

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Aleksandar N. Sugaris

**MODEL ZA PROCENU EFIKASNOSTI
IZBORA TEHNOLOGIJA DIGITALNE
TELEVIZIJE**

doktorska disertacija

Beograd, 2012.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

Aleksandar N. Sugaris

**SIMULATION MODEL FOR DIGITAL
BROADCASTING TECHNOLOGIES
EFFICIENCY ESTIMATION**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2012.

Mentor:

Vanr. prof, dr Irini Reljin, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Članovi komisije:

Red. prof, dr Miroslav Dukić, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Red. prof. u penziji, dr Branimir Reljin, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Docent, dr Milan Bjelica, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Vanr. prof, dr Andreja Samčović, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet

Datum odbrane:

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а АЛЕКСАНДАР СУГАРИС

број уписа _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

МОДЕЛ ЗА ПРОЦЕНУ ЕФИКАСНОСТИ ИЗБОРА
ТЕХНОЛОГИЈА ДИГИТАЛНЕ ТЕЛЕВИЗИЈЕ

- 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, 17.05.2012.

Потпис докторанда

Сујари

Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске
верзије докторског рада**

Име и презиме аутора АЛЕКСАНДАР СУГАРИС
Број уписа _____
Студијски програм _____
Наслов рада МОДЕЛ ЗА ПРОЦЕНУ ЕФИКАСНОСТИ ИЗБОРА ТЕХНОЛОГИЈА ДИГИТАЛНЕ
Ментор ЗАНЈ. ПРОВ. ДР ИРИНА РЕЛОВИЋ, УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ ^{ТЕЛЕВИЗИЈЕ}
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
Потписани АЛЕКСАНДАР СУГАРИС

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.

У Београду, 17.05.2012.

Потпис докторанда

Сугарис

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

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

МОДЕЛ ЗА ПРОЦЕНУ ЕФИКАСНОСТИ ИЗБОРА
ТЕХНОЛОГИЈА ДИГИТАЛНЕ ТЕЛЕВИЗИЈЕ

која је моје ауторско дело.

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

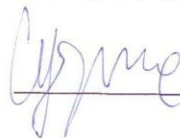
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

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).

У Београду, 17.05.2012.

Потпис докторанда



1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.

MODEL ZA PROCENU EFIKASNOSTI IZBORA TEHNOLOGIJA DIGITALNE TELEVIZIJE

REZIME:

Digitalizacija zemaljskog emitovanja televizijskih programa prva je velika promena u TV sistemima još od uvođenja kolor televizije. Prelazak sa analognog na digitalno emitovanje predstavlja jedan od najvećih izazova u razvoju video i audio tehnologije i desiće se u celom svetu u veoma bliskoj budućnosti. Pored ozbiljnih tehničkih zahvata, ovaj proces zahteva značajne finansijske investicije vezane za enorman broj standardnih TV prijemnika i široko rasprostranjene televizijske mreže. Zbog toga, gde god je moguće u distributivnoj mreži, potrebno je obezbediti kompatibilnost sa postojećim sistemima. Nasuprot tome, digitalizacija video signala visoke rezolucije zahteva visoko sofisticirane algoritme sa velikom kompresijom i veoma efikasnom tehnologijom prenosa.

Trenutno u svetu koriste se tri međunarodna standarda za digitalno zemaljsko emitovanje TV programa - *Advanced Television Systems Committee* (ATSC) u upotrebi u Severnoj Americi i Južnoj Koreji, *Digital Video Broadcasting Terrestrial* (DVB-T) pored Evrope upotrebljava se u Australiji, Indiji i nekim zemljama Azije i Afrike, *Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial* (ISDB-T), koristi se u Japanu i Južnoj Americi. Fokus ove disertacije je na analizi performansi i razvoju metoda za procenu efikasnosti tehnologija za fiksni prijem koje se koriste u Evropi.

Za isporuku TV servisa krajnjim korisnicima postoje tri glavna sistema prenosa, satelitski, kablovski i preko zemaljskih predajnika. Digitalni zemaljski sistem je sposoban za isporuku TV programa čak i mobilnim korisnicima. Servisi prenosa podataka i televizije visoke rezolucije (HD) raspoloživi su preko digitalnih satelitskih i kablovskih mreža, ali sve do sada korisnici zemaljskih mreža nisu primali ove servise jer je za njihov prenos potreban veći kapacitet kanala u odnosu na onaj korišćen za televiziju standardne rezolucije (SD) - *Digital Video Broadcasting Terrestrial* (DVB-T) i *Moving Picture Expert Group* MPEG-2 standard kompresije. Novije tehnologije, kao što su standard kompresije MPEG-4 verzija 10 i druga generacija standarda za zemaljsko emitovanje (DVB-T2), obezbeđuju povećan kapacitet i robusnost u zemaljskim mrežama. Međutim, pored tehničkih prednosti evidentno je da najnovije

tehnologije sa sobom donose i više cene opreme i sistema. Sprovodljivost poslovnog plana uvođenja digitalnog emitovanja je pod direktnim uticajem ovih tehno-ekonomskih pitanja.

Ova disertacija uvodi multidisciplinarni pristup rešavanja problema i pri proceni implementacije novih tehnologija uzima u obzir parametre kao što su cene opreme i prihodi od servisa. Zato je u ovoj disertaciji razvijen metod za procenu dobitaka od digitalne dividende koji su postignuti upotrebom novijih tehnologija (DVB-T2 i MPEG-4 verzija 10) u odnosu na tradicionalne digitalne tehnologije (DVB-T i MPEG-2).

Infrastrukture sistema za digitalno zemaljsko emitovanje koje koriste novije tehnologije sposobne su da uvedu širokopojasne servise u regione gde su neophodni i unaprede pristup upotrebom velikih binarnih protoka. Disertacija ističe takođe i širi ekonomski uticaj implementacije digitalnog emitovanja televizije. Penetracija širokopojasnih servisa u bilo kojoj zemlji može se povećati uvođenjem novih servisa kroz digitalnu dividendu. Postoji jasna veza između penetracije širokopojasnih servisa i bruto društvenog proizvoda (BDP) po stanovniku. Zbog prirode VHF/UHF sistema emitovanja širokopojasni servisi mogu da se ponude skoro celokupnoj populaciji zemlje (u zavisnosti od pravila pokrivanja). Da bi se uspostavila pristupna mreža potrebno je samo instalirati TV antenu na krov. Rezultati analize za Srbiju pokazuju da raspoloživost DVB-T/T2 servisa na preko 90% stanovništva implicira povećanja BDP po stanovniku od oko 5% ako se novi servis obezbeđuje mrežom nacionalnih emitera.

U ovoj disertaciji cilj strategije digitalnog emitovanja je maksimizacija dobitaka od digitalne dividende. Najbolji rezultati se dobijaju upotrebom elemenata kao što su efikasan standard kompresije koji snižava binarni protok po TV programu, zatim efikasna tehnologija prenosa koja povećava kapacitet u okviru jednog UHF kanala i konačno, arhitektura mreže koja obezbeđuje veliki broj lokalnih TV programa.

Nakon detaljne analize i komparacije tehnologija kompresije (MPEG-2 i MPEG-4) i posebno tehnologija prenosa (DVB-T i DVB-T2) izvedeni su odgovarajući zaključci. Dobro je poznato da za isti nivo kvaliteta video signala MPEG-4 kompresiji potrebno je upola manji binarni protok u odnosu na MPEG-2 standard kompresije. Važnija i detaljnija analiza, analiza sistema prenosa, pokazuje da druga generacija tehnologija za digitalno emitovanje, DVB-T2, postiže veću efikasnost prilikom upotrebe spektra u odnosu na DVB-T. Zaključuje se takođe da je DVB-T2 znatno robusniji od DVB-T

zbog više važnih tehnoloških novina objašnjenih u disertaciji. Na primer, ako za oba standarda održimo isti odnos signal-šum koji obezbeđuje prenos skoro bez grešaka (QEF) i poredimo epektralnu efikasnost u Rajsovom kanalu, u realnim uslovima DVB-T2 ima veći binarni protok za oko 70%. Ako se poredi robusnost Rajsovog kanala uz održavanje aproksimativno istog binarnog protoka za oba standarda, onda se QEF kvalitet sa DVB-T2 standardom postiže sa oko 8 dB nižim odnosom signal-šum.

Treći element za maksimiziranje digitalne dividende je arhitektura mreže sa ubacivanjem lokalnog TV sadržaja. Predložena su tri modela arhitekture zasnovane na IP/MPLS protokolima. Procenom ključnih parametara (Ponuda lokalnih sadržaja, Složenost po regionima, Zahtevi u pogledu video transporta, Veličina digitalne dividende) predloženih modela došlo se do zaključka da je najbolje rešenje model gde se lokalni TV sadržaj ubacuje lokalno.

Moderni principi upravljanja strateškog planiranja vode ovo istraživanje ka ne samo analizi tehničkih parametara već i ekonomskih i tržišnih aspekata koji u informacionim i komunikacionim tehnologijama imaju sve češće konačan uticaj na donošenje odluka. Nakon sprovedenog istraživanja razvijeno je jedno rešenje problema izbora tehnologija digitalne televizije. Rešenje za pronalaženje najefikasnije tehnologije koristi matematički model i uključuje tehničke, komercijalne kao i tržišne parametre. Upotrebom ovog simulacionog modela moguće je sveobuhvatno vrednovati sistem i precizno proceniti efekte digitalne dividende. Algoritam tehno-ekonomske analize ima četiri faze: analiza problema, modeliranje, procena rada modela, revizija (usavršavanje) modela. Cilj ovog istraživanja je postignut razvojem simulacionog modela kroz četiri pomenute faze.

Simulacioni model je razvijen u formi matematičkih jednačina. Algoritam tehno-ekonomske analize se izvršava sukcesivnim izračunavanjem formula. Ova disertacija analizira tehničke parametre za primenu tehnologija digitalne televizije i predlaže model koji procenjuje ekonomsku efikasnost najnovijih tehnologija koje se pojavljuju u dve kombinacije MPEG-4/DVB-T i MPEG-4/DVB-T2. Ekonomska efikasnost se u modelu računa kao tačka preloma (*break-even point*), tačka na vremenskoj osi kada sistem postaje profitabilan. Pre te tačke, prihodi od servisa omogućeni novim tehnologijama manji su nego troškovi investicija u sistem. Ovaj osnovni model je jednostavan i fleksibilan.

Osnovni model je primenjen na televizijsko tržište u Srbiji. Ako se koriste MPEG-4 i DVB-T2 standardi, rezultati simulacije govore da se profitabilnost televizijske mreže ostvaruje za manje od tri godine za sistem sa jednim multipleksom ili odmah nakon implementacije ako se koristi više multipleksa.

Nakon procene rada osnovnog modela zaključuje se da postoje realističniji scenariji primene, naročito u oblasti izvora prihoda. Model je unapređen i usavršen tako što su komparirani direktno DVB-T2 i DVB-T (primenjujući samo MPEG-4), primenjujući model na scenario sa više multipleksa (ne za jedan multipleks za šta je osnovni model originalno razvijen), procenjujući brzinu prihvatanja *PayTV* servisa upotrebom *Bass* difuzionog modela (umesto servisa velikoprodaje internet pristupa kao izvora prihoda) i procenjujući tačku preloma za ukupnu investiciju u DVB-T2 infrastrukturu (ne za razliku troškova dve kombinacije tehnologija) zasnovano na prihodima od kapaciteta dobijenog tehnološkim poboljšanjima u DVB-T2 standardu. Veoma važna komponenta unapređenog modela je primena *Bass* difuzionog modela na *PayTV* servis u okviru DVB-T2 sistema.

Unapređen model je primenjen na televizijsko tržište Srbije. Rezultati simulacije pokazuju da ako se kao izvor prihoda koristi samo *PayTV* servis onda se profitabilnost DVB-T2 mreže ostvaruje za oko tri godine za sistem sa četiri multipleksa/RF kanala, ili brže (dve godine) – što zavisi od tržišnih okolnosti. Sa daljim usavršavanjem unapređenog modela, ako se kao izvor prihoda koristi istovremeno *PayTV* servis i aukcijska prodaja frekvencijskog spektra (spektar digitalne dividende prodat za potrebe širokopojasnih servisa mreža mobilne telefonije), profitabilnost se postiže odmah nakon realizacije projekta ukoliko mreža koristi više od četiri multipleksa.

Bilo koji mrežni operator može da primeni predloženi simulacioni model koristeći različite vrednosti tehničkih, tržišnih i komercijalnih parametara, kao i sa različitim parametrima *Bass* difuzionog modela i regulativama za aukcije spektra u različitim državama.

KLJUČNE REČI: DVB-T, DVB-T2, MPEGx, digitalna dividenda, tehno-ekonomska analiza, modeliranje, strateško planiranje, efikasnost tehnologija, PayTV, Bass difuzioni model

NAUČNA OBLAST: Telekomunikacije

UŽA NAUČNA OBLAST: Televizija

UDK: 621.3

SIMULATION MODEL FOR DIGITAL BROADCASTING TECHNOLOGIES EFFICIENCY ESTIMATION

ABSTRACT:

The first major change within the TV system since the introduction of color is the digitalization of television terrestrial broadcast network. The digital switchover is one of the main challenges in video and audio technology developments and it is going to happen in the very near future throughout the world. Besides the severe technical requirements, this process is driven by significant financial investments, regarding to an enormous number of standard TV sets and widespread broadcast networks. Consequently, it is necessary, wherever is possible in distribution network, to ensure the compatibility with existing systems. On the contrary, digitization of high-resolution video and audio signals needs highly sophisticated algorithms with high compression and very efficient transmission technology.

There are three international standards currently used world-wide for digital terrestrial broadcasting - Advanced Television Systems Committee (ATSC) used in North America and South Korea, Digital Video Broadcasting Terrestrial (DVB-T) used apart from Europe in Australia, India and some other Asian and African countries, Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial (ISDB-T), used in Japan and South America. The focus of this dissertation is the performance analysis and efficiency estimation method applied to the technologies for fixed reception used in our region – Europe.

The three main transmission systems for delivering TV service to end-users are satellite, cable and terrestrial networks. The digital terrestrial television (DTT) system is capable of distribution of television content even to the mobile devices. Data-casting services and high-definition (HD) television content is available via digital satellite and digital cable networks but, until now, terrestrial users have not received data and HD content because its transmission requires a higher channel capacity than that used for standard definition (SD) TV - Digital Video Broadcasting Terrestrial (DVB-T) and Moving Picture Expert Group MPEG-2 coding and compression standard. The latest technologies, like compression standard MPEG-4 part 10 and the second generation of digital terrestrial broadcasting standard (DVB-T2), provide increased capacity and

ruggedness in the terrestrial transmission networks. But besides technical benefits it is evident that the latest technologies bring also a higher system cost. The viability of digital broadcasting business case is directly influenced by this techno-economic issue.

This dissertation introduces a multidisciplinary approach to the problem, and take into account the cost and revenue items when evaluate the implementation of new technology. Therefore, this dissertation develops a method of estimating the benefits of digital dividend gained by using new (DVB-T2 and MPEG-4 part 10) technologies compared to traditional digital technologies (DVB-T and MPEG-2).

The infrastructure of digital terrestrial broadcasting system that uses the latest technologies is capable to introduce the broadband services to un-served or under-served regions and upgrade networks to very-high-speed access. The dissertation emphasise also the broader economic impact of the digital broadcasting technologies implementation. The broadband penetration in any country could be increased by using the digital dividend for new services. There is a clear relationship between broadband penetration and GDP per capita. Because of the nature of VHF/UHF broadcast system the broadband service could be offered to almost the whole population of the country (depends on the coverage rules). The access network is already in place; there is a need only for TV antenna on the rooftop. The results of the analysis for Serbia shows that the DVB-T/T2 service availability of over 90% of the population implicates the increase of GDP per capita for around 5%, if new service is provided using public-service broadcaster network.

In this dissertation the aim of the digital broadcasting strategy is the maximization of the digital dividend benefits. The best results are achieved by using such elements as the efficient compression standard that decrease the bit rate for one TV program, the efficient transmission technology that increase the capacity within one UHF channel and the network architecture that insert the large number of local TV programs.

After the detailed analysis and comparison of compression (MPEG-2 and MPEG-4) and specially transmission technologies (DVB-T and DVB-T2) the appropriate conclusions are derived. It is well known that for the same quality of video signal MPEG-4 compression can achieve with the half of the bit rate compared to MPEG-2 compression standard. More important and detailed analysis, the analysis of transmission system,

showed that the second-generation digital terrestrial broadcast technology, DVB-T2, achieves higher efficiency in its use of terrestrial spectrum, compared to DVB-T. It is also concluded that the DVB-T2 is considerably more robust than previous DVB-T, due to several important new technological features explained in the dissertation. For instance, if the spectral efficiency of Ricean channel is compared by keeping the equal signal-to-noise ratio for both standards (Quasi Error Free - QEF quality), in realistic situations with DVB-T2 the bit rate is increased by around 70%. If the robustness of the Ricean channel is compared by keeping approximately the equal bit rate for both standards, QEF quality DVB-T2 standard can achieve with around 8 dB lower signal-to-noise ratio.

The network architecture with the local TV program insertion is the third element for maximizing digital dividend. Three IP/MPLS based architecture models are proposed. The key parameters evaluation (local content offer, regional complexity, video transport capacity, digital dividend) of proposed models ended with conclusion that the model with local insertion of local content is the best solution.

Modern principles of management in strategic planning lead this research to not only technology analysis but also economic and market aspects that in information and communication technologies play more often the key role in decision making process. After the research is done, one solution for the problem of the digital broadcasting technologies selection was developed. The solution for finding the most efficient technology uses mathematical model and incorporates technical and commercial parameters as well as market dependant aspects. By using this simulation model it is possible to comprehensively value the system and precisely evaluate the effects of digital dividend. The algorithm of techno-economic analysis consists of four phases: problem analysis, modeling, model evaluation and model refining. The goal of this research is accomplished by the development of the simulation model through mentioned four phases.

The simulation model is developed in the form of mathematical equations. The algorithm of techno-economic analysis is executed by successive calculations of the equations. This dissertation analyses the technical parameters for deploying the latest broadcast technologies and proposes a model that evaluates the economic efficiency of

the latest broadcast technologies that appear primarily in two combinations, MPEG-4/DVB-T and MPEG-4/DVB-T2. In the model the economic efficiency is calculated as the break-even point, the point in the time line where the profit is achieved. Before break-even point the revenue from services enabled by new technologies is lower than the cost of the system. This basic simulation model is simple and flexible.

The basic model is applied to the Serbian broadcast market. If MPEG-4 and DVB-T2 standards are used, the results from simulation show that the broadcast network profitability could be achieved: in less than three years for one multiplex system or immediately for multiple-multiplex system.

After the evaluation of the basic model the conclusion is that there are more realistic scenarios, primarily for the revenue sources. The model is improved and refined by comparing directly DVB-T2 and DVB-T (applying only MPEG-4 compression), applying the model to multiple multiplex scenario (not one multiplex scenario for which the basic model was originally developed), estimating PayTV service acceptance rate by Bass Diffusion Model (instead wholesale Internet access service as the revenue source) and evaluating the break-even point for the overall investment in DVB-T2 broadcasting infrastructure (not the cost difference between two combinations of technologies), based on the revenue from capacity gain due to DVB-T2 technology improvements. The application of Bass Diffusion Model to PayTV service within DVB-T2 system is very important component of this improved model.

The improved model is applied to the Serbian broadcast market. The results from simulation show that if for the revenue we use only PayTV service, the DVB-T2 broadcast network profitability could be achieved in approximately three years if four multiplexes/RF channels are used, or even faster (two years) - depending on the market situation. With the further refinement of the improved model, if for the revenue we use PayTV service and the frequency spectrum auction (digital dividend spectrum sold for the purpose of broadband mobile services) at the same time, for more than four multiplexes the profitability is achieved immediately.

The simulation model could be applied to any network operator with different technical, market and commercial values of the parameters, as well as with different parameters of Bass diffusion model and regulatory framework of spectrum auction for different countries.

KEYWORDS: DVB-T, DVB-T2, MPEGx, digital dividend, techno-economic analysis, modeling, strategic planning, technology efficiency, PayTV, Bass diffusion model

SCIENTIFIC FIELD: Telecommunications

SPECIFIC SCIENTIFIC FIELD: Television

UDC: 621.3

SADRŽAJ

Strana

	Spisak skraćenica	
	Spisak slika	
	Spisak tabela	
1.	Uvod	1
2.	Strategija digitalizacije emitovanja programa	10
	2.1. Osnove digitalne radio-difuzije – formiranje, distribucija i emitovanje TV signala	11
	2.2. Digitalna dividenda	14
	2.3. Postavka problema	21
	2.4. Uticaj digitalne dividende na razvoj društva	22
3.	Tehnologije digitalne televizije	25
	3.1. IP umrežavanje	28
	3.2. OFDM u radio-difuziji	29
	3.3. Zaštitno kodovanje	35
	3.4. Raznovrsnost parametara za podešavanje performansi sistema	39
	3.5. Robusnost specifična za određeni servis	41
	3.6. Unapređena modulacija – rotacija konstelacionog dijagrama	45
	3.7. Diverziteti tehnike – Alamuti algoritam	47
	3.8. Teoretski maksimalan kapacitet kanala kod DVB-T2	49
	3.9. Usporedni pregled DVB-T i DVB-T2 standarda	50
4.	Model za procenu efikasnosti tehnologija digitalne televizije	54
	4.1. Proces strateškog planiranja mreža	55
	4.2. Osnovni model	58
	4.3. Unapređen model	65
	4.3.1. Bass difuzioni model	65
	4.3.2. Algoritam unapređenog modela	69
	4.3.3. Varijacija unapređenog modela	72
5.	Rezultati simulacije predloženog modela	76
	5.1. Rezultati simulacije osnovnog modela	76
	5.2. Rezultati simulacije unapređenog modela	81
6.	Zaključak	92
	Literatura	102

SPISAK KORIŠĆENIH SKRAĆENICA

Skraćenica	Puni naziv	Objašnjenje (na srpskom)
3GPP LTE	3rd Generation Partnership Project Long Term Evolution	Standard mobilnih komunikacija sa visokim bitskim protocima
ASI	Asynchronous Serial Interface	Asinhroni serijski interfejs
ATSC	Advanced Television Systems Committee	Američki standard za digitalnu zemaljsku televiziju
AVC	Advanced Video Coding	Napredno video kodovanje
B	Bi-directional predicted frame	Predikcija slika u odnosu na prethodnu i buduću sliku
BB	BaseBand	Osnovni opseg učestanosti
BCH	Bose, Chaudhuri, Hocquenghem	BCH kod
BDP	Bruto društveni proizvod	Bruto društveni proizvod
BER	Bit Error Rate	Verovatnoća greške po bitu
C/N	Carrier to Noise Ratio	Odnos snaga RF signala i šuma
CC	Convolutional Coding	Konvoluciono kodovanje
CM	Centralno Multipleksiranje	Centralno multipleksiranje
CMRA	Centralno Multipleksiranje Regionalna Adaptacija	Centralno multipleksiranje sa regionalnom adaptacijom
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex	Kodovano frekvencijsko multipleksiranje sa ortogonalnim nosiocima
CR	Code Rate	Kodni količnik
DAB	Digital Audio Broadcasting	Digitalna audio radio-difuzija
DCT	Discrete Cosine Transform	Diskretna kosinusna transformacija
DTMB	Digital Terrestrial Multimedia Broadcast	Kineski standard za zemaljsko emitovanje digitalnog TV signala
DVB	Digital Video Broadcasting	Digitalna video radio-difuzija
DVB PSI	DVB Program Specific Information	DVB programski specifične informacije
DVB SI	DVB Service Information	DVB servisne informacije
DVB-C	Digital Video Broadcasting - Cable	Kablovski DVB standard prve generacije
DVB-C2	Digital Video Broadcasting - Cable 2	Kablovski DVB standard druge generacije

DVB-H	DVB - Handheld	DVB standard za mobilni TV prijem
DVB-NGH	DVB Next Generation Handheld	DVB standard nove generacije za mobilni TV prijem
DVB-S	Digital Video Broadcasting Satellite	- Satelitski DVB standard prve generacije
DVB-S2	Digital Video Broadcasting Satellite 2	- Satelitski DVB standard druge generacije
DVB-T	Digital Video Broadcasting Terrestrial	- Zemaljski DVB standard prve generacije
DVB-T2	Digital Video Broadcasting Terrestrial 2	- Zemaljski DVB standard druge generacije
EBU	European Broadcast Union	Evropska unija emitera
EP	Economic Profit	Ekonomski profit
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	Evropski institut za standardizaciju u telekomunikacijama
FDD	Frequency Division Duplex	Frekvencijska podela dvosmernih kanala
FEC	Forward Error Correction	Zaštitno kodovanje
FFT	Fast Fourier Transform	Brza Furijeova transformacija
FMO	Flexibile Macroblock Ordering	Fleksibilan raspored makroblokova
GI	Guard Interval	Zaštitni interval
GPS	Global Positioning System	Globalni sistem za pozicioniranje
GSE	Generic Stream Encapsulation	Enkapsulacija nizova opšteg tipa
HD DVD	High Density Digital Versatile Disc	Optički disk velike gustine
HDTV	High Definition TV	Televizija visoke rezolucije
HEVC	High Efficiency Video Coding	Visoko efikasno kodovanje videa
HVS	Human Visual System	Ljudski vizuelni sistem
ICT	Information and Communications Technologies	Informacione i komunikacione tehnologije
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform	Inverzna brza Furijeova transformacija
IKM	Interliving Kodovanje Modulacija	Interliving Kodovanje Modulacija
IP	Internet Protocol	Internet protokol
IPTV	Internet Protocol Television	Televizija bazirana na Internet protokolu
IRD	Integrated Receiver Decoder	Integrisan prijemnik i dekođer
ISDB - T	Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial	Japanski standard za zemaljsko emitovanje digitalnog TV signala
ISI	Inter Symbol Interference	Intersimbolska interferencija

ITU-R	International Telecommunications Union - Radiocommunication Sector	Sektor za radio komunikacije Međunarodne unije za telekomunikacije
ITU-T	International Telecommunications Union - Telecommunication Standardization Sector	Sektor za standardizaciju Međunarodne unije za telekomunikacije
LDPC	Low Density Parity Check	Kod za proveru parnosti sa malom gustinom
MAC	Media Access Control	Kontrola medijuma za pristup
MFN	Multiple Frequency Network	Višefrekvencijska mreža
MHP	Multimedia Home Platform	Multimedijalna kućna platforma
MISO	Multiple Input Single Output	Više ulaza jedan uzlaz
MPE	Multiprotocol Encapsulation	Enkapsulacija protokola u TS
MPEG	Motion Picture Expert Group	Grupa eksperata za pokretnu sliku
MPLS	Multiprotocol Label Switching	Protokol za rutiranje baziran na labelama
NBA	National Basketball Association	Američka profesionalna košarkaška liga
NHE	Nacionalni HeadEnd	Centralna glavna stanica
NLS	Nonlinear Least Squares	Analiza nelinearne regresije
OLS	Ordinary Least Squares	Analiza linearne regresije
OSI	Open Systems Interconnection	Sistem povezivanja slojeva komunikacije
P	Predicted frame	Predikcija slika u odnosu na prethodnu sliku
PLP	Physical Layer Pipe	Zasebni kanali fizičkog sloja DVB-T2
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Kvadratura amplitudska modulacija
QEF	Quasi Error Free	Prijem skoro bez grešaka
QoS	Quality of Service	Kvalitet servisa
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	Digitalna fazna modulacija sa 4 simbola
RF	Radio Frequency	Radio frekvencije
RHE	Regionalni HeadEnd	Regionalna glavna stanica
RLC	Run Length Coding	Kodovanje dužina niza
RM	Regionalno Multipleksiranje	Regionalno multipleksiranje
RS	Reed Solomon	Reed Solomon zaštitno kodovanje
RTP	Real-time Transport Protocol	Protokol za prenos real-time servisa
S/N (SNR)	Signal to Noise Ratio	Odnos snaga signala i šuma
SDTV	Standard Definition TV	Televizija standardne rezolucije

SFN	Single Frequency Network	Jednofrekvencijska mreža
SISO	Single Input Single Output	Jedan ulaz jedan izlaz
SMPTE	Society of Motion Picture and Television Engineers	Udruženje video i televizijskih inženjera
STB	Set-Top-Box	Prijemnik digitalnog TV signala
T2-MI	T2 Modulator Interface	Interfejs ka DVB-T2 modulatoru
TC	Total Cost	Ukupni troškovi
TDD	Time Division Duplex	Vremenska podela dvosmernih kanala
T-DMB	Terrestrial – Digital Multimedia Broadcasting	Standard za zemaljski mobilni prijem TV signala
TPS	Transmission Parameter Signalling	Signalizacija parametara prenosa
TR	Total Revenue	Ukupni prihod
TS	Transport Stream	Transportni niz
TV	TeleVision	Televizija
UBR	Useful Bit Rate	Korisni binarni protok
UDP	User Datagram Protocol	Protokol bez garancije prenosa
UHF	Ultra High Frequency	Frekvencijski opseg ultra visokih učestanosti 300 MHz - 3 GHz
UK	United Kingdom	Ujedinjeno Kraljevstvo
VHF	Very High Frequency	Frekvencijski opseg vrlo visokih učestanosti 30 MHz - 300 MHz
VLAN	Virtual Local Area Network	Virtuelna lokalna računarska mreža
VLC	Variable Length Coding	Kodovanje sa promenljivom dužinom reči
VoD	Video on Demand	Video na zahtev
WiFi	Wireless Fidelity	Standard za bežičnu tačnu reprodukciju IEEE 802.11
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access	Standard interoperabilnosti za mikrotalasni pristup
WMV9	Windows Media Video 9	Windows standard za kompresiju videa

