razvoja, simulacije i testiranja DVB-C2 sistema [13], u radu na definisanju novog modela

fizičkog nivoa. Ovaj razvoj, kao i eventualna primena rezultata na unapređenje DVB-T2 sistema počiva na jedinstvenim osobinama ortogonalnosti COFDM, tehnike modulacije i multipleksa u isto vreme, čije osnove su date u sekciji 6.1.

6.2. COFDM tehnika multipleksa i modulacije

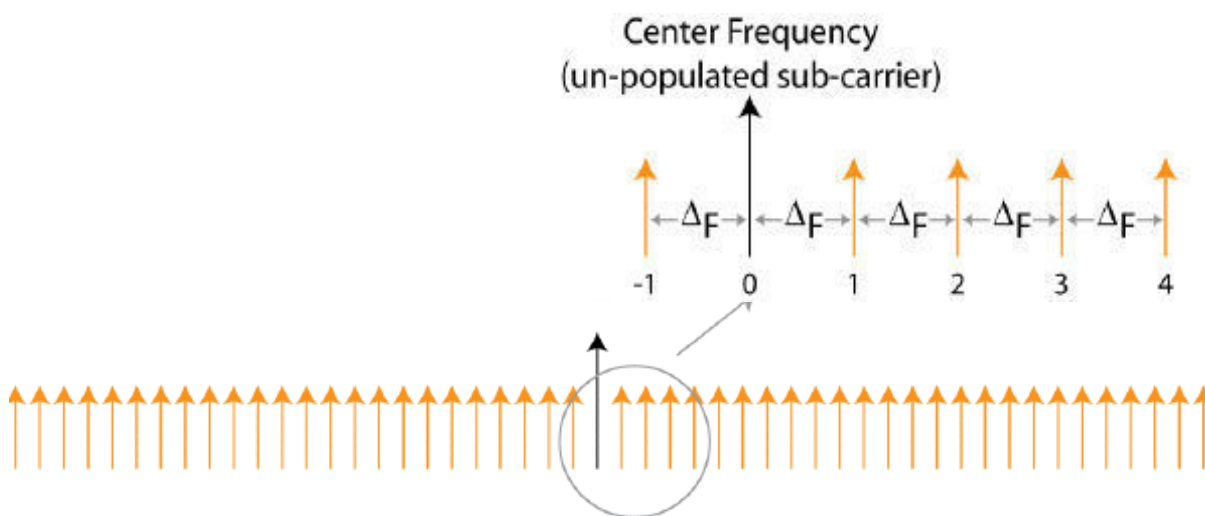
Višestruke putanje signala od predajnika do prijemnika daju dodatni nivo složenosti svim bežičnim sistemima, pa i DTT sistemima. Na prijemnoj strani se očekuje da određeni simbol stigne unutar prozora koji odgovara dužini simbola. Ako je kašnjenje, zbog višestrukih putanja prostiranja signala, veće od dužine prozora, prijemnik će dobiti deo simbola u periodu narednog simbola, što izaziva značajnu simbofsku, a kasnije i bitsku grešku.

U klasičnim komunikacionim sistemima se slao jedan simbol po jednom nosiocu u jednom trenutku. Protok podataka se postizao povećanjem brzine prenosa simbola (*simbol rate*). Međutim, povećanje simbofske brzine znači i manju dužinu simbola, dakle i uži prozor u



Slika 6.1. Paralelni prenos simbola preko više podnosilaca

kome prijemnik očekuje simbol. U suštini dužina simbola se smanjivala u odnosu na kašnjenje, koje isključivo zavisi od uslova prostiranja.



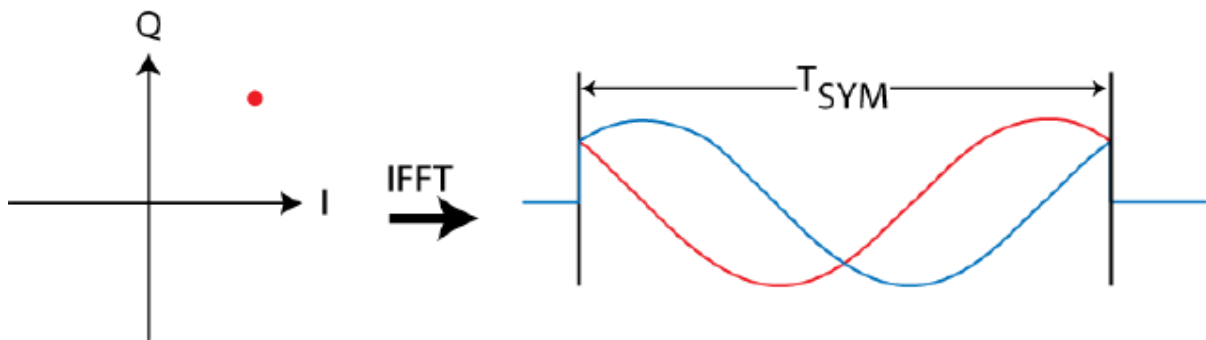
Slika 6.2. Razmeštanje podnosilaca oko centralne frekvencije

Prenos velikim simbofskim brzinama dobro funkcioniše ako postoji direktna putanja prenosa, recimo kod usmerenih radio-relejnih sistema (linkova). Međutim, većina bežičnih

komunikacionih sistema, u koje spadaju i DTT radiodifuzni sistemi rade u uslovima gde signal stiže do korisnika po više putanja. Tako vreme u kome stižu eho signali postaje sve veće u odnosu na trajanje simbola.

Umesto prenosa jednog simbola u jednom trenutku, OFDM prenosi istovremeno više simbola, Slika 6.2. To je poseban način multipleksiranja sa frekvencijskom raspodelom kanala (*Frequency Division Multiplex, FDM*). Digitalni signali se modulišu višenivoskom QAM modulacijom i, kao simboli tačno definisane dužine, prenose istovremeno preko velikog broja kanala. Ti kanali, nazvani su podnosioci ili nosioci. Precizno su raspoređeni na frekvencijama, koje su umnožak pažljivo odabrane frekvencije prvog podnosioca. Međusobno su "ortogonalni", tako da susedni podnosioci, iako su blizu jedan drugome nemaju interferenciju. Kako se postiže ortogonalnost?

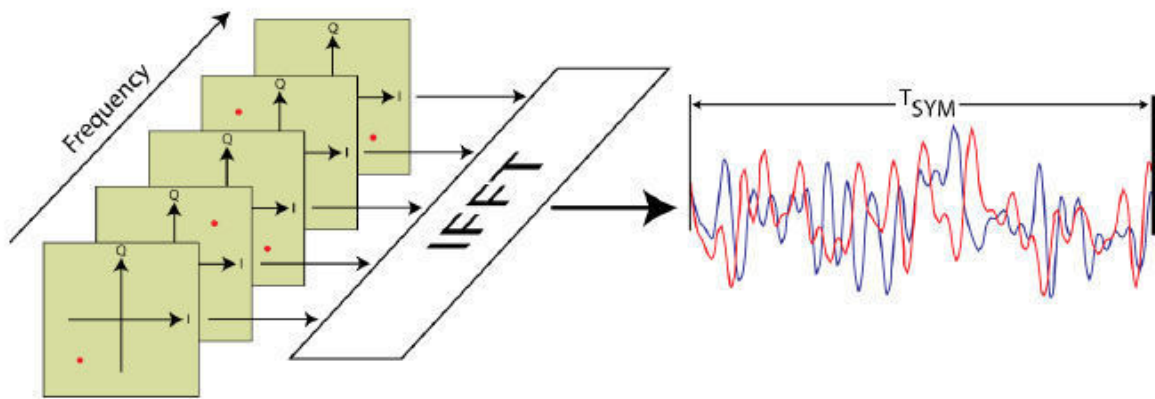
Uslov za ortogonalnost je da razmak između podnosilaca, ΔF , bude jednak recipročnoj vrednosti trajanja simbola koji se prenose po podnosiocima. Trajanje simbola je podešeno prema nameni bežičnog sistema i karakteristikama linka. U dodeljeni frekvencijski opseg se smešta na desetine hiljada podnosilaca. Podnosioci se precizno i simetrično lociraju oko centralne frekvencije, pa se, npr. podnosilac k , nalazi na frekvenciji koja se u odnosu na centralnu frekvenciju razlikuje za $k\Delta F$, Slika 6.3.



Slika 6.3. Mapiranje QAM moduliranih simbola na ulaze IFFT bloka

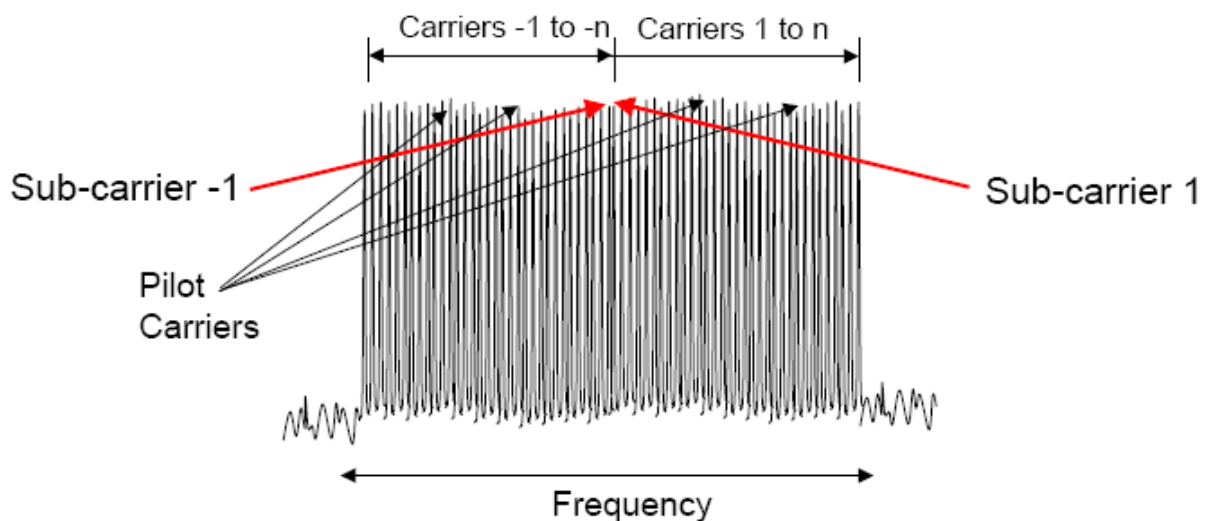
OFDM za rad koristi Inverznu Brzu Furijeovu Transformaciju (*Inverse Fast Fourier Transform*), IFFT, slika 6.4. Protok se deli na više sporijih paralelnih tokova, koji dolaze na IFFT blok da bi bili modulisani i preneti podnosiocima koji se smeštaju na prostoru dodeljenog frekvencijskog opsega. Manji protok po svakom od podnosioca znači da su simboli duži i da dužina zaštitnog intervala, koji se dodaje simbolima, može da bude dovoljna da spreči većinu refleksija da izazovu međusimbolsku interferenciju, a da istovremeno ne umanjuje previše kapacitet prenosa. Ovo je posebno važno za DTT sisteme, pa i za razmatrani DVB-T2, koji ima nekoliko modova koji, prema uslovima prenosa fiksni MFN, fiksni SFN ili portabl/mobilni, ima i modove sa odgovarajućim brojem podnosilaca i dužinom dodatog zaštitnog intervala u okviru svakog simbola.

U osnovi, cilj je da se poveća trajanje simbola, a to znači smanji protok simbola po podnosiocu, pri tome zadržavajući visok ukupni protok podataka. IFFT omogućava sporiji protok simbola u paraleli. Simboli svih podnosilaca, koji se formiraju paralelno, postupkom IFFT učestvuju u stvaranju zajedničke talasne forme u vremenskom domenu. To je postupak prevođenja signala iz frekvencijskog u vremenski domen. Stvara se *OFDM simbol*, koji ima istu dužinu T_{SYM} kao i pojedinačni simboli na podnosiocima. Obrnut postupak obaviće se FFT transformacijom u prijemniku. Slika 6.4 ilustrativno prikazuje ovaj postupak sa naznačenom realnom i imaginarnom komponentom OFDM simbola, jer se one u daljem postupku, u cilju bolje zaštite od uticaja kanala, nezavisno prenose.



Slika 6.4. Formiranje OFDM simbola

Dijagram na Slici 6.5 pokazuje kako su numerisani podnosioci u okviru OFDM signala smeštenog u frekvencijski opseg dodeljen za prenos jednog TV kanala. Takođe su pokazani i "pilot podnosioci", simboli čije su vrednosti poznate prijemniku i koriste se kao referentne vrednosti za razna podešavanja i ekvilizaciju delova spektra, kako bi se kompenzovale vremenske i frekvencijske varijacije signala.



Slika 6.5. Frekvencijska karakterteistika OFDM signala u okviru RF kanala

Upravo tako je modulu za generisanje OFDM nekog DVB-T2 predajnika, dodeljena uloga da preuzme ćelije koje proizvodi Modul za formiranje rama, kao koeficijenata u frekvencijskom domenu, da ubaci relevantne referentne informacije, pilote, koji omogućavaju prijemniku da i u prisustvu izobličenja signala nastalih u prolasku kroz TV kanal, detektuju signal. Potom se ubacuju zaštitni intervali i, ako je potrebno, smanjuje ukupni nivo signala ako ovaj prelazi neke granice (tzv. PAPR).

Ključni blokovi u implementaciji su svakako IFFT blok u predajniku, i FFT u prijemniku, u kojima se vrši Inverzna Furijeova transformacija i Furijeova transformacija. Oni obezbeđuju da se dobije uniformni spektar signala, nezavisno od sadržaja informacionog signala. U DVB-T2 su predviđeni FFT blokovi veličine od 1k do 32k, s tim što blokovi od 8k, 16k i 32k imaju i proširene verzije sa povećanim brojem aktivnih u odnosu na neaktivne podnosiocce (nule, koji ne prenose korisnu informaciju). Smeštanjem velikog broja podnosilaca u opseg planiran za TV prenos koji iznosi 6, 7 ili 8 MHz povećava se spektralna gustina na 4-5 bit/s/Hz, zavisno od moda mreže.

Da bi se izbegao međusobni uticaj, RF kanali su međusobno razdvojeni zaštitnim frekvencijskim intervalom. U RF kanalu opsega 8 MHz za prenos signala u modu sa normalnim brojem podnosilaca (*normal carrier mode*) koristi se opseg širine 7,61 MHz. U proširenim verzijama (*extended carrier mode*) koristi se 7,71 MHz u 8k modu, a 7,77 MHz u 16k i 32k modovima. Što je broj podnosilaca veći, veća je i njihova ortogonalnost, pa se može koristiti veći deo dodelejnog spektra. Za primenu u narednom periodu planirani su upravo ovi prošireni modovi. Iako smanjen, i u proširenoj verziji u svakom kanalu ipak ostaje deo frekvencijskog spektra od 0,23 MHz koji nije iskorišćen. Zaštitni frekvencijski interval je nasleđe iz analognog prenosa, i primene drugih multipleksnih i modulacionih tehnika. Primenom OFDM susedni kanali mogu funkcionisati nezavisno ili se povezati u zajednički opseg, na način da se i ovaj prostor može iskoristi. Ovo je povećanje kapaciteta na fizičkom (PHY) sloju OSI modela. Princip je jednostavan, ako unutar jednog kanala postoji režim u kome postoji ortogonalnost podnosilaca, onda takav režim treba stvoriti i između susednih RF kanala.

U nastavku rada biće definisani uslovi, proverena mogućnost realizacije i dati dobiti koji se postižu iskorišćenjem ovog intervala, zavisno od broja spojenih kanala. Povećanje je dato u odnosu na proširene verzije FFT modova, planirane za buduće primene. Dobitak u kapacitetu je veći kod proširenog 8k moda pošto on pokriva nešto manji frekvencijski opseg, u poređenju sa proširenim modovima 16k i 32k blokova. Sa većim brojem povezanih kanala dobitak se povećava.

6.3. Planovi razvoja fizičkog sloja u DVB-C2

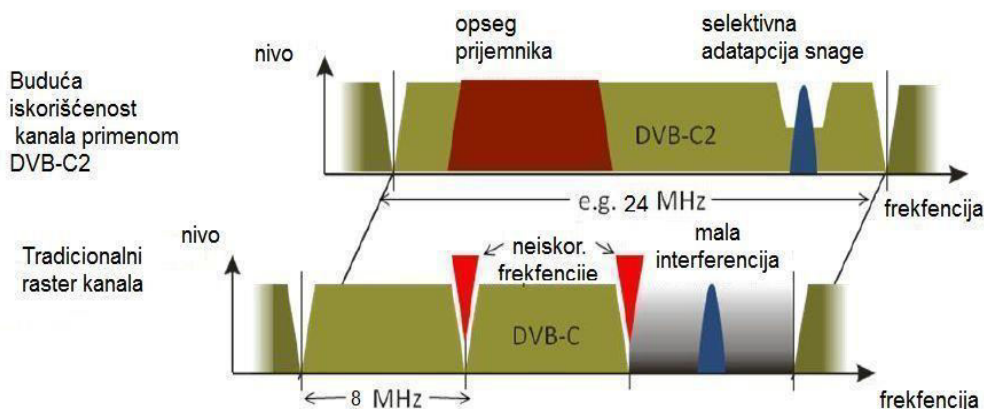
Tehnika povezivanja susednih kanala na PHY sloju je već primenjena kod WiFi sistema u verziji 802.11n. U DVB familiji ova mogućnost je pomenuta i u specifikacijama najnovijeg DVB-C2 sistema. U DVB-C2 sistemu koriste se uvek 4K (IFFT) algoritmi sa 4096 podnosilaca, od kojih se 3409 koristi za prenos podataka i „pilote“. Frekvencijski razmak između podnosilaca je uvek isti i iznosi 1,672 KHz za 6 MHz opsege, a 2,232 KHz za 8 MHz opsege koji se primenjuju u Americi i Evropi, respektivno. Efektivno se zauzima 5,7 MHz odnosno 7,6 MHz od opsega kanala.

DVB-C2 sistem podržava fleksibilno i dinamično smeštanje podataka u dodeljeni propusni opseg. Ima mehanizme koji na fizičkom sloju spajaju (koristi se izraz kombinuju, „*combining*“) susedne kanale u jedan širokopolasni kanal. Za kombinovanje 4 kanala, 4k IFFT jedinica OFDM generatora na predajnoj strani treba da bude zamenjena sa 16k IFFT algoritmom. U slučaju da treba da se kombinuje 8 kanala treba da se instalira 32k IFFT jedinica. Kombinovanje kanala na fizičkom sloju ima neke prednosti u odnosu na konvencionalni princip povezivanja na MAC sloju. Pre svega, ovaj metod omogućava korišćenje delova frekvencijskih opsega koji se nalaze na ivicama pojedinih kanala, a na kojima se tradicionalno nalaze strmine filtera kao mera zaštite od međukanalskog uticaja. Ova funkcija dodatno poboljšava efikasnost DVB-C2, jer, na primer, kombinacijom 4 kablovska kanala rezultat u povećanju ukupnog protoka je veći od faktora 4. Rečeno je već da osnovni 8 MHz-ni DVB-C2 signal koristi 3409 podnosilaca i može se realizovati sa 4k IFFT algoritmom u predajniku. Širi DVB-C2 signal može pokriti propusni opseg od npr. 32 MHz, koji se obično koristi $3 * 3584 + 3409 = 14161$ podnosilaca. U ovom slučaju 16k IFFT blok može da se koristi za generisanje signala na predajnoj strani.

Postoji mogućnost da se vrši namensko mapiranje odgovarajućih slajseva podataka na dodeljene OFDM podnosioce, odnosno na određeni podopseg ukupnog OFDM spektra. Pored toga, DVB-C2 osigurava da signalizacija (L1 podaci) ima periodičnu strukturu sa periodom ponavljanja jednakim 6 MHz u SAD, odnosno, 8 MHz u Evropi. Kako slajsevi željenih

podataka imaju jednak ili manji propusni opseg, moguće je da uređaji prijemnika, koji rade na opsegu od 6 MHz prime samo taj frekvencijskog prozor DVB-C2 spektra, iako je ceo propusni opseg DVB-C2 signala, na primer, 18 MHz. U stvari, prijemnik dekoduje samo one podnosiocce koji se prenose u okviru tog 8 MHz prozora, kao što je ilustrovano na Slici 6.6. Na ovaj način se omogućava i primena prijemnika koji nemaju mogućnost širokopojasnog prijema.

Na Slici 6.6 je prikazana i mogućnost zaštite od interferencije što još jedna korisna osobina DVB-C2. Snaga signala podnosioca na nekom podopsegu može selektivno da se smanji, odnosno da se spektralna gustina snage signala promeni sa ciljem sprečavanja međukanalske interferencije.



Slika 6.6. Ilustracija mogućnosti kombinovanja u OFDM tehnici prenosa

Očekuje se da najčešće korišćeni operativni mod C2 prenosa na srednji rok bude zasnovan na korišćenju postojeće podele na kablovske kanale, odnosno da će ukupni propusni opseg C2 kanala, u većini slučajeva, biti umnožak propusnog opsega osnovnog rastera kablovskih kanala (npr. umnožak opsega od 8 MHz). Dugoročno DVB-C2 pruža mogućnosti za prevazilaženje podele na kanale u kablovskoj mreži. Maksimalni teorijski opseg C2 signala je oko 450 MHz i ograničen je samo parametrima u L1 signalizaciji.

6.4. Mogućnosti razvoja fizičkog sloja u DVB-T2

Karakteristike medijuma bežičnog i kablovskog prenosa signala se znatno razlikuju, pa samim tim i realizacija fizičkog nivoa DVB-T2 i DVB-C2 sistema. Konfiguracija DVB-T2 mreža je složenija. Ovo utiče na izbor parametara zaštitnog kodovanja, QAM konstelacionih šema, zaštitnog intervala... Kao što je navedeno u poglavlju 3, koncepcija DVB-T2 je takva da koristi različite veličine (I)FFT blokova na istom frekvencijskom opsegu, pa se sa promenom broja podnosioca menja i međufrekvencijski razmak i dužina simbola. Zato se i eventualni predlozi za promene u fizičkom sloju moraju analizirati odvojeno.

U prethodnoj sekciji je rečeno da se po DVB-C2 specifikaciji OFDM multipleks formira sa nosiocima koji imaju definisan frekvencijski razmak između nosilaca, koji za 8 MHz kanal iznosi 2,232 kHz. DVB-T2 prenos, međutim, podržava modove kod kojih se sa povećanjem broja nosilaca, u istoj meri povećava dužina simbola, a smanjuje međufrekvencijsko rastojanje. Ovi parametri upravo služe da se određeni FFT mod primeni u uslovima prenosa, shodno očekivanoj međukanalskoj interferenciji, Doplerovom efektu i međusimbolskoj interferenciji.

Pođimo od pretpostavke da su: frekvencijski razmak (važan za ICI i Doplerov efekat), dužina simbola i ciklični prefiks (važna za ISI), kao i modulacija (kojom se utiče i na robustnost) već

izabrani za odgovarajuće vrste mreže, pa i za DVB-T2, prema očekivanim uslovima prenosa. Stoga se ovi parametri i pri pokušaju da se poveća frekvencijski opseg ne smeju menjati. Pod tim uslovima nameću se dva moguća rešenja, koja se u ovom radu predlažu kao dva rešenja, odnosno dve originalne metode, za povećanje kapaciteta i objedinavanje kapaciteta susednih RF kanala u resurs, širokopojasni RF kanal, dovoljan za efikasno emitovanje HD i UHD programa.

Prvo rešenje je da se, u skladu sa potrebnim kapacitetom, podešava (povećava) frekvencijski opseg kanala tako što se povećava veličina FFT bloka. Da bi izbegli povećavanje dužine simbola, što je pravilo kod DVB-T2 emitovanja, neophodno je da se u istom odnosu smanji elementarni period T . Ako za povećanje opsega n puta uzmemo da je $FFT_n = FFT \times n$ i istovremeno $T_n = T/n$, onda je dužina simbola T_{Un} ista kao i T_U , jer je očigledno:

$$T_{Un} = FFT_n \times T_n = FFT \times T = T_U \quad (6.1)$$

što znači i da i frekvencijsko rastojanje između podnosilaca $cs_n = 1/T_{Un}$ (Hz) takođe ostaje nepromenjeno.

Po drugom rešenju se formiraju grupe susednih kanala popunjavanjem zaštitnog frekvencijskog intervala između njih preciznim određivanjem frekvencijskog razmaka krajnjih nosilaca susednih kanala, koji mora biti jednak ili biti umnožak frekvencijskog rastojanja između podnosilaca u samim kanalima. Time se čuva ortogonalnost podnosilaca. Na tako stvorenom opsegu *leđa uz leđa* (*side by side*) spojenih kanala može se formirati potrebni širokopojasni multipleks.

Pretpostavimo da podnosioci zauzimaju ceo frekvencijski opseg (na primer 8 MHz) i neka su indeksirani sa $k \in [K_{min}; K_{max}]$ i omeđeni sa K_{min} i K_{max} . Razmak između susednih podnosilaca je $cs = 1/T_U$. Ako je prethodni kanal je označen sa indeksom A, i sledeći sa indeksom B, onda razmak između podnosilaca K_{Amax} i K_{Bmin} mora biti tačno

$$CS_{AB} = CS_A = CS_B \quad (6.2)$$

U stvari, ortogonalnost se može održati ako se bilo koji od ovih vrednosti pomnoži sa n , i $n = 1, 2, 3 \dots$. To znači da će, u principu, ortogonalnost biti očuvana i ako susedni kanali ne koriste isti mod (FFT blok), što ovom načinu povezivanja daje dodatnu fleksibilnost, ali se onda mora voditi računa o dužini simbola T_U i zaštitnog intervala T_G , što komplikuje rad prijemnika. U radu će se smatrati da susedni kanali koriste isti FFT mod. Onda je raspored nosilaca isti kao da se koristi jedan zajednički FFT blok, ali sa n puta manjom frekvencijom uzimanja uzoraka.

Frekvencijski opseg kanala i frekvencijski razmak između susednih RF kanala su u DVB birani tako da se u puni opseg B smešta ceo broj nosilaca N_{total} :

$$N_{total} = B/cs = B \times T_U = B \times T \times FFT = (7/8) \times FFT \quad (6.3)$$

Činjenica da je broj podnosilaca, zapravo broj frekvencijskih rastojanja između podnosilaca, celobrojan, znači da je dovoljno da RF frekvencije budu podešene na frekventnom rastojanju od tačno 8 MHz i da se postigne „međukanalska“ ortogonalnost.

Metoda *leđa uz leđa* omogućuje i koegzistenciju potpuno zauzetih susednih kanala, a da se oni koriste potpuno nezavisno. PHY i MAC sloj su nezavisni. Ova fleksibilnost daje mogućnost da se PHY prošireni kanal koristi i za standardno pojedinačno zauzimanje, ali i u drugim tehnikama povezivanja, susednih ili nesusednih kanala, koje se realizuju na MAC sloju. Tako se i, u poglavlju 5 opisano, TFS povezivanje može primeniti na RF kanale čiji je opseg u potpunosti zauzet.

Zavisno od uslova eksploatacije, u primeni se zauzimanje zaštitnog frekvencijskog opsega RF kanala na jednom ili drugom kraju ukupnog opsega može vršiti slobodno, a jedini kriterijum je mogućnost sinhronizacije između tih kanala. Kao što je navedeno u sekciji 3.3, DVB-T2 za rad u SFN mrežama, ima mogućnost frekvencijske, vremenske, ali i sinhronizacije samih OFDM simbola. Ova mogućnost je dovoljna i za sinhronizovani rad susednih RF kanala, kao i sinhronizovani rad RF kanala povezanih predloženim metodama, i nesmetani rad susednih RF kanala koji nisu predmet povezivanja.

U oba načina povećan je stepen iskorišćenja opsega kanala i zadržani su konfiguracioni parametri pojedinačnog RF kanala planirani za buduću primenu prema vrsti mreže i uslovima prenosa. Analiza i rezultati simulacije, dati u sekciji 6.4, će pokazati i eventualni uticaj kombinovanja na kvalitet prenosa.

Kod prvog modela zasnovanog na povećanju FFT multipleksa, pored tehnoloških ograničenja, postoje i administrativna, jer je trenutno po DVB-T2 standardu maksimalna vrednost FFT bloka 32k. U specifikacijama se, za sada samo za potrebe, kontrole rada predajnika, *Transmitter Signature* [5], koristi blok 64K. Tehnički, slično kao i kod DVB-C2 i ovde bi prijemnik koji ima FFT blok od npr. 16k mogao i da na jednom RF kanalu na koji se podesi preuzme samo deo signala koji se prenosi po tom opsegu. U tom slučaju bi na MAC nivou moralo da se vodi računa da to bude i odgovarajuća softverska celina, što u principu krnji efekte zbog kojih je ovo udruživanje i predloženo.

Kod modela *leđa uz leđa* bitno je da se održava ortogonalnost podnosilaca susednih kanala u frekvencijskom i u vremenskom domenu, što se lako može realizovati, jer postoje tehnike koje se primenjuju kod sinhronizacije SFN mreža.

6.5. Simulacija i analiza povezivanja RF kanala

Simulacija je sprovedena dopunjenim originalnim softverskim paketom [19], a delimično je korišćena u objavljenim radovima autora disertacije [16], [17 i [18].

6.5.1. Povećanje FFT bloka

U Tabeli 6.1 [1] dati su osnovni OFDM parametri kao što su FFT mod, mod podnosilaca, zaštitni interval i Δf , namenjeni za primenu u DVB-T2 mrežama. Kao što je već navedeno u predstavljanju prvog modela povezivanja, jedan od načina da se zadrže vrednosti parametara koje jedna konfiguracija ima, a da frekvencijski opseg obuhvati više RF kanala, je da se smanji elementarni period.

Za potrebe analize, u izvršenoj Matlab simulaciji, elementarni period za kanal širine 8 MHz koji iznosi $7/64 \mu s$ smanjivan je dva, odnosno četiri puta. Istovremeno je dva ili četiri puta povećan broj podnosilaca, odnosno veličina FFT bloka. Frekvencijski razmak između podnosilaca, dužina simbola, kao i dužina zaštitnog intervala, dakle parametri koji se biraju prema uslovima prenosa signala, ostali su nepromenjeni. Zauzet je dva odnosno četiri puta veći opseg, a broj podnosilaca za prenos signala se i dodatno povećao, jer se za celu grupu zauzetih kanala koriste samo dva zaštitna frekvencijska intervala na krajevima opsega.

Povećanje broja podnosilaca u odnosu na isti broj pojedinačnih RF kanala u proširenom modu dato je u Tabeli 6.2 procentualno, odnosno kao dobitak u kapacitetu. Treba napomenuti da je, u slučaju kada RF kanale koji su susedni grupi FFT povezanih kanala takođe koristi DVB-T2 sistem (što je za sada slučaj jer je dodeljeni frekvencijski opseg celovit), moguće iskoristiti i preostala dva zaštitna intervala, pa bi i povećanje kapaciteta bilo veće.

Tabela 6.1. Osnovni OFDM parametri za DVB-T2

Parametar		1K mod	2K mod	4K mod	8K mod	16K mod	32K mod
Broj podnosilaca Ktotal	normalni mod	853	1705	3409	6817	13633	27265
	prošireni mod	NP	NP	NP	6913	13921	27841
Minimalni broj podnosilaca Kmin	normalni mod	0	0	0	0	0	0
	prošireni mod	NP	NP	NP	0	0	0
Maksimalni broj podnosilaca Kmax	normalni mod	852	1704	3408	6816	13632	27264
	prošireni mod	NP	NP	NP	6912	13920	27840
Broj podnosilaca dodatih na svaku stranu u proširenom modu Kext (napomena 2)		0	0	0	48	144	288
Trajanje simbola Tu		1024T	2048T	4096T	8192T	16384T	32768T
Trajanje simbola Tu μ s (napomena 3)		112	224	448	896	1792	3584
Razmak između podnosilaca $1/T_u$ (Hz) (napomene 1 i 2)		8929	4464	2232	1116	558	279
Razmak između Kmin i Kmax ($K_{total}-1)/T_u$	normalni mod	7,61MHz	7,61MHz	7,61MHz	7,61MHz	7,61MHz	7,61MHz
	prošireni mod	NP	NP	NP	7,71MHz	7,77MHz	7,77MHz
NP: Nije primenjeno							
Napomena1: Numeričke vrednosti u „italic“ fontu su približne.							
Napomena2: Vrednosti su date kad je primenjena ista pilotska sekvenca u normalnom i proširenom modu.							
Napomena3: Vrednosti za RF kanal širine 8MHz.							

U dobijenom širokopojasnom kanalu upotrebljen je FFT mod sa više podnosilaca. Frekvencijski razmak između njih je ostao isti, pa samim tim uticaj efekata faznog šuma na OFDM ostaje nepromenjen. Isto važi i za dužinu simbola, pa se može birati ista dužina zaštitnog intervala. Ako se i konstelacija modulacije, kojom se postiže robusnost sistema, izabere kao za pojedinačni RF kanal, možemo očekivati da se ponašanje ovakvog širokopojasnog kanala u uslovima prenosa ne razlikuje od ponašanja pojedinačnog RF kanala.

Tabela 6.2. Osnovni parametri i povećanje kapaciteta u odnosu na proširene verzije pojedinačnih RF kanala za različite FFT modove

FFT mod	8K ext	16K ext	32K ext
Broj podnosilaca K_{Total}	6913	13921	27841
Dužina simbola T_U	0,000896	0,001792	0,003584
Frekv. razmak (Hz)	1116,071	558,0357	279,0179
Dobitak u % 2 RF opsega	1,844351	1,490554	1,492403
Dobitak u % 4 RF opsega	2,766527	2,235831	2,238605
Dobitak u % 6 RF opsega	3,073919	2,484256	2,487339

Na Slici 6.7 prikazane su, simulacijom dobijene, frekvencijske karakteristike pojedinačnog kanala od 8 MHz (gore) i širokopojasnog kanala od 32 MHz (dole). U simulaciji su korišćeni parametri za portabl/mobilne SFN mreže iz tabele 3.2 i podaci za 16K mod iz tabele 6.1. U širokopojasnom kanalu 16k FFT je umnožen četiri puta. Kao što se vidi na slici frekvencijske karakteristike su identične. Povećala se samo širina opsega.