SPISAK SLIKA

Broj		Str.
Slika 1.1.	Lanac učesnika u digitalnom emitovanju radio-difuznog programa	3
Slika 1.2.	Hronologija razvoja najvažnijih DVB standarda	6
Slika 2.1.	Pregled učesnika u lancu digitalnog zemaljskog emitovanja	11
Slika 2.2.	Slojevi digitalnog televizijskog kodovanja	13
Slika 2.3.	Savremena mreža za emitovanje televizijskih signala (DVB-T2/IP).	13
Slika 2.4.	GPS sinhronizacija predajnika u SFN radu	16
Slika 2.5.	Sinhronizacija mreže bez GPS signala	17
Slika 2.6.	Arhitektura distribucione mreže: model CM - lokalni sadržaj je zajednički za celu mrežu	18
Slika 2.7.	Arhitektura distribucione mreže: model CMRA - lokalni sadržaji se multipleksiraju centralno	18
Slika 2.8.	Arhitektura distribucione mreže: model RM - lokalni sadržaji se ubacuju lokalno	19
Slika 2.9.	Arhitektura distribucione mreže sa nacionalnim i regionalnim programima	20
Slika 3.1.	Višestruka propagacija i raspršivanje kašnjenja	30
Slika 3.2.	Principska šema formiranja OFDM signala	31
Slika 3.3.	Ortogonalni nosioci u OFDM signalu	32
Slika 3.4.	Pozicija OFDM simbola u vremensko-frekvencijskoj ravni	32
Slika 3.5.	Pozicija GI u vremensko-frekvencijskoj ravni	33
Slika 3.6.	Uticaj zaštitnog intervala na izbegavanje ISI	33
Slika 3.7.	Poređenje analognog i digitalnog prenosa u UHF opsegu	34
Slika 3.8.	Efekte frekvencijski selektivnog kanala na nosioce OFDM signala	35
Slika 3.9.	COFDM obrada signala kod DVB-T standarda	36
Slika 3.10.	FEC kodovanje kod DVB-T2 standarda	37
Slika 3.11.	Poređenje zaštitnih kodova DVB-T i DVB-T2 sistema	38
Slika 3.12.	Povećanje FFT veličine kod DVB-T2 sistema smanjuje gubitke kapaciteta usled GI	40

Slika 3.13.	Blok šema obrade DVB-T2 signala	42
Slika 3.14.	Distribucija T2-MI paketa	43
Slika 3.15.	Generalni model za DVB-T2 fizički sloj	44
Slika 3.16.	DVB-T2 princip prenosa sa višestrukim PLP	45
Slika 3.17.	Rotirana 16-QAM konstelacija	46
Slika 3.18.	Ponašanje sistema pri rotaciji konstelacije za 29° (levo) i u klasičnom IKM (desno)	46
Slika 3.19.	Blok šema MISO sistema sa regionalnim ubacivanjem programa	47
Slika 3.20.	MISO u DVB-T2 standardu	48
Slika 3.21.	DVB-T, DVB-T2 i Šenonova granica kapaciteta kanala	50
Slika 4.1.	Algoritam tehno-ekonomske analize	51
Slika 4.2.	Topologija telekomunikacione mreže za radio-difuzne potrebe	59
Slika 4.3.	Opšti slučaj dinamike priliva prihoda i investicija tokom vremena	61
Slika 5.1.	Analiza profita i gubitaka za Slučaj MPG4T	78
Slika 5.2.	Analiza profita i gubitaka za Slučaj MPG4T2	79
Slika 5.3.	Analiza profita i gubitaka za MPEG-4/DVB-T2 i MPEG-4/DVB-T	80
Slika 5.4.	Zavisnost potrebnog broja RF kanala od broja TV programa za različite tehnologije	81
Slika 5.5.	Broj novih pretplatnika <i>PayTV</i> servisa mesečno u Srbiji prema <i>Bass</i> difuzionom modelu	84
Slika 5.6.	Simulacija unapređenog modela za $P = 0,1$ i $m = 45.000$	86
Slika 5.7.	Simulacija unapređenog modela za $P = 0,1$ i $m = 75.000$	86
Slika 5.8.	Simulacija unapređenog modela za $P = 0,2$ i $m = 45.000$	87
Slika 5.9.	Simulacija unapređenog modela za $P = 0,2$ i $m = 75.000$	87
Slika 5.10.	Simulacija varijacije unapređenog modela za $P = 0,1$ i $m = 45.000$	90
Slika 5.11.	Simulacija varijacije unapređenog modela za $P = 0,2$ i $m = 75.000$	90

SPISAK TABELA

Broj		Str.
Tabela 2.1.	Poređenje različitih arhitektura distribucione mreže	20
Tabela 3.1.	Kapacitet prenosa DVB-T i DVB-T2 standarda – primer za MFN mrežu	51
Tabela 3.2.	Kapacitet prenosa DVB-T i DVB-T2 standarda – primer za SFN mrežu	52
Tabela 3.3.	Poređenje parametara DVB-T i DVB-T2 standarda	53
Tabela 5.1.	Kapacitet prenosa DVB-T i DVB-T2 standarda – primer za mrežu u Srbiji	78

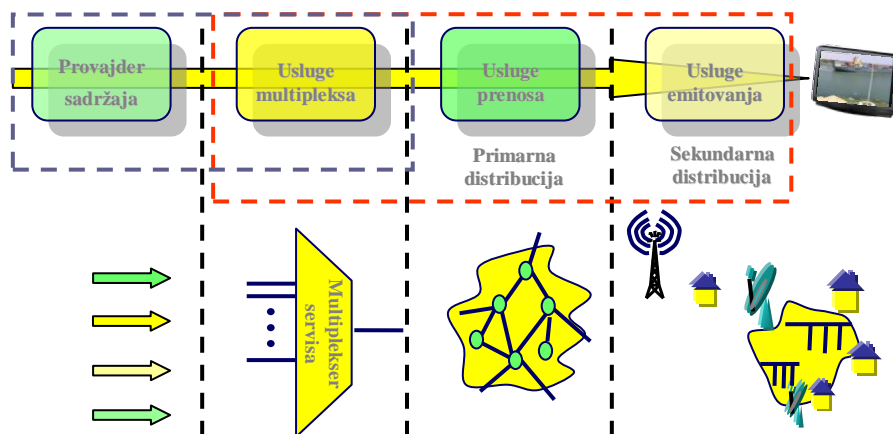
1. Uvod

Pronalaženje, razvoj i realizacija novih puteva i tehnologija prenosa bili su uvek, a naročito su danas, jedan od glavnih zadataka naučnih istraživanja u oblasti telekomunikacija. Televizija predstavlja poseban telekomunikacioni medijum za predaju i prijem video signala sa pripadajućim zvukom. Sve do početka devedesetih godina dvadesetog veka televizijske tehnologije se nisu dinamično menjale, a promena sa analognog na digitalni način emitovanja televizijskog (TV) programa je najveća promena u radio-difuziji još od pojave kolor TV sadržaja. Kao i svi telekomunikacioni sistemi, i televizijski zahtevaju velika finansijska ulaganja u ljudske resurse, mrežnu infrastrukturu i opremu. Zato je osnovna težnja tokom procesa bilo kakve promene ili unapređenja tehnologije omogućiti evolutivnost i što veću kompatibilnost sa sistemima koji su već u upotrebi. Međutim, u procesu digitalizacije sistema emitovanja TV programa zahtevaju se revolucionarne promene uz upotrebu naučnih istraživanja, stručnih ispitivanja, odlaganja u pogledu primene, pri čemu prvi implementirani sistemi često bivaju prevaziđeni u sledećim generacijama [RELJ08].

Prilikom digitalizacije TV sistema formira se signal koji zahteva protok od 270 Mb/s u slučaju televizije standardne rezolucije SDTV (*Standard Definition TV*), odnosno 1,5

Gb/s za televiziju visoke rezolucije HDTV (*High Definition TV*). Da bi se smanjio binarni protok mora se izvršiti kompresija video i audio signala. Emitovanje komprimovanog TV signala do krajnjih korisnika obavlja se satelitskim putem, zemaljskom mrežom predajnika ili kablom. Kao što je uobičajeno u razvoju novih telekomunikacionih tehnologija tako se i kod tehnika emitovanja digitalnog TV signala pošlo od principa evolutivnosti. Prilikom definisanja standarda za emitovanje koji podržava prenos digitalnog signala unutar postojećeg televizijskog kanala, evolutivnost se postiže nenarušavanjem strukture i raspodele kanala unutar VHF (*Very High Frequency*) i UHF (*Ultra High Frequency*) opsega u zemaljskom emitovanju. Dva bitna procesa dominiraju u rešavanju problema digitalnog televizijskog emitovanja: kompresija i prenos.

Tri osnovna činioca u sistemu digitalne radio-difuzije predstavljaju proizvođači sadržaja, operatori mreža i korisnici. Kod korisnika usluga nalaze se prijemnici digitalnog TV signala, odnosno *Set-Top-Box* (STB) uređaji. Digitalna radio-difuzna mreža omogućava i nove usluge, uključene u osnovni program ili se nude posebno ali za to je potrebno obezbediti STB uređaje koji su osposobljeni za njihov prijem. Osnovni činioci sa svojim funkcijama koje su u sistemu digitalne radio-difuzije prikazani su na slici 1.1 [RELJ09B]. Provajdere sadržaja u praksi čine i emiteri sa sopstvenom produkcijom, ali generalno to mogu biti i nezavisni vlasnici televizijskih, radio i multimedijalnih sadržaja koji se mogu prenositi, zajedno sa osnovnim programskim sadržajima ili u okviru digitalne dividende. Usluge multipleksa se najčešće obezbeđuju u okviru distribucionih mreža. Ako provajderi sadržaja formiraju digitalni signal, onda će ga distribicioni sistemi prihvatiti u tom obliku i multipleksirati sa ostalim pritokama multipleksa. Distribicioni sistemi se sastoje od primarnih (prenos signala do predajnika) i sekundarnih (emitovanje signala krajnjem korisniku) mreža. Primarna distribucija se može obavljati radio vezama, mrežom telekom operatora, kablovskim sistemima ili preko satelita. Sekundarna distribucija se obavlja putem satelita, kablovskog sistema, ili interneta, a naročito važan segment je zemaljski, koji koristi emisionu tehniku ponuđača usluga emitovanja. U ovoj disertaciji razmatraće se zemaljski način emitovanja signala.



Slika 1.1. Lanac učesnika u digitalnom emitovanju radio-difuznog programa

Postoji više standarda koji se u svetu danas primenjuju za digitalni zemaljski način emitovanja TV signala [FIS10]. Prvo je uveden ATSC (*Advanced Television Systems Committee*), koji se danas koristi u Severnoj Americi i Južnoj Koreji. DVB-T (*Digital Video Broadcasting – Terrestrial*) je standard baziran na dogovoru konzorcijuma evropskih kompanija i institucija, ali se danas koristi pored Evrope i u Australiji, Indiji, nekim zemljama Azije i Afrike. ISDB-T (*Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial*) je japanski standard za zemaljsko emitovanje digitalnog TV signala, koji je usvojen nakon ATSC i DVB-T i uzima u obzir iskustva stečena u primeni ovih standarda. ISDB-T se dosta primenjuje u Južnoj Americi. Pored ova tri međunarodna standarda, Kina je razvila standard DTMB (*Digital Terrestrial Multimedia Broadcast*) za fiksni i mobilni prijem zemaljskog TV signala. Postoje i dva značajna standarda za zemaljski mobilni prijem TV signala, T-DMB (*Terrestrial – Digital Multimedia Broadcasting*) i DVB-H (*Digital Video Broadcasting – Handheld*). Prvi je razvijen u Južnoj Koreji i ima parametre identične sa evropskim DAB (*Digital Audio Broadcasting*) standardom. T-DMB se koristi u mnogim zemljama širom sveta. Sa druge strane, DVB-H se preferira za zemaljske mobilne TV servise u Evropi. Fokus ove disertacije je na analizi performansi i na metodu za procenu efikasnosti tehnologija za fiksni prijem, a koje se koriste u našem regionu odnosno Evropi.

Zbog složenosti tehnologije i procesa prelaska na digitalno emitovanje, evropske interesne grupe u oblasti televizije organizovale su stručnjake emitera, proizvođača korisničke opreme i regulatornih agencija, sa ciljem standardizovanja televizijskog

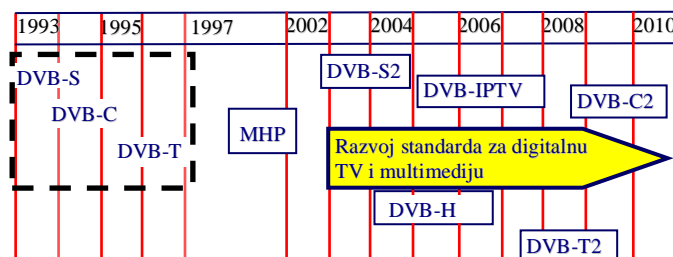
difuznog sistema. Tako je nastao DVB (*Digital Video Broadcasting*) projekat. U okviru projekta istraživanja su usmerena na video/audio tehnologije, kao i digitalnog difuznog prenosa širokopojasnih signala.

DVB predstavlja konzorcijum sastavljen od skoro 300 kompanija (proizvođača opreme, emitera, mrežnih operatera, proizvođača softvera, regulatornih agencija i dr.) u početku evropskih a danas iz celog sveta. Cilj organizacije je da dogovori specifikacije za sisteme isporuke digitalnih medija, naročito televizije. DVB je inicijativa privatnog sektora i otvorena je za nove članice. Potpisujući Memorandum o razumevanju članice se obavezuju na zajednički rad u duhu poverenja i uzajamnog poštovanja i između konkurentskih kompanija. Članice DVB projekta razvijaju i dogovaraju specifikacije koje se prosleđuju evropskim standardizacionim telima ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), EBU (*European Broadcast Union*, Evropska unija emitera),... na odobrenje, nakon čega se specifikacije i formalno pretvaraju u standarde za televiziju. Svaka interesna grupa donosi svoj deo ekspertize. Ključan doprinos daju proizvođači opreme i emiteri: potvrda da je određenu specifikaciju vredno razvijati samo ako i kada mogu da se pretoče u proizvod koji ima direktnu komercijalnu vrednost. DVB specifikacije su tržišno orijentisane. 1993. godine ovakav pristup rada u svetu standardizacionih tela je bio jedinstven i odlučujući je činilac uspeha serije DVB standarda. U organizaciji razvoja standarda ključna su dva komiteta: Komercijalni i Tehnički moduli. Komercijalni modul definiše osobine i nivoe cena koje određeni proizvod treba da ima da bi bio uspešan, bez diskusije o tome na koji način će se postići. Tek onda se Tehničkom modulu postavlja zadatak da kreira tehničku specifikaciju koja će da zadovolji postavljene zahteve. Kada je specifikacija pripremljena Komercijalni modul proverava da li je postignuto ono što je traženo. Izuzetno pažljivo se biraju predsedavajući Modula koji tokom vremena rada ključno doprinose konačnom uspehu.

Početni zadatak rada na ovom projektu bio je da se razviju tehnologije za televizijsko emitovanje preko satelita, kablovske i zemaljske mreže u jednom predstandardizacionom telu. Uzet je princip kreiranja sistema prenosa po principu "kontejnera" koji nosi bilo koju kombinaciju slika, tona ili multimedije, a ne da se za svaku vrstu programa i medija (SDTV, HDTV, *surround sound*,...) pravi novi sistem isporuke. Da bi se snizila cena proizvodnje, gde god je to moguće, DVB se opredeljuje

za iste tehnologije na svim različitim platformama (satelit, kabl, predajnici). Finalizacija posla se obavlja ETSI standardizacijom za fizički sloj i zaštitnim kodovanjem za svaki sistem isporuke. Poseban ETSI izveštaj se pravi za moguće tipove signala u osnovnom opsegu koji su spremni za prenos. DVB kao signal u osnovnom opsegu koristi MPEG (*Motion Picture Expert Group*) *Transport Stream* format za sve tri vrste isporuke servisa uz kompresiju prema široko rasprostranjenom standardu MPEG-2 [ITU00] ili novijem i efikasnijem MPEG-4 verzija 10 [ITU10]. Način obeležavanja specifikacije je DVB- i odgovarajuća oznaka sistema (na primer *Digital Video Broadcasting - Satellite* DVB-S za satelitski, *Digital Video Broadcasting - Cable* DVB-C za kablovski i *Digital Video Broadcasting - Terrestrial* DVB-T za zemaljski način isporuke digitalne TV).

Istorijski gledano prvo su nastale specifikacije za satelitski i kablovski prenos zato što nije bilo većih tehničkih problema, jednostavnija je regulacija ovih servisa i tržišni prioriteti su vodili ovakav razvoj. Prvo je razvijen DVB-S za digitalno emitovanje TV programa preko satelita - 1993. godine. DVB-S je prilično jednostavan sistem koji koristi QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) modulaciju. Specifikacija definiše i sistem zaštitnog kodovanja koji se kasnije koristi i kod ostalih sistema. DVB-C za kablovsku distribuciju je završen 1994. godine i orijentiše se na QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) modulaciju i ima mogućnost transporta kompletnog kanala satelitskog multipleksa u kablovski kanal (postoji i posebna specifikacija za Zajedničke antenske sisteme). DVB-T [ETSI09] je najsloženiji standard jer signal mora da se prenese u nepovoljnom kanalu za prenos (šum, interferencija, prostiranje po više putanja,...) i zato koristi modulaciju sa više nosilaca QAM. Relativno dugo vreme od definisanja prvih standarda (10 do 15 godina) i razvoj tehnologija u televizijskom prenosu, doveli su do uvođenja novih-savremenijih, i za tržište potrebnijih rešenja koja su formalizovana kao druga generacija DVB standarda. Druga generacija DVB standarda definisana je za sva tri tipa mreža za emitovanje TV programa i nosi oznake DVB-S2, DVB-C2 i DVB-T2. U svim mrežama za emitovanje druge generacije ostvaruje se povećanje kapaciteta prenosa za najmanje 30%. To je ostvareno upotrebom naprednih tehnika modulacije i zaštitnog kodovanja kao i kompresije video signala. Hronologija razvoja DVB standarda ilustrovana je na slici 1.2 [RELJ09A].



Slika 1.2. Hronologija razvoja najvažnijih DVB standarda

Jasno je da kod oba bitna procesa za digitalno zemaljsko emitovanje, kompresiju i prenos, postoji mogućnost izbora različitih tehnologija, MPEG-2 ili MPEG-4 verzija 10 (u daljem tekstu samo MPEG-4) i DVB-T ili DVB-T2 [ETSI11A]. Međutim, i pored tehnološke superiornosti novih standarda postavlja se pitanje izbora jer složenost novih standarda kompresije i emitovanja, nedostatak iskustva u primeni tih tehnologija, i mali izbor proizvođača te opreme su veliki ograničavajući faktor za masovniju primenu iste. Pored toga pri izboru tehnologija je od izuzetnog značaja ekonomski aspekt jer jednom uvedena tehnologija treba da bude u upotrebi dugi niz godina, a da zadovolji sve veći zahtevani kvalitet novih multimedijalnih servisa. Kako primena nove tehnologije po pravilu zahteva veća finansijska sredstva, ukazuje se potreba za analizom efikasnosti izbora tehnologija digitalne televizije. Da bi se sproveda takva analiza neophodno je razviti odgovarajući matematički model koji može dati objektivno poređenje različitih tehnologija i standarda za digitalno emitovanje zemaljskog TV programa. Izbor tehnologija za digitalnu televiziju ima veliki značaj. Tehnološki - on se ogleda u mogućnosti ispunjenja zahteva izabranih standarda za: potrebnim kapacitetom prenosa, veličinom zone pokrivanja servisom, kvalitetom primljenog signala itd. Ne manje važan aspekt je procena ekonomske isplativosti izbora tehnologije, imajući u vidu troškove uvođenja tehnologije, održavanja, tržišta, prihoda, itd. On poprma sve veći uticaj na konačan izbor primenjenih standarda u oblasti informacionih i komunikacionih tehnologija (ICT). Dodatni parametri su društveni i socijalni značaj izbora odgovarajućih tehnologija jer ovaj izbor utiče na kompletno stanovništvo sa jedne strane, ali sa druge strane doprinosi razvoju društva kroz podizanje infrastrukture za širokopojasne servise (tamo gde ih nema ili za dopunu kapaciteta) a samim tim i povećanju bruto društvenog proizvoda (BDP) zemlje.

Ova disertacija predlaže jedno rešenje problema izbora tehnologije digitalne televizije uz primenu matematičkog modela koji uzima u obzir tehnološke i ekonomske parametre koji opisuju različite postojeće sisteme i omogućava precizno vrednovanje sistema i procenu koristi od digitalne dividende koja se dobija upotrebom najnovijih tehnologija.

Prethodni napori za utvrđivanje odnosa između tehničkih i ekonomskih performansi digitalnih tehnologija za radio-difuziju su retki i sa različitim fokusom, a posebno nedostaju istraživanja koja na taj način tretiraju DVB-T2 standard. U radovima [BRO08] i [KIM08] je izvršena ekonomska analiza, kao i analiza efikasnosti upotrebe spektra za tehnologije širokopojasnog bežičnog pristupa. Još od prvih dana digitalizacije zemaljskog emitovanja TV servisa u svetu, postoje tehno-ekonomske analize [TAD99] koje modeliraju tržišne perspektive, konvergenciju sa telekom i informacionim tehnologijama i njen uticaj na regulativu. U radu [HOI06] predstavljen je model za simulaciju tehno-ekonomske analize sistema za pristup IP servisima mobilnih korisnika preko zemaljskog DVB sistema. Pored servisa podataka postoje istraživanja [SKI06] koja procenjuju povezanost zahtevanog kapaciteta i finansijskog ulaganja u mrežu za mobilnu televiziju i radio servis, ali bez simulacionog modela za izračunavanje odnosa profita i troškova. U istraživanju prezentiranom u radu [YIP07] definisan je generalni model za planiranje digitalnih TV sistema za procenu godišnjeg rasta penetracije tržišta za HDTV, IPTV (*Internet Protocol Television*) i mobilnu TV. Model koristi formulu koja uzima u obzir faktore koji utiču na rast a kriva rasta ima S-oblik (S-kriva). Za razliku od [YIP07], za slične svrhe u istraživanjima i kao deo modela koji se prezentira u ovoj disertaciji, za procenu difuzije novih tehnologija koristi se u ovoj oblasti čuveni *Bass* model koji će biti objašnjen kasnije u disertaciji. Polazne osnove vezane za digitalnu dividendu su navedene u iscrpnim analizama u [MAS09].

U ovoj disertaciji na osnovu pregleda postojećih tehnologija definišu se parametri digitalnog radio-difuznog sistema koji daju numerički opis karakteristika različitih sistema sa stanovišta tehno-ekonomske analize. Na osnovu ovako definisanih parametara formira se model koji omogućava poređenje kombinacije različitih tehnologija i procenu njihovih efikasnosti i to za tri tipične kombinacije: postojeću kombinaciju MPEG-2/DVB-T, koja se koristi u zemljama koje već više godina imaju digitalnu zemaljsku televiziju, i naprednih tehnologija MPEG-4/DVB-T, odnosno MPEG-4/DVB-T2. Tehnički parametri sistema se određuju tako da se za svaku

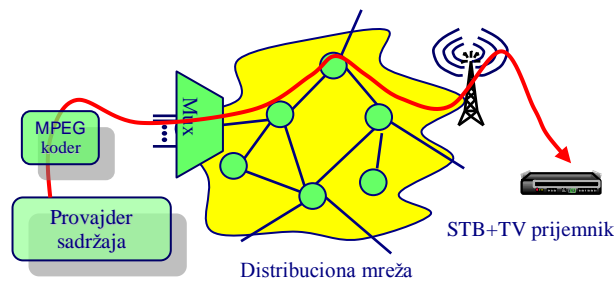
kombinaciju tehnologija dobija isti kvalitet servisa za istu zonu pokrivanja ali, u zavisnosti od tehničke efikasnosti primenjene kombinacije, na raspolaganju su različiti kapaciteti za prenos servisa. Radi poređenja tehnologija određuju se troškovi uspostavljanja sistema (investicije), formira se razlika troškova tehnologija koje se porede, i ta razlika investicija (ili cela investicija) se poredi sa prihodima koji se u modelu računaju na osnovu dobiti od uštede u kapacitetu prenosa. Primenom predloženog modela može se eksplicitno odrediti tačka preseka kriva troškova i prihoda u vremenu, od koje počinje period profitabilnosti (isplativosti) jedne od posmatranih tehnologija koje se porede. Model može da koristi digitalni TV sistem sa jednim ili više programskih paketa – multipleksa. Dobit od uštede u kapacitetu prenosa ogleda se u dodatnim servisima koji su ilustrovani kroz prenos podataka ili profitabilnijem *PayTV* servisu čiji se prihodi računaju u modelu. *PayTV* je televizijski servis zasnovan na pretplati. Ovaj servis se može emitovati preko satelita, kablovske mreže, interneta ili zemaljskih predajnika, a sadržaj se kriptovanjem štiti od neovlašćene upotrebe servisa. Za procenu broja korisnika servisa u mreži upotrebljava se *Bass* model za koji su određeni parametri prilagođeni za *PayTV* servis. Alternativno, model može da kombinuje dva istovremena izvora prihoda, od *PayTV* servisa i od aukcijske prodaje frekvencijskog spektra. Ulazni podaci za primenu modela dobijaju se od mrežnog operatora, provajdera TV sadržaja, multipleks operatora i proizvođača opreme za ceo sistem. Model je primenjen na televizijsko tržište u Srbiji, koje je karakterisano velikim brojem TV programa, ali se isti može primeniti i na druge zemlje.

Disertacija je organizovana u šest poglavlja. U uvodnom poglavlju definisane su ključne komponente digitalnog radio-difuznog sistema, opisan je razvoj tehnologija digitalne TV, ukazano je na probleme u izboru tehnologije za primenu i navedene činjenice vezane za prethodna istraživanja u oblasti simulacija performansi različitih telekomunikacionih tehnologija. Drugo poglavlje objašnjava početne postavke problema kroz definisanje elemenata i ciljeva strategije digitalizacije zemaljske mreže za emitovanje TV programa. U trećem poglavlju uz analizu istaknute su tehnološke prednosti novih standarda u oblasti digitalne televizije. U četvrtom poglavlju su opisani algoritam i predložen model za procenu efikasnosti izbora tehnologija digitalne televizije. U petom poglavlju su navedeni rezultati simulacija modela primenjeni na slučajeve televizijskih mreža i tržišta u Srbiji. Na kraju rada doneti su zaključci o

istraživanjima i rezultati poređenja tehno-ekonomske efikasnosti različitih kombinacija tehnologija digitalne televizije.

2. Strategija digitalizacije emitovanja programa

Strategija digitalizacije emitovanja televizijskih programa nalazi utemeljenje u savremenim dostignućima u digitalnoj radio-difuziji i ima za cilj kvalitetan i efikasan prenos signala koji pored televizijskih može da nosi radio, multimedijalne i druge sadržaje [SRB09A]. Uvođenje nove tehnologije u sistem emitovanja programa donosi pogodnosti svim učesnicima u digitalizaciji, a naročito krajnjim korisnicima. Njima će digitalizacija omogućiti bolji kvalitet audio i video signala, više TV programa, raznolikost sadržaja, nove usluge podešene za posebne grupe korisnika (manjine, osobe sa posebnim potrebama itd), mogućnost interaktivnih servisa, portabl i mobilni prijem programa, konvergenciju usluga. Pružaocima usluga digitalizacija će omogućiti prilagođavanja programa prema zahtevima različitih ciljnih grupa, pružanje usluga na zahtev, kao i niže troškove emitovanja. Regulatornim telima digitalizacija će omogućiti efikasnije korišćenje radio-frekvencijskog spektra, promociju razvoja tehnologije i unapređenu konkurenciju. Pojednostavljena blok šema sistema za prenos signala od provajdera sadržaja do krajnjeg korisnika data je na slici 2.1.



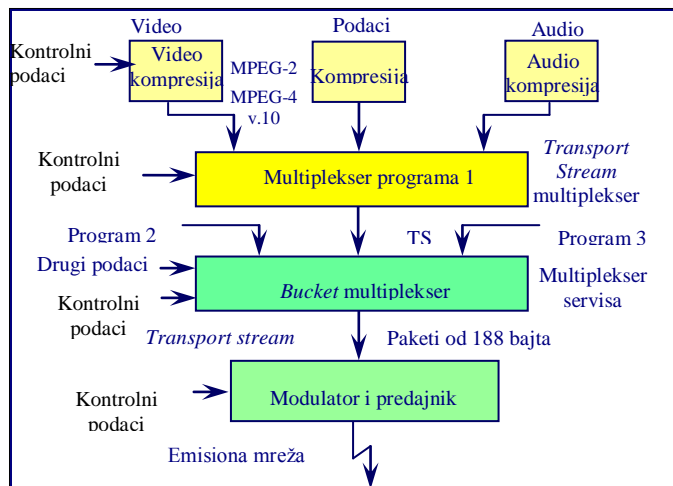
Slika 2.1. Pregled učesnika u lancu digitalnog zemaljskog emitovanja

2.1. Osnove digitalne radio-difuzije – formiranje, distribucija i emitovanje TV signala

DVB projekat je definisao više važnih smernica za razvoj digitalnih sistema emitovanja televizijskog signala. Važna pretpostavka prenosa odnosi se na način kompresije audio i video signala. Kao i kod mnogih drugih telekomunikacionih standarda, i ovde je usvojeno da u slučaju videa to bude MPEG-2, koji je identičan sa preporukom H.262 organizacije ITU-T (*International Telecommunications Union*). MPEG-2 standard je otvoren jer se tim standardom specificira dekodir. On pruža velike mogućnosti za unapređenja koda što se koristi kroz različite generacije koda uvođenjem mnogih inovacija proizvođača uređaja. Kao posledica toga dobija se stalni pad nepodnog binarnog protoka za utvrđeni subjektivni kvalitet dekodiranog video signala. Na početku, za odličan kvalitet bilo je potrebno obezbediti protok od 8 Mb/s. Za isti sadržaj slike u sadašnjim MPEG-2 koderima, isti kvalitet zahteva protok od 4 Mb/s. I pored toga, konstantno se razvijaju razne tehnike i algoritmi, na primer, definisane kao H.263 preporuka, namenjene uglavnom multimediji za prenos preko treće generacije mobilnih mreža. MPEG-4 je u početku takođe bio namenjen multimediji (npr., verzija 2 tog standarda), ali je daljim usavršavanjem definisao i kompresiju pri nešto većim protocima radi boljeg kvaliteta reprodukcije videa. Prvi standard koji je doveo u pitanje za televiziju neprikosnoveni MPEG-2, bio je MPEG-4, verzija 10 (u ITU usvojen kao preporuka H.264). Većim brojem sitnih poboljšanja uz nekoliko krupnijih, H.264 je uspeo da ostvari približno isti subjektivni kvalitet reprodukovanog videa kao MPEG-2, a sa upola manjim protokom [SUG11]. Standard je usvojen 2003. godine i sve više postaje baza za digitalnu televiziju. Danas postoje dualni dekoderi u kojima su primenjena oba standarda kompresije, MPEG-2 i MPEG-4 verzija 10.