Matematički izraz za spektralnu gustinu $P_k(f)$, za OFDM simbole sa dodatim zaštitnim intervalom (odnosno cikličnim prefiksom CP) ukupne dužine T_s , maksimalnim brojem aktivnih podnosilaca K , frekvencijama podnosilaca indeksiranim sa f_k , gde je k ukazuje na udaljenosti podnosilaca od RF nosioca frekvencija f_c je:

$$P_k(f) = \left[\frac{\sin \pi(f - f_k)T_s}{\pi(f - f_k)T_s} \right]^2 \quad (6.4)$$

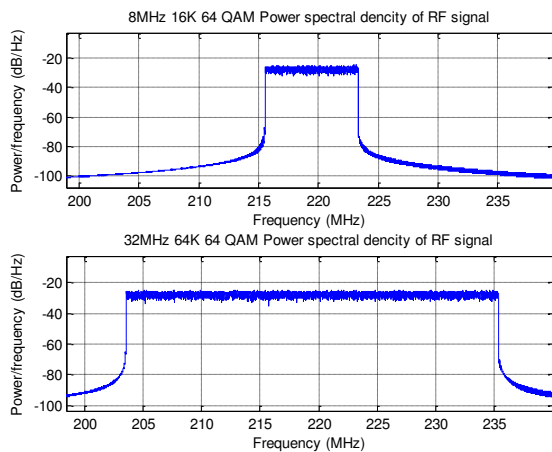
gde je:

$$f_k = f_c + \frac{k}{T_u}; \quad -\frac{K-1}{2} \leq k \leq \frac{K-1}{2}; \quad (6.5)$$

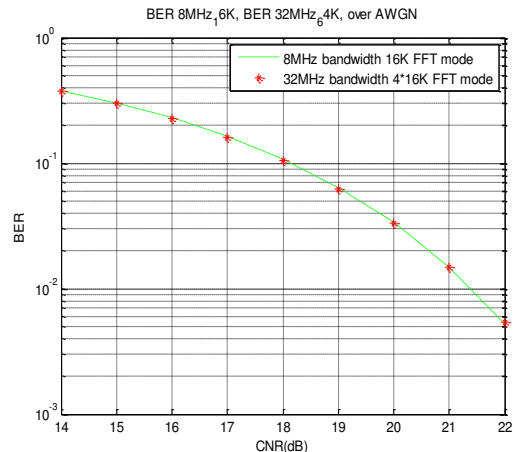
Vrednosti k , f_k , T_u i T_s se ne menjaju. Menja se samo maksimalan broj aktivnih podnosilaca K i u tom odnosu i širina frekvencijskog opsega. U tom smislu i matematički se potvrđuje da, osim što je signal proširen na višestruko širi frekvencijski opseg spektralna gustina (PSD) signala pojedinačnog i širokopojasnog RF kanala se ne razlikuju.

Na Slici 6.8 dat je dijagram simulacije BER za 16k FFT prošireni mod pojedinačnog i širokopojasnog kanala satavljenog od četiri kombinovana kanala (64k FFT), takođe sa parametrima za SFN portabl mrežu u prisustvu AWGN šuma. Dijagram pokazuje da se krive gubitaka poklapaju, zapravo da je dijagram proširenog moda, čak, za nijansu bolji zbog veće ortogonalnosti podnosilaca kod većeg IFFT i FFT bloka.

Već je pomenuto da prema preporukama za DVB-T2, maksimalan FFT može biti 32k i za specijalne primene testiranja SFN mreže i 64k [5]. Ako je maksimalnu vrednost FFT trenutni ograničavajući faktor, jasno da kod onih vrste emitovanja kojima je neophodan veći međufrekvencijski razmak po ovom modelu može povezati više kanala.



Slika 6.7. PSD za jedan i četiri FFT pomnožena kanala



Slika 6.8. BER za jedan i četiri FFT pomnožena kanala

U stacionarnom prenosu zbog ortogonalnosti nosilaca ovaj razmak nije kritičan, pa se planira upotreba 32k FFT bloka za fiksni MFN i fiksni SFN prenos. S druge strane prenos signala do portabl i mobilnih korisnika je podložan uticaju Doplerovog efekta [23] pa je potreban veći razmak između podnosilaca i planira se upotreba FFT blokova sa 16k i, možda, 8k podnosilaca. U tom slučaju se metodom povećanja FFT može povezati četiri odnosno osam kanala, a da FFT blok bude 64k.

Iako se više od 64k podnosilaca za sada ne pojavljuje u DVB specifikacijama, pošto je to polje stalnog tehnološkog napretka, za očekivati je da će se u budućnosti koristiti sve veći FFT blokovi.

6.5.2. Spajanje susednih kanala

U pogledu kapaciteta efekat *leđa uz leđa* tehnike je isti kao kod tehnike povećanja FFT bloka. Zapravo n povezanih RF kanala u ovoj tehnici ima $n-1$ manje aktivnih podnosilaca, jer svaki kanal ima svog RF nosioca, dok u prethodnoj tehnici postoji jedan zajednički. Razlika je beznačajna, tek na trećoj decimali, pa uz blago zaokruživanje važe dobici iz tabele 5.3.

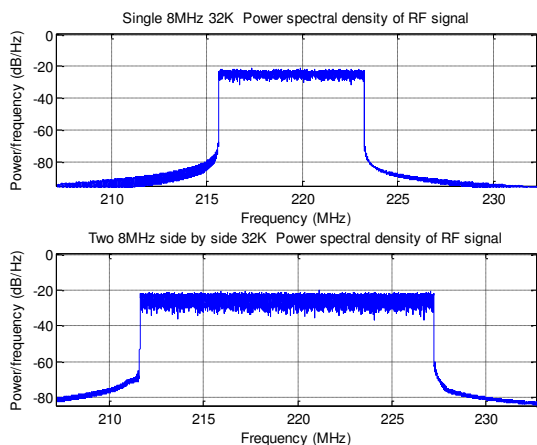
Treba naglasiti činjenicu da je u DVB broj podnosilaca, zapravo broj frekvencijskih razmaka između njih, u ukupnom opsegu RF kanala celobrojan. Npr. u 8 MHz kanal staje tačno 28 672 podnosilaca, odnosno razmaka, ako se koristi 32k FFT mod, tako da je dovoljno da RF frekvencije budu podešene na frekventnom rastojanju od tačno 8 MHz i da podnosilac sa najvišom frekvencijom prethodnog i podnosilac sa najnižom frekvencijom sledećeg kanala imaju razmak jednak razmaku između podnosilaca unutar FFT bloka.

U izvršenoj Matlab simulaciji u odnosu na neku centralnu RF frekvenciju f_c , ako za primer ponovo uzmemo kombinaciju četiri kanala onda su noseće frekvencije pojedinačnih kanala iznositi:

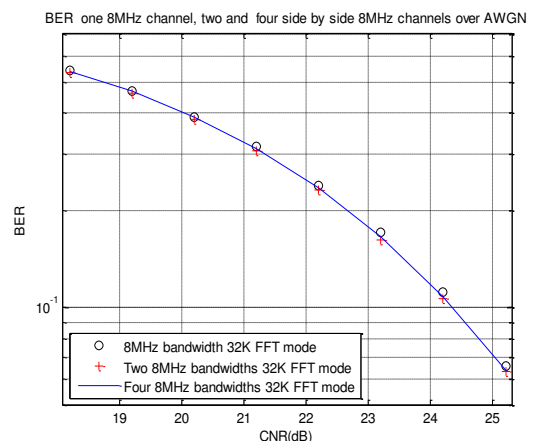
$$f_{c1} = f_c - 3 * (N_{total} / 2) * cs \quad f_{c2} = f_c - (N_{total} / 2) * cs \quad (6.6)$$

$$f_{c3} = f_c + ((N_{total} / 2) + 1) * cs \quad f_{c4} = f_c + 3 * (N_{total} / 2) + 1 * cs$$

gde je N_{total} definisan u izrazu (6.3). Na Slici 6.9 prikazane su frekventne karakteristike pojedinačnog RF kanala i dva *leđa uz leđa* spojena kanala. U simulaciji su korišćeni parametri Fiksne MFN mreže iz tabele 3.2 i podaci za IFFT i FFT iz tabele 6.1. Kao što se vidi frekvencijske karakteristike su, osim širine opsega, identične.



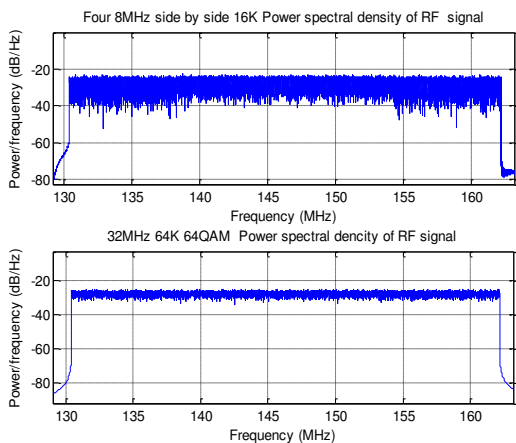
Slika 6.9. PSD za jedan i dva kanala *leđa uz leđa*



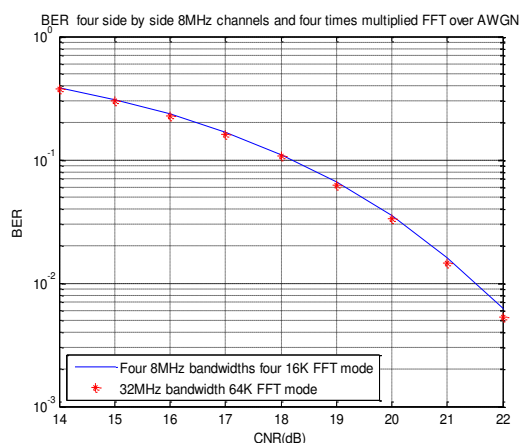
Slika 6.10. BER za jedan, dva i četiri kanala *leđa uz leđa*

Kombinovani kanali imaju iste konfiguracione parametre kao i pojedinačni kanali. Na slici 6.10. dat je dijagram simulacije BER za jedan, dva i četiri integrisana takva kanala takođe sa parametrima za MFN fiksne mrežu u prisustvu AWGN šuma. Dijagram pokazuje da se krive gubitaka poklapaju.

Ako se sada međusobno uporede dva razmatrana načina povezivanja RF kanala na PHY sloju, a na primeru portabl SFN mreže sa parametrima iz tabele 6.1, može se ponovo zaključiti da daju iste rezultate. Na Slici 6.11 date su frekvencijske karakteristika povezivanja četiri RF kanala povećanjem FFT bloka (dole) i spajanje *leđa uz leđa* (gore), a na Slici 6.12 dijagrami BER za tako formirane širokopolasne kanale. Zapravo, i ovde se može uočiti poznata činjenica da se ortogonalnost podnosilaca sa povećanjem FFT bloka povećava, pa je frekvencijska karakteristika na donjoj polovini Slike 6.11 „čistija“. Rezultati simulacije za BER na Slici 6.12, takođe pokazuju tu blagu razliku.



Slika 6.11. PSD za četiri FFT pomnožena i četiri *leđa uz leđa* RF kanala



Slika 6.12. BER za četiri FFT pomnožena i četiri *leđa uz leđa* RF kanala

Simulaciona analiza je, dakle, potvrdila očekivanja da OFDM tehnika omogućava da se princip ortogonalnosti višestrukih nosilaca u okviru jednog kanala proširi na grupu susednih kanala. Integracijom kanala na fizičkom sloju stvaraju se širokopolasni kanali neophodni za multipleks digitalnih programa velikog protoka.

Analizirana su dva načina objedinjavanja više RF kanala u DVB-T2 prenosu. Ako se koriste isti parametri za zaštitno kodovanje, modulaciju i zaštitni interval kapacitet objedinjenih kanala po oba modela na fizičkom nivou je veći u odnosu na TFS, tehniku objedinjavanja na MAC nivou, jer u potpunosti koristi dodeljeni frekvencijski opseg. TFS tehnika ima veću fleksibilnost jer može kombinovati i nesusedne kanale.

U uslovima tzv. DVB-T2 okruženja, ako se može postići sinhronizacija sa susednim RF kanalima, moguće je koristiti zaštitni frekvencijski opseg na obe strane RF kanala, bez obzira na koji se način vrši povezivanje u širokopolasni multipleks. Ovim se dodaje deo spektra na krajevima PHY spojenih kanala, ali i na oba kraja svakog TFS spojenog RF kanala. O ovome će se detaljnije razmatrati u poglavlju 7. Simulaciona analiza bi se i u ovim slučajevima izvela na isti način.

6.5.3. Dobitak planiranja kod spajanja na PHY sloju

Sasvim je logično da će dobitak u pokrivenosti biti veći ukoliko su kanali povezani u širokopolasni multipleks razmaknutiji, jer se tako smanjuje uticaj frekvencijski selektivnog fedinga. Rezultati za dobitak planiranja TFS povezanih kanala su pokazali da se pri ukupnom rasponu od šest RF kanala dobitak u pokrivanju iznosi 2,5 dB. Za kanale povezane na fizičkom sloju nema eksplicitnih rezultata merenja dobitka. Pošto je to spajanje susednih kanala dobitak po osnovu smanjenja uticaja efekata selektivnog fedinga je znatno manji nego

kod TFS povezivanja. U ovom radu pretpostavićemo da on iznosi 1,5 dB za dva, 2 dB za tri, 2,2 dB za četiri i 2,5 dB za šest povezana kanala.

U Tabeli 5.3 date su razlike u odnosu signal-šum $\Delta(C/N)$ u dB potrebne da se kodni količnik sa $2/3$ promeni na novu vrednost. Na osnovu ove tabele može se zaključiti da dobitak planiranja koji se može postići kod spojenih susednih kanala moguće iskoristiti za povećanje kodnog količnika sa $2/3$ na $3/4$, izuzev za dva i tri kanala gde je ovo moguće samo kod QAM 64 modulacije.

Zaključak

Simulacija oba razmatrana modela na fizičkom nivou je pokazala da se vrednost BER širokopojasnih kanala ne menja u odnosu na pojedinačni (uskopojasni) RF kanal.

Integracija spajanjem kanala je pogodna za sve vrste prenosa, ali zahteva strogu vremenska i frekvencijska sinhronizacija kanala. Integracija kanala povećanjem FFT bloka je limitirana administrativnim i tehničkim ograničenjem maksimalne veličine FFT bloka, pa je, makar u početku, pogodnija za mreže namenjene portabl i mobilnim korisnicima.

Dobitak planiranja je znatno manji nego kod TFS povezivanja. To daje osnova da se razmotri mogućnost TFS povezivanja RF kanala čiji je pojedinačni kapacitet proširen na fizičkom sloju, na način razmotren u ovom poglavlju. Tako bi se udružile tehnike na MAC i PHY sloju. Uslov je rad u DVB-T2 okruženju, odnosno sinhronizacija ovih i svih susednih RF kanala, tehnikama koje se koriste za SFN mreže. U poglavlju 7, izvršiće se proračuni i za ovu opciju.

7. Smeštanje programa u širokopojasne kanale

Razmatranja u poglavlju 4. jasno pokazuju da, čak i sa primenom HEVC, osim velikog broja HD programa prve generacije, DVB-T2 multipleks jednog RF kanala ne može preneti očekivani broj programa budućih formata. Istovremeno ni iskorišćenje kapaciteta multipleksa nije potpuno. U poglavlju 5. i poglavlju 6. prikazani su načini kako da se kapacitet RF kanala poveća, a udruživanjem kapaciteta omogući veća efikasnost u korišćenju.

7.1. Kapacitet širokopojasnog RF kanala

7.1.1. Kapacitet u ne-DVB-T2 okruženju

Ne-DVB-T2 okruženje podrazumeva situaciju kada se RF kanali koji su predmet razmatranja nalaze u okruženju RF kanala sa kojima se ne može postići OFDM vremenska i frekvencijska sinhronizacija. To može biti mešovito korišćenje frekvencijskog prostora sa drugim, primera radi Mobilnim mrežama, ili čak, susedstvo sa DVB-T2 kanalima koji se, iz nekih razloga, ne mogu sinhronizovati. Prema takvim kanalima zadržava se standardni zaštitni frekvencijski interval.

TFS tehnikom se zajednički širokopojasni frekvencijski prostor stvara softverski, na MAC nivou, a njegov kapacitet je jednak zbiru kapaciteta pojedinačnih RF kanala. U Tabeli 3.2. u tački 3.4 dati su kapaciteti multipleksa na jednom kanalu za fiksni MFN, fiksnu SFN, portabl SFN i mobilnu SFN mrežu, a za vrednosti FFT moda, moda podnosilaca, zaštitnog intervala i modulacije za koje se očekuje da će biti primenjivani u DBV-T2 mrežama u bliskoj budućnosti. U Tabeli 7.1, u kolonama označenim sa TFS dati su kapaciteti širokopojasnog multipleksa koji se dobijaju povezivanjem dva, četiri i šest RF kanala. Razmatranja u ovoj i tački 7.1.2. oslanjaju se na analize u radu [16].

TFS integracija omogućava protok $n \times P$, gde je P protok jednog, u ovom primeru 8 MHz kanala. DBV-T2 specifikacijama je predviđeno povezivanje do 6 RF kanala. U kolonama TFS u Tabeli 7.1. dati su kapaciteti za dva, tri, četiri i šest kanala po svakom od tri posmatrana

moda emitovanja. Kapaciteti su izračunati multiplikacijom vrednosti iz Tabele 3.2. Primena TFS omogućava značajno poboljšanje efikasnosti, koje ćemo diskutovati paralelno sa očekivanim efektima integracije kanala na fizičkom sloju u tački 7.1.2.

Ipak, kod TFS povezivanja, u svakom RF kanalu ostaje na krajevima deo frekvencijskog spektra koji nije iskorišćen. U poglavlju 6 je pokazano da se zahvaljujući OFDM tehnici susedni kanali mogu povezati u zajednički opseg na PHY sloju, na način da se i ovaj frekvencijski prostor iskoristi. Dobitak u kapacitetu je najveći kod 8k extended moda pošto on pokriva manji frekvencijski prostor, 7,71 MHz, u poređenju sa proširenim modovima 16k i 32k koji zauzimaju band od 7,77 MHz. Sa većim brojem kombinovanih kanala dobitak se povećava. U Tabeli 7.1, u koloni PHY (fizički sloj) dati su odgovarajući kapaciteti širokopojasnih kanala povezanih hardverskim putem.