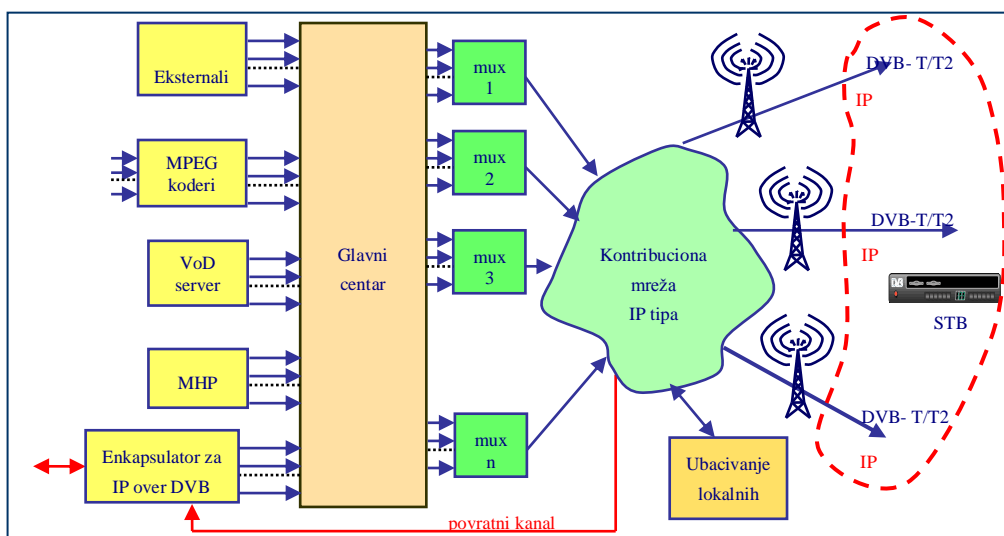
U cilju pripreme TV sadržaja za emitovanje, komprimovani video i audio signali se multipleksiraju, uz insertovanje informacija o televizijskom programu, slika 2.2 [RELJ09A]. Multipleksirani signal ima formu paketa fiksne dužine od 188 bajta (*transport stream*, TS) i ima ulogu kontejnera za prenos informacije. Zatim se više programa multipleksira u novi transportni niz TS, u tzv. *buket multipleksa*. Od velike je važnosti činjenica da je format TS paketa isti i za MPEG-2 i MPEG-4 te se TV programi sa različitom kompresijom, što se tiče mreže za distribuciju i emitovanje, mogu ravnopravno prenositi, čak i kao kombinacija MPEG-2 i MPEG-4 u istom multipleksu. Takođe, važno je istaći da se kod digitalne televizije koristi uglavnom statističko multipleksiranje gde se upotrebljavaju promenljivi binarni protoci pojedinih TV programa, a tokom multipleksiranja svakom TV programu se dodeljuje kapacitet koji odgovara trenutnom protoku tog programa. Na taj način kapacitet prenosa se prilagođava trenutnim potrebama za kapacitetom pojedinih programa favorizujući kvalitet prenosa i reprodukcije TV sadržaja. Multipleks se može formirati ili na mestu produkcije programa, ili kod vlasnika distribucionih mreža. Ako je multipleks formiran u blizini emisionih kapaciteta on se može odmah emitovati ka krajnjim korisnicima. U svakom slučaju transportni niz se mora pre emitovanja zaštititi od grešaka nastalih u prenosu. Kod DVB-T u tu svrhu se primenjuje kanalsko kodovanje, poznato pod imenom *Reed-Solomon* kodovanje koje dodaje izvesnu količinu bajtova svakom paketu. Time se smanjuje raspoloživi protok bita u kanalu. Radi zaštite od dugih sekvenci grešaka, koristi se proširivač (*interleaver*), koji za vreme prenosa vrši promenu redosleda bajtova transportnog niza. Na izlazu kanalskog koda koristi se konvolucioni koder koji dodatno omogućava zaštitu transportnog niza TS kao i unutrašnji (interni) proširivač. Zaštićeni signal se šalje ka modulatoru i predajniku. Kod DVB-T2, sistem zaštitnog kodovanja je unapređen (o ovome će biti više reči u sledećem poglavlju). Imajući na umu prirodu kanala za prenos u zemaljskim radio sistemima, zbog postojanja višestruke propagacije emitovanog signala javlja se eho signala. Zato je za digitalno emitovanje kao zaštita definisano proširivanje trajanja simbola (zaštitni interval – *GI Guard Interval*). Prošireni simbol obezbeđuje da eho predstavlja samo deo simbola, koji se u prijemu ignorise i ne predstavlja destruktivnu smetnju. Tehnika koja obezbeđuje kodovanje, ubacivanje GI i modulaciju sa više nosilaca naziva se COFDM (*Coded*

Orthogonal Frequency Division Multiplex). U DVB-T/T2 sistemu, ovakvom pripremom formira se kanal sa verovatnoćom greške bita u MPEG TS paketima manjom od 10^{-11} .



Slika 2.2. Slojevi digitalnog televizijskog kodovanja

Osnovna ideja koja je vodila koncipiranju DVB standarda, naročito druge generacije, u velikoj meri zasnovana je na razvoju interneta i standarda koji su ka njemu orijentisani [SUG11]. DVB je još na početku imao orijentaciju ka multimediji, pa je sve zajedno dovelo do nove vizije digitalne televizije. Ako je potrebno MPEG TS signal preneti na udaljene lokacije do predajničkih mesta, onda se u današnje vreme koriste distribucione mreže zasnovane na IP protokolu, slika 2.3.



Slika 2.3. Savremena mreža za emitovanje televizijskih signala (DVB-T2/IP)

Kada se multipleksi generišu u glavnom centru distribucione mreže, onda u njih ulaze eksterni signali, programi generisani u produkcionim centrima, zatim video na zahtev VoD (*Video on Demand*), kao i MHP (*Multimedia Home Platform*) signali. Mreža primarne distribucije je IP orijentisana uz podršku MPLS (*Multiprotocol Label Switching*) protokola koji obezbeđuje neophodan kvalitet u transportu za *real-time* servise kao što je televizija. Signali se iz IP/MPLS mreže prenose do satelitske stanice, zemaljskih predajnika ili kablovske glavne stanice da bi se TV programi emitovali ka krajnjim korisnicima, a omogućava se i internet prenos po DVB kanalima. Za emitovanje preko mreže zemaljskih predajnika postoji mogućnost izbora dva standarda, DVB-T ili DVB-T2. Novi standard DVB-T2 za isti kvalitet prijema i sličnu zonu servisa daje najmanje 30% veći kapacitet prenosa za servise (o ovome će biti više reči u sledećem poglavlju).

2.2. *Digitalna dividenda*

Zahvaljujući novim tehnologijama koje se primenjuju u standardima kompresije (MPEG-4) i sistemu prenosa (DVB-T2) moguće je smanjiti potreban kapacitet u sistemu emitovanja, a ostvariti isti kvalitet servisa i zonu pokrivanja. Kapacitet u sistemu emitovanja koji se uštedi na ovaj način zove se digitalna dividenda. Jednostavnije rečeno, digitalna dividenda predstavlja deo kapaciteta koji se oslobađa po uvođenju novih efikasnijih tehnologija. Najčešće se podrazumeva da se digitalna dividenda dobija (a samim tim i izražava) u vidu frekvencijskog spektra (jedinica mere Hz), međutim može se dobiti i izraziti u vidu broja VHF/UHF kanala ili izražena u vidu binarnog protoka (jedinica mere b/s). Kapacitet digitalne dividende ima potencijal da se iskoristi za dodatne servise kao na primer televizijske, multimedijalne, širokopolasne, mobilne ili njihovu kombinaciju.

Strategija digitalizacije emitovanja programa se može analizirati sa stanovišta maksimiziranja digitalne dividende i to uz upotrebu četiri ključna faktora za uspešan ishod:

1. Efikasne kompresije koja obezbeđuje smanjenje protoka po programu;

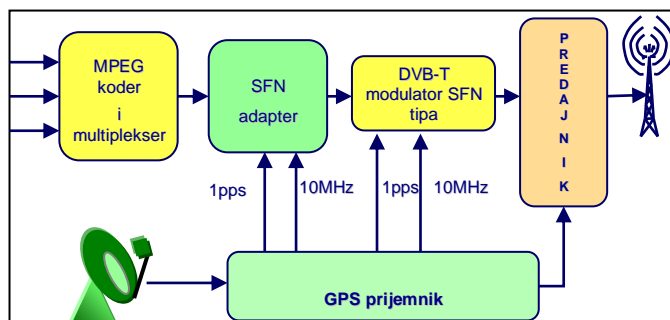
2. Efikasnog standarda za prenos koji obezbeđuje povećanje binarnog protoka u jednom TV kanalu;
3. Jednofrekvencijske mreže (*Single Frequency Network* - SFN) po zonama raspodele, koje efikasnije koriste frekvencijski spektar;
4. Arhitekture mreže sa jednostavnim insertovanjem velikog broja lokalnih-regionalnih programa.

O uticaju prva dva faktora već je bilo reči a u sledećem poglavlju data je detaljnija analiza.

Treći faktor je SFN mreža. Standardne TV mreže rade kao MFN (*Multiple Frequency Network*) odnosno prijemnik se podešava na frekvenciju predajnika koji se nalazi u njegovoj blizini dok u npr susednoj zoni servisa predajnik za isti TV program radi na drugoj frekvenciji. Kod SFN svi predajnici u mreži koriste isti frekvencijski kanal. Zbog osobina COFDM modulacije koja se koristi u DVB-T i DVB-T2 standardima, kao i zbog precizne sinhronizacije predajnika, u prijemu *ne* dolazi do destruktivne interferencije signala koji dolaze sa različitih SFN predajnika. DVB-T2, kao i prethodna generacija standarda, podrazumeva sinhronizaciju predajnika, posebno ako se želi rad u jednofrekvencijskim mrežama. S obzirom da je DVB standard, uvodeći COFDM, omogućio robusnost na raspršivanje kašnjenja u uslovima višestruke propagacije signala, to se prijem signala od dva susedna predajnika koji rade na istoj frekvenciji, za televizijski prijemnik doživljava kao originalna i zakašnjena verzija signala. Upotrebom zaštitnog intervala i zaštitnog kodovanja ova potencijalno destruktivna pojava se maksimalno ublažava, a ukupna snaga prijemnog signala se povećava. To znači da je rad jednofrekvencijske mreže moguć, ali je neophodno da se ima dobra sinhronizacija među predajnicima. Više predajnika opslužuje zajedničku zonu pokrivanja i zato oni ne mogu da rade nezavisno, odnosno potreban im je visok nivo sinhronizacije. Signali koji se emituju sa različitih predajnika moraju biti identični po sadržaju što znači da se signali emituju u isto vreme i da se njihove frekvencije poklapaju sa visokom preciznošću.

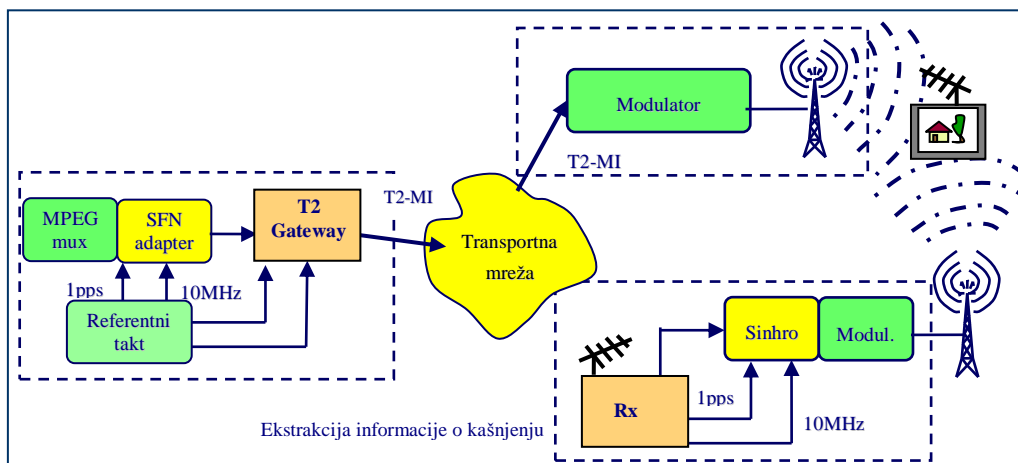
Sinhronizacija u digitalnoj televiziji može se ostvariti upotrebom sistema za globalno pozicioniranje GPS (*Global Positioning System*), slika 2.4. Za sinhronizaciju upotrebljava se signal koji se emituje sa satelita, frekvencijom 10 MHz i taktom 1 pps

(jedan impuls u sekundi). Tako se dobija veoma precizna sinhronizacija, ali zahteva upotrebu skuplje opreme i konstantnu nadoknadu troškova. To su razlozi zašto operatori distribucione mreže traže alternative za sinhronizaciju [RELJ09B]. DVB-T2 standard daje rešenje u vidu specifikacije za intefejsa ka modulatoru (T2-MI), koji omogućava ubacivanje u signal informacija na osnovu kojih se podešavaju sva kašnjenja u mreži (bez GPS signala), slika 2.5.



Slika 2.4. GPS sinhronizacija predajnika u SFN radu

Upotreba SFN mreža donosi više pogodnosti. Osnovne prednosti su poboljšano pokrivanje teritorije TV servisom, interferencija je kontrolisana i samim tim manja, predajnicima je potrebna manja emisiona snaga i, možda najvažnije, znatno efikasnije se koristi frekvencijski spektar. Teme koje su povezane sa izborom SFN mreže su broj kanala (u frekvencijskom spektru), projekat mreže, oblik i veličina zone servisa a i međusobno su povezane. Na primer, SFN mreža koja koristi jednu frekvenciju za nacionalno pokrivanje (što je teoretski moguće) imaće drugačiju strukturu od mreže koja opslužuje isto nacionalno područje ali uz upotrebu nekoliko regionalnih SFN mreža koristeći nekoliko frekvencija. Kod nacionalne SFN postoje dva problema, jedan je teška koordinacija frekvencija u pograničnim područjima sa susednim zemljama jer mora da se ostvari ista frekvencija svuda, a drugi je efekat interferencije od drugog SFN predajnika. Drugi problem se javlja kada signal sa SFN predajnika koji pokriva neko udaljeno područje stigne do posmatrane zone servisa, verovatno ima kašnjenje koje je duže od GI jer dolazi iz daleka i iako je niskog nivoa snage stvara intersimbolsku interferenciju. Zato se SFN mreže dele najčešće na više manjih-regionalnih SFN za pokrivanje cele zemlje pri čemu susedni regionalni SFN imaju različite frekvencijske kanale.



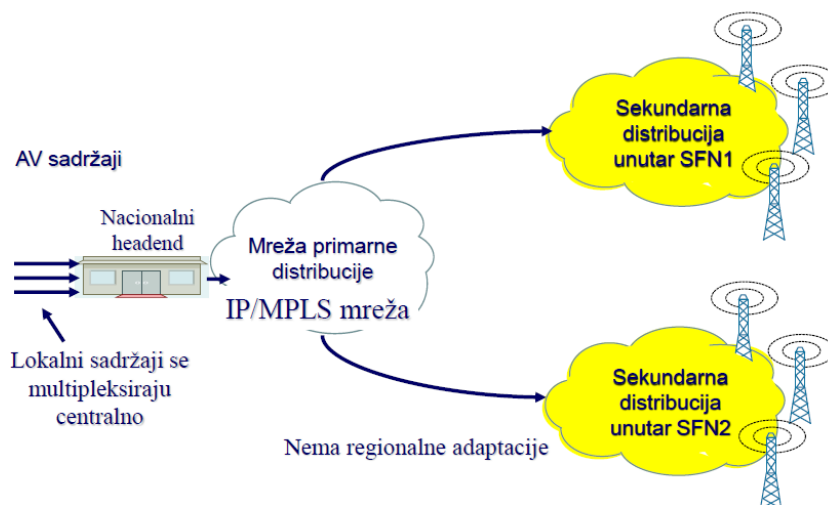
Slika 2.5. Sinhronizacija mreže bez GPS signala

Četvri faktor koji utiče na maksimiziranje digitalne dividende je arhitektura mreže. U zavisnosti od rešenja za realizaciju ubacivanja lokalnih TV programa u distribucioni sistem, mogu se identifikovati tri modela za arhitekturu mreže koja je zasnovana na IP/MPLS tehnologiji. U prvom scenariju svi TV programi, i nacionalni i lokalni, multipleksiraju se centralno u nacionalnom headend-u, slika 2.6 (model CM – Centralno Multipleksiranje lokalnog sadržaja). Kod ovog modela sav lokalni sadržaj je na raspolaganju svim korisnicima, u svim regionima, i nema regionalne adaptacije programa. *Headend* predstavlja glavnu stanicu gde se TV signali primaju i pripremaju za distribuciju do predajnika.

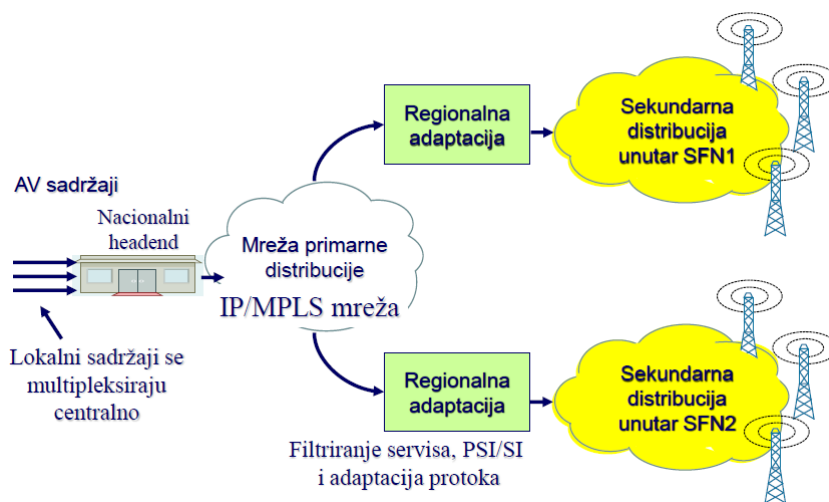
U drugom scenariju svi TV programi, i nacionalni i lokalni, ponovo se multipleksiraju centralno (slika 2.7) ali u regionalnim centrima postoji adaptacija programa (model CMRA – Centralno Multipleksiranje Regionalna Adaptacija lokalnog sadržaja). Programi se lokalno filtriraju na osnovu servisnih DVB SI (*Service Information*) i programski specifičnih MPEG PSI (*Program Specific Information*) informacija koje se prenose zajedno sa programima i samo oni lokalni program koji su namenjeni određenom regionu se prosleđuju ka sekundarnoj distribucionoj mreži do krajnjih korisnika.

U trećem scenariju samo nacionalni TV programi se multipleksiraju centralno (slika 2.8), a u regionalnim centrima postoje lokalni multipleksi gde se programi lokalno ubacuju u sistem (model RM – Regionalno Multipleksiranje lokalnog sadržaja). To

znači da se lokalni sadržaji u svakoj pojedinoj oblasti komprimuju i multipleksiraju za sekundarnu distribuciju.



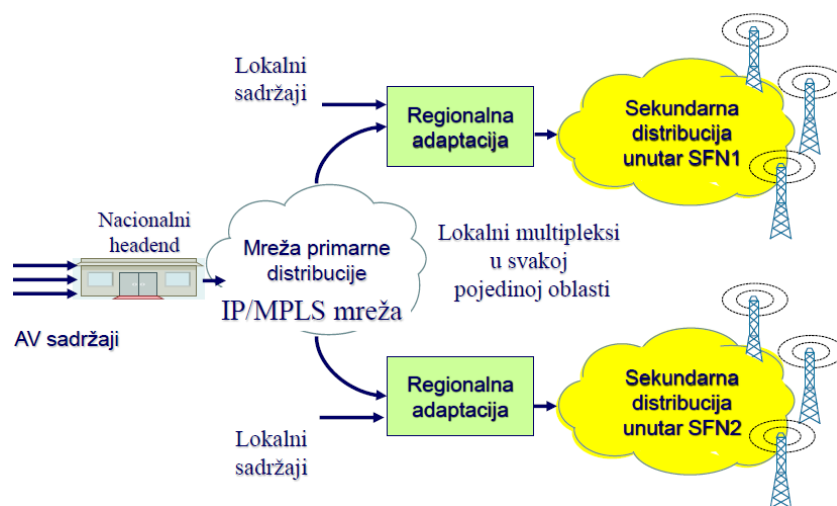
Slika 2.6. Arhitektura distribucione mreže: model CM - lokalni sadržaj je zajednički za celu mrežu



Slika 2.7. Arhitektura distribucione mreže: model CMRA - lokalni sadržaji se multipleksiraju centralno

Pretpostavimo da je u sva tri scenarija potreban isti broj nacionalnih i lokalnih programa sa istim binarnim protocima. Analizirajući prethodno opisana tri scenarija možemo zaključiti da prvi model CM samo delimično nudi koncept lokalnog sadržaja jer je

lokalni sadržaj zajednički za celu mrežu a ne specijalno podešen za pojedine regione kao u modelima CMRA i RM. Ovakav način ubacivanja lokalnog sadržaja, od modela CM do modela RM postepeno povećava složenost obrade signala i opreme u regionalnim centrima. Zahtevani kapacitet mreže za prenos TV sadržaja i veličina digitalne dividende su veoma bitni parametri za procenu efikasnosti pojedinih modela arhitekture mreže. Nasuprot složenosti obrade u regionalnim centrima, zahtevani kapacitet mreže za prenos TV sadržaja, od modela CM do modela RM postepeno se smanjuje. U modelu CM i nacionalni i kompletan lokalni sadržaj prenosi se kroz celu mrežu, u modelu CMRA se kompletan sadržaj prenosi do regionalnih centara gde se mreža rasterećuje i dalje distribuira samo sadržaj namenjen tom regionu, a u modelu RM se mreža dodatno rasterećuje tako što se u primarnoj distribuciji prenose samo nacionalni programi a od regionalnih centara do krajnjih korisnika, kao i kod modela CMRA, distribuiraju se nacionalni i sadržaji namenjeni tom regionu. Digitalna dividenda je u modelu CM skromna dok se u modelima CMRA i RM postiže velika dividenda zbog preciznog određivanja lokalnih programa za pojedine regione čime se štedi na utrošenim frekvencijskim kanalima za emitovanje TV signala. U tabeli 2.1. sumirana je analiza različitih modela arhitekture mreže.



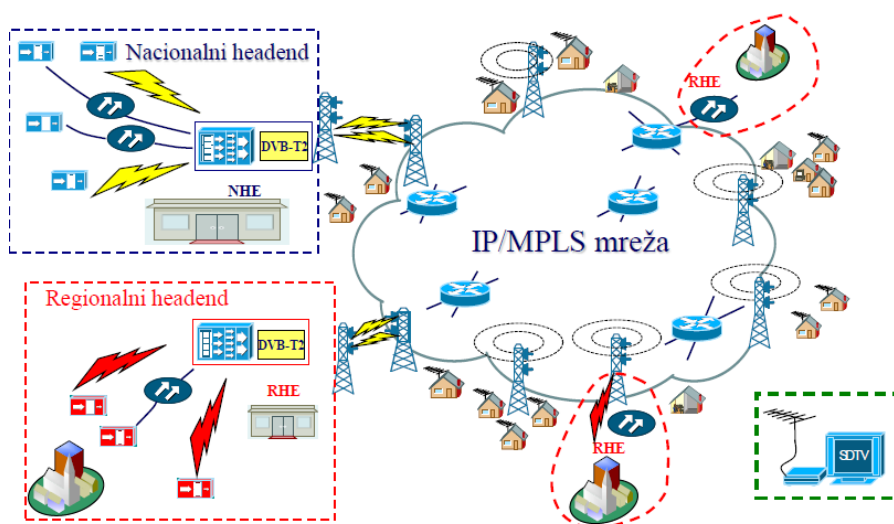
Slika 2.8. Arhitektura distribucione mreže: model RM - lokalni sadržaji se ubacuju lokalno

Tabela 2.1. Poređenje različitih arhitektura distribucione mreže

	Model CM	Model CMRA	Model RM
Ponuda lokalnih sadržaja	Skromna	Velika	Velika
Složenost po regionima	Skromna	Srednja	Visoka
Zahtevi u pogledu video transporta	Visoki	Srednji	Skromni
Veličina digitalne dividende	Skromna	Velika	Velika

Iz uporedne analize možemo zaključiti da je najbolje rešenje model RM (lokalni sadržaj ubačen lokalno) jer iako u odnosu na model CMRA ima veću složenost po regionima (brzina obrade signala stalno raste a cena opreme stalno opada) ipak ima manje zahteve za kapacitetom u mreži, što je kritičniji parametar jer će u budućnosti zahtevi za kapacitetom u mreži stalno da rastu.

Na slici 2.9 prikazana je arhitektura mreže sa nacionalnim (NHE) i regionalnim headend-om (RHE), IP/MPLS okosnicom mreže, radio-relejnim vezama, emisionim objektima sa odgovarajućim predajnicima i uređajima krajnjih korisnika.



Slika 2.9. Arhitektura distribucione mreže sa nacionalnim i regionalnim programima

2.3. Postavka problema

U današnjoj teoriji i praksi upravljanja strateškim procesima, razvijaju se trendovi u kojima se strategija analizira kao tržišno orijentisan proces. To znači da i strategija digitalizacije emitovanja TV programa mora razmotriti prednosti i mane ne samo primenjenih tehnologija u standardima, nego i ekonomske strane projekta koja ima često presudan uticaj na *konačan* izbor primenjenih standarda u oblasti informacionih i komunikacionih tehnologija (ICT) [RELJ11]. Ako se ne primeni ovakav multidisciplinarni pristup problemu, onda se ne uzimaju u obzir važne komponente kao što su prihodi, troškovi, tržište itd. Za ekonomski aspekt neophodno je na početku definisati odakle dolaze prihodi, izvore troškova, kao i korisnike usluga koje obezbeđuju nove tehnologije. Na kraju strateškog planiranja potrebno je što preciznije odrediti kada će se isplatiti investicija u nove tehnologije.

Generalno, tokom digitalizacije emitovanja TV programa [SRB09A] troškovi mogu nastati iz:

- Tehničkih, finansijskih i drugih sredstava neophodnih za implementaciju digitalne emisije mreže, kao i plana realizacije investicije, na osnovu *izabranog standarda za kompresiju i prenos* televizijskih programa;
- Subvencionisanja nabavke digitalnih prijemnika (odnosno STB) za krajnje korisnike, za sve ili samo pojedine društvene grupe;
- Promotivne kampanje u cilju informisanja tržišta i priprema za digitalno emitovanje (npr. obuke za upotrebu nove opreme i novih usluga).

Kako se ova disertacija bavi procenom efikasnosti izbora tehnologija digitalne televizije, samo prva grupa troškova (tehnička sredstva koja rade po određenim standardima) je važna za procenu investicija u različite tehnologije. Nove tehnologije svakako uvode tehničke prednosti u mrežu (veći kapacitet, kvalitet servisa, bolja pokrivenost...) ali sa njima se povećavaju troškovi nabavke potrebne opreme da bi se ostvarile te prednosti. U odnosu na različite arhitekture mreža koje su predložene u ovom poglavlju, nove tehnologije utiču presudno na izbor dve vrste uređaja, oprema za kompresiju (MPEG-2 ili MPEG-4 koderi) i predajnici sa modulatorima (DVB-T ili DVB-T2), a u isto vreme to su osnovni izvori investicija koji utiču na procenu

efikasnosti tehnologija. Izbor tehnologije za digitalno emitovanje može indirektno da utiče i na izbor distribucione mreže, ali o tome će biti više reči u poglavlju koje opisuje model za procenu efikasnosti.

Vrlo važan ekonomski parametar su prihodi koji se dobijaju od servisa primenjenih kroz digitalnu dividendu. Sa upotrebom novih tehnologija povećava se kapacitet u emisionom sistemu, i zato je moguće da u radio-difuznu mrežu budu uvedeni novi sadržaji (televizijski ili neki drugi) a da se pri tom ne poveća zauzetost frekvencijskog spektra u VHF/UHF opsegu. Izračunavanjem prihoda koji se tokom vremena ostvaruju od novih servisa ostvarenih zbog upotrebe novih standarda, može se proceniti ukupna efikasnost (tehnička i ekonomska) uz dobijanje tačke na vremenskoj skali kada će se isplatiti investicija u nove tehnologije [SUG11]. Tada nastaje profitabilnost jer će se prihodi izjednačiti sa investicijama u novu opremu. To su razlozi zašto se javlja potreba za simulacionim modelom koji će uz multidisciplinarni pristup na osnovu tehničkih, ekonomskih i tržišnih (model prilagodljiv na različite lokalne specifičnosti) parametara različitih kombinacija tehnologija, da izračunava efikasnost kapaciteta prenosa primenjenih standarda i procenjuje vremenski period koji je potreban da protekne do ostvarivanja profitabilnosti.

2.4. Uticaj digitalne dividende na razvoj društva

Širokopojasne mreže predstavljaju važne činioce ekonomskog i razvoja celog društva [OECD09]. Te mreže imaju ulogu telekomunikacione osnove ekonomije jedne zemlje, a imaju moć da povećavaju produktivnost. Upravo prepoznajući te osobine, mnoge zemlje su, naročito u poslednje vreme, investirale u projekte unapređenja infrastruktura širokopojasnih mreža. Projekti te vrste mogu se podeliti u one koji uvode servise na tržišta gde ih nema ili na ona tržišta gde je nedovoljno pokrivanje širokopojasnim servisima i na taj način poboljšavaju kvalitet ponude. U obe ove kategorije projekata važnu ulogu ima infrastruktura digitalne zemaljske televizije.

Uobičajeno je da investitori i inženjeri imaju dileme oko izbora koji projekat da podrže jer tempo ekonomskih promena forsira brze procene [OECD04]. Međutim, u okviru strateškog planiranja telekomunikacionih mreža, zato što se radi o infrastrukturnim projektima, donete odluke imaju višedecenijske implikacije. Kako je infrastruktura za

analognu televiziju u upotrebi oko 50 godina, ova konstatacija posebno ima značaj za infrastrukturu u radio-difuziji. Kako strateške odluke imaju dalekosežne implikacije i treba ih donositi relativno brzo uz sveobuhvatno razmatranje velikog broja tehničkih, tržišnih i ekonomskih parametara, ukazuje se potreba za simulacionim modelima, koji daju procenu efikasnosti tehnologija digitalne televizije u svakom smislu.