Tabela 7.1. Kapaciteti multipleksa na TFS grupama od dva, tri, četiri i šest RF kanala, primer scenarija fiksnog MFN, fiksnog SFN i prenosivog SFN moda DVB-T2 za rad u ne-DVB-T2 okruženju

Kapacitet multipleksa (Mb/s)						
Broj kanala	Fiksna MFN		Fiksna SFN		Potrabl SFN	
	32 k prošireni		32 k prošireni		16 k prošireni	
	TFS	PHY	TFS	PHY	TFS	PHY
8 MHz	40,20	40,20	37,00	37,00	26,20	26,20
2x8 MHz	80,40	81,60	74,00	75,1	52,40	53,18
3x8 MHz	120,6	123,00	111,00	113,21	78,60	80,16
4x8 MHz	160,80	164,40	148,00	151,31	104,80	107,15
6x8 MHz	241,20	247,19	222,00	227,52	157,20	161,31

U Tabeli 7.1 u kolonama označenim sa PHY, dati su kapaciteti predloženih širokopojasnih kanala od dva, tri, četiri i šest kanala spojenih na PHY sloju, koristeći podatke o povećanju kapaciteta iz Tabele 7.2. U ne-DVB-T2 okruženju kapaciteti kod PHY spajanja su veći u odnosu na odgovarajuće kod TFS i prikazani su kao dobitak u procentima za odgovarajući broj kanala. Razlika se sa brojem spojenih kanala povećava.

Broj podnosilaca za jedan, dva, tri, četiri i šest spojenih kanala označenih sa N, N2, N3, N4 i N6 dat je u gornjem delu Tabele 7.2. Povećanje kapaciteta, izraženo kroz povećanje broja aktivnih podnosilaca (Dodatni podnosioci) i procentualno povećanje (Dobitak Nx) u odnosu na isti broj povezanih kanala tehnikom TFS dato je u donjem delu Tabele 7.2. Razmatrani su 16k i 32k FFT algoritmi u normalnom i proširenom modu podnosilaca, pošto su to verzije za koje se očekuje da budu primenjivane u sledećih nekoliko godina. Proračunati dobitak u broju aktivnih podnosilac poklapa se sa povećanjem kapaciteta datim u Tabeli 7.1.

Podaci u Tabeli 7.2 podrazumevaju da su zaštitni frekvencijski intervali između povezanih RF kanala iskorišćeni, a da su na krajevima grupe zadržani, računajući na mogućnost rada u ne-DVB-T2 okruženju, sa kojim se ne može postići potrebna ortogonalnost. Dobitak se kreće od 2,6% za dva spojena kanala do 4,3% za 6 spojenih kanala kod normalnih FFT modova. Procenti su manji kada su za poređenje uzete proširene verzije FFT, verzije predviđene za buduću primenu pa i u prikazanom TFS kapacitetu, a dobici su od 1,49 do 2,48%. I sa ovim

Tabela 7.2. Broj aktivnih podnosilaca na grupama od dva, četiri i šest RF kanala u slučaju udruživanja na fizičkom nivou, broj dodatnih kanala i odgovarajući dobitak u odnosu na TFS povezivanje

FS	16384	16384	32768	32768
mod	normalni	prošireni	normalni	prošireni
N - jedan kanal	13633	13921	27265	27841
N2 - dva povezana kanala	27969	28256	55937	56512
N3 – tri povezana kanala	42305	42591	84609	85183
N4 - četiri povezana kanala	56641	56926	113281	113854
N6 - šest povezanih kanala	85313	85596	170625	171196
Dodatni podn. N2	703	414	1407	830
Dodatni podn. N3	1406	828	2814	1660
Dodatni podn. N4	2109	1242	4221	2490
Dodatni podn. N6	3515	2070	7035	4150
Dobitak N2 (%)	2,578	1,487	2,581	1,491
Dobitak N3 (%)	3,438	1,999	3,441	1,987
Dobitak N4 (%)	3,868	2,231	3,870	2,236
Dobitak N6 (%)	4,298	2,479	4,300	2,4846

vrednostima ukazuju da se spajanjem kanala realizovanih u proširenom FFT modu postiže veći dodatni dobitak od onoga između normalnog i proširenog FFT moda.

7.1.2. Kapacitet u DVB-T2 okruženju

U uslovima kada je DVB-T2 dodeljeni opseg koherentan i unutar opsega nema kanala drugih mreža, može se postići ortogonalnost svih RF kanala, bez obzira da li su ili nisu predmet povezivanja u širokopojasni multipleks. U DVB-T2 sistemu je za potrebe SFN mreže razrađen način sinhronizacije predajnika u okviru jedne SFN mreže. Proširenjem ovog principa na celu mrežu može se postići sinhronizacija potrebna za potpuno zauzeće

kapaciteta RF kanala i za njihovo povezivanje na fizičkom sloju, kao i za koegzistenciju sa ostalim RF kanalima u okruženju. U odnosu na kapacitete u ne-DVB-T2 okruženju ovi kapaciteti su uvećani za:

- 1,2 Mb/s po svakom RF kanalu kod TFS povezivanja,
- 1,2 Mb/s za celu grupu povezanih RF kanala

Tabela 7.3: Kapaciteti multipleksa na TFS grupama od dva, tri, četiri i šest RF kanala, primer scenarija fiksnog MFN, fiksnog SFN i prenosivog SFN moda DVB-T2 za rad u DVB-T2 okruženju

Mod mreže	MFN	SFN	Portable
FFT mode	32k	32k	16k
8 MHz	41,4	38,1	26,98
2X 8 MHz	82,8	76,21	53,97
3X 8 MHz	124,2	114,31	80,95
4X 8 MHz	165,6	152,42	107,93
6X 8 MHz	248,4	228,63	161,9

U ovom slučaju kapacitet RF kanala je isti za oba načina povezivanja u širokopojasni multipleks pa će i kapacitet širokopojasnog RF kanala biti isti i kod TFS i kod povezivanja na fizičkom sloju. Očigledno da je povećanje kod TFS povezivanja veće i da time ovaj način povezivanja dobija na značaju.

Povećani kapaciteti na fizičkom sloju analizirani u ovoj i prethodnoj tački, istovremeno doprinose i povećanju dobitka statističkog multipleksiranja. Povećani broj programa mogao bi se i egzaktno proračunati na način prikazan u poglavlju 4, tačke 4.5.2 i 4.5.3. Međutim u poglavlju 6. detaljno je objašnjen dobitak planiranja, koji prati povećanje frekvencijskog opsega, kao dodatni efekat poboljšanja otpornosti na frekvencijsku selektivnost odziva RF kanala. Zato razmatranja u ovoj i prethodnoj tački imaju smisla samo da pokažu koliki je efekat povezivanja kanala na povećanje kapaciteta sa aspekta boljeg korišćenja frekvencijskog opsega. Kapaciteti koje smo proračunali i prikazali u prethodnim tabelama služe kao osnova da se na njih doda kapacitet koje se može ostvariti po osnovu dobitka planiranja. Kvantitativna analiza načina da se dobitak planiranja, odgovarajućom promenom parametara, pretvori u povećanje kapaciteta kanala, ili poboljšano pokrivenje područja TV signalom, data je sekciji 7.2.

7.2. Povećanje kapaciteta po osnovu dobitka planiranja

Sasvim je logično da će dobitak planiranja biti veći ukoliko su kanali povezani u širokopojasni multipleks razmaknutiji, jer je veća šansa da kanali u istom trenutku trpe različite tako uticaje u prenosu, a da u zbir tih uticaja bude manje promenljiv, što i jeste osnovni cilj. U eksperimentalnim mrežama [10] i [11] ovo je potvrđeno. U poglavlju 5, tačka 5.4.2 dati su eksperimentalni rezultati za TFS dobitak u dB. Ovi rezultati daju dovoljno informacija da se napravi procena dobitka planiranja i kod povezivanja susednih RF kanala. Dobra je okolnost da se na bazi ovih podataka i koristeći Tabelu 5.8, dobitak planiranja izražen u dB može pretvoriti u odgovarajuću promenu kodnog količnika, FEC. U Tabelama 7.3 i 7.4, uz podatke o kapacitetima, date su i vrednosti dobitka planiranja pod oznakom Δ (C/N) [dB] i ekvivalentne vrednosti FEC.

7.2.1. Povećanje kapaciteta u ne-DVB-T2 okruženju

U Tabeli 7.4 dati su kapaciteti dva, tri, četiri i šest RF kanala povezanih TFS tehnikom (kolona TFS) ili spajanjem na fizičkom sloju (kolona FI) za rad u ne-DVB-T2 okruženju (ostavljen zaštitni frekvencijski interval na krajevima opsega).

U okviru parametara koje će DVB-T2 koristiti u narednim godinama, planiran je kodni količnik 2/3, u fiksnim, portabl i mobilnim mrežama. Povoljnije vrednosti kodnog količnika su 3/4, 4/5 i 5/6, a u tabeli 5.8 su date razlike u odnosu signal-šum $\Delta(C/N)$ u dB, potrebne da se kodni količnik sa 2/3 promeni na novu vrednost. Ove razlike, uzete iz Tabele 5.7 imaju određeni dijapazon u zavisnosti od toga da li je dominantan Gausov, Rajsov ili Rejljev šum.

Tabela 7.4. Kapacitet širokopolasnih RF kanala u ne-DVB-T2 okruženju bez i sa uključenim dobitkom planiranja

Kapacitet širokopolasnog RF kanala						
Broj RF kanala	Fiksna MFN		Fiksna SFN		Potrabl SFN	
	32 k extended		32 k extended		16 k extended	
	TFS	FI	TFS	FI	TFS	FI
8 MHz	40.2	40.2	37	37.0	26.2	26.2
2x8 MHz	80.4	81.6	74	75.1	52.4	53.18
$\Delta(C/N)$ [dB]	2,5	1,5	2,5	1,5	2,5	1,5
FEC	3/4	2/3	3/4	2/3	3/4	2/3
Sa dobitkom planiranja (Mb/s)	90.45	81.6	83.25	75.1	58.95	53.18
3x8 MHz	120.6	123	111	113.21	78.6	80.16
$\Delta(C/N)$ [dB]	4	2	4	2	4	2
FEC	4/5	2/3	4/5	2/3	5/6	3/4
Sa dobitkom planiranja (Mb/s)	144.72	123	133.2	114.31	94.32	90.18
4x8 MHz	160.8	164.4	148	151.31	104.8	107.15
$\Delta(C/N)$ [dB]	4,5	2,2	4,5	2,2	4,5	2,2
FEC	4/5	3/4	4/5	3/4	5/6	3/4
Sa dobitkom planiranja (Mb/s)	192.96	184.95	177.6	170.22	131	120.54
6x8 MHz	241.2	247.19	222	227.52	157.2	161.1
$\Delta(C/N)$ [dB]	5	2.5	5	2.5	5	2.5
FEC	5/6	3/4	5/6	3/4	5/6	3/4
Sa dobitkom planiranja (Mb/s)	301.5	278.09	266.4	255.96	196.5	181.1

Tabela pokazuje manje kapacitete TFS pre dodavanja dobitka planiranja. Razlika se povećava sa povećanjem broja povezanih RF kanala, i kod šest kanala (red 6x8MHz) kapacitet FI povezanih kanala je veći i razlika iznosi od 4,1 Mb/s kod Portable do 6 Mb/s kod fiksne MFN mreže. Međutim, dobitak planiranja kod TFS povezivanja, zbog veće disperzije kanala, je znatno veći. Ukupno, zbog većeg dobitka planiranja (redovi $\Delta(C/N)$ [dB]), pa time i boljeg kodnog količnika (redovi FEC), kapaciteti sa dobitkom planiranja veći su za TFS. Primera radi, kod šest povezanih kanala (najniži red u Tabeli) razlika se kreće od 15,03 Mb/s kod Portabl do 23,41 Mb/s kod fiksne MFN mreže.

Dobitak planiranja je posebno izražen kod Portabl moda jer se tu QAM 64 modulacija, pa poboljšanje odnosa signal-šum bolje valorizuje u odnosu na QAM 256. Iz tabele se vidi da se već kod tri TFS povezana RF kanala kodni količnik povećava na maksimalnih 5/6, što u odnosu na kodni količnik 2/3 predstavlja povećanje kapaciteta od 25%.

7.2.2. Povećanje kapaciteta u DVB-T2 okruženju

Na isti način kao u prethodnoj datu su i kapaciteti širokopojasnih RF kanala za TFS i FI povezivanje, ovog puta u DVB-T2 okruženju. Dakle, iskorišćeni su u potpunosti opsezi RF kanala, u ovim primerima od 8 MHz. Kapaciteti su značajno povećani, posebno kod TFS kanala, koji su u prethodnom razmatranju imali zaštitne frekvencijske intervale na krajevima.

Tabela 7.5. Kapacitet širokopojasnih RF kanala u DVB-T2 okruženju bez i sa uključenim dobitkom planiranja

Kapacitet širokopojasnog RF kanala						
Broj RF kanala	Fiksna MFN		Fiksna SFN		Potrabl SFN	
	32 k extended		32 k extended		16 k extended	
	TFS	FI	TFS	FI	TFS	FI
8 MHz	41.4	41.4	38.1	38.1	26.98	26.98
2x8 MHz	82.8	82.8	76.20	76.21	53.96	53.97
Δ (C/N) [dB]	2,5	1,5	2,5	1,5	2,5	1,5
FEC	3/4	2/3	3/4	2/3	3/4	2/3
Sa dobitkom planiranja (Mb/s)	93.15	82.8	85.725	76.21	60.705	53.97
3x8 MHz	124.20	124.2	114.30	114.31	80.95	80.95
Δ (C/N) [dB]	4	2	4	2	4	2
FEC	4/5	2/3	4/5	2/3	4/5	3/4
Sa dobitkom planiranja (Mb/s)	149.04	124.2	137.16	114.31	97.128	91.07
4x8 MHz	165.60	165.6	152.40	152.42	107.92	107.93
Δ (C/N) [dB]	4,5	2,2	4,5	2,2	4,5	2,2
FEC	4/5	3/4	4/5	3/4	5/6	3/4
Sa dobitkom planiranja (Mb/s)	198.72	186.3	182.88	171.47	134.9	121.42
6x8 MHz	248.40	248.4	228.60	228.63	161.88	161.9
Δ (C/N) [dB]	5	2.5	5	2.5	5	2.5
FEC	5/6	3/4	5/6	3/4	5/6	3/4
Sa dobitkom planiranja (Mb/s)	310.50	285.75	274.32	257.21	202.35	182.14

Vrednosti dobitka planiranja, pa time i kodni količnici ostaju isti kao u Tabeli 7.4. Ali ovog puta ovaj dobitak se primenjuje na mnogo veću osnovicu pa su dobijeni kapaciteti veći. Kod, recimo, šest TFS povezanih kanala razlika se kreće od 5,75 Mb/s kod Portabl do 9 Mb/s kod fiksne MFN mreže.

Posebno treba napomenuti da, kod pretvaranja iz vrednosti u dB u promenu FEC, dobitak planiranja nije u potpunosti potrošen, pa se odražava na poboljšanje pokrivenosti područja TV signalom.

Zaključak

Rezultati Tabele 7.5 predstavljaju maksimalno povećanje kapaciteta koje se može postići formiranjem širokopolasnih RF kanala. To je zapravo sinergija dometa unapređenja sistema na fizičkom i na MAC sloju OSI modela.

Potpunim korišćenjem frekvencijskog opsega RF kanala povećava se kapacitet. Primenom TFS na frekvencijski razmaknute RF kanale virtuelno se poboljšava i uravnotežuje odnos signal-šum i time podiže Shanon-ova granica. Na povećanom kapacitetu do punog izražaja dolazi efekat statističkog multipleksiranja, dovodeći do uravnoteženja protoka na nivou kapaciteta kanala.

7.3. Proračun broja HD i UHD programa

Na slikama prikazanim u ovoj sekciji može se sagledati broj programa u HD i UHD rezoluciji koji se može smestiti u širokopolasne multiplekse TFS i FI povezanih RF kanala. Prikazane su situacije za:

- a) neDVB-T2 okruženje sa zauzimanjem opsega RF kanala proširenom modu (dijagram na levoj strani),
- b) DVB-T2 okruženje sa potpunim zauzimanjem opsega RF kanala modu (dijagram na desnoj strani).

Horizontalne linije pokazuju kapacitete multipleksa dva, tri i četiri TFS povezana RF kanala sa uračunatim dobitkom planiranja. Kapaciteti na desnim dijagramima su veći, jer se koriste zaštitni frekvencijski opsezi sa oba kraja opsega RF kanala. Sa brojem povezanih kanala ova razlika se povećava. Na slikama je prikazano povezivanje do četiri RF kanala, jer se pokazalo da su za HEVC komprimovane HD programe ovo dovoljni kapaciteti za dostizanje postavljenih ciljeva. Zajedno sa HD prikazuju i 4k programi. Pošto oni zahtevaju mnogo veće protoke smeštaj programa UHD formata u širokopolasne multiplekse sa pet i šest povezanih RF kanala će se dodatno razmatrati.

Kose linije pokazuju potrebne kapacitete sa porastom broja u formatima: HD720p, HD1080p, 3DTV na bazi HD1080p i HD2160p (4k). Osenčeni delovi prikazuju promenu u kapacitetima za svaki od ovih formata ako se stepen komprimovanja HEVC-a poboljšava sa 50% ($k_1=0,5$) do 40% ($k_2=0,4$) u odnosu na MPEG-4.

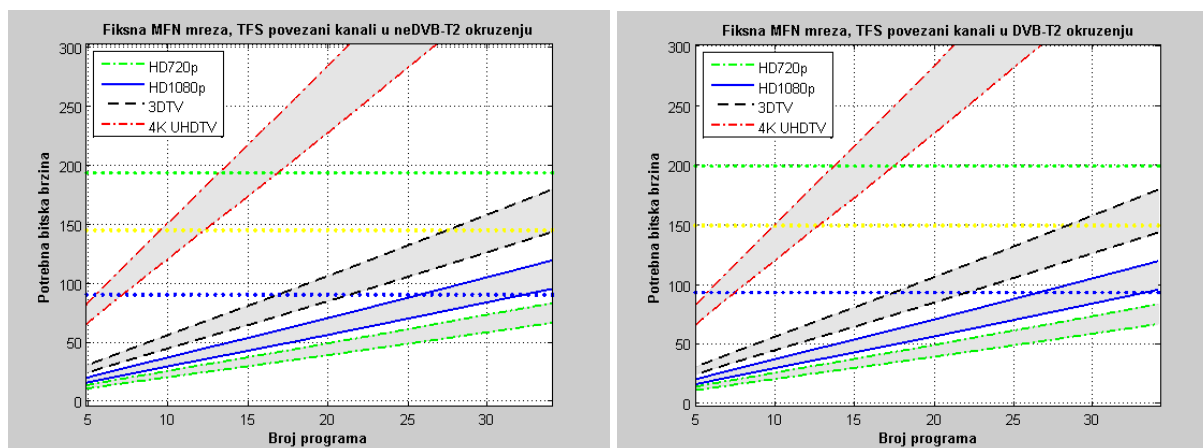
Broj programa za prikazane kapacitete i formate programa očitava se iz preseka kosih linija za određeni format i horizontalnih linija za predložene širokopolasne multiplekse. U razmatranju će se smatrati da 15 do 20 programa u multipleksu omogućava zadovoljavajuće, a preko 20 programa potpuno iskorišćenje kapaciteta kanala.