Postoji nekoliko razloga koji mogu da opravdaju ulaganja u telekomunikacione mreže [OECD09]: bolje povezivanje (broj korisnika i kapacitet prenosa), uvođenje konkurencije (alternativni pristup širokopojasnim servisima), podsticanje inovacija (novi servisi i ravnomeran razvoj pristupne mreže i okosnice) i društveni značaj. Što se tiče poslednjeg razloga, digitalna TV unapređuje programe za pojedine društvene grupacije ali ima i ekonomsku korist za celo društvo. Zašto je to tako? Zato što kada digitalnu dividendu upotrebimo za uvođenje širokopojasnih servisa tada povećavamo penetraciju tih servisa, a na osnovu [WB09] postoji veza između penetracije širokopojasnih servisa i BDP (Bruto Društveni Proizvod) po stanovniku. Na osnovu tih istraživanja u zemljama sa niskim i srednjim prihodima, došlo se do rezultata da povećanje penetracije širokopojasnih servisa (u periodu 1986-2006 godine) od 10% izaziva povećanje BDP po stanovniku za 1,38%. Kako digitalni radio-difuzni sistem (zahvaljujući mogućnostima prenosa IP paketa) može da predstavlja širokopojasnu mrežu (za prijem je potrebna samo UHF antena) onda njegovo uvođenje povećava BDP po stanovniku, što je jedan od ciljeva razvoja telekomunikacija svake zemlje uključujući i Srbiju. Za koliko će biti povećan BDP, zavisi od toga koliki će biti procenat povećanja širokopojasne penetracije koju uzrokuje digitalna dividenda. Pokrivanje stanovništva DVB-T/T2 signalom zapravo predstavlja uspostavljanje pristupne širokopojasne mreže jer svako ko je u zoni pokrivanja i ima TV antenu može se smatrati potencijalnim korisnikom servisa. U okviru strategije digitalizacije [SRB09A] Vlada Srbije je predvidela da kada se pređe na digitalno emitovanje 90% stanovništva bude pokriveno tim signalom. Pošto je penetracija širokopojasnog pristupa u Srbiji oko 13% [RAT11] onda je uvođenjem DVB-T/T2 sistema oko 77% stanovništva dobilo mogućnost da ima takav pristup. Istraživanja pokazuju [LAM06] da se 50% od svih krajnjih korisnika koji imaju tehničke mogućnosti (obebeđenu infrastrukturu), zaista i pretplati na širokopojasni servis. Ako se taj rezultat primeni na Srbiju onda zbog uvođenja digitalne emisije infrastrukture ima novih 38,5% korisnika (povećanje penetracije)

širokopojasnih servisa. Na osnovu rezultata istraživanja [WB09] dobija se da bi u Srbiji zbog uvođenja novih servisa u DVB-T/T2 sistem povećanje BDP po stanovniku trebalo biti oko 5%.

Kako su ispunjeni svi razlozi za ulaganje u projekat digitalizacije emitovanja TV programa potrebno je proceniti tehničku i ekonomsku efikasnost investicije u zavisnosti od primenjene tehnologije.

3. Tehnologije digitalne televizije

Kod digitalnog emitovanja TV sadržaja, a naročito sa stanovišta maksimiziranja digitalne dividende, najvažniji je izbor tehnologija kompresije i prenosa TV signala.

Ako se TV signal digitalizuje prema međunarodnom standardu ITU-R (*International Telecommunications Union - Radiocommunication Sector*) BT.601-7 [ITU11] sa standardnim odabiranjem u formatu 4:2:2, za video signal sa brzinom slika 25 Hz i kodnom reči od 8 bita po odbirku dobije se da je neophodan binarni protok 216 Mb/s, odnosno 166 Mb/s ako se računaju samo aktivni pikseli [REI05] (za 4:2:0 format potreban protok je 124,5 Mb/s). Ako bi se takav signal emitovao bez kompresije bilo bi potrebno znatno više propusnog opsega nego za analogne TV signale. Standard za kompresiju MPEG-2 obezbeđuje potpunu kompatibilnost među različitim proizvođačima opreme koja se koristi u DVB standardima [ETSI00] što je dovelo do toga da se MPEG-2 video kompresija veoma rasprostranjeno primenjuje.

Tehnike kompresije koje su primenjene u algoritmu MPEG-2 standarda dobro su poznate. Osnovu čine DCT (*Discrete Cosine Transform*) transformacija, kvantizacija zasnovana na HVS (*Human Visual System*) sistemu, RLC (*Run Length Coding*)

kodovanje, VLC (*Variable Length Coding*) kodovanje bazirano na *Huffman* tabelama, kompenzacija pokreta, predikcija slika u odnosu na prethodnu (*Predicted frame* – P slike) i predikcija slika u odnosu na prethodnu i buduću sliku (*Bi-directional predicted frame* - B slike). Trenutno, na tržištu telekomunikacija, a naročito televizije, postoji ogromna baza uređaja koja radi po MPEG-2 standardu. Međutim, u odnosu na MPEG-2 danas postoje modernije i naprednije tehnologije kompresije, kao što su MPEG-4 verzija 10 (često citiran kao AVC – *Advanced Video Coding*) ili SMPTE VC-1 (*Society of Motion Picture and Television Engineers*). SMPTE VC-1 standard, poznatiji kao WMV9 (*Windows Media Video 9*), početno je razvio *Microsoft* pre nego što je postao standard. WMV9 se pored *Microsoft* aplikacija koristi kod HD DVD (*High Density Digital Versatile Disc*) i *Blu-ray* diskova (pored MPEG-2 i MPEG-4). Iako kao standard postoji već pet godina veoma retko se koristi za digitalno emitovanje TV programa.

MPEG-4 standard počinje da se primenjuje sve više u mrežama za digitalno emitovanje TV programa, ali postaje i dominantna tehnologija video kompresije i u drugim oblastima telekomunikacija. U mnogim slučajevima, upotrebom MPEG-4 kompresije može se postići dva do tri puta niži binarni protok u odnosu na MPEG-2, a da se pri tom zadrži sličan kvalitet video signala. Iako se kod MPEG-4 nisu menjali osnovni principi kompresije, razlike u odnosu na MPEG-2 leže u finim podešavanjima i detaljima [FIS10]. U daljem tekstu biće u najkraćem izložene osnovne razlike.

Za razliku od MPEG-2, kod MPEG-4 kompenzacija pokreta koristi makroblokove čija se veličina, pa čak i oblik, fleksibilno biraju od 16x16 do 4x4 piksela, u zavisnosti od potrebe za preciznim kodovanjem pokreta, i na taj način obezbeđuje precizniju segmentaciju pokretnih delova slika. Slična je situacija i sa blokovima koji više nisu fiksirani na 8x8 već mogu biti 4x4 ili 2x2 piksela. Kod MPEG-4 broj referentnih slika je povećan na maksimalnih 16 (ili 32 poluslike) u odnosu na ranijih jednu (P) ili dve (B) referentne slike (najveći efekat je kod cikličnih ponavljanja u slici). Za razliku od MPEG-2 sada postoji mogućnost upotrebe više vektora pomeraja u okviru jednog makrobloka (do 32 vektora za B slike) koji mogu da povezuju objekte iz različitih referentnih slika. Pored toga povećana je i preciznost kompenzacije pokreta i sada iznosi $\frac{1}{4}$ piksela u odnosu na $\frac{1}{2}$ piksela kod MPEG-2. MPEG-4 upotrebljava fleksibilnu veličinu *slice*-a (isečka) za razliku od strogo definisane strukture u MPEG-2. Korišćenjem fleksibilnog rasporeda makroblokova (FMO - *Flexible Macroblock*

Ordering) zasnovanog na podeli slike u grupe *slice*-va u kojima se svaki *slice* nezavisno dekoduje, MPEG-4 može da ostvari veću robusnost u pogledu gubitaka informacija (slanje redundantnih slajsova, kodovanje sa više bita različitih grupa slajsova...). Transformaciono kodovanje kod MPEG-4 je doživelo značajne promene. Adaptivna blokovska transformacija omogućava da se, u onim delovima signala u kojima se uočava korelacija dužeg reda, poveća blok nad kojim se izračunava transformacija, a tamo gde su velike promene da se blok smanji (adaptivna selekcija 8x8, 4x4 ili 2x2 DCT bloka). Pored toga, poboljšane su i optimizovane HVS kvantizacione tabele odnosno matrice. Kod MPEG-4 koriste se nove naprednije tehnike entropijskog VLC kodovanja. Dalja poboljšanja MPEG-4 u odnosu na MPEG-2 kompresiju ogledaju se u povećanoj preciznosti kodovanja po odbirku (do 14 ili čak 16 bita), zatim za specifične delove slike moguće je makro blokove kodovati direktno bez predikcije, i upotreba deblocking filtra koja otklanjanja blok efekte u slici koji nastaju zbog primene blokovske transformacije i predikcije. Deblocking filter pravi glatke prelaze na ivicama DCT blokova 8x8 i 4x4 i kod lumentnih i kod hrominentnih signala poboljšavajući predikciju što ima kao rezultat bolji kvalitet slike i efikasnije kodovanje.

Značajna je činjenica, a naročito za problem koji tretira ova disertacija, da MPEG-4 koristi isti format *Transport Stream* TS paketa za prenos kao i MPEG-2 sistem kodovanja. To znači da u okviru pripreme TV signala za prenos – multipleksiranja, mogu da se koriste isti uređaji (multiplekseri) za obe tehnologije kompresije, i MPEG-2 i MPEG-4. Čak je u jednom multiplekseru moguće kombinovati ulaze koji dolaze sa koda koji koriste ova dva različita standarda. Poboljšanja koja su došla sa MPEG-4 tehnologijom kompresije praktično znače da je sada umesto sa 4-6 Mb/s MPEG-2 moguće jedan SDTV program kodovati sa 2-3 Mb/s binarnim protokom. Jedan HDTV program sa MPEG-4 moguće je kodovati sa čak manje od 10 Mb/s umesto 19-20 Mb/s sa MPEG-2 kompresijom.

MPEG-4 je za sada, u tehničkom smislu, najefikasniji standard za kompresiju video signala. Međutim, uskoro (2012-2013 godine) očekuje se H.265 standard. Iako se danas često ovako naziva, pravo ime budućeg standarda je HEVC (*High Efficiency Video Coding*) i takođe zajednički ga razvijaju ITU i MPEG organizacije. Cilj je ponovo da se obezbedi za oko upola manji binarni protok u odnosu na MPEG-4 a da se pri tom zadrži približno isti vizuelni kvalitet slike. Slično kao i kod odnosa MPEG-4 i MPEG-2 to je

moгуće uraditi na račun povećane složenosti algoritma kompresije i samim tim zahteva se povećana procesorska snaga. Predviđa se da će dekomder biti do dva puta složeniji dok će koder biti višestruko složeniji (i skuplji). Tako je bilo i sa MPEG-2 i MPEG-4 standardima, ali vremenom, uz stalno napredovanje tehnologija elektronskih čipova i masovne proizvodnje, razlike se smanjuju i danas praktično ne predstavljaju problem.

Pored kompresije, za digitalno emitovanje druga važna oblast je tehnologija prenosa TV signala. Dominantne tehnologije koje su danas raspoložive pretočene su u dva standarda, DVB-T i DVB-T2. Kao i kod tehnologija kompresije i standardi DVB-T i DVB-T2 imaju sličnu osnovu, ali razlike koje postoje su još veće nego kod tehnologija kompresije i odgovarajući izbor parametara DVB-T2 standarda može drastičnije da utiče na performanse celog sistema. Osnovna unapređenja koja donosi DVB-T2 su sledeća:

- Novi efikasniji sistem zaštitnog kodovanja (FEC – *Forward Error Correction*);
- Uz OFDM pristup multipleksu povećan je broj nivoa QAM modulacije pojedinih nosilaca;
- Širok dijapazon parametara – broj nosilaca u OFDM, novi kodni količnici za FEC, proširene mogućnosti zaštitnog intervala GI (*Guard Interval*);
- Direktna kompatibilnost sa IP mrežama.

Postoji još dosta novih tehnologija u DVB-T2 standardu. U ovom poglavlju biće analizirane zajedno sa već pomenutim i one koje doprinose najviše povećanoj robusnosti i kapacitetu.

3.1. IP umrežavanje

Uvođenje mogućnosti direktnog prenosa servisa podataka u IP format preko DVB mreža druge generacije (DVB-x2) daje potpuno novu dimenziju sistemima prenosa koji su do sada bili isključivo posvećeni TV servisima. Sposobnost da bez adaptacije prenosi IP pakete stavlja DVB sisteme u red modernih mrežnih tehnologija baziranih na tzv. *all-IP* konceptu - 3GPP LTE (*3rd Generation Partnership Project Long Term Evolution*),

WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), ili budući DVB-NGH (*Next Generation Handheld*).

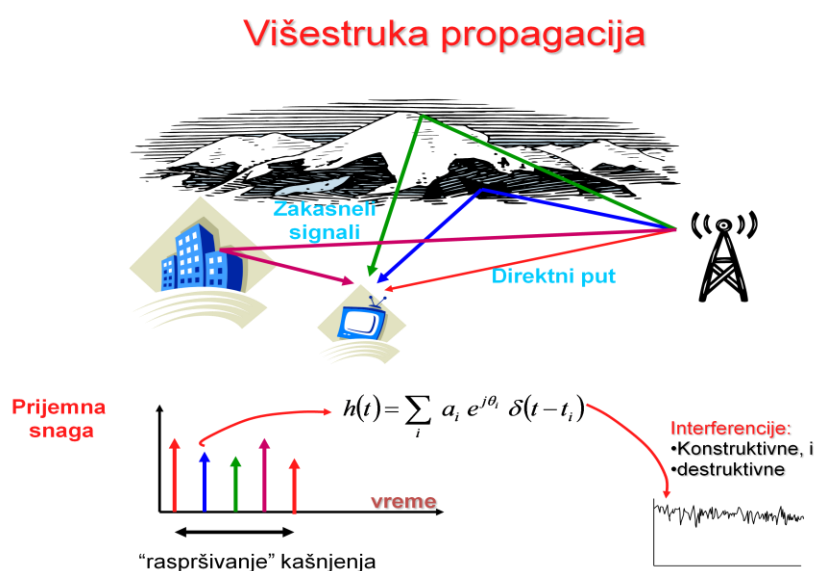
Pored enkapsulacije MPEG TS u DVB sisteme, DVB-T2 omogućava da se upotrebom GSE (*Generic Stream Encapsulation*) obezbedi adaptacija paketa mrežnih protokola (IPv4, IPv6, MPEG, Ethernet, 802.1pQ VLAN,...) na drugom sloju OSI (*Open Systems Interconnection*) modela koji se zatim ubacuju direktno na fizički sloj upotrebom *BaseBand* frejmova (BB). I do sada je bilo moguće prenositi servise podataka (IP pakete) preko MPEG TS MPE (*Multiprotocol Encapsulation*) protokola ali MPEG TS je optimizovan za prenos TV signala a ne IP servise tako da MPE ima ograničenja koja smanjuju efikasnost upotrebljenog propusnog opsega pri ovakvom načinu prenosa podataka. Enkapsulacijom IP paketa upotrebom MPEG TS MPE ubacuju se dodatna zaglavlja na prenošene podatke i na taj način smanjuju efikasnost u odnosu na GSE koji prenosi bilo koji vrstu podataka (GSE paketi imaju promenljivu veličinu da bi minimizirali zaglavlje pri prenosu saobraćaja kakav je IP). Smanjenje zaglavlja koje se postiže upotrebom GSE u odnosu na MPE je dva do tri puta. GSE protokol je transparentan za funkcije mrežnog sloja kao na primer IP kriptovanje ili kompresija IP zaglavlja, takođe podržava i različite modove adresiranja (*Media Access Control* - MAC unicast/multicast, bez MAC adrese, opcione adrese sa tri bajta).

Uz upotrebu GSE protokola servisi prenosa podataka postaju vrlo atraktivni i mrežnim TV operatorima i emiterima, tako da se na tržištu povećava mogućnost pristupa sveprisutnim IP protokolima.

3.2. OFDM u radio-difuziji

Prva testiranja OFDM sistema prenosa datiraju još od osamdesetih godina dvadesetog veka, a prvi standard baziran na OFDM je standard za digitalno emitovanje radio programa *Digital Audio Broadcasting* (DAB) [ETSI06] koji je proizašao iz projekta Eureka sredinom devedesetih godina. Nakon toga, 1997. godine i DVB-T standard se bazira na OFDM i od tada do danas, zahvaljujući pre svega velikom uspehu u implementaciji za digitalnu televiziju širom sveta, OFDM postaje nezaobilazni deo svih standarda za zemanjsku (naročito bežičnu) distribuciju različitih vrsta servisa (na primer WiMAX [IEEE09], 3GPP LTE [ETSI11B], DVB-NGH [DVB08] ...).

OFDM modulaciona tehnika predstavlja način prenosa digitalnih informacija upotrebom više nosilaca. Veliki broj u frekvencijskom domenu blisko raspoređenih (multipleksiranih FDM) nosilaca prenose se istovremeno i svaki nosilac je modulisan QAM ili PSK (*Phase Shift Keying*) modulacionom šemom sa više nivoa. Nosioци imaju ortogonalni međusobni položaj što znači da je frekvencijski razmak između njih jednak inverznom trajanju simbola modulisanih nosilaca. Ako se tome doda i zaštitno kodovanje onda takva tehnika prenosa nosi naziv COFDM. Ovakav način obrade signala pre prenosa čini ga otpornijim na smetnje koje nastaju zbog prostiranja signala po više putanja, neizbežne pojave u bežičnim pristupnim mrežama. Na slici 3.1 dat je uprošćen prikaz jednog takvog kanala za prenos.

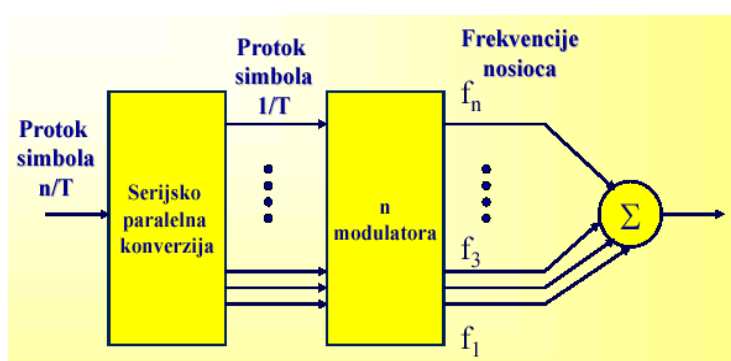


Slika 3.1. Višestruka propagacija i raspršivanje kašnjenja

Zbog pojave višestruke propagacije postoje zakasneli signali (eha) u odnosu na direktan (raspršivanje kašnjenja) i oni dolaze do prijemnika sa različitim snagama i fazama u odnosu na direktan signal. Na slici 3.1 jednačinom je predstavljena karakteristika kanala sa višestrukom propagacijom u vremenskom domenu $h(t)$, a zakasneli signali označeni indeksom i imaju kašnjenje u odnosu na direktan signal izraženo sa t_i , slabljenje u odnosu na direktan signal izraženo sa a_i i fazu u odnosu na direktan signal izraženo sa θ_i . Interferencije od višestruke propagacije mogu biti i konstruktivne i destruktivne, ako eha stižu u fazi sa glavnim signalom i pojačavaju ga ili stižu u kontra fazi i poništavaju glavni signal. Sličan efekat eha imaju i SFN mreže jer predajnici emituju isti signal na istoj frekvenciji i ako prijemnik prima nekoliko signala sa različitih predajnika, sa

različitim kašnjenjima, onda dolazi do dodatnog efekta eha ali ovog puta ne od prirodnih prepreka već od susednih predajnika. Višestruka propagacija (prirodna ili neprirodna) može se u frekvencijskom domenu predstaviti kao kanal sa frekvencijski selektivnim odzivom. Drugi frekvencijski zavisani efekti za koji COFDM obrada signala donosi korist je prisustvo izolovanog uskopojasnog signala unutar spektra posmatranog signala.

Postoji više razloga zašto je OFDM signal otporan na ovakvo okruženje. Prilikom formiranja OFDM signala, ulazni signal velikog binarnog protoka raspoređuje se na veliki broj nosilaca (preko hiljadu) koji se prenose istovremeno, ali sa n puta smanjenim protokom, gde je n broj paralelnih nosilaca. Zbog smanjenog protoka ti signali imaju produženo trajanje simbola. Na slici 3.2 prikazana je principna šema ovog procesa. Paralelni protoci se modulišu zasebno svaki u svojoj grani na n nosilaca koji su frekvencijski razmaknuti na razdaljini $1/T$, gde je T trajanje simbola na ulazu u modulator i predstavlja aktivno trajanje simbola. Tokom aktivnog trajanja simbola prijemnik ispituje signal i demoduliše ga integracijom. Ovakav izbor razmaka između nosilaca obezbeđuje *ortogonalnost* nosilaca, jer demodulator jednog nosioca “ne vidi” modulacije drugih nosilaca tako da nema preslušavanja između nosilaca čak iako nema eksplicitnog filtriranja a njihovi spektri se preklapaju, slika 3.3. Nule u spektru jednog nosioca se poklapaju sa frekvencijama drugih nosioca.

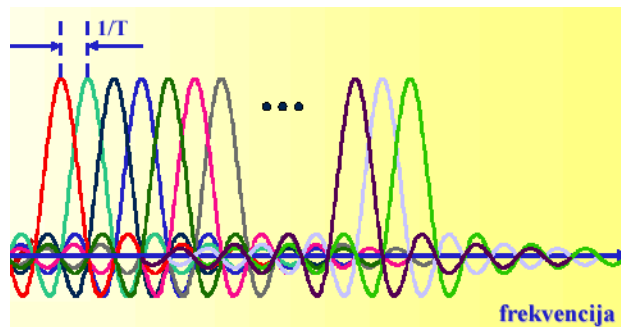


Slika 3.2. Principna šema formiranja OFDM signala

Kompleksni proces modulacije hiljada nosioca istovremeno, obavlja se diskretnom Furijeovom transformacijom za šta se koristi efikasni algoritam FFT (*Fast Fourier Transform*). Zapravo, u modulatoru se koristi Inverzna FFT (IFFT), a u demodulatoru

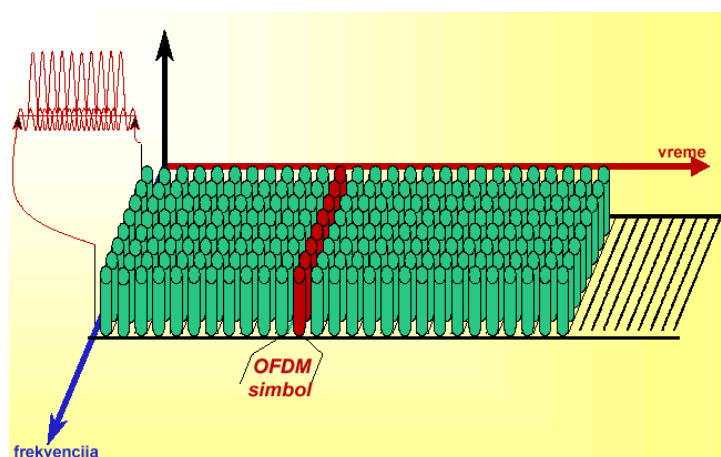
FFT transformacija. Inače, pored korisničkih prenosa se i drugi nosioci koji nose signalizacione informacije i informacije o stanju kanala za prenos.

Zbog produženog trajanja simbola uvođenjem velikog broja paralelnih nosilaca, efekat intersimbolske interferencije (*Inter Symbol Interference* - ISI) kod OFDM signala je znatno smanjen, ali ipak može da nastane ako se ne preduzmu dodatne mere.

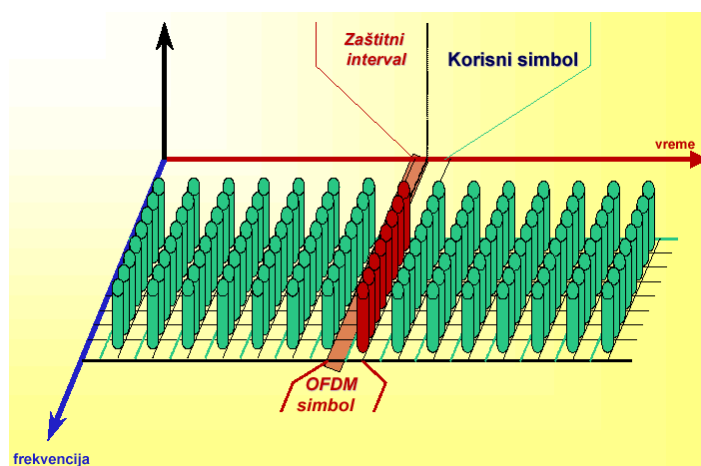


Slika 3.3. Ortogonalni nosioci u OFDM signalu

Da bi se izbegla ISI pre svakog simbola ubacuje se zaštitni interval (GI). To znači da se svaki simbol emituje u trajanju koje je duže od aktivnog trajanja simbola za period koji se naziva zaštitni interval GI. GI se sastoji od cikličnog nastavka poslednjeg dela aktivnog simbola – na taj način korisni delovi simbola su razmaknuti jer se na prijemu GI ignoriše. Na slikama 3.4 i 3.5 prikazano je mesto GI u vremensko-frekvencijskoj ravni.

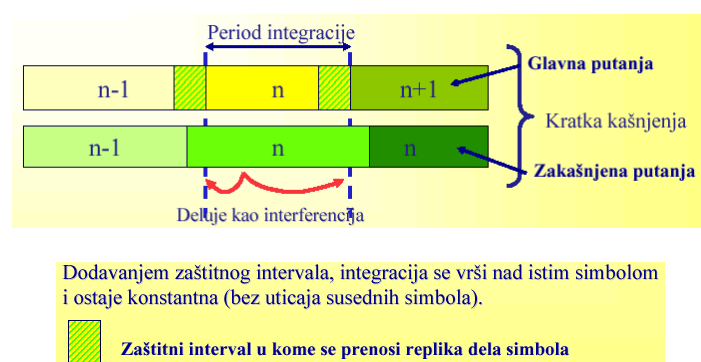


Slika 3.4. Pozicija OFDM simbola u vremensko-frekvencijskoj ravni



Slika 3.5. Pozicija GI u vremensko-frekvencijskoj ravni

Ako sada razmatramo tri uzastopna simbola označena sa $n-1$, n i $n+1$, onda se može zaključiti da se ISI izbegava ako se sva eha prisutna u prijemnom signalu završavaju tokom trajanja GI, slika 3.6. Drugim rečima, ako je kašnjenje bilo koje putanje u odnosu na najkraće (direktna glavna putanja), manje od zaštitnog intervala, sve komponente signala unutar perioda integracije potičuće od istog simbola što je i bio cilj. Efekat izbegavanja ISI postiže se na račun smanjenog kapaciteta za prenos jer je zbog ubacivanja GI upravo za toliko smanjen period za prenos korisne informacije.

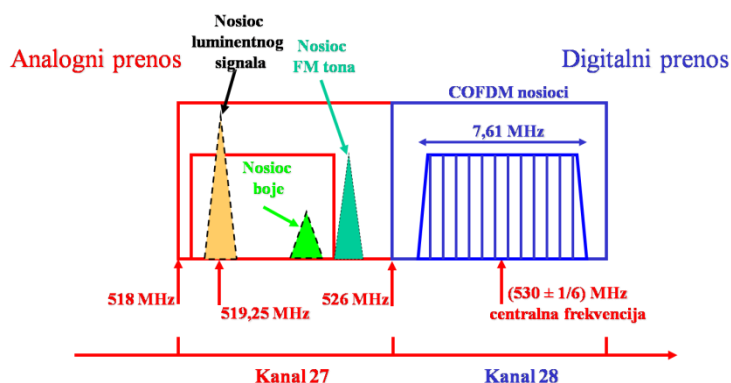


Slika 3.6. Uticaj zaštitnog intervala na izbegavanje ISI

Koncept zaštitnog intervala bi se u principu mogao primeniti i na sisteme sa jednim nosiocem, ali bi gubitak u kapacitetu prenosa bio prevelik. Naime, sa upotrebom OFDM moguće je produženjem aktivnog simbola zaštititi signal od eha, jer izborom dovoljno velikog broja FFT nosilaca dovoljno se produžava trajanje simbola i ostavlja dovoljno prostora da i mali udeo aktivnog simbola (GI) može realno da štiti od eha i da se sa druge strane ne umanjuje značajno kapacitet prenosa.

Upravo ovako se formira OFDM signal i kod DVB-T i kod DVB-T2 standarda, ali na raspolaganju su različiti GI kao i različit broj nosilaca čime se mogu ostvariti značajno različite performanse sistema.

Na slici 3.7 prikazan je plan zauzeća UHF kanala kada se prenose analogni i digitalni COFDM signal.

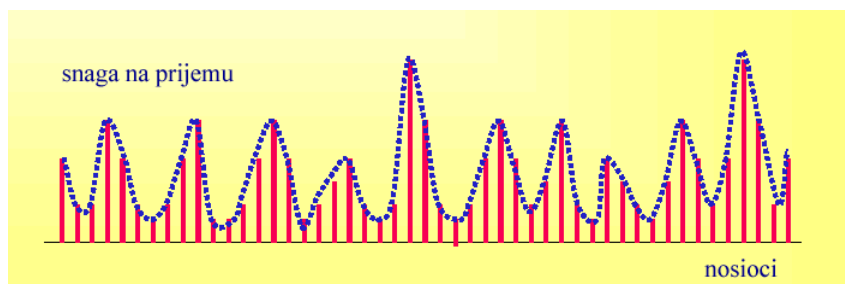


Slika 3.7. Poređenje analognog i digitalnog prenosa u UHF opsegu

Što se tiče modulacije, kod DVB-T individualni nosioci se modulišu sa QPSK, 16QAM ili 64QAM dok se kod DVB-T2 pored pomenutih modulacija može koristiti i 256QAM. DVB-T standard kao najgušću konstelaciju ima 64QAM, sa čim nudi dosta veliku količinu podataka od 6 bita po OFDM ćeliji (6 bita po simbolu po jednom nosiocu). U DVB-T2 standardu, upotrebom 256QAM spektralna efikasnost se povećava na 8 bita po OFDM ćeliji, odnosno povećanje u odnosu na DVB-T od 33% u kapacitetu kanala. To bi značilo da bi bio neophodan znatno veći odnos C/N (*Carrier to Noise Ratio*) snaga signala i šuma (4 do 5 dB veći, u zavisnosti od karakteristika kanala i kodnog količnika) jer je prijem osetljiviji na šum zato što je kod 256QAM Euklidovo rastojanje između dve susedne konstelacione tačke oko dva puta manje nego kod 64QAM. Međutim, performanse zaštitnog kodovanja kod DVB-T2 su znatno bolje nego kod DVB-T i ako se za 256QAM uzme isti ili malo jači kodni količnik u odnosu na one što se koriste kod 64QAM u DVB-T, onda se održava zahtevani C/N dok se ipak postiže značajno povećanje binarnog protoka. O efikasnijem zaštitnom kodovanju biće više reči u narednom odeljku. Iz navedenih razloga očekuje se da će 256QAM modulacija biti često korišćena u praksi.

3.3. Zaštitno kodovanje

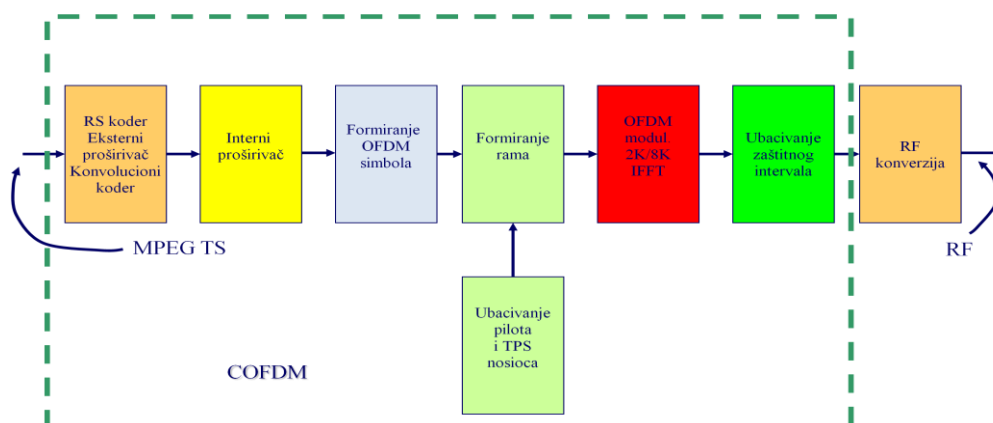
Iako OFDM sistem obezbeđuje prenos bez ISI i bez interferencije među nosiocima ipak zbog prisustva višestruke propagacije eha stvaraju fading i to frekvencijski zavisani (selektivni), slika 3.8. Analizirajući efekte frekvencijski selektivnog kanala na OFDM signal onda se prvo određuje odnos signal-šum za svaki nosilac, zatim odgovarajući stepen grešaka po bitu (BER – *Bit Error Rate*) u zavisnosti od odnosa signal-šum i konačno BER za ceo OFDM signal se određuje usrednjavanjem BER-ova po svim nosiocima. Ovo se u principu može uraditi za bilo koji selektivni kanal i bez obzira na šemu modulacije koja se primenjuje po nosiocu. Takav način procene efekta selektivnog kanala za potrebe ove analize može se uprostiti ako se pretpostavi da postoji eho takvog kašnjenja da je jedan nosilac među njih N potpuno oslabljen (tzv 0 dB eho). Tada će bez obzira koliki je nivo signal-šum OFDM signala (čak i beskonačan), stepen greške simbola (gde simbol nazivamo grupu bita koju prenosi jedan nosilac u jednom OFDM simbolu) biti $1/N$. Jasno je da bez zaštitnog kodovanja OFDM signal nije moguće koristiti na zadovoljavajući način ako se koristi u kanalima sa ekstremno frekvencijski selektivnim odzivom kao što je to slučaj u televizijskom emitovanju.



Slika 3.8. Efekti frekvencijski selektivnog kanala na nosioce OFDM signala

Za digitalno emitovanje televizije po oba standarda DVB-T [ETSI09] i DVB-T2 [DVB10] definisana su dva osnovna tipa selektivnog kanala, za fiksni prijem Rajssov (*Ricean*) kanal a za portabl prijem Rejljiev (*Rayleigh*) kanal. Oba modela se matematički mogu opisati prema formuli sa slike 3.1 pri čemu Rajssov kanal pored direktnog ima na prijemu još 20 signala stiglih po različitim putanjama dok Rejljiev kanal ima samo 20 zakasnelih signala.

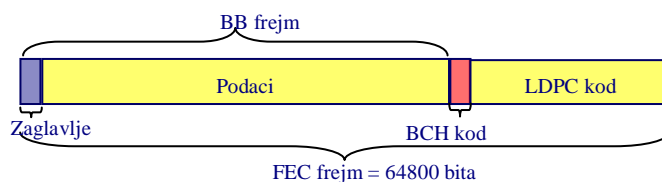
Rešenje koje se primenjuje za problem selektivnog kanala je primena zaštitnog kodovanja koje ima zadatak da zaštiti od grešaka informaciju koja ulazi u kanal za prenos. U DVB standardima koriste se *Forward Error Correction* (FEC) kodovi. FEC kodovi, pre slanja MPEG TS paketa u kanal za prenos i modulacije, u korisnu informaciju ubacuju dodatne bite koji na prijemu služe za ispravljanje eventualnih grešaka nastalih tokom prenosa. Odnos broja korisnih bita pre kodovanja i broja bita nakon kodovanja zove se kodni količnik. Tehnike FEC kodovanja povećavaju binarni protok korisne informacije ali veoma efikasno štite informaciju čak i u veoma nepovoljnim uslovima prenosa (visok nivo šuma, interferencija, pojava eha-prostiranje po više putanja...). Zbog upotrebe kompresija i velikih binarnih protoka u TV mrežama, potrebno je ostvariti jako nisku verovatnoću pogrešnih bita (BER). U DVB sistemima cilj je ostvariti prenos skoro bez grešaka (*Quasi Error Free* - QEF), odnosno manje od jedne neispravljene greške tokom jednog sata emitovanja programa. Ovakav kvalitet prenosa moguće je ostvariti upotrebom FEC kodova u odgovarajućim koderima i dekoderima. Zapravo, zaštitno FEC kodovanje je ključno za postizanje visokih performansi DVB-T/T2 sistema. Izborom dovoljno efikasnog FEC kodovanja i interlivinga (proširivača) moguće je postići dovoljno nišak nivo grešaka u prenosu kroz frekvencijski selektivan kanal uz C/N koji je samo nekoliko dB viši nego kod kanala sa samo Gausovim šumom. Na slici 3.9 prikazana je COFDM obrada signala koja se primenjuje kod prve generacije zemaljskog DVB standarda DVB-T. Pilot i TPS (*Transmission Parameter Signalling*) nosioci ubacuju se radi procene stanja kanala za prenos i signalizacije parametara upotrebljenih za prenos (npr. kodni količnik i modulaciona šema).



Slika 3.9. COFDM obrada signala kod DVB-T standarda

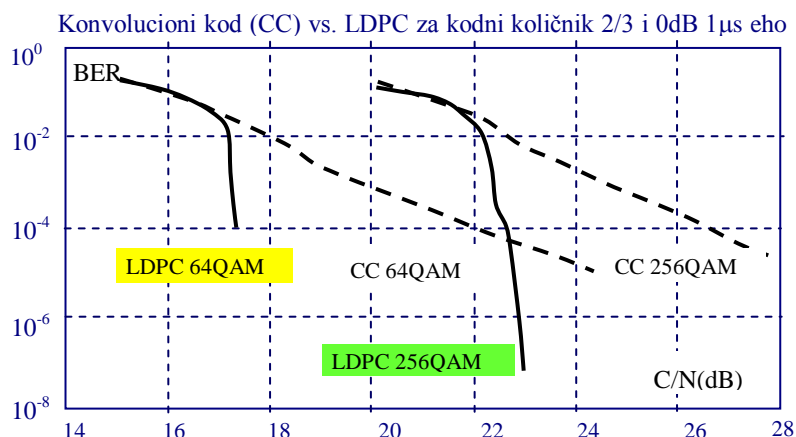
Unutrašnji i spoljašnji FEC kodovi DVB-T standarda bazirani su na konvolucionom i *Reed-Solomon* (RS) kodu. Deset godina tehnološkog napretka dovelo je do toga da se kodovi veće složenosti, kao što je to LDPC (*Low Density Parity Check*), primene u prijemnicima. Naime, u teoriji informacija dobro je poznat kôd za proveru parnosti – *Parity Check*, međutim LDPC je specijalan primer kodova provere na parnost [GALL62] i koristi se kao jedna od metoda za prenos signala u prisustvu šuma. Razvijen je šezdesetih godina dvadesetog veka, a zatim skoro potpuno zaboravljen. Sledećih trideset godina, sve do pojave turbo kodova, u teoriji informacija se nije pojavio ni jedan kôd približne efikasnosti. Pored šest turbo kodova, 2003. godine LDPC je izabran za primenu u novom DVB-S2 standardu a kasnije i u ostalim standardima druge generacije DVB, zatim WiMAX, WiFi, mobilnu TV... Da bi se uklonile sve preostale greške nakon LDPC dekodovanja, podaci se štite dodatnim kratkim BCH (*Bose, Chaudhuri, Hocquenghem*) kodom, koji spada u grupu cikličnih blok kodova, i služi za korekciju višestrukih grešaka.

Kao što je pomenuto u odeljku 3.1, paketi za prenos u DVB-T2 standardu (MPEG TS ili IP) enkapsuliraju se u BB frejmove sa odgovarajućim zaglavljem koje nosi informacije o enkapsuliranim podacima. Na BB frejmove se primenjuje FEC kodovanje kao na slici 3.10.



Slika 3.10. FEC kodovanje kod DVB-T2 standarda

Ukupna dužina FEC frejma je tipično 64.800 bita i predstavlja osnovnu jedinicu obrade signala u DVB-T2 sistemu. DVB-T2 koristi povezane BCH (spoljašnji) i LDPC (unutrašnji) kodove koji zajedno obezbeđuju bolju zaštitu od grešaka nego DVB-T sistem i time omogućavaju veći kapacitet prenosa u kanalu. LDPC sam za sebe, a pogotovo u kombinaciji sa BCH kodom, postiže veoma strmu (gotovo vertikalnu) karakteristiku BER-C/N što predstavlja gotovo idealnu osobinu zaštitnih kodova.



Slika 3.11. Poređenje zaštitnih kodova DVB-T i DVB-T2 sistema

Na slici 3.11 prikazani su rezultati koji se postižu u DVB-T i DVB-T2 prijemniku i to pre spoljašnjeg dekodera (*Reed-Solomon* ili BCH respektivno). DVB-T2 standard stavlja na raspolaganje LDPC kodne količnike 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6. Ako konvolucioni koder DVB-T i LDPC koder DVB-T2 predajnog sistema koriste kodni količnik 2/3, onda se u kanalu sa 0 dB 1 μs ehom za modulacije 64QAM i 256QAM u prijemniku dobijaju rezultati kao na slici 3.11. U DVB-T tehnologiji smatra se da se QEF kvalitet prijema posle *Reed-Solomon* dekodovanja ($BER \leq 10^{-11}$ na nivou MPEG TS) dobija kada je BER pre *Reed-Solomon*, a posle konvolucionog Viterbi dekodovanja, oko 10^{-4} . Kod DVB-T2 tehnologije [DVB10] smatra se da se QEF kvalitet prijema posle BCH dekodovanja ($BER \leq 10^{-11}$ na nivou MPEG TS) dobija kada je BER pre BCH, a posle LDPC dekodovanja, oko 10^{-7} (zato što *Reed-Solomon* dekodner ima nešto veće mogućnosti za ispravljanje grešaka nego BCH dekodner). Međutim, zbog skoro vertikalne karakteristike LDPC dekodera u oblasti od interesa, može se smatrati da je kod DVB-T2 i za $BER=10^{-4}$ i za $BER=10^{-7}$ potreban isti C/N (za obe modulacije, 64QAM i 256QAM). U ovom slučaju kod DVB-T2 FEC donosi dobitak oko 5 dB na QEF nivou servisa.

Kod DVB-T2 primenjuju se slični principi za izbor kodnog količnika i modulacije kao i kod DVB-T. Veći kodni količnici i viši nivoi modulacionih konstelacija daju veće binarne protoke ali zahtevaju i veće odnose C/N. Međutim, kada se međusobno porede, performanse LDPC kodova su znatno bolje nego konvolucionih kodova kod DVB-T. Zbog toga je zahtevani odnos C/N manji za dati LDPC kodni količnik nego za

konvolucioni kôd sa istim količnikom. Sa druge strane, *slučaj koji je važniji za ovu disertaciju, ako je zadat odnos C/N onda sa DVB-T2 može da se koristi veći kodni količnik (manjeg dobitka) i tada se postižu veći binarni protoci.*

Na poboljšanje performansi FEC kodova utiče i interliving, koncept koji je dobro poznat u mnogim digitalnim sistemima prenosa. Cilj interlivinga je da se informacija za prenos raširi po vremenu, frekvenciji ili nekom drugom kriterijumu, i to tako da se ne dogodi gubitak dugačkih sekvenci originalnog sadržaja zbog dejstva impulsne smetnje u određenom vremenskom periodu ili frekvencijski selektivnog fedinga koji poništava nekoliko nosilaca u nizu. Interliving je specijalno podešen za primenjene tehnike FEC. Interliving se primenjuje tako da se povorka bita za prenos razlikuje po uzastopnom redosledu bita iz originalnog sadržaja. DVB-T2 pored interlivinga bita i frekvencija uvodi i interliving ćelija (nosilaca u pojedinim OFDM simbolima) i najznačajnije, vremenski interliving koji iznosi preko 70 ms i štiti od impulsnog šuma i vremenski selektivnog fedinga.

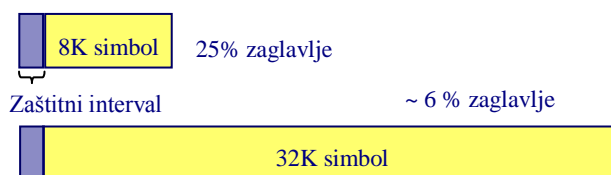
3.4. Raznovrsnost parametara za podešavanje performansi sistema

DVB-T standard podrazumeva dva FFT moda rada odnosno broja nosilaca, 2K i 8K. Aktivni broj nosilaca kod ova dva moda je 1512 i 6048, respektivno. Dužina trajanja aktivnog dela simbola za UHF kanale u 8K modu je 896 μ s a razmak između nosilaca je 1116,07 Hz. DVB-T2 uvodi nove FFT modove i proširuje sa dva već postojeća na još 1K, 4K, a što je značajnije i na 16K i 32K. Povećanjem broja nosilaca smanjuje se razmak između nosilaca ali ono što je bitno – produžava se trajanje simbola. Smanjenje razmaka između nosilaca ima negativan efekat jer se zbog pojave Doplerovog efekta povećava interferencija između nosilaca ako se sistem koristi za mobilni prijem. Zato se za mobilne aplikacije koriste modovi sa manjim brojem nosioca ili neki drugi sistem (npr DVB-H - *Handheld*). Međutim, povećanjem FFT veličine odnosno povećanjem trajanja simbola povećavaju se i mogućnosti za suzbijanje ISI uz smanjenje gubitka kapaciteta zbog uvođenja GI.

Razmotrimo osnovne elemente upotrebe zaštitnog intervala u praksi. Generalno gledano, dužina zaštitnog intervala GI mora odgovarati očekivanoj najdužoj višestrukoj propagaciji (eho) u zoni pokrivanja servisom. To pre svega važi za predviđanje najdužeg kašnjenja eha od prirodnih i veštačkih objekata između predajnika i

prijemnika, ali to važi i za slučaj kada se koristi SFN mreža gde treba izračunati najdužu razliku puteva signala od dva predajnika u okviru zajedničke zone servisa (slučaj sa SFN mrežom je naravno lakše predvideti ali su razlike puteva veće što je često teže kompenzovati). Kod DVB-T standarda zaštitni interval (često se obeležava sa Δ) bira se kao 1/4, 1/8, 1/16 ili 1/32 deo trajanja korisnog dela OFDM simbola. Da bi sva eha završila tokom trajanja Δ i da ne bi došlo do ISI, bira se ona dužina Δ koja prevazilazi predviđeno najduže kašnjenje eha. Ako posmatramo 8K i DVB-T sistem, onda najduži GI iznosi 224 μ s (= 896 μ s / 4), a najkraći 28 μ s (= 896 μ s / 32). U kontinentalnom delu centralne Evrope uz DVB-T koristi se sistem 8K sa trajanjem simbola 896 μ s i uz GI od 1/4 dobija se $\Delta = 224$ μ s, što odgovara razlici puta dva signala od 67,2 km (maksimalna razlika dužina putanja je 3×10^8 m/s \times Δ). Za zaštitu od ISI zbog višestruke propagacije u prirodnoj okolini analizirani mod rada je dovoljan, ali ako razmatramo SFN mreže razdaljina od 67,2 km može biti ograničavajući faktor (rastojanje lokacija TV predajnika za Beograd i Novi Sad je veće od ovog rastojanja).

Ako dužina GI od $\Delta = 224$ μ s odgovara situaciji na terenu onda povećanjem broja nosilaca (FFT veličine) sa 8K na 32K (što je raspoloživa FFT veličina u DVB-T2) produžava se aktivno trajanje simbola sa 896 μ s na 3584 μ s i u tom slučaju za $\Delta = 224$ μ s u 32K modu koristi se 1/16 deo aktivnog simbola tj oko 6% gubitka kapaciteta zbog GI u odnosu na 25% sa DVB-T tehnologijom (slika 3.12). Ovo smanjenje zaglavlja kod DVB-T2 sistema može uz istu zaštitu da poveća realnu propusnu moć kanala za emitovanje od 2% do skoro 18%.



Slika 3.12. Povećanje FFT veličine kod DVB-T2 sistema smanjuje gubitke kapaciteta usled GI

Pored povećane veličine FFT u DVB-T2 postoji i veći izbor GI, dodatni u odnosu na DVB-T su na primer 1/128 ili 19/128. Upotrebom 1/128 zaštitnog intervala uz 32K mod

može da se dobije isto vreme trajanja zaštitnog intervala kao 8K 1/32 (28 μ s) ali uz smanjeno zaglavlje i povećan kapacitet kanala za prenos.

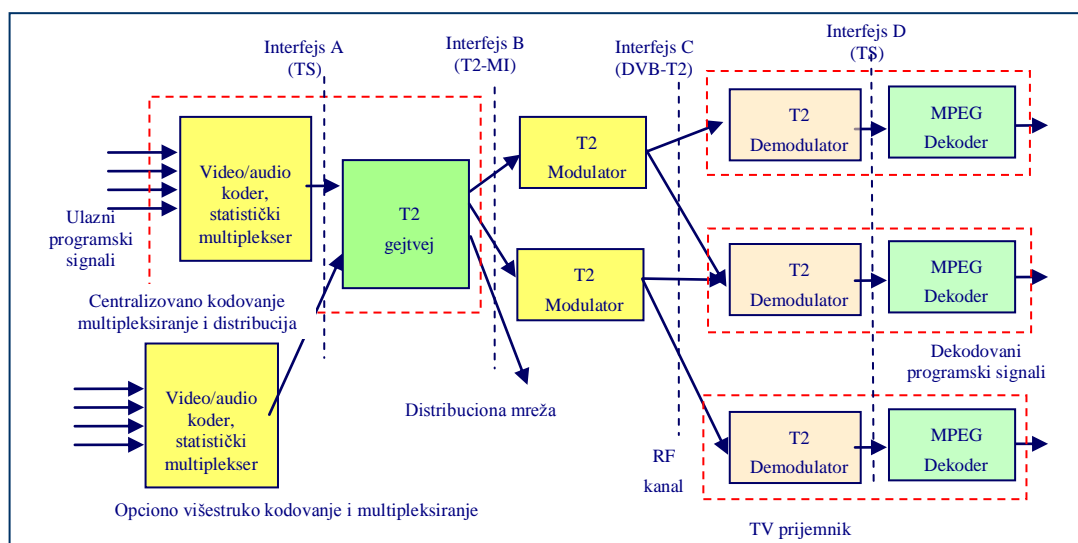
Druga pogodnost koju donosi raznovrsnost parametara je povećanje SFN mreža odnosno razdaljina između SFN predajnika i to bez povećanja zaglavlja za GI. Najveći dozvoljeni GI koji može da se sa 32K modom obezbedi u DVB-T2 je 532 μ s (= 3584 μ s x 19/128), što iznosi u maksimalnoj razlici dužina putanja signala 159,6 km, što je dovoljno i za velike nacionalne SFN.

Povećanje veličine FFT donosi još pogodnosti. Pošto se sa povećanjem broja nosilaca ivice frekvencijskog spektra OFDM signala spuštaju brže, otvara se mogućnost proširenja spektra na spoljnim krajevima OFDM signala. To praktično znači da se može povećati broj nosilaca po simbolu koji se koriste za prenos podataka i tako povećati kapacitet prenosa. Dobitak koji se na ovaj način može ostvariti kreće se od 1,4% (8K) do 2,1% (32K). Ova mogućnost predstavlja opciju u DVB-T2 standardu jer može da stvara poteškoće u ostvarivanju spektralne maske uređaja ili ostvarivanja zaštitnih odnosa snaga signala na terenu.

3.5. Robusnost specifična za određeni servis

Tokom eksploatacije mreža za digitalno zemaljsko emitovanje javila se potreba za obezbeđivanjem različite robusnosti u prenosu za servise koji se nalaze u okviru istog DVB signala. Kod DVB-T standarda, da bi se obezbedila robusnost specifična za određene servise, pokušalo se sa uvođenjem hijerarhijske modulacije. Koncept predlaže primenu modulacije koja će imati isti protok simbola kao i bez hijerarhije ali će obrada signala biti podeljena na dva dela različite otpornosti na greške (robusnosti) koji uključuju isti ukupni broj bita po simbolu. Npr umesto 64QAM koristi se QPSK i 16QAM. Naravno to je samo koncept, a u praksi radi se o relativno složenom mehanizmu koji ni posle desetak godina upotrebe DVB-T tehnologija u svetu, nije primenjivan u industriji proizvođača prijemnika (hijerarhijska modulacija je opcionalna funkcionalnost u DVB-T standardu). Inače, iako nudi mogućnost različite robusnosti za različite servise, sam koncept ima dosta ograničenja i nije fleksibilan. Zato je ova funkcionalnost unapređena kod DVB-T2 standarda i pojavio se novi koncept koji omogućava prenos podataka nezavisno od sopstvene strukture (MPEG TS ili IP) sa

potpuno slobodnim izborom grupe parametara fizičkog sloja u dodeljenom kapacitetu za ostvarenje specifične robusnosti određenog servisa (PLP – *Physical Layer Pipe*). Na fizičkom sloju u okviru istog kanala, na ovaj način formiraju se linije za prenos sa različitim otpornostima na greške koje nastaju u procesu prijema signala. DVB-T2 standard dozvoljava specificiranje određene modulacije, kodnog količnika i dubine vremenskog interlivinga za svaki individualni PLP. Na neki način i PLP je opciona funkcionalnost jer celokupan sadržaj za prenos može da se smešta u jedan PLP i tako, kao u DVB-T, ista robusnost se ostvaruje za celokupan sadržaj. Nakon MPEG multipleksiranja signali se pripremaju za PLP u DVB-T2 modulatoru. Svaki pojedinačni servis iz MPEG TS (TS može biti jedan ili više njih) ili servis podataka GSE (jedan ili više njih) svrstava se u određeni PLP. Funkcije koje obavlja DVB-T2 modulator mogu biti smeštene u jedan uređaj ili u dva uređaja – DVB-T2 gejtvej i modulator (slika 3.13).

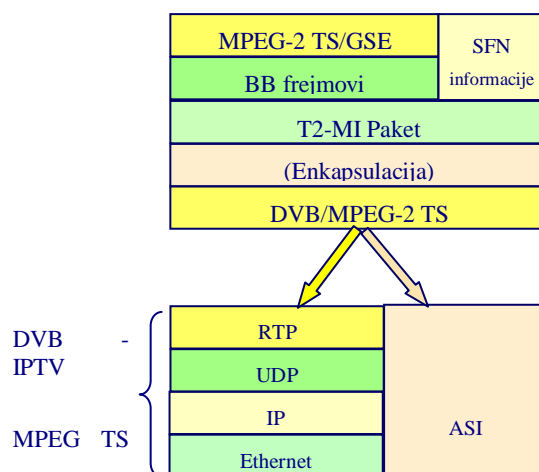


Slika 3.13. Blok šema obrade DVB-T2 signala

Da bi se unapredio rad SFN mreža uvodi se novi sklop T2 gejtvej (T2-Gateway), gde se obavlja alokacija i raspored signala. DVB-T2 gejtvej isporučuje pakete preko specijalno definisanog izlaznog interfejsa T2-MI (*Modulator Interface*). To ima za posledicu da svaki modulator u mreži može formirati identičan signal za emitovanje. Interfejs modulatora u DVB-T2 definiše format signala za modulator i omogućava formiranje pouzdanih mreža predajnika za SFN i MFN. Pored toga, T2-MI dopušta korišćenje regenerativnih repetitora za dalje napajanje MFN i SFN mreža. T2-MI paketi sadrže

informacije za opisivanje sadržaja i vremenskog redosleda za emitovanje DVB-T2 signala. T2-MI signal se putem distribucione mreže prenosi do modulatora u mreži. Modulatori uzimaju BB frejmove i instrukcije sadržane u dolaznom T2-MI signalu i formiraju DVB-T2 frejmove i, radi ispravne SFN sinhronizacije, emituju ih u odgovarajućem vremenskom intervalu. Signal od T2 gejtvaja ka T2 modulatoru distribuirana se ili preko standardnog DVB asinhronog serijskog interfejsa ASI (*Asynchronous Serial Interface*), ili enkapsulacijom u IP pakete za prenos kroz IP mreže upotrebom RTP (*Real-time Transport Protocol*) i UDP (*User Datagram Protocol*) protokola, slika 3.14.

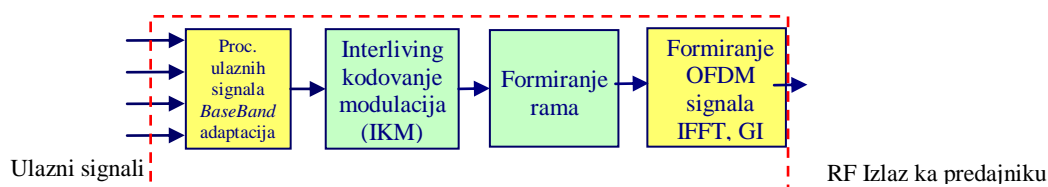
Kod jednostavnijih mreža, naročito ako nisu SFN mreže, podsistemi za kodovanje i multipleksiranje povezuju se direktno na modulatore, preko interfejsa za TS (*Transport Stream Interface*). U tom slučaju modulator (pored svojih osnovnih funkcija) obezbeđuje i funkcije T2 gejtvaja.



Slika 3.14. Distribucija T2-MI paketa

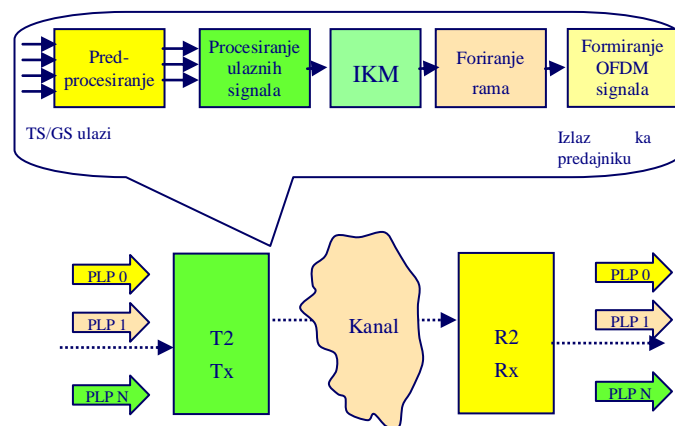
Generalni model za DVB-T2 fizički sloj je prikazan na slici 3.15. Ulaz sistema može biti jedan ili više MPEG TS i/ili jedan ili više GS signala. Ulazni signali sa slike 3.15, ako je to potrebno, mogu biti pred-procesirani u DVB-T2 gejtvaju (razdvajanje servisa, remultipleksiranje) čime će se na ulaz DVB-T2 sistema dovesti jedan ili više logičkih nizova podataka (programa) koji imaju slaganje jedan-prema-jedan sa kanalima podataka u modulatoru odnosno PLP-ovima. Veoma često grupa servisa može da deli iste zajedničke elemente, kao što su PSI/SI tabele. Da se ne bi ponavljale takve informacije za svaki PLP, DVB-T2 ima koncept zajedničkog PLP-a, za grupu PLP-ova.

U tom slučaju, prijemnici dekoduju u isto vreme dva PLP-a: PLP podataka i njihov zajednički pridruženi PLP. Ako ulazni servisi nemaju zajedničke elemente onda nema potrebe za zajedničkim PLP-om. Na slici 3.16 prikazan je princip prenosa sa višestrukim PLP.



Slika 3.15. Generalni model za DVB-T2 fizički sloj

Korišćenjem više PLP-ova omogućava se da dodeljen kapacitet, kao i robusnost (specifični parametri pojedinačnih PLP-a), mogu da se podese prema posebnim zahtevima provajdera servisa i sadržaja. PLP se formira prvo grupisanjem više OFDM simbola u jedan frejm, a zatim dodeljivanjem različitih servisa različitim slajsevima (isečcima), koji predstavljaju delove frejma. Pošto je moguće postići veću dubinu vremenskog interlivinga sa više PLP-a (do 250 ms) nego sa jednim (oko 70 ms), ova tehnika se preporučuje za upotrebu čak i u slučajevima kada su nam potrebni isti parametri modulacije i FEC, jer se značajna robusnost servisa postiže naročito za servise sa vremenski promenljivim kanalom kakav je portabl ili mobilni prijem (npr mobilna TV). Ako se primene sve mogućnosti PLP-a, sa posebnom modulacijom, FEC i vremenskim interlivingom primenjenim na servise/slajseve PLP, umesto na ceo multipleks, dobija se jedna od najvažnijih promena koju donosi DVB-T2 u odnosu na arhitekturu DVB-T. Takođe, može da se primeni i tradicionalan DVB-T pristup tako da postoji jedan jedini slajs odnosno PLP, ali takav da nosi kompletan MPEG TS sa više programa.



Slika 3.16. DVB-T2 princip prenosa sa višestrukim PLP

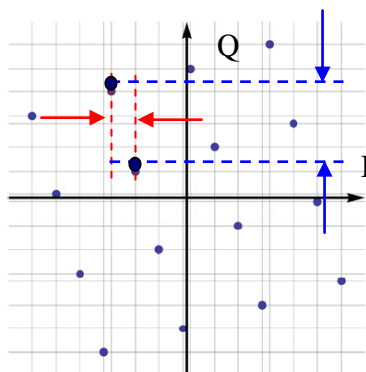
3.6. Unapređena modulacija – rotacija konstelacionog dijagrama

DVB-T2 uvodi novu tehniku ‘rotirane konstelacije’ kojom se postiže značajna robusnost signala u kanalima za zemaljsku distribuciju servisa. Rotirana konstelacija unapređuje performanse modulacije u uslovima frekvencijski veoma selektivnog fedinga gde dolazi do potpunog poništavanja pojedinih nosilaca u okviru OFDM signala. U principu, FEC kodovanje može da ispravi greške nastale ovim putem, ali ako se zbog povećanog kapaciteta prenosa koriste kodni količnici 4/5 ili 5/6 koji slabije ispravljaju greške, ti podaci će biti izgubljeni. U takvim slučajevima tehnika rotirane konstelacije održava kvalitet primljenog signala dok se i dalje koristi povećan kapacitet prenosa.