Prikazani su dijagrami za tri osnovna moda DTT mreža: fiksnu višefrekvencijsku mrežu (MFN), fiksnu jednofrekvencijsku mrežu (SFN) i mrežu za prenosive i mobilne uređaje (Portabl/mobile). Parametri i kapaciteti RF kanala u ovim mrežama su definisani i dati su u Tabeli 3.1.

7.3.1 TFS širokopolasni kanali u fiksnoj MFN mreži

Na Slici 7.1 prikazan je broj programa koji se može smestiti u širokopolasne multiplekse TFS povezanih RF kanala u fiksnoj MFN mreži. Ovo je mreža sa najvećim kapacitetom pojedinačnih RF kanala. Kako je i dobitak planiranja kod TFS veći nego kod FI povezivanja, ovo je kombinacija koja omogućava najveće kapacitete širokopolasnog multipleksa. Tabela

7.5 daje tačne vrednosti, a na desnom dijagramu Slike 7.1 se vidi da je kapacitet za tri povezana kanala blizu 150 Mb/s, a za četiri kanala blizu 200 Mb/s.



a) NeDVB-T2 okruženje

b) DVB-T2 okruženje

Slika 7.1. Broj programa u dva, tri i četiri TFS povezana RF kanala u fiksnoj MFN mreži

Slika pokazuje da TFS multipleks već od dva povezana RF kanala omogućava veliki broj i potpuno iskorišćenje kapaciteta za formate 720p i 1080p, čak i za efikasnost HEVC-a od 50%. Broj 720p je preko 35 i izlazi iz područja prikazanih slikom. Broj 1080p programa se, zavisno od stepena komprimovanja, kreće od 26 – 32 programa u neDVB-T2 do 27 – 34 programa u DVB-T2 okruženju. Može se zaključiti da TFS multipleks u MFN mreži omogućava efikasno emitovanje formata 720p i 1080p, uključujući svaku kombinaciju programa ovih formata u multipleksu.

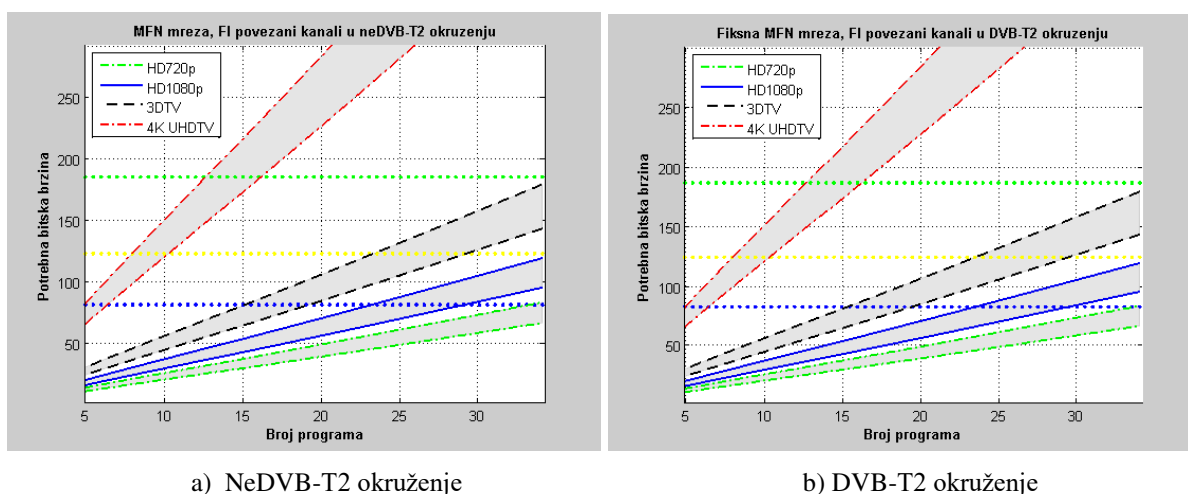
Što se 3DTV programa tiče njihov smeštaj na TFS multipleksu od dva RF kanala je zadovoljavajući (17 u neDVB-T2 i 18 programa u DVB-T2) za k1 efikasnost HEVC-a i postaje potpuno efikasan (oko 22 programa) sa koeficijentom kompresije k2. Manji broj 3DTV programa može se efikasno emitovati u kombinaciji sa programima 720p i 1080p već i pri k1 efikasnosti HEVC-a. Sa povećanjem efikasnosti kompresije HD programi svih razmatranih formata mogu slobodno da se kombinuju. TFS širokopolasni multipleks sa ovim programima u potpunost će iskoristiti kapacitet dva povezana RF kanala.

Treba li onda formirati TFS na tri RF kanala? Prema upravo prikazanim rezultatima, ne! Međutim, potreba za TV programima stalno raste. Posmatrajući Tabele 7.4 i 7.5 može se videti da se prelaskom na tri TFS povezana, a dovoljno frekvencijski raznaknuta RF kanala, FEC može da se poveća sa 3/4 na 4/5 i samim tim i kapacitet za skoro 7%. Na Slici 7.1 to se najbolje vidi po povećanju broja 3DTV programa koji dostiže broj od 27 programa u neDVB-T2 okruženju i k1 efikasnosti HEVC-a, i 36 programa kod k2 efikasnosti u DVB-T2 okruženju.

Stanje sa 4k formatima je sasvim drugačije. Ovo su suviše zahtevni formati za efikasno emitovanje u multipleksima na dva i tri RF kanala, čak i u MFN mrežama. Tek na TFS širokopolasnom multipleksu od četiri RF kanala dostiže se 13 do 14 programa za k1 i zadovoljavajućih 17 do 18 programa za k2 efikasnost komprimovanja signala. To, ipak, omogućava da se, emitovanjem nekoliko programa ove rezolucije zajedno sa HD programima, ne naruši statistička ravnoteže u multipleksu po četiri, i eventualno, tri RF kanala.

7.3.2 FI širokopolasni kanali u fiksnoj MFN mreži

Povezivanje na FI sloju donosi bolje zauzimanje opsega RF kanala. I u neDVB-T2 okruženju koriste se zaštitni frekvencijski intervali između spojenih RF kanala. Zato je razlika u kapacitetima širokopolasnih kanala namenjenih za rad u neDVBT2 i DVB-T2 okruženju manja, u odnosu na stanje kod ova dva načina u TFS povezivanju. Slika 7.2 pokazuje kapacitete za dva, tri i četiri FI povezana RF kanala i razlika između levog i desnog dijagrama je jedva uočljiva. Međutim, mnogo uočljiviji su manji kapaciteti odgovarajućih širokopolasnih kanala u odnosu na TFS kapacitete sa Slike 7.1. Tabela 7.4 i Tabela 7.5 pokazuju da se razlike kreću od 10, 20 pa do 30 Mb/s kod multipleksa sa šest povezanih RF kanala. Ipak, i ovo su kapaciteti, koji u odnosu na pojedinačne RF kanale, omogućavaju neuporedivo veći broj programa i bolju efikasnost u korišćenju kapaciteta.



Slika 7.2. Broj programa u dva, tri i četiri FI povezana RF kanala u fiksnoj MFN mreži

Slika 7.2 pokazuje da i FI multipleks od dva povezana RF kanala omogućava veliki broj i potpuno iskorišćenje kapaciteta za formate 720p i 1080p, čak i za efikasnost HEVC-a od 50%. Broj 720p je preko 33 i izlazi iz područja prikazanih slikom. Broj 1080p programa se, zavisno od stepena komprimovanja, kreće od 23 – 29 programa u neDVB-T2 i 24 do 30 programa u DVB-T2 okruženju. Iako sa nešto manje programa, može se zaključiti da, kao i TFS, i FI multipleks u MFN mreži omogućava efikasno emitovanje formata 720p i 1080p, uključujući svaku kombinaciju programa ovih formata u multipleksu.

Za 10 Mb/s manji kapacitet u odnosu na TFS multipleks, uočljiv je kod smeštanja 3DTV programa. Broj programa se smanjuje na donju granicu zadovoljavajućeg iskorišćenja kapaciteta od 15 programa za k1 efikasnost HEVC-a i nešto ispod donje granice potpune efikasnosti sa 19 programa kod koeficijenta kompresije k2. Zato se i broj 3DTV programa, koji se može emitovati u kombinaciji sa programima 720p i 1080p, mora redukovati, posebno u početnoj fazi primene HEVC. Sa povećanjem efikasnosti kopresije, 3DTV programi mogu u većem broju da se kombinuju sa programima ostalih HD formata.

Na Slici 7.2 se vidi koliko se povećanjem FI multipleksa sa dva na tri RF kanala poboljšava efikasnost korišćenja kapaciteta. Broj 3DTV programa se kreće od 23 programa kod k1 efikasnosti HEVC-a, do 28 programa kod k2 efikasnosti.

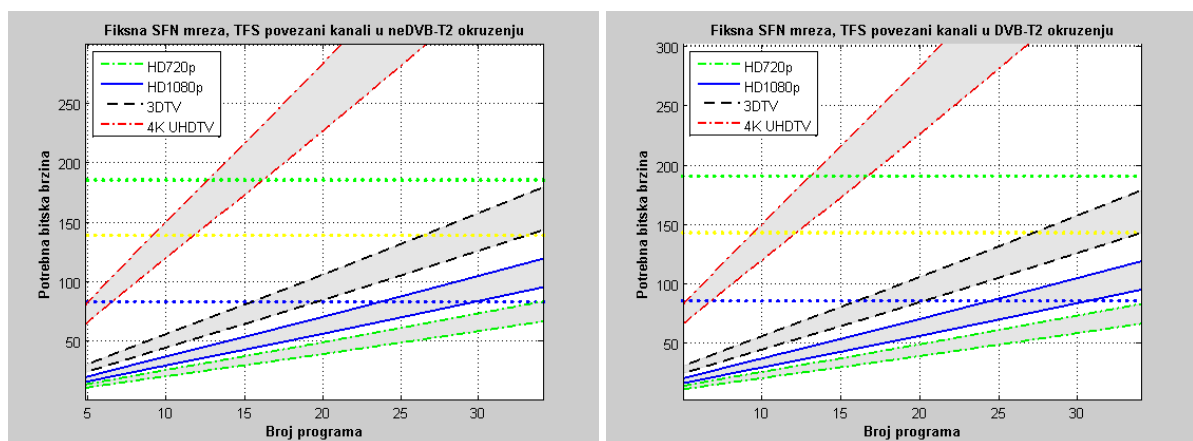
Kod programa u 4k formatu situacija je malo lošija, ali u principu slična onoj u TFS multipleksima. Na četiri FI povezana RF kanala može se očekivati dobitak planiranja i povećanje FEC sa 2/3 na 3/4. Postiže se kapacitet poveća dovoljno da može smestiti

multipleks sa 13 programa za k1 i zadovoljavajućih 16 do 17 programa za k2 efikasnost komprimovanja signala. To omogućava da se nekoliko programa 4k rezolucije emituje zajedno sa HD programima, a da se ne naruši statistička ravnoteža u multipleksu po četiri RF kanala, i eventualno, jednog ili dva programa u multipleksu na tri RF kanala.

7.3.3 TFS širokopojasni kanali u fiksnoj SFN mreži

Fiksna SFN mreža je veoma zastupljena u eksploataciji. Kapacitet RF kanala je nešto manji u odnosu na fiksnu MFN mrežu. Razlog leži u potrebi da zaštitni interval u OFDM simbolu bude duži kako se predajnici u SFN mreži ne bi ometali međusobno. Kapacitet na jednom RF kanalu je manji za oko 3 Mb/s, i to se procentualno odražava na TFS širokopojasne kanale. Iako može da prihvate manje programa i ovakvi multipleksi su dovoljni da se postigne statistička ravnoteža i iskoristivost kapaciteta na sličan način kao i kod fiksnih MGN mreža.

Slika 7.3 pokazuje da pri radu i u neDVB-T2 i, naravno, DVB-T2 okruženju TFS multipleks već od dva povezana RF kanala omogućava veliki broj i potpuno iskorišćenje kapaciteta za formate 720p i 1080p, čak i za efikasnost HEVC-a od 50%. Broj 720p je oko 35, a za veću efikasnost HEVC izlazi iz područja prikazanih slikom. Broj 1080p programa se, zavisno od stepena komprimovanja, kreće od 23 – 30 programa u neDVB-T2 okruženju, a od 24 – 31 programa u DVB-T2 okruženju. To znači da TFS multipleks u SFN mreži omogućava efikasno emitovanje formata 720p i 1080p, uključujući svaku kombinaciju programa ovih formata u multipleksu.



a) NeDVB-T2 okruženje

b) DVB-T2 okruženje

Slika 7.3. Broj programa u dva, tri i četiri TFS povezana RF kanala u fiksnoj SFN mreži

I smeštaj 3DTV programa u TFS multipleksu od dva RF kanala je zadovoljavajući (16 u neDVB-T2 i 17 programa u DVB-T2) za k1 efikasnost HEVC-a i dolazi do potpuno efikasnog multipleksiranja (oko 20 programa) sa koeficijentom kompresije k2. Manji broj 3DTV programa može se efikasno emitovati u kombinaciji sa programima 720p i 1080p već i pri k1 efikasnosti HEVC-a. Sa povećanjem efikasnosti kompresije HD programi svih razmatranih formata mogu slobodno da se kombinuju. TFS širokopojasni multipleks sa ovim programima u potpunost će iskoristiti kapacitet dva povezana RF kanala.

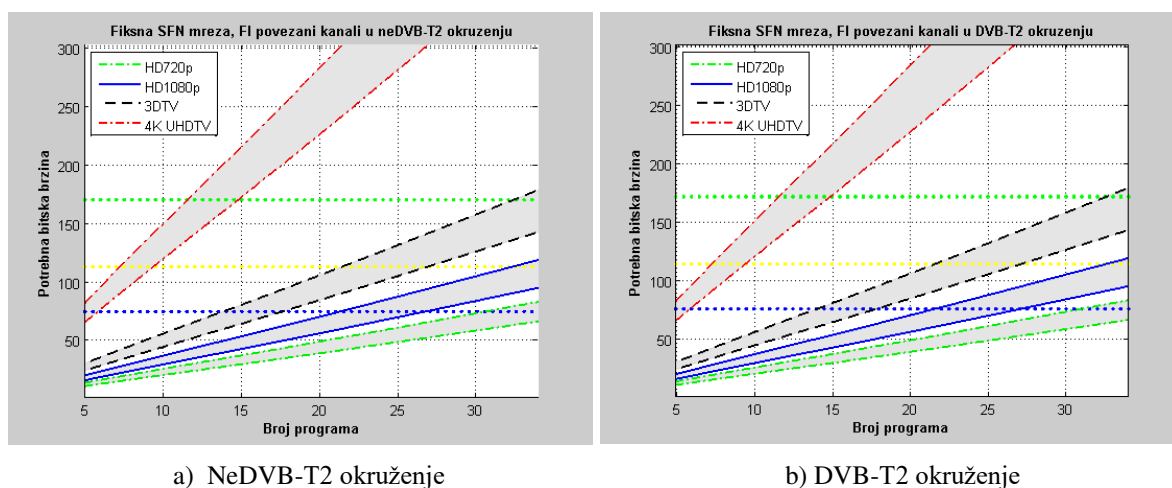
I ovde TFS multipleks na tri RF kanala može da prihvati mnogo veći broj programa i omogući potpuno iskorišćenje kapaciteta RF kanal. Tabele 7.4 i 7.5 može se videti da se prelaskom na tri TFS povezana, a dovoljno frekvencijski razmaknuta RF kanala, FEC može da se poveća sa 3/4 na 4/5. Na Slici 7.3 se vidi po povećanju broja 3DTV programa koji dostiže broj od 26 programa u neDVB-T2 okruženju i k1 efikasnosti HEVC-a, i 34 programa kod k2 efikasnosti u DVB-T2 okruženju.

Malo manji kapaciteti od fiksne MFN mreže, pa uz to i manja efikasnost statističkog multipleksiranja na malom broju programa utiču negativno na smeštanje 4k programa. Tako se TFS širokopojasnom multipleksu od četiri RF kanala može smestiti jedan program manje u odnosu na MFN mreže. Može se emitovati 12 do 13 programa za k1 i zadovoljavajućih 16 do 17 programa za k2 efikasnost komprimovanja signala. To, ipak, omogućava da se i ovde, emitovanjem nekoliko programa 4k rezolucije zajedno sa HD programima, ne naruši statistička ravnoteže u multipleksu po četiri, i eventualno, tri RF kanala.

Treba napomenuti da je namena SFN mreže da radom na istoj frekvenciji grupe predajnika štedi frekvencijske resurse. Otuda se manji kapacitet multipleksa u odnosu na MFN mrežu može nadomestiti dodatnim RF kanalima u širokopojasnom multipleksu. Zato se ovaj vid mreže može smatrati veoma perspektivnim za širokopojasno emitovanje HD progama.