Nakon formiranja modulacione konstelacije, vrši se rotacija u kompleksnoj I-Q ravni (I osa definiše realni deo a Q osa imaginarni deo kompleksnog broja koji definiše konstelacionu tačku modulacione šeme), gde svaka osa ima dovoljno informacija o svojim nosiocima i na osnovu kojih se mogu razdvojiti susedne tačke u novoformiranoj konstelaciji, slika 3.17. DVB-T2 standard je definisao različite uglove rotacije za različite modulacije, QPSK (29°), 16QAM (16.8°), 64QAM (8.6°), 256QAM ($\arctg(1/16)$).

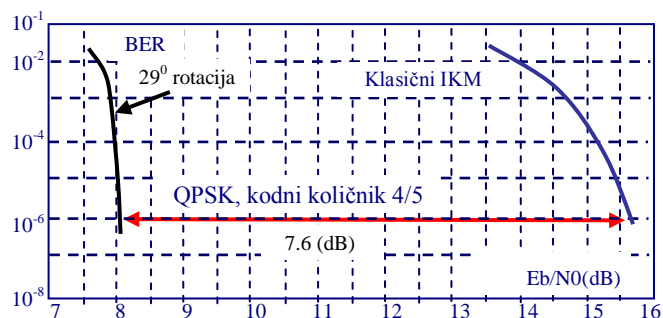
U modulatoru I i Q komponente se razdvajaju i spajaju sa odgovarajućim vrednostima drugih OFDM ćelija (interliving ćelija). Na ovaj način se postiže da se I i Q komponente jedne ćelije prenose na različitim frekvencijama (nosiocima) i različitim vremenima (simbolima). U prijemniku I i Q komponente se vraćaju na originalne pozicije gde su

bile i pre interlivinga a posle rotacije. Na ovaj način ako se neki nosilac ili simbol izgubi zbog selektivnog kanala ili interferencije, i dalje postoji dovoljno informacija od neoštećene ose (I ili Q) koja je prenošena drugim putem.



Slika 3.17. Rotirana 16-QAM konstelacija

Sa slike 3.17 vidi se da čak i ako je loše primljena jedna od komponentata, na osnovu druge je moguće ispravno detektovati informaciju odnosno sve bite posmatrane konstelacione tačke. Stoga je prema prvim simulacijama [DVB10] dobitak kodovanja značajan. U kanalu samo sa aditivnim Gausovim šumom nema dobitka, ali što je kanal frekvencijski selektivniji ili je pod uticajem veće inerferencije, dobitak je veći. Za standardne fedinge dobitak iznosi oko 0,7 dB. Za kanale sa dubokim fedingom, 0dB-eho kanale, kanale sa impulsnim interferencijama odnosno kada postoji gubitak više nosilaca, dobitak rotirane konstelacije je znatno veći. Na slici 3.18 prikazano je ponašanje sistema sa QPSK modulacijom, kodnim količnikom 4/5 i kanalom sa 15% obrisanih nosioca.

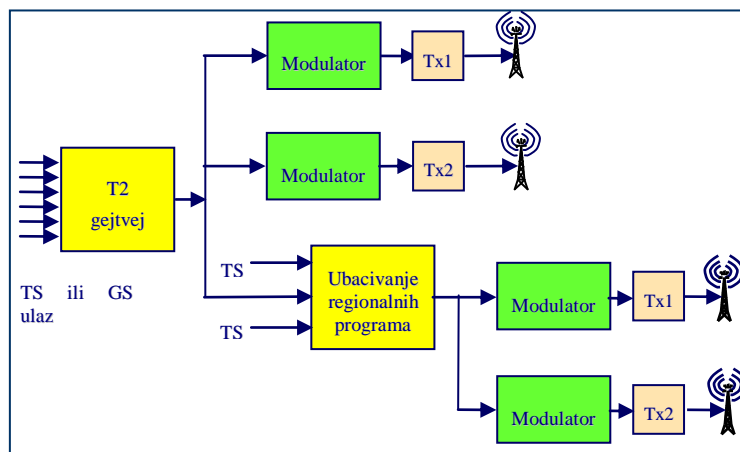


Slika 3.18. Ponašanje sistema pri rotaciji konstelacije za 29° (levo) i u klasičnom IKM (desno)

Dobitak u ovom slučaju iznosi 7,6 dB što omogućava da se koriste veći kodni količnici odnosno povećava kapacitet prenosa.

3.7. Diverziti tehnike – Alamuti algoritam

Iako DVB-T tehnologije omogućavaju upotrebu SFN mreža, zbog prijema signala slične snage sa dva predajnika dolazi do dubokog selektivnog fedinga što dovodi do povećanja grešaka u prijemu koje se često ne mogu ispraviti ni povećanjem snage predajnika već se eventualno mogu ispraviti izborom efikasnijeg zaštitnog kodovanja. DVB-T2 kao opcionu mogućnost uvodi upotrebu Alamuti diverziti tehnike sa dva predajnika, slika 3.19, kao primer MISO (*Multiple Input Single Output*) sistema.



Slika 3.19. Blok šema MISO sistema sa regionalnim ubacivanjem programa

Originalno, Alamuti kodovanje [ALA98] spada u grupu prostorno-vremenske diverziti tehnike koja koristi dva predajna lanca i definisana je matricom X :

$$X = \begin{bmatrix} S_0 & S_1 \\ -S_1^* & S_0^* \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Matricom X definisano je kodovanje i sekvenca prenosa Alamuti diverziti tehnike pri čemu redovi predstavljaju sukcesivne vremenske slotove prenosa, a kolone predstavljaju antenske izlaze (signale) tokom vremena. Ovaj metod može direktno da se primeni na signale predstavljene kompleksnim brojevima što je slučaj kod modulacija implementiranih u OFDM signalima. Zato se već koristi MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) diverziti tehnika kod WiMAX tehnologije a sada i kod DVB-T2. Saglasno Alamuti kodovanju, izraz (3.1), dva vremenski sukcesivna simbola S_0 i S_1 se istovremeno prenose sa dve antene (prvi red matrice), a zatim se u sledećem

vremenskom slotu takođe istovremeno prenose ista dva simbola ali sa različitih antena, konjugovano kompleksni i S_1 simbol sa promenjenim znakom (drugi red matrice). Kada se ovako emituju signali, prijemnik može da razdvoji dva susedna simbola primenom odgovarajućih matematičkih operacija nad tim kompleksnim simbolima. Sledeće formule daju uprošćeni prikaz tih operacija i način kombinovanja signala u prijemniku:

$$r_0 = S_0 + S_1 \quad (3.2)$$

$$r_1 = -S_1^* + S_0^* \quad (3.3)$$

$$S_0 \cong r_0 + r_1^* = 2 \times S_0 \quad (3.4)$$

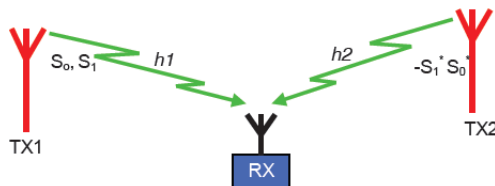
$$S_1 \cong r_0 - r_1^* = 2 \times S_1 \quad (3.5)$$

Da bi se Alamuti diverziti mogao primeniti treba da su poznate funkcije prenosa kanala h_1 i h_2 , odnosno neophodno je da se procenjuju karakteristike kanala za prenos što se i radi u okviru obe generacije standarda za digitalno emitovanje TV programa.

DVB-T2 koristi modifikovan Alamuti algoritam koji se može predstaviti matrica X' :

$$X' = \begin{bmatrix} S_0 & S_1^* \\ S_1 & -S_0^* \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Promena je u tome što se na jednoj anteni sukcesivne OFDM ćelije pojavljuju neizmenjene (znak i konjugacija) dok se na drugoj anteni vrše odgovarajuće operacije nad obe ćelije. Modifikacija se primenjuje da bi DVB-T2 sistem lako mogao da prelazi iz MISO u SISO (*Single Input Single Output*) jednostavnim isključivanjem drugog prenosnog puta. Pored toga, u DVB-T2 ne primenjuje se prostorno-vremenski diverziti već prostorno-frekvencijski diverziti jer se umesto na dva sukcesivna vremenska simbola algoritam primenjuje na dve sukcesivne OFDM ćelije u spektru. Obrada se vrši posle frekvencijskog interlivinga, na početku formiranja OFDM signala.



Slika 3.20. MISO u DVB-T2 standardu

U DVB-T2 sistemu svaku konstelacionu tačku emituju oba predajnika, ali drugi predajnik (Tx2 na slici 3.20) emituje modifikovane verzije obe konstelacije (matrica X')

i to u obrnutom frekvencijskom redosledu. Rezultujući signal dobija pozitivan efekat kombinovanja dva primljena signala, slično formulama (3.4) i (3.5). Primenom ovakve MISO tehnike postoji mogućnost povećanja površine zone pokrivanja za SFN mreže za oko 30%.

3.8. *Teoretski maksimalan kapacitet kanala kod DVB-T2*

Zahvaljujući unapređenjima opisanim u prethodnim odeljcima, DVB-T2 standard se toliko približio idealnom sistemu prenosa da se smatra da u ovoj oblasti dugo neće biti tehnoloških proboja kao što je bio DVB-T2 [FIS10]. Da bi se sagledala tehnička efikasnost DVB-T2 tehnologija i procenili koliko je ovaj standard ispred svog vremena vredno je analizirati koliko se DVB-T2 približio teoretski maksimalnom kapacitetu kanala za prenos, odnosno Šenonovoj granici. Na osnovu Šenonove teoreme o informacionom kapacitetu kanala [SHA48], maksimalni binarni protok koji se može postići bez grešaka u prenosu izračunava se prema formuli:

$$C = W \times \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad (3.8)$$

gde je W širina propusnog opsega kontinualnog kanala u Hz, S je prosečna snaga signala koji se prenosi i N je prosečna snaga belog Gausovog šuma u kanalu prenosa, kapacitet C se izražava u b/s. Da bi se izračunao maksimalni kapacitet u televizijskom UHF kanalu širine $W = 8$ MHz, formulu (3.8) možemo da transformišemo u:

$$C = 8 \times \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) [Mb/s] \quad (3.9)$$

Ako uzmemo u obzir vrednosti odnosa snaga signala i šuma za realne sisteme gde se ostvaruju kapaciteti prenosa u kanalu od oko 20 Mb/s i više, u DVB-T2 sistemu potrebno je za različite kanale ostvariti odnos S/N oko 10 dB i više [DVB10]. Ako dalje prilagodimo formulu (3.9) ovom slučaju i primenimo približnu jednakost:

$$\log_2(1 + x) \approx \log_2(x), \text{ za } x \geq 10 \quad (3.10)$$

kao i poznati identitet promene osnove logaritma:

$$\log_2(x) = \frac{\log_{10}(x)}{\log_{10} 2} \quad (3.11)$$

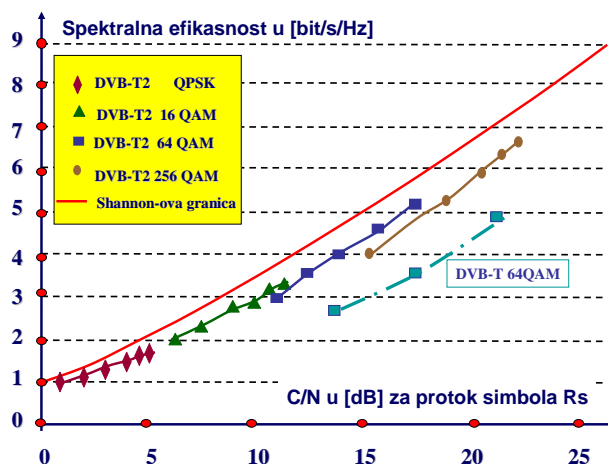
konačno dobijamo praktično upotrebljiv izraz

$$C = \frac{8}{3} \times 10 \times \log_{10}\left(\frac{S}{N}\right) [Mb/s] \quad (3.12)$$

odnosno

$$C = 2,67 \times SNR[dB] \quad [Mb/s] \quad (3.13)$$

što uz istaknute pretpostavke predstavlja prema Šenonovoj teoremi maksimalan kapacitet prenosa bez grešaka u 8MHz kanalu pri SNR većem od 10 dB. Koristeći izraz (3.13), zatim preciznije izračunavanje Šenonove granice za $SNR < 10$ dB, kao i ucertavanje tačaka spektralne efikasnosti za SNR odnose u Gausovom kanalu DVB-T2 sistema za određene modulacije i kodne količnike [DVB10], dobijamo dijagram 3.21.



Slika 3.21. DVB-T, DVB-T2 i Šenonova granica kapaciteta kanala

Na slici 3.21 dato je i poređenje spektralne efikasnosti najčešće korišćene DVB-T modulacije 64QAM, sa DVB-T2 sistemom.

3.9. Uporedni pregled DVB-T i DVB-T2 standarda

Sumirajući sličnosti i razlike između DVB-T i DVB-T2 standarda u ovom odeljku dat je pregled najvažnijih performansi tehnologija prenosa digitalne televizije [SUG12].

U ključne parametre koji su unapređeni u DVB-T2 svakako najpre spada sistem zaštitnog kodovanja jer je potpuno promenjen u odnosu na DVB-T standard. Primena samo novog, naprednijeg FEC donosi oko 30% povećanja kapaciteta prenosa. Ostala poboljšanja donose dodatno povećanje binarnog protoka. Zbog poboljšane zaštite omogućena je upotreba modulacije sa velikim brojem nivoa (256QAM). Pored toga, rotirana konstelacija doprinosi robusnosti za prenos u nepovoljnim uslovima. Povećanje broja OFDM nosilaca omogućava da se sa manjim GI postigne ista zaštita od ISI, a sa manjim GI dobija se na kapacitetu i preko 17%. Kao kod DVB-T i kod DVB-T2 pored

korisničkih prenosa se i pilot nosioci koji nose signalizacione informacije i informacije o stanju kanala za prenos. U DVB-T2 prenosu, zbog optimizacije prema GI, pilot nosioca može biti manje i do 7-8%. Upotreba PLP-a kod DVB-T2 daje velike mogućnosti za optimizaciju parametara za prenos prema vrsti servisa koji se prenosi, uz uštedu u kapacitetu. Vremenski interliving pruža DVB-T2 signalu veću otpornost na greške pri portabl i mobilnom prijemu. Upotreba modifikovane Alamuti diverziteti tehnike je velika novost u DVB-T2 i može da obezbedi veće servisne zone, naročito za SFN mreže. DVB-T2 obezbeđuje veoma fleksibilno umrežavanje sa svuda prisutnim aplikacijama baziranim na IP protokolima. Skoro sva unapređenja u DVB-T2 standardu vode ka povećanju binarnog protoka (i više servisa) u istom kanalu za prenos. U tabelama 3.1 i 3.2 dat je primer povećanja kapaciteta DVB-T2 u odnosu na DVB-T za dve mrežne konfiguracije (MFN i SFN) ako se ostvaruje ista zona pokrivanja i isti kvalitet prijema signala [SUG11]. U tabeli 3.3 dato je poređenje parametara DVB-T i DVB-T2 standarda [SUG12].

Tabela 3.1. Kapacitet prenosa DVB-T i DVB-T2 standarda – primer za MFN mrežu

	DVB-T	DVB-T2
Modulacija	64QAM	256QAM
FFT veličina	8K	32K
Zaštitni interval	1/32	1/128
FEC	2/3CC + RS	3/5LDPC + BCH
Rasejani piloti	8,3%	1,0%
Kontinualni piloti	2,0%	0,53%
Mod nosioca	standardni	prošireni
Kapacitet	24,1 Mb/s	36,1 Mb/s

Poređenjem ova dva sistema uočava se da je DVB-T2 efikasniji u korišćenju frekvencijskog spektra kao i da je njegov signal robusniji u prenosu od odgovarajućeg signala u DVB-T standardu [ETSI09], [DVB10]. Na primer, ako poredimo spektralnu efikasnost i uzmemo da je u Rajsovom kanalu za QEF kvalitet potrebno ostvariti isti SNR (21,5 dB) za oba standarda, onda je za DVB-T potreban mod rada 64QAM i 7/8FEC što daje protok od 30 Mb/s, dok je za DVB-T2 potreban mod rada 256QAM i 4/5FEC što daje 50 Mb/s. Uočava se povećanje protoka podataka za skoro 70%. Sa druge strane, ako poredimo robusnost signala i fiksiramo protok na približno isti nivo

(DVB-T na 22,1 Mb/s, DVB-T2 na 21,3 Mb/s) onda je za isti Rajsov kanal za DVB-T potreban mod rada 64QAM i 2/3FEC da bi se postigao QEF kvalitet uz *SNR* od 17,3 dB, dok je za DVB-T2 potreban mod rada 16QAM i 2/3FEC da bi se postigao QEF kvalitet uz *SNR* od 9,1 dB. Uočava se da DVB-T2 može da isporučiti servis u istom kvalitetu i sa sličnim protokom sa znatno manjom snagom (oko 8 dB).

Tabela 3.2. Kapacitet prenosa DVB-T i DVB-T2 standarda – primer za SFN mrežu

	DVB-T	DVB-T2
Modulacija	64QAM	256QAM
FFT veličina	8K	32K
Zaštitni interval	1/4	1/16
FEC	2/3CC + RS	3/5LDPC + BCH
Rasejani piloti	8,3%	4,2%
Kontinualni piloti	2,0%	0,39%
Mod nosioca	standardni	prošireni
Kapacitet	19,9 Mb/s	33,2 Mb/s

U vreme objavljivanja novog DVB-T2 standarda (2009. godine) izgledalo je da se možda sa uvođenjem novog standarda zakasnilo jer je DVB-T već postao široko rasprostranjen nakon više od decenije u upotrebi. Međutim, tehnologije primenjene u DVB-T2 daju veći kapacitet prenosa u istom kanalu i oni koji sada uvode digitalno emitovanje TV programa imaju idealnu priliku da izaberu standard koji neće skoro zastareti. Sa druge strane, oni mrežni operatori koji već koriste DVB-T imaju dosta motiva da kombinuju sa DVB-T2 i u perspektivi potpuno pređu na novi standard. Spektralna efikasnost postaje veoma važna i UHF opseg koji koriste TV servisi postaje veoma tražen od strane operatora mobilnih mreža zbog povoljnih uslova propagacije signala u tom frekvencijskom opsegu. DVB-T2 je tehnički najnapredniji standard za digitalnu televiziju i približio se teoretski idealnim performansama sistema (Šenonova granica) kao ni jedan do sada. Trebalo bi da su tehničke karakteristike ključne za izbor (i ove) tehnologije, *ALI* često se dešava da ekonomska isplativost i raspoloživost servisa odnesu prevagu u strateškom odlučivanju. Sledeće poglavlje predlaže model za procenu efikasnosti izbora tehnologije digitalne televizije uzimajući u obzir i te faktore.

Tabela 3.3. Poređenje parametara DVB-T i DVB-T2 standarda

	DVB-T	DVB-T2
FEC	Konvoluciono kodovanje + RS 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8	LDPC + BCH 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6
Modulacija	COFDM: QPSK, 16QAM, 64QAM	COFDM: QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
Zaštitni interval	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 19/256, 1/8, 19/128, 1/16, 1/32, 1/128
FFT veličina	2K, 8K	1K, 2K, 4K, 8K, 16K, 32K
Rasejani pilot nosioci	8% od ukupnog broja	1%, 2%, 4%, 8% od ukupnog broja
Frekvencijski opsezi	Band III, IV/V (VHF, UHF)	Band III, IV/V (VHF, UHF) + L Band
Širina kanala	6, 7, 8 MHz	1.75, 5, 6, 7, 8, 10 MHz
C/N opseg (Rajs kanal)	5 dB (QPSK 1/2) do 23 dB (64QAM 7/8)	3 dB (QPSK 1/2) do 24 dB (256QAM 5/6)
Max SFN Tx rastojanje (8 MHz)	67,2 km (8K mod)	159,6 km (32 K mod), 134,4 km (16K mod)
Rotirana konstelacija	-	Povećana robusnost u kanalima sa fedingom i interferencijom
Interliving	Bit, frekvencijski	Bit, ćelijski, vremenski, frekvencijski
Specifična robusnost	Ograničena fleksibilnost ako se koristi hijerarhijska modulacija	PLP sa različitom modulacijom, FEC, interlivingom
Diverziti	SISO, SIMO	SISO, MISO, SIMO, MIMO
Max binarni protok	31,7 Mb/s (8K, 64QAM, CR=7/8, GI=1/32)	50,3 Mb/s (32K prošireni mod, 256QAM, CR=5/6, GI=1/128, 1% rasejanih pilot)
Protokoli za prenos podataka	MPEG TS MPE	MPEG TS MPE, GSE

4. Model za procenu efikasnosti tehnologija digitalne televizije

Pored tehničkih poboljšanja nove tehnologije uvek i u svakoj disciplini uvode i veće troškove da bi se poboljšanja omogućila korišćenjem odgovarajuće opreme, uređaja i sistema. Da li i kada se ostvaruje povraćaj investicije ako se uvedu nove tehnologije? Novi standardi donose inovacije (opisane u prethodnom poglavlju) iz kojih nastaju izvori prihoda a oni se vremenom pretvaraju u profit. Inovacije su direktan izvor prihoda jer, kao što je u ovoj disertaciji utvrđeno, da bi se ostvario isti kvalitet servisa i ista zona pokrivanja korišćenjem novih tehnologija digitalne televizije potreban je manji kapacitet prenosa. Ušteden kapacitet koji se može izraziti kao Mb/s, MHz ili broj TV kanala, na tržištu ubire prihod. Dobijena digitalna dividenda ima veliki značaj kako za televizijsku industriju, tako i za oblast mobilnih širokopojasnih komunikacija. Jednostavno, ako digitalno zemaljsko emitovanje zahteva manje kapaciteta za prenos nego analogna televizija, ili DVB-T2 zahteva manje kapaciteta za prenos nego DVB-T, onda ušteden kapacitet može biti upotrebljen na nove usluge. Međutim, često se dešava da i pored tehničkih prednosti koje donose nove tehnologije, naročito u početku, radio-

difuzne ustanove i mrežni TV operatori budu skeptični po pitanju novih standarda zato što se po pravilu uvek zahteva upravo njihovo investiranje u novu opremu i sisteme. Zato se pored tehničkih parametara i ekonomski i tržišni parametri uključuju u model procene efikasnosti tehnologija digitalne televizije koji je opisan u ovom poglavlju.

4.1. Proces strateškog planiranja mreža

Iako neke tehnologije imaju tehničku superiornost u odnosu na ostale, to ne garantuje da će biti opšte i brzo prihvaćene na tržištu. Da bi se zaista procenila efikasnost izbora određene tehnologije u telekomunikacionom i radio-difuznom sistemu potrebno je napraviti istinsku tehno-ekonomsku analizu u okviru planiranja odgovarajuće mreže. Kratkoročno (operativno) planiranje radi se za period od nekoliko dana ili nedelja, ima malih neizvesnosti u planiranju, a uticaj odluka na ukupne investicije i prihode je uglavnom zanemarljiv. Primeri problema iz ove kategorije su konfigurisanje uređaja i kontrola/nadzor sistema. Srednjeročno (taktičko) planiranje radi se za period do godinu dana, kreira umerenu neizvesnost u planiranju, a uticaj pojedinih odluka na ukupne investicije i prihode je prilično veliki. Primeri problema iz ove kategorije su dimenzionisanje sistema i konfigurisanje mreže. Dugoročno (strateško) planiranje mreže radi se za period od nekoliko godina, ima visoku neizvesnost u planiranju, a odluke se odnose na celokupnu (nacionalnu) mrežu i imaju ključni uticaj na ukupne investicije i prihode. U ovu kategoriju problema spadaju izbor tehnologije i izbor topologije mreže. Pored informacija o mogućim tehnologijama, za strateško planiranje postoje dva osnovna ulazna podatka. Prvi odražava uticaj tržišta i predstavlja potražnju korisnika za uslugama zasnovanim na novim aplikacijama koje po pravilu povećavaju zahteve za ukupnim kapacitetom prenosa. Drugi je nova investicija za nabavku odgovarajuće opreme i odražava komercijalni uticaj. Na slici 4.1 prikazan je algoritam tehno-ekonomske analize za procenu efikasnosti izbora tehnologije u okviru strateškog planiranja mreže. U teoriji i praksi planiranja razvoja telekomunikacionih mreža postoje četiri faze u tehno-ekonomskim studijama:

- analiza problema (definisane predmeta studije, sakupljanje podataka o tehnologijama i tržištu);
- modeliranje (povezivanje tehnologija sa strukturama investicija i prihoda);
- procena rada modela (simulacija rada algoritma);

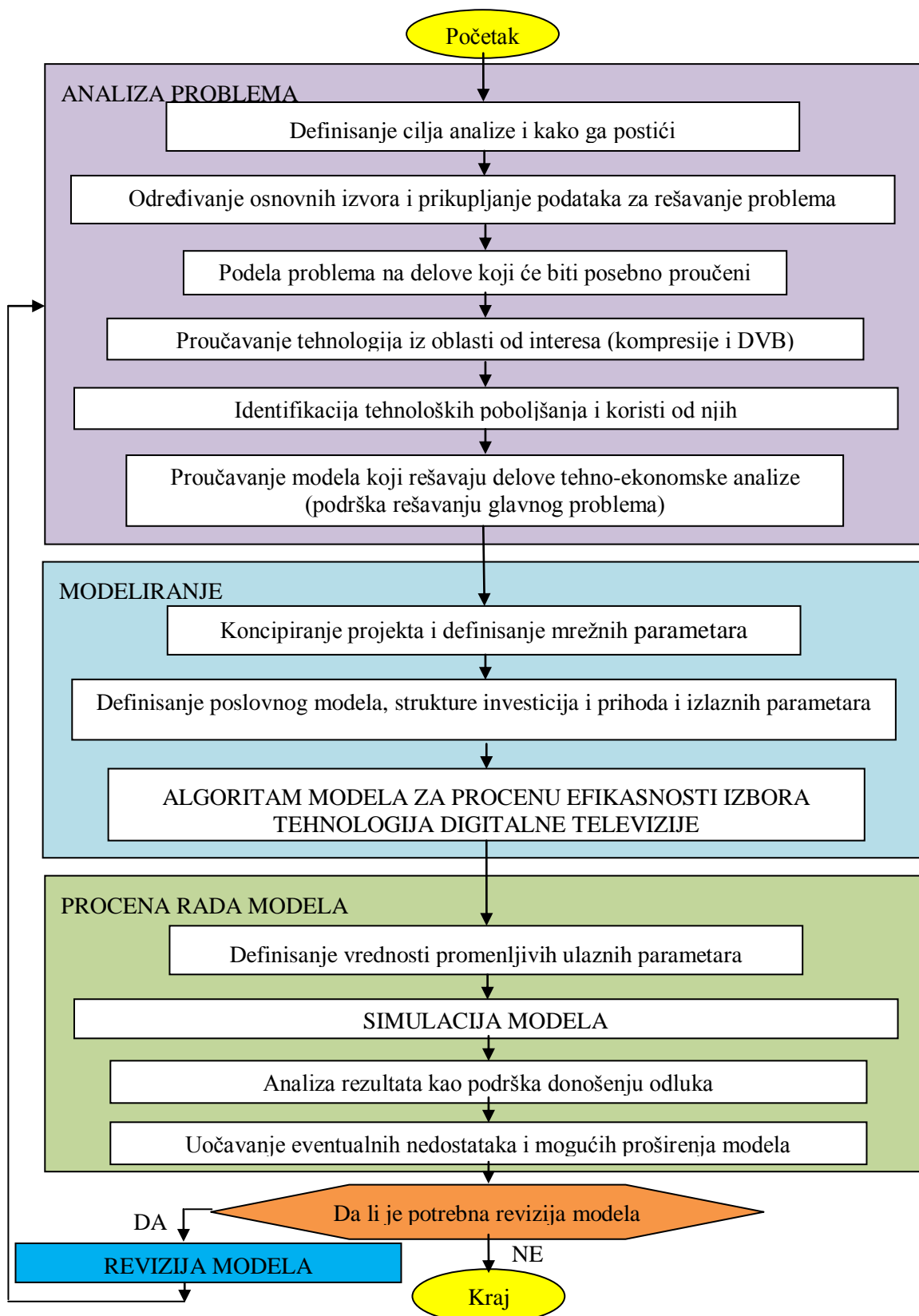
- revizija i usavršavanje algoritma.

Ovaj pristup studijama planiranja poznat je kao *Shewhart*-ov ciklus koji je kasnije proširio *Deming* [DEM86].

U okviru analize problema definisan je delokrug istraživanja i cilj analize koji su objašnjeni u drugom poglavlju ovog rada, *Strategija digitalizacije emitovanja programa*. Postizanje cilja može se ostvariti razvojem modela, a simulacijom rada modela da se proceni efikasnost izbora različitih tehnologija koje stoje na raspolaganju u oblasti digitalne televizije. Nakon istraživanja (izvori informacija su referisani na kraju ovog rada u posebnom poglavlju *Literatura*) i prikupljanja podataka napravljena je podela problema na delove koji su posebno proučeni:

- Analiza prethodnih istraživanja u ovoj oblasti;
- Pretraga izvora informacija o potencijalnim tehnologijama (međunarodni standardi, radovi objavljeni u naučnim/stručnim časopisima i konferencijama);
- Istraživanje regulatornog okvira radio-difuzije i širokopojsnih telekomunikacija;
- Saradnja sa proizvođačima opreme o analizi troškova investiranja;
- Saradnja sa operatorima mreža i emiterima o parametrima mreže;
- Pronalaženje alata za podršku rešavanja definisane analize;
- Analiza statističkih podataka o tržištu.

Za rešavanje problema procene efikasnosti ključna je analiza performansi raspoloživih tehnologija kompresije i digitalnog emitovanja. Detaljno poređenje performansi dato je u prethodnom poglavlju. Na kraju tog poglavlja identifikovana su tehnološka poboljšanja kada se porede različite kombinacije standarda i predstavljene koristi, kao na primer povećan kapacitet za prenos za iste zone pokrivanja i kvalitet primljenog signala. Novonastali kapacitet za prenos signala može se koristiti za uvođenje novih usluga.