7.3.4 FI širokopojasni kanali u fiksnoj SFN mreži

I kod fiksne SFN mreže razlika u kapacitetima širokopojasnih kanala namenjenih za rad u neDVB-T2 i DVB-T2 okruženju nije velika, i ne povećava se sa porastom broja RF kanala, sve do četiri RF kanala kad se može povećat FEC po osnovu dobitka planiranja. Slika 7.4 pokazuje kapacitete za dva, tri i četiri FI povezana RF kanala i razlika između levog i desnog dijagrama je jedva uočljiva. Kapaciteti kod fiksne SFN su nešto manji u odnosu na do sada razmatrane širokopojasne kanale.



Slika 7.4. Broj programa u dva, tri i četiri FI povezana RF kanala u fiksnoj MFN mreži

I sa ovakvim kapacitetom širokopojasni FI multipleks na dva povezana RF kanala omogućava dovoljan broj programa za potpuno iskorišćenje kapaciteta za formate 720p i 1080p, čak i za efikasnost HEVC-a od 50%. Broj 720p je preko 30 i izlazi iz područja prikazanih slikom. Broj 1080p programa se, zavisno od stepena komprimovanja, kreće od 21 – 26 programa u neDVB-T2 i 22 do 27 programa u DVB-T2 okruženju. Iako sa nešto manje programa, može se zaključiti da FI multipleks u SFN mreži omogućava efikasno emitovanje formata 720p i 1080p, uključujući svaku kombinaciju programa ovih formata u multipleksu.

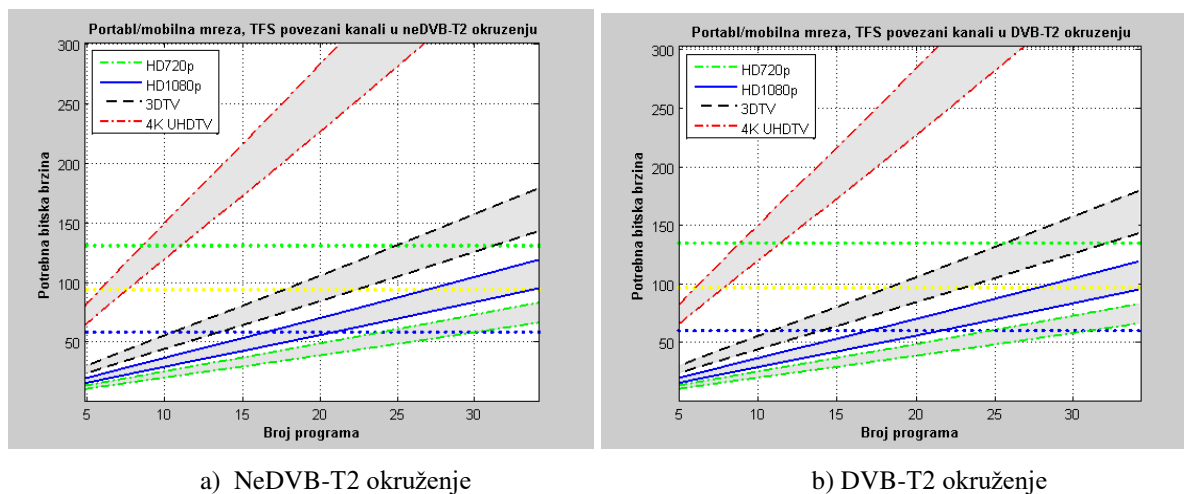
Kod smeštanja 3DTV programa, manji kapacitet pomera broj programa pri početnoj efikasnosti HEVC-a, k1, na oko 13 programa, što je ispod zadovoljavajuće granice. Sa povećanjem stepena komprimovanja na k2, broj programa u multipleksu se povećava na zadovoljavajućih 18. Zato se i broj 3DTV programa, koji se može emitovati u kombinaciji sa programima 720p i 1080p, mora značajno redukovati, posebno u početnoj fazi primene HEVC. Sa povećanjem efikasnosti kopresije, 3DTV programi mogu u većem broju da se

kombinuju sa programima ostalih HD formata. Ipak, optimalni kapacitet FI širokopojasnog kanala za emitovanje 3DTV programa stvara se multipleksiranjem na tri RF kanala. Broj 3DTV programa se kreće od 21 programa kod k1 efikasnosti HEVC-a, do 27 programa kod k2 efikasnosti.

Emitovanje programa u 4k formatu na tri povezana RF kanala nema mnogo smisla. U multipleks se može smestiti 7 programa u početnoj k1 i do 9 programa u kasnijoj k2 efikasnosti HEVC-a. Na četiri FI povezana RF kanala može se očekivati dobitak planiranja i povećanje FEC sa 2/3 na 3/4. Potiže se kapacitet dovoljan da se može smestiti multipleks sa 12 programa za k1 i zadovoljavajućih 16 programa za k2 efikasnost komprimovanja signala. To omogućava da se nekoliko programa 4k rezolucije emituje zajedno sa HD programima, a da se ne naruši statistička ravnoteže u multipleksu. Već je napomenuto da u SFN mreži, lakše nego u MFN, mogu da se obezbede dodatni RF kanali za proširenje kapaciteta širokopojasnog multipleksa.

7.3.5. TFS širokopojasni kanali u portabl/mobilnoj mreži

Za mreže koje će u budućnosti omogućiti prijem TV programa i drugih sadržaja na prenosivim i mobilnim uređajima sa zemaljskih predajnika obično se koristi termin *portabl/mobile*. Zajedničko im je da su namenjene za rad u uslovima smanjenog odnosa signal/šum, nižeg nivoa prijemnog signala, manjeg dobitka prijemne antene, a kod mobilnog prijema i uticaja Doplerovog efekta. Za ovakav prijem planirana je robusnija QAM64 modulacija i, verovatno, 16k prošireni mod rada. Zato je kapacitet RF kanala značajno manji, 26 do 27 dB, a samim tim i kapacitet širokopojasnih multipleksa na grupi takvih kanala.



Slika 7.5. Broj programa u dva, tri i četiri TFS povezana RF kanala u Portabl/mobilnoj mreži

Slika 7.5 pokazuje da pri radu u neDVB-T2 i, naravno, DVB-T2 okruženju TFS multipleks, već od dva povezana RF kanala, omogućava dovoljan broj programa za potpuno iskorišćenje kapaciteta za formate 720p. Broj 720p programa se kreće od 24 do 25 za k1 efikasnost HEVC-a, a za veću efikasnost oko ili malo preko 30 programa. Međutim, broj 1080p programa se, zavisno od stepena komprimovanja, kreće od 16 – 21 programa u neDVB-T2 okruženju, a od 17 – 22 programa u DVB-T2 okruženju. To znači da TFS multipleks u Portabl/mobilnoj mreži omogućava efikasno emitovanje formata 720p i 1080p, uključujući svaku kombinaciju programa, tek kada se stepen kompresije poboljša na 40% sadašnjih MPEG-4 protoka ovih formata. Naravno i u početnoj fazi primene HEVC može se deo

programa, manje od polovine emitovati u 1080p formatu, a da se efikasnost korišćenja kapaciteta održi na visokom nivou.

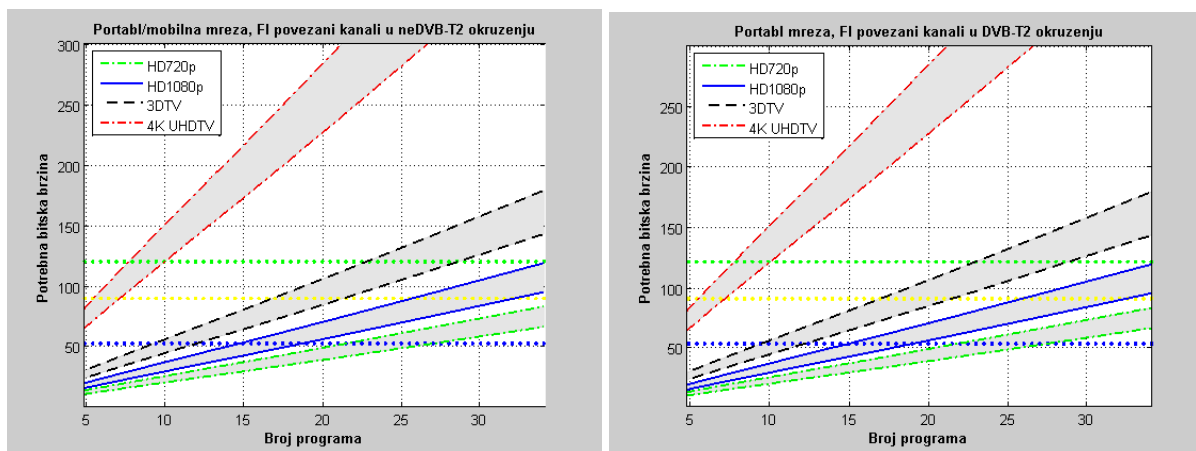
Broj 3DTV programa na dva povezana RF kanala se kreće od 11 programa (k1 kompresija, neDVB-T2 okruženje) do 14 programa (k2 kompresija, DVB-T2 okruženje). Mada je i to značajan broj programa, to je ispod granice zadovoljavajućeg korišćenja kapaciteta RF kanala. Stanje kod širokopojasnog TFS multipleksa na tri RF kanala je znatno povoljnije. I ovde TFS multipleks može da prihvati mnogo veći broj programa i omogući bolje iskorišćenje kapaciteta RF kanala. Iz Tabela 7.4 i 7.5 može se videti da se prelaskom sa dva na tri TFS povezana, a dovoljno frekvencijski razmaknuta RF kanala, FEC može da se poveća sa 4/5 na 5/6. Ovako visok kodni količnik je moguć zbog mnogo veće robustnosti QAM64 u odnosu na QAM256 modulaciju. Na Slici 7.5 se to vidi po povećanju broja 3DTV programa koji dostiže broj od 18 programa u neDVB-T2 okruženju i k1 efikasnost HEVC-a, do 23 programa kod k2 efikasnosti u DVB-T2 okruženju. To znači da u fazi pune zrelosti HEVC-a 3DTV programi mogu da se slobodno kombinuju sa ostalim HD programima. U početnoj fazi bi bilo dobro broj ovih programa, ipak, ne bude dominantan.

Treba imati u vidu da su prag subjektivnog osećaja kvaliteta i očekivanje korisnika niži kod portabl i mobilnog prijema, slično kao što je to i kod mobilnih telefonskih aparata, u odnosu na fiksnu telekomunikacionu mrežu. U tom smislu prethodni zaključci su, verovatno, prestrogi, tako da ima smisla emitovati nekoliko 3DTV programa i u dva TFS povezana RF kanala.

Emitovanje programa u 4k formatu na tri povezana RF kanala nema mnogo smisla. U multipleks se može smestiti 6 programa u početnoj k1 i do 8 programa u kasnijoj k2 efikasnosti HEVC-a. Na četiri TFS povezana RF kanala potiže se kapacitet dovoljan da se može smestiti multipleks sa 8 programa za k1 i 12 programa za k2 efikasnost komprimovanja signala. Razlike između neDVB-T2 i DVB-T2 okruženja gotovo da nisu uočljive. Ipak, ako se uzme u obzir sniženi prag očekivanja, ima smisla da se u multipleksu četiri programa, pri povećanoj efikasnosti HEVC-a sa HD programima emituje i nekoliko programa 4k rezolucije.

7.3.6 FI širokopojasni kanali u Potrabl/mobilnoj mreži

Ovo je vrsta širokopojasnih kanala sa najmanjim kapacitetom. Kapacitet na dva FI povezana RF kanala, ipak omogućava dovoljno programa da se dostigne ili preskoči granica potpunog iskorišćenja za 720p i zadovoljavajućeg iskorišćenja za 1080p formate programa.



a) NeDVB-T2 okruženje

b) DVB-T2 okruženje

Slika 7.6. Broj programa u dva, tri i četiri FI povezana RF kanala u Portabl/mobilnoj mreži

Slika 7.6 pokazuje da se broj 720p programa kreće oko 21 za k1 efikasnost HEVC-a, a za veću efikasnost oko ili malo preko 27 programa. Međutim, broj 1080p programa se, zavisno od stepena komprimovanja, kreće od 15 programa kod k1 kompresije, pa do 18 programa kod k2 kompresije, za oba razmatrana okruženja. To znači da FI multipleks u Portabl/mobilnoj mreži omogućava efikasno emitovanje formata 720p i zadovoljavajuću efikasnost kod emitovanja 1080p. Naravno i u početnoj fazi primene HEVC može se deo programa, manje od polovine emitovati u 1080p formatu, a da se efikasnost korišćenja kapaciteta održi na visokom nivou.

Broj 3DTV programa na dva povezana RF kanala se kreće od 9 programa za k1 kompresiju, do 12-13 programa za k2 kompresiju, kod oba DVB-T2 okruženje. Mada je i to značajan broj To je dosta ispod granice zadovoljavajućeg korišćenja kapaciteta RF kanala, naročito kod manje efikasnosti HEVC-a. Stanje kod širokopojasnog TFS multipleksa na tri RF kanala je povoljnije. Ovde FI multipleks može da prihvati veći broj programa i omogući bolje iskorišćenje kapaciteta RF kanala. Iz Tabela 7.4 i 7.5 može se videti da se prelaskom sa dva na tri TFS povezana, FEC može da se poveća sa 2/3 na 3/4. Na Slici 7.6 se to vidi po povećanju broja 3DTV programa koji dostiže 17 programa, pri k1 efikasnosti HEVC-a, i 21, eventualno 22 programa kod veće efikasnosti i u DVB-T2 okruženju. To znači da u fazi pune zrelosti HEVC-a 3DTV programi mogu da se slobodno kombinuju sa ostalim HD programima. U početnoj fazi bi bilo dobro broj ovih programa, ipak, ne bude preveliki.

I ovde emitovanje programa u 4k formatu na tri povezana RF kanala nema mnogo smisla. U multipleks se može smestiti 6 programa u početnoj k1 i do 7 programa u kasnijoj k2 efikasnosti HEVC-a. Na četiri FI povezana RF kanala potiče se kapacitet dovoljan da se može smestiti multipleks sa 7-8 programa za k1 i 10 programa za k2 efikasnost komprimovanja signala. Razlike između neDVB-T2 i DVB-T2 okruženja gotovo da nisu uočljive. Jedino ako se uzme u obzir, već pomenuti, sniženi prag očekivanja, i ovde ima smisla da se u multipleksu četiri programa, pri povećanoj efikasnosti HEVC-a, emituje i nekoliko programa 4k rezolucije, emituje sa HD programima.

7.4. Primer smeštanja UHD programa u velike širokopojasne kanale

Prethodna razmatranja pokazuju da 4k format po svojim potrebama za protokom, pa time i brojem programa i postignutom efikasnosti korišćenja kapaciteta odudara od HD formata. Iako ovo ulazi u dalju perspektivu u ovoj sekciji će se, ilustracije radi, po modelu koji je do sada korišćen, napraviti proračun broja UHD programa formata 4k i 8k. Primereno potrebama razmatraće se širokopojasni multipleksi na četiri, pet i šest RF kanala. Ne ulazeći u realnost stvaranja tako velikih multipleksa posmatraće se samo primer fiksne TFS mreže, koja omogućava najveće kapacitete.

Za programe u 8k formatu je, po principu koji je korišćen u Tabeli 4.2 procenjen potrebni protok MPEG-4 kodovanog sadržaja na nivou 7 puta veći od protoka 1080p. U literaturi se, često, a to pokazuju i eksperimentalni rezultati [21] procenjuje da će stepen komprimovanja sa porastom formata biti veći. Uzimajući to u obzir, korigovane su vrednosti za početnu (k1) i poboljšanu (k2), efikasnost HEVC-a, tako da se dobijaju vrednosti protoka date u Tabeli 7.6.

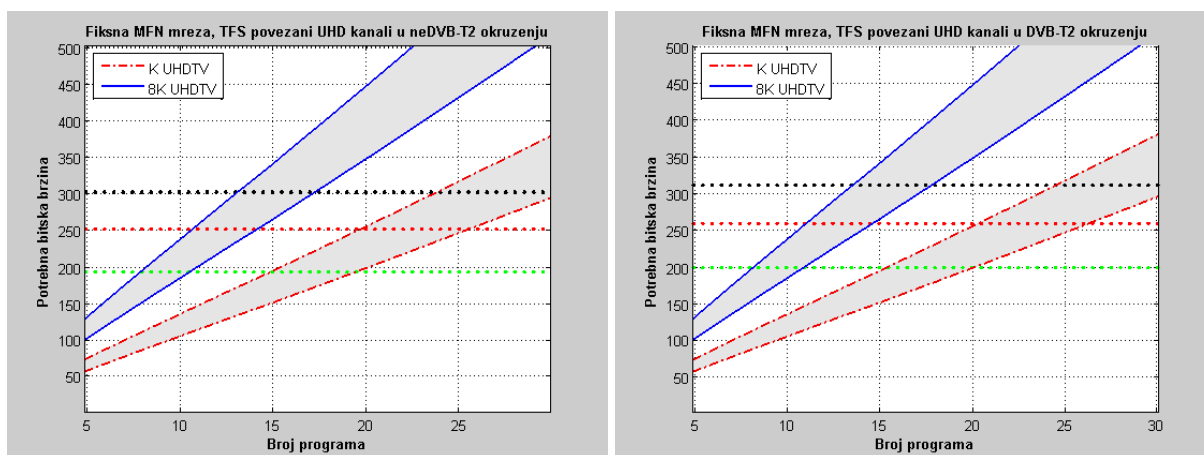
Kapaciteti su, za sadašnje pojmove zaista respektabilni, primereni UHD formatima. Slika 7.7 pokazuje da, pri četiri TFS povezana RF kanala, 4k programi ulaze u područje zadovoljavajuće efikasnosti, već pri početnoj efikasnosti HEVC-a, a u područje pune efikasnosti korišćenja kapaciteta RF kanala, kada se HEVC dodatno unapredi. Ne licitirajući sa tačnim brojem programa, generalno se može zaključiti da je u multipleksu na pet kanala

iskorišćenje kapaciteta potpuno već za početnu efikasnost HEVC-a. Broj programa je, naravno, veći za DVB-T2 okruženje.