Slika 4.1. Algoritam tehno-ekonomske analize

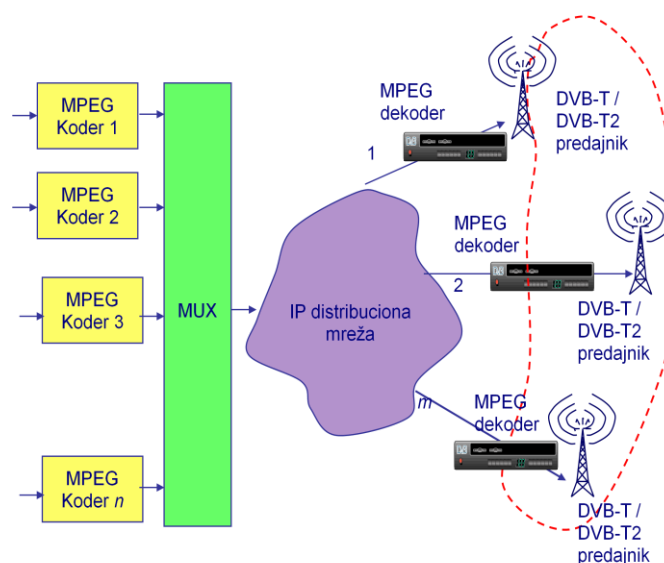
U odeljku 4.2 koncipiran je idejni projekat, definisana topologija mreže za digitalno emitovanje TV programa i mrežni parametri koji utiču na rad modela. U modeliranju primenjen je tzv *bottom-up* metod koji polazi od zahteva za servisima, a mreža se dimenzioniše tako da krajnji korisnici imaju prijem servisa u propisanom kvalitetu. Na osnovu potrebne opreme u mreži razvijena je struktura troškova odnosno investiranja. Zatim je na osnovu definisanog poslovnog modela opisana struktura izvora prihoda od digitalne dividende. Ovakav pristup u modeliranju ima se uglavnom kada se planira nova mrežna infrastruktura i kada se mreža optimizuje u smislu najveće efikasnosti pri upotrebi infrastrukture, a da se pri tom ne remeti osnovni servis. Upravo za takve svrhe koristi se u ovoj disertaciji. Sam model za procenu efikasnosti tehnologija ima formu algoritma i matematičkih izraza. Uzimajući u obzir tehnološke i druge parametre modela, matematičkim formulama izračunavaju se vrednosti investicija i prihoda u funkciji vremena na osnovu kojih se može proceniti tačka profitabilnosti. Zatim, sledi evaluacija modela koja je izvršena u petom poglavlju gde su nakon simulacije analizirani rezultati i predložena moguća proširenja modela. Na osnovu potreba za revizijom problem je delimično ponovo analiziran u okviru čega je proučen i *Bass* difuzioni model kao podrška rešavanju glavnog problema. Nakon revizije, *unapređen* model je predstavljen na isti način kao i osnovni model. Na osnovu procene rada unapređenog modela moguće je model dalje modifikovati i/ili doneti jasne zaključke.

4.2. Osnovni model

Koncept modela polazi od procene troškova radio-difuznog sistema ako se koriste nove tehnologije i to u dve varijante, MPEG-4/DVB-T i MPEG-4/DVB-T2, a zatim se ti troškovi porede sa troškovima za standardni digitalni sistem emitovanja, MPEG-2/DVB-T. Nakon toga se izračunavaju prihodi koji nastaju od novih servisa omogućenih upotrebom novih tehnologija. Ako se investicije i prihodi predstave u funkciji vremena onda će tačka u kojoj se ove krive seku predstavljati momenat kada se nivo prihoda izjednačava sa nivoom investicije i tada nova infrastruktura za radio-difuziju postaje profitabilna (engl. *break-even point*). Na slici 4.2 predstavljena je topologija telekomunikacione mreže za radio-difuzne potrebe koja se koristi u ovom modelu. Osnovni model [SUG11] proračunava parametre sistema za slučaj difuzije jednog TV paketa – multipleksa.

Procena investicija u digitalni radio-difuzni sistem bazirana je na pretpostavci da distribuciona mreža već postoji. Uticaj distribucione mreže nije uključen u proračun troškova jer ta mreža može da ima brojne različite topologije i da koristi različite tehnologije, a uzimanje u obzir svih njih bi smanjilo jednostavnost i fleksibilnost ovog univerzalnog modela. U modelu se koristi algoritam koji uzima u obzir samo TV podsistem cele mreže pretpostavljajući da se multipleks od produkcionog centra do predajnika prenosi postojećom infrastrukturom, kao na slici 4.2. Pošto u većini slučajeva distribuciona mreža zaista već postoji i zato što distribuciona mreža ne utiče direktno na dileme koje unose tehnologije MPEG-2/4 i DVB-T/T2, izostavljanje ovog dela infrastrukture ne smanjuje univerzalnost modela.

Prijemnici (IRD – *Integrated Receiver Decoder*) koji se nalaze kod krajnjih korisnika i deo su kućne instalacije, nisu predmet proračuna jer je namera tokom razvoja modela bila da se proceni efikasnost infrastrukture čiji je vlasnik investitor. U televizijskoj industriji najčešći slučaj je da prijemnike poseduju građani i oni u modelu ovog rada ne utiču na analizu investicija i prihoda.



Slika 4.2. Topologija telekomunikacione mreže za radio-difuzne potrebe

Prema opštoj definiciji, ekonomski profit (EP) je jednak razlici ukupnih prihoda (TR – *Total Revenue*) i (TC – *Total Cost*) ukupnih investicija:

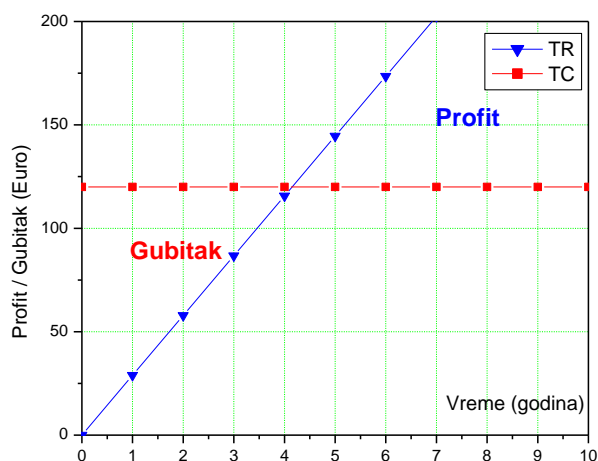
$$EP = TR - TC \quad (4.1)$$

gde TC predstavlja fiksne troškove koji uključuju kapitalne investicije u opremu potrebnu za digitalni zemaljski emisioni sistem. Ovi troškovi nastaju na samom početku implementacije projekta. Promenljivi deo investicija, čiji se nivo menja proporcionalno poslovnim aktivnostima, nije uključen u TC parametar je ne zavisi od vrste primenjene tehnologije. Model polazi od ideje da TC može da se izračuna korišćenjem cena iz baza podataka prodaje proizvođača opreme sa najvećim uticajem u TV industriji. To važi za slučaj kada je u pitanju generalna procena. Kada je potrebno izvršiti procenu investicije za tačno određeni projekat i kada je poznat proizvođač opreme, onda se naravno u modelu za procenu TC , TR i tačke profitabilnosti, koriste konkretni podaci iz projekta. Sa druge strane, prihodi se prikupljaju tokom svake vremenske jedinice (mesečno, godišnje) po osnovu iznajmljivanja kapaciteta sistema prenosa. Dijagram sa slike 4.3 prikazuje u opštem slučaju dinamiku priliva prihoda i investicija tokom vremena. Pre tačke profitabilnosti, prihodi od servisa omogućenih novim tehnologijama manji su od TC i u tom periodu se beleže gubici, dok se nakon te tačke ostvaruje profit.

Pošto hoćemo da procenimo efikasnost novih tehnologija u odnosu na standardne tehnologije digitalne televizije, u ovom modelu TC predstavlja razliku investicija potrebnih za nove i standardne tehnologije. TR se računa kao prihod dobijen od servisa uvedenih sa upotrebom novih tehnologija u odnosu na standardne tehnologije. Imajući na umu ovakav pristup, TC se računa sledećom formulom:

$$TC = \Delta HeadEnd + \Delta Transmitter \quad (4.2)$$

gde su $\Delta HeadEnd$ i $\Delta Transmitter$ razlika investicija (između novih i standardnih tehnologija) u uređaje glavne stanice (u produkcionom centru) i na lokaciji predajnika. Kao što je ranije naglašeno, nove tehnologije se pojavljuju u dve varijante, MPEG-4/DVB-T (označićemo kao Slučaj MPG4T) i MPEG-4/DVB-T2 (Slučaj MPG4T2), i investicije u njih porede se sa investicijama u standardni sistem MPEG-2/DVB-T pretpostavljajući isti broj TV programa (n) po jednom MPEG multipleksu.



Slika 4.3. Opšti slučaj dinamike priliva prihoda i investicija tokom vremena

Slučaj MPG4T:

$$\Delta HeadEnd = n \times Cencmpg4 + MUX - (n \times Cencmpg2 + MUX)$$

$$\Delta HeadEnd = n \times (Cencmpg4 - Cencmpg2) \quad (4.3)$$

$$\Delta Transmitter = t \times (Cdecmpg4 + Cdvbt) - t \times (Cdecmpg2 + Cdvbt)$$

$$\Delta Transmitter = t \times (Cdecmpg4 - Cdecmpg2) \quad (4.4)$$

Slučaj MPG4T2:

$$\Delta HeadEnd = n \times Cencmpg4 + MUX - (n \times Cencmpg2 + MUX)$$

$$\Delta HeadEnd = n \times (Cencmpg4 - Cencmpg2) \quad (4.5)$$

$$\Delta Transmitter = t \times (Cdecmpg4 + Cdvbt2) - t \times (Cdecmpg2 + Cdvbt) \quad (4.6)$$

gde je n – broj SD TV programa po multipleksu; $C_{encmpg2}$ – troškovi MPEG-2 kodera; $C_{encmpg4}$ – troškovi MPEG-4 kodera; MUX – troškovi multipleksera; t – broj predajničkih lokacija; $C_{decmpg2}$ – troškovi MPEG-2 dekodera; $C_{decmpg4}$ – troškovi MPEG-4 dekodera; C_{dvbt} – troškovi DVB-T predajnika; C_{dvbt2} – troškovi DVB-T2 predajnika.

Osim promenljive n , sve ostale su nezavisne promenljive. Promenljiva n zavisi od izabranog tehničkog profila emitovanja koji određuje korisni binarni protok sistema (UBR) i zavisi od binarnog protoka jednog komprimovanog TV programa:

$$n = \lfloor UBR_{dvbt} / MPG2SD \rfloor \quad (4.7)$$

gde se UBR_{dvbt} odnosi na korisni binarni protok DVB-T profila (to je ulazni podatak koji daje planer digitalne emisije mreže) i $MPG2SD$ se odnosi na binarni protok SD TV programa sa MPEG-2 kompresijom (to je ulazni podatak koji daje najčešće provajder sadržaja). Nakon deljenja dobijeni broj se zaokružuje na manju celobrojnu vrednost. Tako se dobija broj TV programa za standardni digitalni sistem. Kako u ovom modelu računamo efikasnost u okviru jednog MPEG multipleksa, odnosno RF kanala, onda koristimo isti broj kanala (n) i za dve varijante novih tehnologija, i računamo koliko je kapaciteta ostalo u Mb/s u okviru jednog MPEG multipleksa zbog više ili manje efikasne tehnologije u smislu potrebnog binarnog protoka za postizanje istog kvaliteta servisa (QoS), u odnosu na standardne tehnologije. Ovako izračunati kapacitet u Mb/s nazivamo napredna digitalna dividenda (promenljiva a) jer se ne dobija u vidu oslobođenog spektra zbog prelaska sa analognog na digitalno emitovanje, već se dobija upotrebom efikasnije digitalne tehnologije u odnosu na drugu digitalnu tehnologiju. Promenljiva a se računa kao:

Slučaj MPG4T

$$a = UBR_{dvbt} - n \times MPG4SD - (UBR_{dvbt} - n \times MPG2SD) \quad (4.8)$$

Slučaj MPG4T2

$$a = UBRdvbt2 - n \times MPG4SD - (UBRdvbt - n \times MPG2SD) \quad (4.9)$$

gde je $UBRdvbt2$ koristan binarni protok DVB-T2 profila (to je ulazni podatak koji daje planer digitalne emisije mreže) i $MPG4SD$ je binarni protok SD TV programa sa MPEG-4 kompresijom (to je ulazni podatak koji daje najčešće provajder sadržaja).

Ako mrežni operator investira u infrastrukturu za radio-difuziju onda taj operator ima finansijske koristi (prihode) od napredne digitalne dividende jer se može koristiti za uvođenje novih servisa ili iznajmljivanje kapaciteta a iz DVB sistema drugim zainteresovanim stranama, na primer servis provajderima. Ako se koristi cenovni model prodaje internet pristupa na veliko (eng. *wholesale*) onda se taj kapacitet može prodavati internet provajderima ili kompanijama koje obezbeđuju drugi sadržaj. Ima smisla primeniti taj cenovni model jer visina pretplate za danas poznate servise podataka u DVB sistemu (DVB-H, mobilna TV ili pristup podacima) slična je kao pretplata za internet pristup, tako da je i velikoprodajna cena takođe slična. Ako mrežni operator digitalnog emisionog sistema koristi DVB mrežu za pristup IP servisima onda kapacitet u veoma atraktivnom frekvencijskom opsegu (VHF/UHF), sa uvođenjem mobilnosti i interaktivnosti (DVB-H, DVB-NGH, povratni kanal u 3G), može po ceni (po Mb/s) lako da prevaziđe velikoprodajne cene interneta.

Sada TR može da se izračuna po formuli:

$$TR = a \times REV \times Y \times 12 \quad (4.10)$$

gde je REV mesečni prihod novog servisa po Mb/s i Y je broj godina za koji se TR izračunava.

Kada se primene formule od (4.2) do (4.10) i generišu odgovarajući dijagrami lako se može odrediti tačka profitabilnosti, odnosno period nakon koga će investicija da postane profitabilna. TC izračunato formulom (4.2) ima konstantnu vrednost tokom vremena, dok je TR prema (4.10) linearna funkcija vremena (kao na dijagramu opšteg slučaja, slika 4.3).

Postoje dva moguća ograničenja u ovom algoritmu, prvo pretpostavlja se konstantan prihod po jedinici vremena tokom vremena i drugo, pretpostavlja se da je ukupni raspoloživi kapacitet za prenos a uvek kompletno angažovan, odnosno da se ostvaruje prihod. Ova ograničenja se mogu ukloniti modifikacijom formule (4.10) i u tom slučaju TR se izračunava kao:

$$REV_1 = REV \quad (4.11)$$

$$REV_i = 0,7 \times REV_{i-1} \quad (4.12)$$

$$TR = REV \times 12 \times D + \sum_{i=2}^Y REV_i \times 12 \times D \quad (4.13)$$

Ako je $Y \times D \geq a$, onda TR računamo kao

$$TR = REV \times 12 \times D + \sum_{i=2}^{i_k-1} REV_i \times 12 \times D + \sum_{i=i_k}^Y REV_i \times 12 \times a \quad (4.14)$$

gde je i_k prva celobrojna vrednost koja zadovoljava nejednakost $i_k \geq a/D$. Promenljiva D predstavlja godišnju potražnju za kapacitetom u Mb/s od servis provajdera koji iznajmljuje DVB kapacitet.

Pretpostavimo najpre da postoji promena visine pretplate na širokopoljasne servise tokom vremena, a zatim modifikaciju formula možemo vršiti direktnim prilagođavanjem za slučaj Srbije kao primer a kasnije i u opštem slučaju. Iz studije OECD [OECD10] može se zaključiti da zemlje slične veličine kao Srbija, koje su nedavno napravile tranziciju ka tržišnim ekonomijama i deregulaciju telekomunikacionog tržišta, imaju godišnji rast visine pretplate za širokopoljasne servise oko -30%. To znači da se svake godine, zbog negativnog rasta visina pretplata smanji za 30%. To je razlog zašto u formuli (4.12) prihode za narednu godinu računamo kao 70% prihoda prethodne godine. Ako uzimamo opšti slučaj koji nije vezan za Srbiju onda formula (4.12) može da se napiše kao:

$$REV_i = \left(1 - \frac{y}{100}\right) \times REV_{i-1} \quad (4.15)$$

gde je y godišnji procenat smanjenja pretplate za širokopojasne servise.

Drugo, ako pretpostavimo da napredna digitalna dividenda nije odjednom popunjena (raspoloživ kapacitet nije jednak izdatom kapacitetu), onda ukupan prihod računamo postepeno kao što je prikazano u formuli (4.13). Ako se raspoloživi kapacitet angažuje pre kraja perioda (Y) za koji se računa TR , onda se primenjuje formula (4.14).

4.3. *Unapređen model*

Iz moderne literature može se naučiti da je priroda ciklusa u tehno-ekonomskim istraživanjima veoma važna jer omogućava postepeno usavršavanje modela, a samim tim i analize [VER09]. U ovoj disertaciji primenjen je taj princip i nakon prve dve faze algoritma tehno-ekonomske analize (slika 4.1) kao i procene rada osnovnog modela, pristupilo se reviziji odnosno usavršavanju od čega je proizašao unapređen model opisan u ovom odeljku.

U ovom odeljku prikazan je model sa sledećim modifikacijama: porede se DVB-T i DVB-T2 uzimajući u obzir istu kompresiju za oba slučaja – MPEG-4, primenjena je analiza za scenario sa više multipleksa, u okviru digitalne dividende koristi se profitabilniji servis (*PayTV*) u odnosu na širokopojasni Internet, primenjuje se *Bass* model za predviđanje prihvatanja tehnologija ili servisa i, veoma važno, unapređeni model procenjuje period posle koga će biti ostvarena profitabilnost u odnosu na celu investiciju u MPEG-4/DVB-T2 tehnologije, a ne samo u odnosu na razliku u nivou investicije što je slučaj u osnovnom modelu. Pre analize unapređenog modela, potrebno je definisati kako se numerički može opisati prihvatanje tehnologije i servisa na tržištu što predstavlja važnu komponentu modela.

4.3.1. *Bass difuzioni model*

Već je istaknuto da modifikovani model koristi *PayTV* servis u okviru napredne digitalne dividende. Da bi bili procenjeni prihodi od pretplate tog servisa koji su nam potrebni za analizu gubitaka i profita, potrebno je odgovoriti na jednostavno pitanje: koja je brzina prihvatanja servisa tokom vremena (pretplatnika mesečno ili godišnje) na nekom određenom tržištu? Odgovor nije tako jednostavan, naročito ako se želi dati

precizan odgovor. Ovakvo predviđanje je teško jer ne postoje istorijski podaci za takav inovativni servis na tržištu (*PayTV* u mreži za digitalno zemaljsko emitovanje programa) na osnovu koga možemo da damo procenu brzine prihvatanja servisa. Zapravo, potrebno je da znamo kako da predvidimo na tržištu širenje (difuziju) novog servisa *pre* nego što servis počne da se nudi. Teorija koja pomaže kod ovakvih pitanja je „difuzija inovacija“ [ROG62] i najčuvaniji matematički opis te teorije je *Bass* difuzioni model opisan 1969. godine [BAS69].

Modeliranje difuzije inovacija je važna i široka tema za istraživanje. Njena važnost može da se ilustruje doslovno hiljadama različitih publikacija koje tretiraju tu temu, kao i da istraživačku oblast difuzije inovacija predstavlja više naučnika u više disciplina nego mnoge druge istraživačke teme. Ova oblast je predmet i praktičnih i akademskih istraživanja u disciplinama marketinga, inženjerstva i ekonomije. Predviđanje difuzije inovacija u mnogim slučajevima daje strateški značaj novim tehnologijama (kao DVB-T2) u okviru planiranja rasta ekonomije, ali i ne manje značajno u podršci menadžerima da preciznije planiraju strategiju povratka investicija modeliranjem razvoja potražnje servisa ili tehnologije. U ovom radu *Bass* model se koristi upravo za takve potrebe.

Popularnost *Bass* modela može se objasniti njegovom primenljivošću u praksi na veoma različite tehnologije, proizvode i usluge. Ovaj model je jednostavan jer sadrži samo tri parametra koji opisuju tri efekta:

- spoljašne efekte (koeficijent inovacije – p);
- unutrašnje efekte (koeficijent imitacije – q);
- nivo zasićenja (ukupni potencijal tržišta – m).

Pretpostavka u *Bass* modelu je da na potencijalnog korisnika inovacije utiču dva kanala komunikacije, masovni mediji (p) i međuljudski kanali (q). Ljudi prihvataju nove proizvode jer vide ili čuju reklamne poruke masovnih medija koje se kontinualno ponavljaju, ali važno je znati da taj uticaj dostiže maksimum dosta brzo u odnosu na ceo životni ciklus posmatranog proizvoda ili servisa. Što se tiče međuljudskih kanala, ljudi prihvataju proizvode na osnovu onoga što vide ili čuju od drugih ljudi koji su već ranije prihvatili proizvod.

Bass je specificirao verovatnoću individualnog prihvatanja u trenutku t (među onima koji do tada nisu kupili proizvod) u tzv funkciji rizika upotrebom jednakosti:

$$P(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = p + q \times F(t) \quad (4.16)$$

gde je $f(t)$ gustina prihvatanja u funkciji vremena (ne-kumulativni deo potencijalnog tržišta koji prihvata proizvod u trenutku t) i $F(t)$ je raspodela prihvatanja u funkciji vremena (kumulativni deo potencijalnog tržišta koji je prihvatio proizvod sve do, ali uključujući i trenutak t). Jednostavno rečeno, $f(t)$ je ne-kumulativni deo tržišta koji prihvata u trenutku t , a $F(t)$ je udeo u ukupnom potencijalnom tržištu koji je prihvatio proizvod u trenutku t , i mogu se predstaviti međusobnim odnosom:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (4.17)$$

$$F(t) = \int_{i=0}^t f(i) di, \quad F(0) = 0 \quad (4.18)$$

Ako formulu (4.17) zamenimo u (4.16) i preuredimo jednakost, dobijamo

$$\frac{dF(t)}{dt} = (p + q \times F(t)) \times (1 - F(t)) \quad (4.19)$$

diferencijalnu jednačinu koja je pored (4.15) alternativni oblik *Bass* modela. Jednačina (4.19) povezuje promenljivu $F(t)$ sa svojim prvim izvodom, $dF(t)/dt$, koji predstavlja brzinu promene $F(t)$ po vremenu t . Rešenje ove diferencijalne jednačine je:

$$F(t) = \frac{1 - e^{-(p+q) \times t}}{1 + \frac{q}{p} \times e^{-(p+q) \times t}} \quad (4.20)$$

Kao što je ranije rečeno, parametar m predstavlja ukupno tržište odnosno krajnji broj kupaca proizvoda (ili servisa) tokom ukupnog trajanja proizvoda (ili servisa) na tržištu. Pošto funkcija $f(t)$ predstavlja izgled za prihvatanjem servisa u trenutku t , a $F(t)$ je kumulativna proporcija ukupnog potencijalnog tržišta koji je prihvatio proizvod u

trenutku t , onda je broj onih koji kupuju servis u trenutku t (često se ovaj parametar naziva “prodaja” u trenutku t):

$$S(t) = m \times f(t) \quad (4.21)$$

i kumulativni broj onih koji kupuju servis do i uključujući t je:

$$Y(t) = m \times F(t) \quad (4.22)$$

U *Bass* modelu o kojem je do sada bilo reči vreme uzima kontinualne vrednosti i može biti bilo koji ne-negativan broj, pri čemu $dt \rightarrow 0$. U realnim uslovima u ovoj oblasti barata se sa bazama podataka ostvarene prodaje koji se čuvaju u različitim vremenskim jedinicama (uobičajeno mesečno ili godišnje ali svakako ne kontinualno), što dovodi do potrebe da se relacije iz kontinualnog prebace u diskretni vremenski domen gde se analiziraju diskretni trenuci od $(t-1)$ do t , koji se numerišu sa $t = 0, 1, 2, \dots$ i predstavljaju mesece ili godine. U modelu sa diskretnim vremenom formule (4.16) i (4.20) ne mogu se koristiti zajedno za predviđanje difuzije servisa jer one nisu konzistentne. Da bi se izbegla cirkularnost i relacije inkonzistentnosti, kontinualni *Bass* model je modifikovan u više različitih radova u različite diskretne forme, čak i u originalnom radu [BAS69] (iako se ta verzija često referencira ona unosi značajne numeričke greške u model). Diskretni *Bass* model koji se najviše preferira [SRI86] može se predstaviti u kratkoj formi:

$$F(t) = \frac{1 - e^{-(p+q) \times t}}{1 + \frac{q}{p} \times e^{-(p+q) \times t}} \quad (4.23)$$

$$f(t) = \begin{cases} F(t) & \text{ako } t = 1 \\ F(t) - F(t - 1) & \text{ako } t > 1 \end{cases}$$

Da bi se prognozirala difuzija servisa (brzina prihvatanja servisa) potrebno je znati tri parametra, p , q i m . Postoje tri osnovne procedure za procenu parametara modela. Dve metode koje procenjuju $p/q/m$ parametre koristeći baze podataka prodaje, su OLS (*Ordinary Least Squares*) analize linearne regresije i NLS (*Nonlinear Least Squares*) optimizacija. One se često koriste kada je servis već u upotrebi i postoje podaci prodaje. Treća metoda je za procenu p i q parametara na osnovu analogije proizvoda. Kako u našem modelu analiziramo prihode od *PayTV* servisa koga nema u DVB-T/T2 mrežama, procena prihvatanja servisa vršiće se upotrebom analogije sa parametrima drugih servisa jer nema podataka o prethodnoj prodaji. Ovaj princip je objašnjen i uspešno implementiran u [BAS01] uz doprinos preciznog predviđanja difuzije servisa satelitske televizije.

U metodu procene parametara prema analogiji, prvi korak je pronaći sličan novi servis koji je ranije uveden i za koji su korišćeni istorijski podaci da bi se procenili p i q OLS ili NLS metodom. Drugi korak je da se koriste koeficijenti procenjeni iz difuzione šeme analognog servisa. To znači da je glavni zadatak od grupe prethodno poznatih uvedenih servisa izabrati za korišćenje najbolju analogiju sa predloženim servisom. U literaturi [LIL04] postoje liste različitih kategorija industrijskih proizvoda i servisa gde se mogu naći vrednosti za p i q koeficijente. Najbolji princip za izbor analognog servisa je koristiti analogiju na bazi sličnosti u očekivanim reakcijama tržišta, što se preporučuje kao pouzdaniji pristup nego izbor na bazi sličnosti samih servisa.

4.3.2. Algoritam unapređenog modela

Da podsetimo, ekonomski profit (EP) je jednak razlici ukupnih prihoda (TR – *Total Revenue*) i (TC – *Total Cost*) ukupnih investicija kao u formuli (4.1), gde u slučaju unapređenog modela TR predstavlja prihode koji se od pretplate na *PayTV* servis prikupljaju u jedinici vremena. *PayTV* servis se ostvaruje u kapacitetu koji je omogućen upotrebom DVB-T2 u odnosu na DVB-T standard. Na osnovu relacije (4.1) procenjuje se vreme nakon kog će cela investicija biti isplaćena i to od prihoda po osnovu tehnološkog napretka.

Kako želimo da procenimo tačku profitabilnosti za investicije u infrastrukturu sa novim tehnologijama (MPEG-4/DVB-T2), u ovom modelu TC se računa po formuli:

$$TC = HeadEnd + Transmitter \quad (4.24)$$

gde su *HeadEnd* i *Transmitter* nivoi investicija u opremu produkcionog centra i predajničkih lokacija, koji se računaju kao:

$$HeadEnd = n \times Cencmpg4 + MUX \quad (4.25)$$

$$Transmitter = t \times k \times (Cdecmpg4 + Cdvbt2) \quad (4.26)$$

U jednakostima (4.25) i (4.26) uvedene su promenljive: *n* – broj TV programa za definisanu zonu pokrivanja, *Cencmpg4* – troškovi MPEG-4 koda, *MUX* – troškovi multipleksa, *t* – broj predajničkih lokacija, *k* – broj multipleksa, *Cdecmpg4* – troškovi MPEG-4 dekodera, *Cdvbt2* – troškovi DVB-T2 predajnika.

Osim promenljive *k* sve druge promenljive predstavljaju nezavisne ulazne podatke. Promenljiva *k* zavisi od promenljive *j₁* koja zavisi od izabranog tehničkog profila emitovanja koji određuje korisni binarni protok sistema (*UBR*) i zavisi od binarnog protoka jednog komprimovanog TV programa:

$$j_1 = \lfloor UBR_{dvbt} / MPG4SD \rfloor \quad (4.27)$$

gde se *UBR_{dvbt}* odnosi na korisni binarni protok DVB-T profila (to je ulazni podatak koji daje planer digitalne emisije mreže) i *MPG4SD* se odnosi na binarni protok SD TV programa sa MPEG-4 kompresijom (to je ulazni podatak koji daje najčešće provajder sadržaja). Nakon deljenja dobijeni broj se zaokružuje na manju celobrojnu vrednost. Broj TV programa po jednom multipleksu u DVB-T sistemu predstavlja se promenljivom *j₁*. Sada *k* možemo odrediti iz nejednakosti

$$k \times j_1 \geq n \quad (4.28)$$

i to kao prvi pozitivan ceo broj koji zadovoljava (4.28). Broj TV programa po jednom multipleksu u DVB-T2 sistemu predstavlja se promenljivom j_2 i računa se kao

$$j_2 = \lfloor UBR_{dvbt2}/MPG4SD \rfloor \quad (4.29)$$

gde se UBR_{dvbt2} odnosi na korisni binarni protok DVB-T2 profila (to je ulazni podatak koji daje planer digitalne emisione mreže). Nakon deljenja dobijeni broj se zaokružuje na manju celobrojnu vrednost.