Tabela 7.6. Očekivani bitski protoci HD programa za sledećih nekoliko godina

Format	HD 2160p	HD 4320p
H.264	40.00	70.00
H.265, k=0.45	18.00	31.50
H.265, k=0.35	14.00	24.50

Programi u 8k formatu se, pri ovako pretpostavljenom protoku, približavaju zadovoljavajućem iskorišćenju kapaciteta u TFS multipleksa na pet kanala, pri poboljšanoj efikasnosti HEVC-a. I pri nižoj efikasnosti kompresije nekoliko ovih programa može se emitovati zajedno sa 4k programima.



a) NeDVB-T2 okruženje

b) DVB-T2 okruženje

Slika 7.7. Broj UHD programa u četiri, pet i šest TFS povezanih RF kanala u fiksnoj MFN mreži

Multipleks na šest RF kanala omogućava više programa, i mnogo veću zastupljenost programa 8k formata, i pri manjem stepenu efikasnosti HEVC-a, a skoro ravnopravnu zastupljenost kada HEVC dostigne eksploatacionu zrelost, računajući da će napredak ići dinamikom kojom su išle prethodne kompresione tehnike, MPEG-2 i MPEG-4.

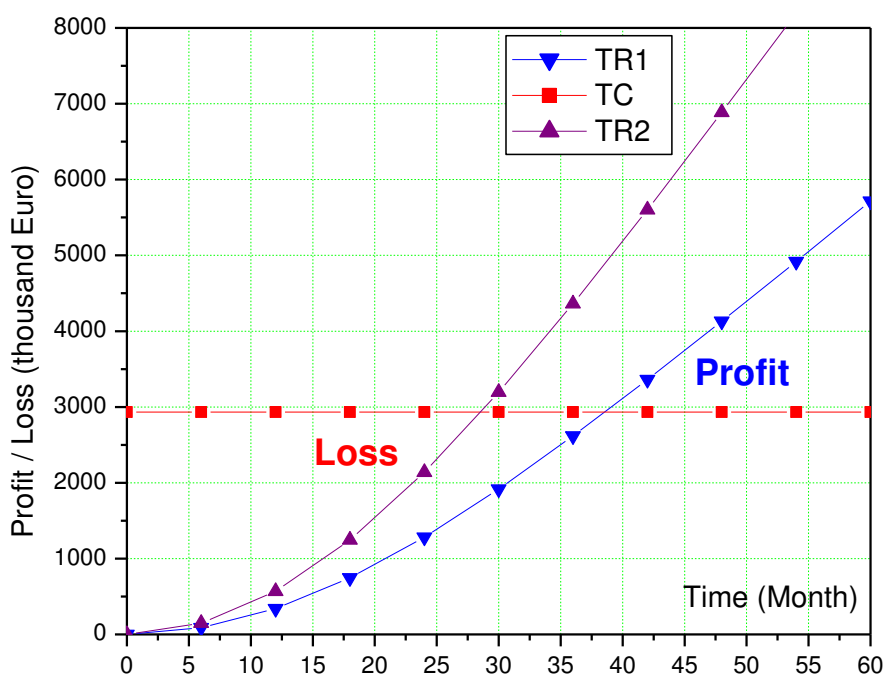
7.5. Analiza ukupnih efekata povezivanja

Razmatranja u ovom poglavlju egzaktno pokazuju koliki su dometi udruživanja više efekata. Pojedinačni dometi povećanja stepena kompresije, statističkog multipleksiranja, povećanja korišćenog opsega i robusnosti sistema po osnovu dobitka planiranja, uz tehnike koje su unapredile DVB-T2 kodovanje kanala, imaju u različitim situacijama manji ili veći uticaj da se broj emitovanih programa poveća. Kada se, u budućnosti, ovi efekti na pravi način udruže, stvara sistem koji, ne samo da može prihvatiti izazov, emitovanja HD programa, uključujući i 3DTV, već i u određenim konfiguracijama može da prihvatiti i UHD programe.

Proračuni su pokazali da, sa malim odstupanjima, širokopojasni multipleksi na dva povezana RF kanala omogućavaju efikasno emitovanje u formatima programa 720p i 1080p. Za 3DTV programe, zasnovane na 1080p formatu, potrebni su multipleksi na tri RF kanala.

Uz očekivano efikasnije kodovanje programa viših rezolucija, proračuni su pokazali da u manjem broju 4k programi mogu da se emituju u multipleksima od četiri, a sa zadovoljavajućom efikasnošću i u većem broju na pet RF kanala. Moguće je i emitovanje nekog UHD programa u 8k rezoluciji, posebno kada se i efikasnost kodovanja još unapredi.

Posebno je značajno primeniti TFS tehniku povezivanja na FI proširene RF kanala. Tako se udružuju ukupno povećanje kapaciteta sa povećanjem procenta korisnog sadržaja. Ovo, integrisano povećanje kapaciteta daje prostor statističkom multipleksiranju da se kapacitet u potpunosti iskoristi. Primenjene tehnike u DVB-T2 sistemu omogućavaju da se eventualni pogrešni biti, prvo razdvoje u pojedinačne, a potom i rekonstruišu.



Slika 7.8. Analiza dividende dobijene TFS povezivanjem četiri RF kanala fiksne MFN mreže u ne-DVB-T2 okruženju u poređenju sa pojedinačno zauzetim kanalima

Izgleda idealno, ali, ukupno gledano, postiže se sve što se od DVB-T2 sistema može očekivati: potpuno iskorišćenje resursa, povećan kapacitet koji zadovoljava potrebe usluga, stabilno i ujednačeno emitovanje signala i fleksibilnost u pogledu podešavanja pokrivenosti područja, kvaliteta i obima usluga. Naravno, kao i do sada, ljudske želje i potrebe se nikada ne zaustavljaju, pa će zahtevi za novim uslugama visoke ili ultra visoke rezolucije, potaknuti razvoj nove opreme kako za kompresiono i kanalsko kodovanje, tako i za sve druge segmente u lancu od generisanja video i drugih sadržaja pa do prijemnika kod korisnika.

7.6. Primer tehno-ekonomske analize

Dosadašnja razmatranja daju jasnu sliku poboljšanja koja se ostvaruju povećanjem kapaciteta RF kanala, boljim korišćenjem kapaciteta i redukcijom protoka programa efikasnijom

tehnikom kodovanja. Najbolja potvrda ovih efekata ipak se dobija kad se tehnička analiza dopuni ekonomskom.

Da bi bila realna, analiza se mora oslanjati na parametre koji važe u praksi. Zato je pogodno pogledati primer primene predloženih tehnika na programima koji su sada u eksploataciji i uraditi kalkulacije sa cenama važećim na tržištu.

Dijagram, prikazan na Slici 7.8 pokazuje rezultate primenjenog unapređenog simulacionog modela Sugaris–Reljin [24] na četiri RF kanala u ne-DVB-T2 okruženju. Analiziran je rad u fiksnoj MFN mreži. Slika pokazuje rezultate za četiri pojedinačna i četiri TFS povezana RF kanala uz primenu statističkog multipleksiranja u oba slučaja. U cilju što veće verodostojnosti rezultata, analiza je primenjena na HD 1080i/25 format programa, pošto je to izabrani format prve generacije HD programa u Srbiji, pa su i ekonomski podaci najpouzdaniji. Uzeta je vrednost protoka od 8,35 Mb/s, pri primenjenoj MPEG-4 kompresiji. Iako odudara od planova primene HD programa u budućnosti (planira se primena HD 720p/50), daje ilustrativnu sliku koristi od povezivanja kanala.

Analiza je sprovedena tako da se digitalna dividenda dobijena primenom TFS koristi, za dodatne PayTV programe. Detaljna analiza samog modela i njegove primene data je u radu pod naslovom “DVB-T2 TFS network benefits from broadcasting HDTV services” [20], koji treba da bude objavljen. Slika 7.8 je preuzeta iz tog rada i pokazuje da se primenom TFS vreme povraćaja troškova smanjuje sa 38 na 29 meseci. Još je upečatljivija činjenica da se posle 38 meseci eksploatacije, kada se bez primene TFS investicija tek otplaćuje, sa primenom TFS već može ostvariti profit, koji prema cenama za ove usluge na tržištu Srbije, iznosi blizu dva miliona eura.

7. Zaključak

Očekuje se da će dugoročno video usluge da migriraju na HD i UHD formate. U disertaciji je sprovedena analiza i predložena su rešenja za efikasno emitovanje HD programa prve i druge generacije, 3D programa na bazi HD programa druge generacije, a razmatrano je i emitovanje UHD programa u rezolucijama 4k i 8k. Pretpostavljena je primena H.264/AVC i H.265/HEVC kompresionog kodovanja.

DVB-T2 je savremena tehnika emitovanja TV programa putem zemaljskih predajnika. Unosi niz značajnih poboljšanja u odnosu na prethodnu generaciju DVB-T, što se manifestuje kroz povećanje kapaciteta i poboljšanje robusnosti prenosa. U disertaciji je konstatovano da kvantitativni efekat poboljšanja koje donose nove DVB-T2 tehnike, a posebno: PLP grupisanje programa, LDPC zaštitno kodovanje i frekvencijsko raspršivanje zavise od načina zauzimanja RF kanala. U ovom radu, u sklopu predloga za povećanje broja emitovanih HD programa, vođeno je računa da se pomenute mogućnosti maksimalno iskoriste.

Na početku su izvršeni proračuni broja programa koji se mogu smestiti u DVB-T2 multipleks jednog RF kanala i sprovedene analize koje obuhvataju sve pomenute formate HD programa, imajući u vidu napredak tehnike kompresionog kodovanja H.264/AVC u sledećih nekoliko godina. Zavisno od tipa mreže za digitalnu distribuciju terestričkih televizijskih signala (MFN, SFN, Portabl/mobilna), taj broj se kreće od 2 do maksimalno 6 programa. Bez dileme se može zaključiti da su protoci koje HD usluge zahtevaju suviše veliki da bi se u potrebnom broju i na efikasan način mogle prenositi, čak i uz primenu statističkog multipleksiranja programa na RF kanalu. Proračuni su pokazali da ni primena nove tehnike kompresionog kodovanja, H.265/HEVC, koja treba da udvostruči stepen kompresije, ne može u potpunosti da kompenzuje povećanje protoka budućih HD i 3D, a još manje mnogo zahtevnijih UHD programa.

Sve analize u ovoj disertaciji praćene su kvantifikacijom i egzaktnim proračunima broja programa, koji se mogu smestiti u razmatrani multipleks, u okviru fiksnog ili

portabl/mobilnog DVB-T2 emitovanja. U tu svrhu napravljen je matematički model koji može da utvrdi potrebne kapacitete za željeni broj programa nekog od razmatranih formata, i da istovremeno pokaže stepen iskorišćenja kapaciteta kanala. Proračuni su vršeni na osnovu relevantnih procena potrebnog protoka HD, 3D i UHD programa, kao i poznatih vrednosti kapaciteta DVB-T2 multipleksa. Primenjeni su opšteprihvaćeni parametri za određivanje efikasnosti korišćenja multipleksa u zavisnosti od broja statistički multipleksiranih programa koji se u njega smeštaju. Nekim proračunima prethodi kvantifikacija. Tako se promene parametara zaštitnog kodovanja stavljaju u korelaciju sa odzivom kanala, strogo prema tabelama odgovarajućih DVB-T2 dokumenata. Izvršeni su proračuni za slučajeve u kojima se posmatra kumulativni uticaj više različitih efekata. Rezultati proračuna mogu poslužiti kao osnova za ekonomsko-tehničke analize pri razvoju opreme i planiranju mreža, pa u tom smislu daju originalan doprinos daljem razvoju.

U disertaciji je potenciran problem velikih promena u protoku komprimovanog sadržaja pojedinačnog programa, tj. varijabilnost proizvedenog protoka. S druge strane kapacitet kanala je fiksni i ograničen. Da bi se kapacitet RF kanala u potpunosti iskoristio, a istovremeno izbegla velika degradacija kvaliteta usluga, potrebno je postići ravnotežu protoka u multipleksu. Istovremenim kodovanjem i multipleksiranjem dovoljno velikog broja programa, uz neku od poznatih disciplina opsluživanja kojom bi se ukupan saobraćaj može da "ujednači". Koristeći u literaturi poznate podatke vezane za različite parametre DVB-T2 standarda, kao i uobičajene protoke u različitim definicijama digitalnih televizijskih sekvenci, u disertaciji su definisani broj programa za zadovoljavajuću, i broj programa za potpunu iskorišćenost kapaciteta kanala, kao pokazatelji uspešnosti primene predloženih rešenja.

Deo disertacije je posvećen analizi frekvencijske karakteristike digitalnog signala u RF kanalu. Rezultati su poslužili kao osnova da se predlože nove metode za povećanje kapaciteta. DVB-T2 koristi OFDM tehniku multipleksiranja. Analiza je pokazala da se princip ortogonalnosti može iskoristiti za potpuno korišćenje celog opsega RF kanala, bez dodatnog štetnog uticaja na susedne RF kanale. Drugim rečima, ortogonalnost postignuta u kanalu može se primeniti i između susednih kanala. To znači da u frekvencijskom prostoru namenjenom DVB-T2 (ili drugom DTT) sistemu emitovanja, mogu koegzistirati RF kanali koji u potpunosti zauzimaju frekvencijske opsege. Uslov je da kanali budu u potpunosti sinhronizovani, što se u DVB-T2 sistemu već primenjuje kod jednofrekvencijskog moda mreže. Predloženo rešenje potvrđeno je rezultatima simulacione analize. Primena modela proračuna, međutim, pokazala je da i sa potpuno iskorišćenim opsegom, jedan RF kanal nema kapacitet da prihvati dovoljno HD programa. Ipak, ovo poboljšanje dobiće smisao u novim načinima zauzimanja RF kanala, razmotrenim u nastavku. Da bi se povećao kapacitet razmotreni su poznati i predloženi originalni načini da se iskoriste potencijali DVB-T2 tehnike za objedinjavanje resursa više RF kanala na hardverskom i/ili softverskom nivou (PHY i MAC sloju OSI modela). Na tom, širokopojasnom kapacitetu su potom primenjeni svi standardni mehanizmi zauzimanja kapaciteta pojedinačnog RF kanala.

- U literaturi je poznat, ali malo analiziran, način povezivanja koji bazira na primeni tzv. TFS tehnike. RF kanali, slobodno izabrani iz dodeljenog frekvencijskog opsega, kao jedinstven resurs se zauzimaju protokom odgovarajućeg broja TV programa. Ovom tehnikom se postiže dvojak efekat: objedinjavanje kapaciteta povezanih kanala, ali i do 5,5 dB povećana robusnost u odnosu na frekvencijski selektivni fading. Poboljšanje koje nastaje kao posledica različitog i nezavisnog odziva frekvencijski razmaknutih RF kanala, stvara uslove za smanjivanje kodnog količnika zaštitnog kodovanja (FEC) i time povećava udeo korisnog sadržaja u ukupnom kapacitetu RF kanala. Pokazano je da se ovo povećanje kreće od 12,5% pa čak do 25%, zavisno od broja udruženih RF kanala i njihove razmaknutosti. Dobitak je ostvaren virtuelnim poboljšanjem odziva

kanala na širokom frekvencijskom području i može se iskoristiti dvojako: za povećanje područja pokrivanja ili za povećanje kapaciteta kroz snižavanje dozvoljenog praga za odnos signal-šum u emitovanju. U skladu sa potrebama moguće je i dozirano kombinovanje između povećanja kapaciteta i boljeg pokrivanja područja, što se reguliše izborom parametara koji definišu FEC.

- TFS kao tehnika je namenjena budućnosti. Između ostalih, jedan doprinos ove disertacije je u kompletnoj kvantitativnoj analizi dobitaka koji se postižu. Definiše se postupak koji dovodi do povećanog kapaciteta u Mb/s, a potom i dodatnog broja programa različitih formata. Tek na ovaj način stiže se realna slika mogućnosti, koja se može uporediti sa očekivanim potrebama.
- Drugi način stvaranja širokopoljnih kanala je originalan predlog za povezivanje na PHY sloju. Zasniva se na spajanju susednih RF kanala tako da se i frekvencijski prostor koji je služio kao zaštitni frekvencijski interval između njih iskoristi za aktivan prenos. Dobitak u kapacitetu se kreće od 1,5 do 6% u zavisnosti od broja i moda (normalni ili prošireni) povezanih kanala. Navedeni procenti ukazuju da se spajanjem kanala postiže veći dodatni dobitak od onoga između normalnog i proširenog FFT moda, predloženog u DVB-T2 specifikacijama. Kao i proširenje pojedinačnog RF kanala i ovaj metod se zasniva na osobini ortogonalnosti podnosilaca u OFDM tehnici multipleksiranja. Do sada je analiziran u drugim sistemima emitovanja (WiFi, mobilna i kablovska mreža), koji imaju drugačiju koncepciju multipleksiranja, pa je predlog i način primene u DVB-T2 tehnici nov i predstavlja jedan od doprinosa disertacije. Sprovedene su i Matlab simulacije, primenom originalnog softverskog paketa, koje su pokazale da je analiza realna i ostvariva, sa očekivanim rezultatima. Pošto se radi o povezivanju susednih kanala povećanje robusnosti je skromnije u odnosu na TFS, ali ipak postoji, i zavisno od broja povezanih kanala kreće se do 2,5dB.

Predložene su dve metode integracije RF kanala na PHY sloju:

- Prva se bazira na povećanju veličine FFT bloka onoliko puta koliko se RF kanala integriše, uz očuvanje parametara koji se u DVB-T2 sistemu biraju prema uslovima emitovanja (frekvencijski razmak između podnosilaca, dužina OFDM simbola i sl.). Prema preporukama za DVB-T2 sisteme, maksimalan FFT blok može biti 32k, a za specijalne primene testiranja SFN mreže i 64k. Ako veličina FFT bloka bude tehnički ograničavajući faktor, jasno da se primena može naći kod onih tipova emitovanja kojima je neophodan veći međufrekvencijski razmak, pa samim tim i FFT blok sa manje podnosilaca, a to su mreže za prenosive i mobilne korisnike. Matlab simulacija je potvrdila realnost ove metode, a rezultati su čak i neznatno bolji zbog veće ortogonalnosti podnosilaca kod većih IFFT i FFT blokova.
- Druga metoda povezivanja na PHY sloju se zasniva na upotrebi susednih RF kanala sa nezavisnim IFFT i FFT blokovima za zajedničko multipleksiranje po principu "leđa uz leđa". Podnosioci u RF kanalima su dodatno zauzeti tako da se zaštitni frekvencijski interval iskoristi za aktivan prenos. Simulacije su potvrdile da se ovim ne utiče na kvalitet emitovanja. Uslov je da se uspostavi potpuna međusobna ortogonalnost, odnosno sinhronizacija susednih RF kanala u vremenskom i frekvencijskom domenu, što se u DVB-T2 sistemima uspešno primenjuje u SFN mrežama.

Sagledavajući razlike u efektima integracije kanala na MAC i PHY sloju, može se zaključiti da povećanje robusnosti TFS povezanih kanala daje bolji rezultat od kumulativnog efekta povećanja kapaciteta, ali i znatno manjeg povećanja robusnosti kod PHY povezivanja. Zato je posebno korisna mogućnost integracije TFS povezivanja i PHY proširenja kapaciteta pojedinačnog RF kanala, čime se dobija i povećanje ukupnog kapaciteta kanala i povećanje

udela korisnog sadržaja u tom kapacitetu. Ovo je moguće realizovati u DVB-T2 okruženju, gde se može postići ortogonalnost između susednih RF kanala, nezavisno od toga da li su povezani u širokopojasni kanal ili ne. U tzv. neDVB-T2 okruženju, dakle, ukoliko se povezani RF kanali graniče sa kanalima drugih mreža povećanje kapaciteta na PHY sloju nije moguće.

Prethodni stav ukazuje na važan zaključak vezan za planiranje mreža. Da bi se dobio puni efekat dobitka planiranja (maksimalna robusnost) kod TFS povezanih RF kanala, neophodno je da odziv povezanih RF kanala bude što nezavisniji, odnosno da njihov frekvencijski razmak bude što veći. U tom smislu je značajno da, ako nadležne administracije smanjuju raspoloživi spektar za DVB-T2, preostali RF kanali budu u razmaknutim grupama, a ne u jednoj homogenoj celini.

- Rezultati povećanja kapaciteta za MFN, SFN i Portabl/mobilnu mrežu na oba načina povezivanja RF kanala su dati tabelarno. Grafički je, potom, za sve predložene načine povezivanja RF kanala i za sve tri vrste mreža, prikazan broj HD i UHD programa svih razmatranih formata. Sa slika se može zaključiti potreban broj RF kanala koje treba integrisati za zadovoljavajuću ili potpunu efikasnost u iskorišćenju kapaciteta kanala.
- Proračuni su pokazali suštinu svakog dobrog rezultata. Najbolji efekat daje, već pomenuto, udruživanje hardverskih i softverskih rešenja. Poboljšanja zavise i od formata HD programa i tipa distribucione terestričke mreže. Načelno, širokopojasni multipleksi već na dva povezana RF kanala omogućavaju efikasno emitovanje u formatima programa 720p i 1080p. Za 3DTV programe zasnovane na 1080p formatu potrebni su multipleksi na tri RF kanala. Korist koju donosi povezivanje kanala najlakše je predstaviti činjenicom da, u većini slučajeva, pomoću 2 povezana RF kanala može da se emituje veći broj HD programa nego po 3 RF kanala sa nezavisnim staističkim multipleksima. Sa porastom rezolucije razlika se povećava.
- Uz očekivano efikasnije komprimovanje programa viših rezolucija, pokazuje se da 4k programi mogu da se emituju uz HD programe nižih rezolucija u multipleksima od tri i naročito, četiri RF kanala. Pri tome se postiže zadovoljavajuća efikasnost i u većem broju RF kanala. Već na pet RF kanala moguće je i emitovanje ponekog UHD programa u 8k rezoluciji, posebno imajući u vidu da će se i efikasnost HEVC kodera narednih generacija vremenom unaprediti. Dakle, u malo daljoj perspektivi DVB-T2 ima predispozicije ne samo da prihvati izazov emitovanja HD programa, uključujući i 3DTV, već i da u određenom broju, u istom širokopojasnom multipleksu, uz HD efikasno emituje i UHD programe.
- Posebno treba naglasiti činjenicu da predloženi načini povezivanja RF kanala doprinose da se poboljša efikasnost nekih tehnika primenjenih u DVB-T2 sistemu. Tek sa stvaranjem širokopojasnih kanala, posebno TFS tehnikom, frekvencijsko i vremensko raspršivanje daje puni efekat. PLP grupisanje ima puni smisao tek kada se jedan zajednički PLP koristi za veliki broj programa u nekoj PLP grupi, a zaštitno kodovanje LDPC i rotacija konstelacije imaju veći efekat kada odziv kanala nema prevelike oscilacije.

Na kraju se može zaključiti da se primenom DVB-T2 standarda može, u dogledno vreme, uz punu primenu raspoloživih tehnoloških potencijala, potpuno iskoristiti dodeljeni frekvencijski resurs i povećati kapacitet kanala povezivanjem više pojedinačnih RF kanala. Kapaciteti širokopojasnih kanala mogu da se, u zavisnosti od formata programa koji se emituju, formiraju tako da multipleks u potpunosti iskoristiti kapacitet kanala. Na ovaj način se garantuje visok, ujednačen i stabilan kvalitet usluge, a dobija se i fleksibilnost u pogledu podešavanja pokrivenosti područja, kvaliteta i obima ponuđenih servisa.

Literatura

- [1] Brugger R., Gbenga-Ilori A. "Spectrum usage and requirements of future terrestrial broadcast applications", Institut für Rundfunktechnik, München - *EBU Technical Review 2009 Q4*, EBU, Geneva, Oktober 2009 (http://tech.ebu.ch/docs/techreview/trev_2009-Q4_Spectrum_Brugger.pdf)
- [2] Cox G. "An Introduction to Ultra HDTV and HEVC", *Report by ATEME*, Paris, France, July 2013 (http://ateme.com/IMG/pdf/2013_an_introduction_to_uhdtv_hevc.pdf)
- [3] EBU Tech 3348, "Frequency & Network Planning Aspects of DVB T2", *EBU Status Report, V.4.1.1*, October 2014 (<http://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3348.pdf>)
- [4] ETSI A 133, "Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)", *DVB Dokument*, Mart 2012
- [5] ETSI A150, "Digital Video Broadcasting (DVB); Structure and modulation of optional transmitter signatures (T2-TX-SIG) for use with the DVB-T2 second generation digital terrestrial television", *DVB Dokument*, June 2010
- [6] ETSI EN 302 755, "Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)", *EBU Final Draft, V1.2.1*, October 2010
- [7] McCann K., Mattei A. "Technical Evolution of the DTT Platform", *An Independent Report by ZetaCast*, January 2012 (<http://stakeholders.ofcom.org.uk/binaries/consultations/uhf-strategy/zetacast.pdf>)
- [8] McCann K. "Promising Efficiency Working Width HEVC", *DVB Scene, An Independent Report by ZetaCast*, September 2013 (<http://www.zetacast.com/wp-content/uploads/2013/06/Promising-Efficiency-Working-with-HEVC.pdf>)
- [9] EBU Technical Report 015, "Defining Spectrum Requirements of Broadcasting in the UHF Band", *EBU Guidelines Document*, Geneva, July 2012 (<http://tech.ebu.ch/docs/techreports/tr015.pdf>)
- [10] EBU Technical Report 014, "What follows HDTV? A status report on 1080p/50 and 4k", *EBU Briefing Document*, Geneva, Yune 2012 (<http://tech.ebu.ch/docs/techreports/tr014.pdf>)
- [11] ETSI TS 102 991, "Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation Guidelines for a second generation digital cable transmission system (DVB-C2)", *DVB Dokument*, V1.2.1, February 2012
- [12] Hanhart P., Rerabek M., Simone F., Ebrahimi T. "Subjective quality evaluation of the upcoming HEVC video compression standard", *Proceedings of SPIE Optical Engineering and Applications*, vol.8499, San Diego, August 2012 (http://infoscience.epfl.ch/record/180494/files/hanhart_SPIE2012_1.pdf)
- [13] Hasse P., Jaeger D., Robert J. Schaaf C. "DVB-C2 Revolutonising, RF Bandwidth utilization in cable", Institut fuer Nachrichtentechnik, Technische Universitaet Braunschweig, *Broadband*, Vol. 32, No. 1, pp 64-68, March 2010 (http://www.ict-redesign.eu/fileadmin/documents/1003_SCTE_Broadband_DVB-C2.pdf)
- [14] Huuhka, E., et.all. "WP3 - Network & Channels - B21C Public Deliverable D11 Part 3 - DVB-T2 Network Planning", *Celtic Telecommunication Solutions*, 2007-2009 (<http://projects.celtic-initiative.org/b21c/B21C-D11-3-DVB-T2-Network-Planning.pdf>)
- [15] Jaeger D., Hasse P., Robert J. "DVB-C2 –The second generation transmission technology for broadband cable", Institut fuer Nachrichtentechnik at Technische Universitaet Braunschweig, *The Cable Show*, pp.159-167, Washington D.C., April 2009 (http://www.ict-redesign.eu/fileadmin/documents/0904_DVB-C2_Cable_Show_Washington_Jaeger_rev2.pdf)
- [16] Lutovac M., Mišković B. "Influence of Guard Interval Duration to Interchannel Interference in DVB-T2 Signal", *MECO*, pp.220-223, Bar, Montenegro, June 2012, ISBN 978-1-4673-2366-6

- [17] Milivojević M., Mišković B., Reljin I. "DVB-T2: An outline of HDTV and UHD TV programmes broadcasting", *Telfor Journal*, 2015, Belgrade, Serbia, to be published
- [18] Milivojević M., Mišković B., Irini Reljin, "Possible scenarios of HDTV and UHD TV programmes broadcasting within DVB-T2", *Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, Belgrade, Serbia, pp 897-900, November 2014, ISBN 978-1-4799-6190-0
- [19] Mišković B., Lutovac M. "Simulation of OFDM transmitter DVB-T2 system" *Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, Belgrade, Serbia, pp 782-785, November 2011, ISBN: 978-1-4577-1499-3, DOI: 10.1109/TELFOR.2011.6143661
- [20] Miskovic B., Reljin I. "Broadband DVB-T2 Channels at a Physical Level – Simulation Analysis", *Research Journal ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA*, Kaunas, Lithuania, Vol. 21 No. 1, pp. 70-75, January 2015 ISSN: 1392-1215, (<http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.21.1.5584>)
- [21] Ofcom, "Secured Long Term Benefit From Scarce Spectrum Resources", *Ofcom, UHF strategy consultation*, March 2012 (<http://stakeholders.ofcom.org.uk/binaries/consultations/uhf-strategy/summary/spectrum-condoc.pdf>)
- [22] Ohm J.R., Sullivan G.J., Schwarz H., Tan T.K., Wiegand T. "Comparison of the Coding Efficiency of Video Coding Standards-Including High Efficiency Video Coding (HEVC) ", *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 22, No. 12, January 2013 (http://iphome.hhi.de/wiegand/assets/pdfs/2012_12_IEEE-HEVC-Performance.pdf)
- [23] Reimers U. "DVB-T2 solutions for portable and mobile reception", Institut fuer Nachrichtentechnik, Technische Universitaet Braunschweig, *DigiTAG Workshop*, Wien, 09 May 2012 (https://tech.ebu.ch/docs/techreview/trev_2013-Q1_DTT_Reimers.pdf)
- [24] Reljin I., Sugaris A. "Digital Broadcasting Techno- Economic Efficiency" *Elektronika ir Elektrotechnika, Research Journal ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA*, Kaunas, Lithuania, Vol. 109 No.3, pp. 109-114, April 2011 (<http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.109.3.183>)
- [25] Rezaei M., Bouazizi I., Gabbouj M., "Statistical Time-Frequency Multiplexing of HD Video Traffic in DVB-T2", *Hindawi Publishing Corporation*, Article ID 186960, pp 1-12, 2009 (<http://dx.doi.org/10.1155/2009/186960>)
- [26] Sullivan J., Boice J.M., Chen Y., Ohm J.R., Segall C.A., Vetro A. "Standardiyed Extesions of High Efficiency Video Coding (HEVC)", *IEEE Journal of selected topics in signal processing*, Vol.7, No.6, December 2013 (<http://www.merl.com/publications/docs/TR2013-105.pdf>)
- [27] Tan T.K. "Report on HEVC compression performance verification testing", Joint Collaborative Team on Video Coding, *Output Document: JCTVC-Q1011*, Valencia, Espana, March –April 2014 (http://vqeg.its.bldrdoc.gov:21/Documents/VQEG_Stockholm_Jul14/MeetingFiles/VQEG_UltraHD_2014_139_UltraHD_Status_UHD_Chairs.pptx)
- [28] Teamcast, "Coming Next: 3D Television over DVB-T2!", *TVB Europe*, Rennes , France, May 2010 (<http://connection.ebscohost.com/c/articles/53987342/coming-next-3d-tv-over-dvb-t2>)
- [29] Thomas K., Reimers U., et.all. "A study of future spectrum requirements for terrestrial TV and mobile services and other radio applications in the 470-790 MHz frequency band, including an evaluation of the options for sharing frequency use from a number of socioeconomic and frequency technology perspectives, particularly in the 694-790 MHz frequency sub-band", *Final report Technische Universität, Braunschweig, Institut für Nachrichtentechnik*, January 2013 (<https://www.bmwi.de/English/Redaktion/Pdf/study-of-future-spectrum-requirements,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=en,rwb=true.pdf>)
- [30] Zhang L., Tech G., Wegner K., Zea S. "Test Model 6 of 3D-HEVC and MV-HEVC", *JCT-3V and Video Subgroup*, Geneva, Switzerland, October –November 2013 (https://hevc.hhi.fraunhofer.de/svn/svn_3DVCSoftware/)

Biografija

Rođen je 08. 01. 1956. U Čačku. Osnovnu školu je završio u Gornjoj Gorevnici kod Čačka, a gimnaziju u Čačku. Studije na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu upisao je 1974. godine. Diplomirao je u rekordnom roku 1978. godine na odseku za Elektroniku, smer Telekomunikacije. Od 1979. godine radi u preduzeću Telekom Srbija, prvo na poslovima održavanja, a potom planiranja i investicija. Od 1984, kada polaže stručni ispit, bavi se projektovanjem lokalnih, a potom i magistralnih telekomunikacionih sistema. Postdiplomske studije je upisao 1981. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na smeru Komutacioni sistemi. Početkom 1985. godine komisija za postdiplomske studije mu je prihvatila temu za izradu magistarskog rada pod nazivom “ Neke metode uvođenja digitalnih komutacionih sistema u postojeću telefonsku mrežu”. Završeni magistarski rad, koji se bavio tada aktuelnim aspektima digitalizacije i decentralizacije javne telefonske mreže, sticajem okolnosti nije branio, pa je školske 2007-2008 godine, obnovio magistarske studije na smeru Telekomunikacione i računarske mreže - komunikacije i protokoli, i nakon polaganja dopunskog ispita, pristupa izradi novog rada pod nazivom: “Komparativna analiza metoda proračuna u klasičnim telefonskim mrežama i paketskoj telefonskoj mreži”, koji je uspešno odbranio 2009. godine.

U dosadašnjem radu, prateći razvoj savremenih telekomunikacija, učestvovao je kao saradnik, a kasnije kao koordinator u izradi razvojnih i investicionih planova za potrebe Telekoma Srbija. Od 2008. Godine bavi se planiranjem, a potom i nadzorom na izgradnji fiksnih bežičnih mreža u Telekomu Srbija, a od 2010. godine radi kao profesor u Visokoj školi strukovnih studija u Čačku, na predmetu Bežične mreže, od kada i počinje da objavljuje radove iz ove oblasti.

Neprekidno se usavršavao prateći uvođenje novih tehnologija:

- na specijalističkim obukama proizvođača opreme u Sloveniji i Italiji,
- na internim obukama za nove telekomunikacione sisteme u Telekomu,
- obukama za programske jezike i relacione baze podataka,
- obukama za elemente Integrisanog informacionog sistema u Telekomu (GIS, TIS, MIS).

Posebno je od značaja samostalna mukotrpa obuka za korišćenje programskih paketa Matematika i Matlab, te njihovo primena u simulacijama za radove u časopisima i na forumima, kao i za izradu magistarskog i doktorskog rada.

Bio je nosilac uvođenja najsavremenijih tehnologija, od brižljivog planiranja do uključenja u rad i pune primene svih servisa koje neki sistem omogućava. U tom smislu proglašen je 2006. godine, na jubileju povodom desetogodišnjice samostalnog rada Telekoma Srbija, za najuspešnijeg menadžera u Regiji Centar.

Zaposlen je u Telekomu Srbije kao Rukovodilac službe za planiranje, razvoj i investicionu izgradnju u IJ Čačak. Kao profesor saradnik angažovan je u VŠSS u Čačku na predmetu Bežične mreže.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Роберт Миљковић
број уписа _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Повећање броја програма и multipleksiца
DVB-T2 sistema

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Београду, _____

Потпис докторанда

Роберт Миљковић

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Војислав Миљковић
Број уписа _____
Студијски програм Електротехника
Наслов рада Решавање броја програма и мултирекламне DVB-T2 система
Ментор prof. dr. Irini Režin
Потписани Војислав Миљковић

изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада. Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, _____

Војислав Миљковић

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Роксетање броја програша и multiplexinga
DVB-T2 sistema

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, _____

Роксетање