Unapređeni model koristi scenario sa više multipleksa koji podržava emitovanje n TV programa za definisanu zonu servisa. Broj multipleksa i RF kanala se definiše promenljivom k – nejednakost (4.28), ako se koristi DVB-T standard. Zbog tehnoloških inovacija analiziranih u prethodnom poglavlju, a koje koristi DVB-T2 standard, broj TV programa po jednom multipleksu u DVB-T2 (j_2) veći je nego u DVB-T (j_1) tako da je potreban broj multipleksa i RF kanala za emitovanje n TV programa za definisanu zonu servisa, manji za DVB-T2 nego za DVB-T (ili u najgorem slučaju jednak). Uprkos toj činjenici, unapređeni model procenjuje nivo investicija u infrastrukturu (TC) ako se koristi k multipleksa i RF kanala u DVB-T2 sistemu, dakle isti broj kao i za DVB-T jer se ovde simulira scenario gde je upotrebljen broj RF kanala isti za oba standarda, a samim tim isti je nivo investicija u godišnje licence za korišćenje frekvencijskih kanala. Imajući na umu ovakav pristup, nakon emitovanja potrebnog broja ne-zaštićenih TV programa (n), u DVB-T2 sistemu preostaje slobodan kapacitet od $(k \times j_2 - n)$ i u DVB-T $(k \times j_1 - n)$ TV programa u kojima se može emitovati *PayTV* servis. Pošto želimo da procenimo koliko se brzo vraća investicija u DVB-T2 na osnovu prihoda rezultiranih tehnološkim inovacijama i manjim kapacitetom potrebnim za isti broj TV programa, sada računamo vrednost promenljive a (napredna digitalna dividenda) čija jedinica mere nije Mb/s nego broj TV progama:

$$a = (k \times j_2 - n) - (k \times j_1 - n) \quad (4.30)$$

$$a = k \times (j_2 - j_1)$$

TR je prihod generisan od novih tehnologija u odnosu na standardne tehnologije. Kada mrežni operator investira u infrastrukturu onda taj operator ubire prihode od napredne digitalne dividende kapaciteta a koja je dobijena upravo primenom inovacija. Korist se ogleda kroz prihod od pretplate na $PayTV$ servis za a TV programa. Kumulativni prihod koji se prikuplja nakon M meseci (TR_M) računa se kao:

$$TR_M = a \times P \times \sum_{t=1}^M SUB_t \quad (4.31)$$

gde $\sum_{t=1}^M SUB_t$ predstavlja sumu kumulativnog broja pretplatnika koji plaćaju servis tokom celog perioda (od prvog do M -tog meseca) i promenljiva P je mesečni profit DVB mrežnog operatora po jednom $PayTV$ programu po pretplatniku. SUB_t je kumulativni broj pretplatnika u trenutku t koji se računa prema diskretnom Bass modelu upotrebom formula (4.22) i (4.23). P je ulazna promenljiva koja u osnovi predstavlja razliku između mesečne cene DVB operatora za $PayTV$ program za pretplatnika i velikoprodajne mesečne cene provajdera sadržaja za maloprodaju (DVB operator) po pretplatniku. U promenljivu P uključeni su troškovi tehničke realizacije rešenja (i na predaji i na prijemu) za uslovni pristup (skremblovanje) programa. Vrednost parametra P varira dosta u zavisnosti od: ekonomske situacije u zemlji, stanju tržišta televizijske industrije, efikasnosti poslovanja DVB operatora, tipa sadržaja (holivudski filmski hitovi, košarkaška NBA liga ili engleska fudbalska liga...), da li je $PayTV$ servis povezan sa drugim servisima (internet, telefon) ili ne, željenog profita...

Kada se koristi ovaj model, nivo investicija se računa po formuli (4.24), a prihodi po formuli (4.31), i uz pridružene ostale formule dolazi se do TC i TR u funkciji vremena i rezultati se mogu prezentovati na dijagramu. Uz ove proračune i dijagram lako možemo da utvrdimo tačku profitabilnosti, odnosno period nakon kog investicija postaje profitabilna.

4.3.3. Varijacija unapređenog modela

Uvođenjem novog izvora prihoda unapređeni model može se dalje usavršiti. Zbog velike atraktivnosti UHF frekvencijskog spektra za operatore bežičnih mreža,

varijacijom unapređenog modela uvodi se nova komponenta prihoda od izdavanja frekvencijskog spektra operatorima bežičnih mreža. Frekvencijski spektar se oslobađa jer se primenjuju efikasnije najnovije tehnologije u radio-difuziji, a prihodi se realizuju kroz proces aukcije za određene delove spektra. U ovoj varijaciji modela zadržava se izračunavanje ukupnih investicija TC prema formulama (4.24), (4.25) i (4.26). Sa druge strane, ukupni prihodi TR se računaju kombinovanjem prihoda od $PayTV$ servisa i prihoda od aukcije frekvencijskog spektra. U ovom scenariju DVB-T multipleks se kompletno ispunjava TV programima predviđenim za definisanu zonu pokrivanja. Broj tih TV programa (n) računa se prema formuli

$$n = k \times j_1 \quad (4.32)$$

gde je k ulazna promenljiva (broj multipleksa) a j_1 (broj TV programa po jednom multipleksu DVB-T sistema) se računa prema formuli (4.27). Ako se umesto DVB-T primeni DVB-T2 standard za isti broj TV programa (n) za definisanu zonu pokrivanja, onda će potreban broj multipleksa biti najmanji ceo broj koji je veći ili jednak n/j_2 ($\lceil n/j_2 \rceil$). Promenljiva j_2 (broj TV programa po jednom multipleksu DVB-T2 sistema) izračunava se prema formuli (4.29). Ako se upotrebom DVB-T2 sistema implementira k multipleksa i RF UHF kanala, onda se digitalna dividenda sastoji od dve komponente.

Prva komponenta predstavljena je celim brojem (b) UHF kanala od 8 MHz koji se računa kao razlika između implementiranog broja multipleksa k i potrebnog broja multipleksa za n TV programa ako se koristi DVB-T2 $\lceil n/j_2 \rceil$.

$$b = k - \lceil n/j_2 \rceil \quad (4.33)$$

Ukupni frekvencijski spektar [MHz] koji donosi b UHF kanala iznosi

$$c = b \times 8 \quad (4.34)$$

Razvoj širokopojasnog mobilnog pristupa servisima omogućava se brojnim preporukama i odlukama međunarodnih i evropskih institucija koje se bave razvojem oblasti elektronskih komunikacija. U mnogim zemljama mobilni širokopojasni pristup se smatra rešenjem za problem zaostajanja u fiksnom širokopojasnom pristupu. Iz tih razloga neke članice Evropske unije (Nemačka, Švedska, ...) već su sprovele aukcije spektra u UHF frekvencijskom opsegu (790-862 MHz) koji se u Evropi preporučuje za servise digitalne dividende. Taj frekvencijski opseg, koji se često naziva opseg 800 MHz, privlači veliku pažnju industrije mobilnih komunikacija jer su propagacione karakteristike opsega ispod 1 GHz bolje za pokrivanje velikih zona izvan urbanih područja, a bolje su i za penetraciju u zgradama u gusto naseljenim područjima. Ovaj spektar naročito može biti profitabilan ako bi se koristio za četvrtu generaciju mobilnih telekomunikacionih sistema 3GPP LTE. Imajući to na umu, u varijaciji unapređenog modela upravo LTE tehnologija koristi dobitak u vidu frekvencijskog spektra (c) u MHz koji je omogućen primenom najnaprednijih tehnologija (MPEG-4/DVB-T2). LTE je projektovan za širine kanala do 20 MHz, odnosno za kanale širine 1.25, 2.5, 5, i 10 MHz. Kanali mogu da se koriste kao upareni (FDD – *Frequency Division Duplex*) ili neupareni (TDD – *Time Division Duplex*). U ovom modelu koriste se upareni kanali $2 \times 2,5 \text{ MHz} = 5 \text{ MHz}$ za LTE mobilne aplikacije. Broj uparenih kanala za LTE koji mogu da popune oslobođeni UHF spektar c (prva komponenta digitalne dividende) računa se prema

$$d = \lfloor c/5 \rfloor \quad (4.35)$$

što dovodi do raspoloživog spektra (S u MHz) za aukciju

$$S = d \times 5 \quad (4.36)$$

Cena za frekvencijski spektar najčešće se izražava u €/MHz/glavi stanovnika države (€/MHz/pop). Postoje velike oscilacije u cenama što uglavnom zavisi od frekvencijskog opsega i od države u kojoj se primenjuje. Uobičajeno je da licenca za korišćenje

frekvencija traje 10 do 15 godina. U ovoj disertaciji odgovarajuća cena za spektar (PS) se procenjuje na osnovu analiza i baze podataka vrednosti spektra [ZEH10] gde PS predstavlja ulaznu promenljivu.

Konačno, prvu komponentu digitalne dividende (MBA) koja dolazi od aukcijskih prihoda za frekvencije širokopojasnog mobilnog pristupa, računamo kao

$$MBA = PS \times S \times POP \quad (4.37)$$

gde POP predstavlja broj stanovnika države.

Druga komponenta digitalne dividende u ovom variranom modelu, je prihod od $PayTV$ servisa saglasno formuli (4.31). Sada se broj $PayTV$ programa (a) računa kao razlika broja TV programa u okviru potrebnog broja multipleksa za n besplatnih TV programa ako se koristi DVB-T2 ($[n/j_2] \times j_2$) i broja TV programa (n) za definisanu zonu pokrivanja

$$a = [n/j_2] \times j_2 - n \quad (4.38)$$

Sada se ukupni prihod može izračunati po formuli

$$TR = MBA + TR_M = PS \times S \times POP + a \times P \times \sum_{t=1}^M SUB_t \quad (4.39)$$

gde se S i a računaju prema formulama (4.36) i (4.38), respektivno, a $\sum_{t=1}^M SUB_t$ se računa na isti način kao u unapređenom modelu.

5. *Rezultati simulacije predloženog modela*

U prethodnom poglavlju predložen je model za procenu efikasnosti izbora tehnologije digitalne televizije. Model je definisan u obliku matematičkih formula čijim se sukcesivnim izvršavanjem dolazi do rezultata koji se dalje mogu analizirati. Definisane su dve verzije modela, osnovni i unapređeni, a unapređena verzija ima i jednu varijaciju. U ovom poglavlju prikazani su rezultati simulacije ovih verzija modela za slučaj mrežnog operatora u Srbiji. U ovom poglavlju definisani su ulazni podaci za model, kako tehnički tako i oni koji su vezani za geografske, organizacione, ekonomske i tržišne specifičnosti Srbije. Model se uspešno može primeniti i na neku drugu zemlju i operatora ako se izvrši odgovarajući izbor ulaznih parametara.

5.1. *Rezultati simulacije osnovnog modela*

Pored ulaznih podataka koje obezbeđuju planeri mreža za emitovanje digitalnih TV programa i provajderi sadržaja, ključne promenljive za model su troškovi neophodni za nabavku odgovarajuće opreme (koderi, dekoderi, multiplekseri, predajnici). Da bi se model primenio koristeći realne podatke iz televizijske industrije, izabrano je prema

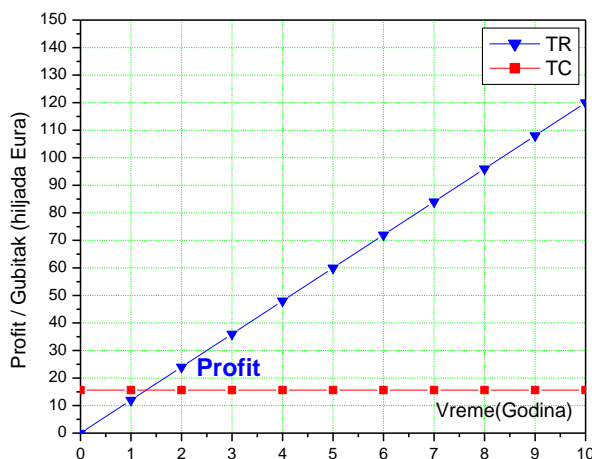
najboljem znanju autora nekoliko uticajnih proizvođača opreme u ovoj oblasti ali takođe i prema spremnosti za saradnju na ovom istraživanju. Za pomenutu opremu vredne informacije dobijene su od predstavnika kompanija *Rohde & Schwarz*, *Tandberg Television* i *Harris Corporation*. Promenljiva *REV* uzima vrednosti prema cenovnom modelu velikoprodaje internet pristupa. U ovom odeljku procenjuju se nivoi investicija i prihoda na osnovu modela opisanog u odeljku 4.2. *Osnovni model*. Što se tiče promenljive *TR*, u ovoj simulaciji primenjuje se formula (4.10) a ne formule (4.11) – (4.14) koje definišu *TR* generalnog modela jer se razmatra samo specijalni slučaj kada je konstantan prihod tokom vremena i kada je celokupan raspoloživi kapacitet dividende odmah i odjednom izdat. Troškovi za investiranje u opremu procenjeni su na osnovu lista cena pomenutih kompanija. Za ostale ulazne podatke opisanog modela, uzete su vrednosti koje odgovaraju tržištu Srbije ali se mogu primeniti i na neke druge zemlje slične veličine, tehničkih zahteva i ekonomske snage. Te promenljive uzimaju sledeće vrednosti: $MPG2SD = 5$ Mb/s; $MPG4SD = 2,5$ Mb/s; $UBR_{dvbt} = 24,1$ Mb/s (DVB-T konfiguracija iz table 5.1); $UBR_{dvbt2} = 40,1$ Mb/s (DVB-T2 konfiguracija iz table 5.1); $t = 12$ (broj glavnih predajničkih lokacija televizijskog mrežnog operatora u Srbiji [LAC08], različiti nacionalni emiteri u Srbiji imaju različit broj predajničkih lokacija); $REV = 100$ Euro (velikoprodajna cena širokopojasnog pristupa po Mb/s za Srbiju [SRB09B]). U tabeli 5.1 date su konfiguracije u odnosu na tabelu 3.1 pri čemu je DVB-T2 modifikovana. U DVB-T pilot projektu u Srbiji konfiguracija je kao u tabeli 5.1 ali sa tom razlikom što se koristi GI $\frac{1}{4}$ [LAC08]. Upotreba tog GI je nepotrebno velika i gubi se dosta na kapacitetu. Ako za potrebe simulacije u ovoj disertaciji primenimo GI $\frac{1}{32}$ kao u tabeli 5.1 i dalje postoji dovoljno velika zaštita od ISI (trajanje zaštitnog intervala od 28 μ s) a dobija se kapacitet od 24,1 Mb/s (povećanje binarnog protoka za više od 4 Mb/s). Zaštita od ISI je svakako dovoljna jer na primer u UK već više od deset godina za MFN uspešno se koristi mod 2K i GI $\frac{1}{32}$ što daje dužinu od 7 μ s. To je četiri puta manje nego u našem primeru a kontinentalni deo UK se ne razlikuje mnogo od srpskog reljefa. Dakle, za potrebe simulacije za DVB-T standard koristimo konfiguraciju tabele 5.1. Što se tiče DVB-T2 konfiguracije ona je promenjena u tabeli 5.1 u odnosu na tabelu 3.1 jedino u kodnom količniku za LDPC, sa $\frac{3}{5}$ na $\frac{2}{3}$. Analize pokrivanja pokazuju da je neznatan dobitak u veličini zone pokrivanja, ali da je dobitak

u kapacitetu kanala oko 4 Mb/s, tako da je za potrebe simulacije uzeta konfiguracija DVB-T2 kao u tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Kapacitet prenosa DVB-T i DVB-T2 standarda – primer za mrežu u Srbiji

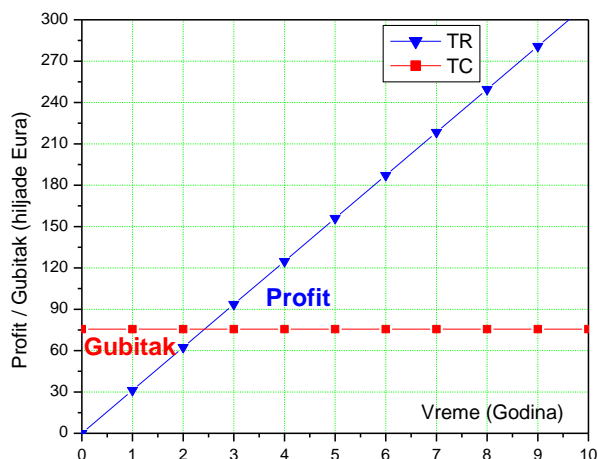
	DVB-T	DVB-T2
Modulacija	64QAM	256QAM
FFT veličina	8K	32K
Zaštitni interval	1/32	1/128
FEC	2/3CC + RS	2/3LDPC + BCH
Mod nosioca	standardni	prošireni
Kapacitet	24,1 Mb/s	40,1 Mb/s

Kada se osnovni model primeni na Srbiju i to Slučaj MPG4T (MPEG-4/DVB-T u odnosu na MPEG-2/DVB-T) uzimajući u obzir pomenute vrednosti za odgovarajuće promenljive, dobijamo dijagram 5.1. Sa slike se može uočiti da se tačka profitabilnosti dostiže nakon nešto više od jedne godine od trenutka puštanja mreže i servisa u rad. Broj SD TV programa po multipleksu je četiri i kapacitet napredne digitalne dividende je 10 Mb/s.



Slika 5.1. Analiza profita i gubitaka za Slučaj MPG4T

Dijagram za Slučaj MPG4T menja svoj izgled kada se osnovni model primeni na Slučaj MPG4T2 u Srbiji uzimajući u obzir ponovo gorepomenute vrednosti za odgovarajuće promenljive (slika 5.2). Sa dijagrama se vidi da se u Slučaju MPG4T2 tačka profitabilnosti dostiže nakon nešto manje od dve i po godine od trenutka puštanja mreže i servisa u rad. Broj SD TV programa po multipleksu je ponovo četiri ali kapacitet napredne digitalne dividende se povećao na 26 Mb/s.



Slika 5.2. Analiza profita i gubitaka za Slučaj MPG4T2

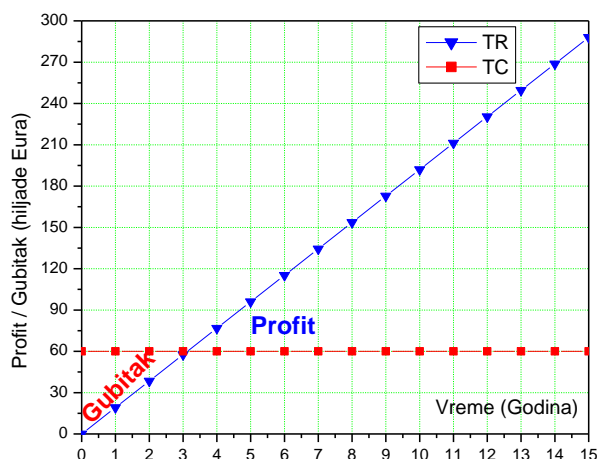
Analizirajući rezultate proračuna osnovnog modela za Slučaj MPG4T i MPG4T2 u Srbiji možemo zaključiti sledeće:

Slučaj MPG4T: Razlika u tehnologijama koje se porede je samo u sistemu kompresije, sistem emitovanja je isti – DVB-T. Zbog vrlo male razlike u ceni, u Slučaju MPG4T izbor sigurno pada na MPEG-4 kompresiju jer je moguće preneti više servisa, a prihodi od tih servisa dostižu povećane investicije (zbog nove tehnologije) nakon oko jedne godine što MPEG-2 kompresiju čini manje atraktivnom u ovoj komparaciji.

Slučaj MPG4T2: Kada se uvede DVB-T2 tehnologija vidimo da se razlika u nivou investicija povećava u odnosu na Slučaj MPG4T, ali ipak sistem dostiže profitabilnost za manje od dve i po godine jer prihodi stižu brže zbog više servisa koje dopušta DVB-T2 u odnosu na DVB-T.

Na osnovu diskusije vidi se da upotreba kombinacije tehnologija MPEG-2/DVB-T ne može više lako da se opravda. Sada ima smisla porediti direktno kombinacije tehnologija MPEG-4/DVB-T2 i MPEG-4/DVB-T. Ako se koriste isti ulazni parametri

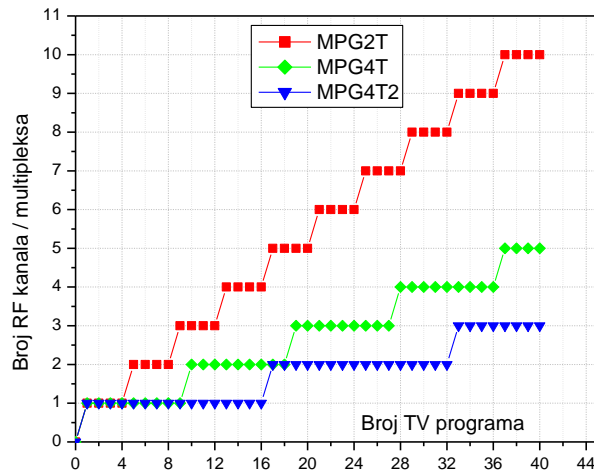
kao za slučajeve MPG4T i MPG4T2 onda se dobija prema osnovnom modelu dijagram na slici 5.3.



Slika 5.3. Analiza profita i gubitaka za MPEG-4/DVB-T2 i MPEG-4/DVB-T

Broj SD TV programa po multipleksu u oba sistema sada je devet (jedan pun DVB-T multipleks sa MPEG-4 kompresijom) i u ovom slučaju napredna digitalna dividenda je 16 Mb/s. Profitabilnost se postiže nakon tri godine, što ima smisla da treba duže nego u slučaju MPG4T2 jer sada međusobno poredimo nove tehnologije gde je dobitak u kapacitetu manji (kao i prihodi) nego kada se poređenje vrši sa tehnologijama prethodne generacije. Naravno, odluka da li će se u scenariju osnovnog modela koristiti MPEG-4/DVB-T2 ili MPEG-4/DVB-T prevashodno zavisi od trenutnih planiranih budžeta za investiranje i raspodele investicija u dekadi nakon donošenja odluke.

Ako želimo da poredimo efikasnost tehnologija uz upotrebu više od jednog multipleksa, treba prvo da izračunamo broj RF kanala / multipleksa koji su potrebni za prenos određenog broja TV programa koristeći vrednosti za promenljive koje smo koristili i u prethodnim primerima [SUG11]. Na slici 5.4 prikazani su rezultati proračuna potrebnog broja kanala za određen broj programa.



Slika 5.4. Zavisnost potrebnog broja RF kanala od broja TV programa za različite tehnologije

Na osnovu dijagrama i bez simulacije osnovnog modela, može se za komparaciju MPEG-4/DVB-T2 i MPEG-4/DVB-T tehnologija zaključiti sledeće: ako se koristi više od devet programa za nacionalno pokrivanje onda će, čak i bez prihoda po osnovu tehnički efikasnije tehnologije, MPEG-4/DVB-T2 kombinacija biti profitabilna od prvog dana puštanja mreže u rad jer kada se koriste nove tehnologije potrebno je zauzeti manje kapaciteta za prenos, odnosno manje RF kanala što znači i manje odgovarajuće opreme za prenos signala da bi se zadovoljio isti zahtevani broj TV programa za oba slučaja. Ova konstatacija nije tačna samo za slučajeve sa 17 i 18 TV programa jer je tada za obe kombinacije tehnologija potreban isti broj kanala (dva) i tada se očekuje profitabilnost slično kao za slučaj jednog multipleksa, čak i brže (jer je napredna digitalna dividenda duplo veća).

5.2. Rezultati simulacije unapređenog modela

Nakon procene rezultata simulacije osnovnog modela izvršena je revizija tog modela. U prethodnom poglavlju revidiran model je definisan kao unapređena verzija jer koristi zaključke analize prvih simulacija osnovnog modela i traži rešenja za realnije scenarije, kao što je upotreba više multipleksa, zatim za naprednu digitalnu dividendu koriste se servisi iz iste industrije (*PayTV*), a procena isplativosti se vrši u odnosu na celu investiciju što ulagače najviše i interesuje.

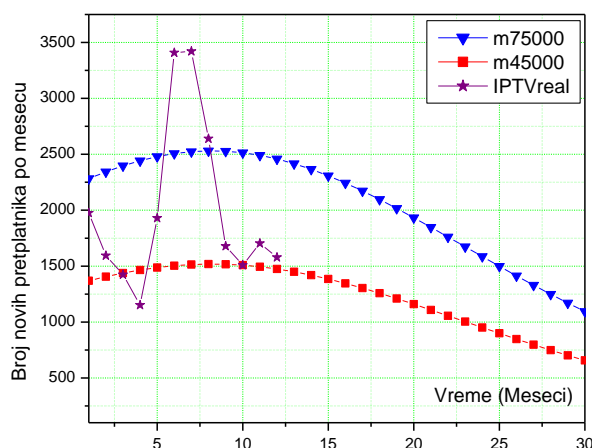
U prethodnom poglavlju analizirana je upotreba *Bass* modela za procenu brzine prihvatanja novih servisa. U ovom odeljku gde se prikazuju rezultati simulacije unapređenog modela, definisaćemo tri parametra *Bass* modela za *PayTV* servis za Srbiju upotrebom pristupa analogije servisa. Sledeći ovaj pristup koji je definisan uz unapređeni model, dolazi se do zaključka da treba tragati za servisima koji su na neki način vezani za TV industriju a da je tržište reagovalo slično kao što bi na *PayTV*. Servisi koji su identifikovani kao takvi su: kolor TV, zemaljski prenos televizije, satelitska i kablovska TV kao i IPTV. Među svim ovim servisima izabrana je kablovska TV kao najbližnja *PayTV* jer je po svojoj prirodi servis sa pretplatom. Ostali servisi se mogu primati ako se samo antena uperi u dobrom pravcu i prijemnik podesi za prijem, osim IPTV. Razlog zašto nije izabran IPTV je zato što u literaturi nema dovoljno pouzdanih podataka za p i q parametre *Bass* modela jer je to prilično nov servis (ima istoriju kraću od deset godina). U poslednje vreme pojavljuju se istraživanja [RAD11] koja daju mogućnost da se naročito u Srbiji IPTV servis uzme kao referentan za procenu penetracije telekomunikacionih servisa. Parametri za kablovsku TV mogu se naći u literaturi, $p = 0,100$ i $q = 0,060$ [LIL04]. Analizirajući dalje ovu analogiju u smislu sličnosti očekivane reakcije tržišta, može se identifikovati značajna razlika između izabrane kablovske TV i *PayTV*. *PayTV* je dodatni servis koji dolazi uz osnovne besplatne TV programe primljene preko digitalne mreže, dok pretplatnik kablovske TV plaća pretplatu za ceo paket (osnovni + dodatni programi) i obično nema drugog načina da lokacija sa kablovskim priključkom dobije TV program. Ova činjenica čini *PayTV* na neki način luksuzom za televizijsko tržište u odnosu na kablovsku TV kao osnovni TV servis. Zato se može zaključiti da vrednost parametra imitacije q za kablovsku TV ne treba menjati za potrebe *PayTV* jer on odražava snagu internih uticaja u industriji koji se ne menjaju zbog utvrđene činjenice (luksuz). Međutim, parametar inovacije p treba promeniti jer p se smatra parametrom na koji značajno utiče marketinška kampanja operatora (uticaj mas medija) i ako *PayTV* tretiramo kao luksuz onda uticaj masovnih medija neće biti tako visok kao za kablovsku TV jer predstavlja osnovnu potrebu (reklamiranje ima veći uticaj na tržište za proizvode osnovne namene nego za luksuznu robu). Iz tog razloga vrednost parametra p za potrebe ove simulacije definisano je $p=0,03$ kao prosečna vrednost parametra za dugačku listu različitih proizvoda i tehnologija [LIL04]. Ta vrednost je manja od one za kablovsku TV i kako p zavisi od

politike marketinške kampanje koja može dosta da varira, ima smisla primeniti prosečnu vrednost.

Sa druge strane, ako koristimo metod izbora parametara *Bass* modela putem analogije, uputno je proceniti parametar m (maksimalan, krajnji broj pretplatnika) nezavisno od primene ovog modela [BAS01]. Postoje različite opcije za to: procena se može dobiti na osnovu analitičke prognoze, marketinškim istraživanjem, ili predviđanjem na osnovu testiranja logike i pretpostavki koje stoje iza procene (kao što je na primer Delfi metod – *Delphi Method* [LIN75]). Ako se iz bilo kog razloga ove opcije ne koriste (iako mogu biti optimistične za upotrebu u *Bass* modelu), često menadžment kompanije (u našem slučaju operatora) procenjuje parametar m na osnovu jake intuicije o veličini tržišta. U mnogim slučajevima ta odluka je podržana podacima istraživanja korisnika o njihovoj nameri da postanu pretplatnici [BAS01]. Iako postoji veza sa stvarnim ponašanjem, dobro je poznato da izražena namera precenjuje realno ponašanje prilikom pretplaćivanja na servis. Kod unapređenog modela procene efikasnosti tehnologija digitalne televizije, potrebno je da se proceni krajnji broj pretplatnika u Srbiji za *PayTV* servis preko digitalne zemaljske radio-difuzne mreže.

Procena počinje od broja domaćinstava u Srbiji kojih trenutno ima oko 2,5 miliona dok oko jedan milion domaćinstava koristi servis kablovske TV [RAT11] koji verovatno neće prelaziti na prijem programa preko difuznog zemaljskog sistema. Znači da ostaje oko 1,5 miliona potencijalnih domaćinstava za prijem digitalnih TV programa preko UHF antene. U [BAS01] uspešno je predviđeno da će u krajnjem ishodu 16% domaćinstava sa televizorom prihvatiti prijem satelitskog TV servisa od jednog američkog operatora. Ako se uzme ova uspešna procenu kao referentna za slučaj *PayTV* servisa, onda se može reći da je nerealno optimistično pretpostaviti da će 16% potencijalnih domaćinstava za prijem digitalnih TV programa preko UHF antene u Srbiji prihvatiti *PayTV*. Uzimajući u obzir da je *PayTV* izvor dodatnog TV programa a ne ukupni paket, procena u ovoj disertaciji je da će istaknuti procenat biti četiri puta manji nego u [BAS01] odnosno 4% potencijalnih domaćinstava u Srbiji će prihvatiti *PayTV* preko digitalne difuzne mreže. To nas dovodi do cifre od oko 60.000 pretplatnika kad servis bude bio u zasićenju. U ovoj disertaciji za potrebe simulacije unapređenog modela koristiće se parametar m sa vrednostima koje su za 15.000 iznad i ispod izračunate cifre, tj $m = 45.000$ i $m = 75.000$).

Za simulaciju diskretnog *Bass* modela koriste se formule (4.21), (4.22) i (4.23) da bi se procenio mesečni rast *PayTV* pretplatničke baze i kumulativni broj onih koji prihvataju servis što je ulazna promenljiva za simulaciju unapređenog modela za procenu prihoda napredne digitalne dividende i efikasnosti DVB-T2 tehnoloških unapređenja. Za slučaj Srbije, kao što je prethodno objašnjeno, uzimaju se koeficijenti za *Bass* model $p = 0,030$, $q=0,060$, uz variranje parametra m , $m = 45.000$ i $m = 75.000$. Na slici 5.5 ilustrovana je implementacija *Bass* modela upotrebom upravo pomenutih parametara i prikazana procena prodaje servisa *PayTV* tokom vremena ako se koriste dve vrednosti za m . Treća kriva predstavlja informaciju o realnoj prodaji tokom vremena IPTV servisa u Srbiji. Od kolega iz Telekoma Srbija dobijeni su podaci o prodaji IPTV servisa koji je raspoloživ na tržištu od 2009. godine. Kriva pokazuje broj novih pretplatnika za svaki mesec tokom prve godine (2009/10) pružanja usluge. Ako uporedimo procenu za *PayTV* sa stvarnim podacima za IPTV vidimo da IPTV (uz kablovsku TV) zaista ima najviše sličnosti sa *PayTV*. Sa druge strane, sada imamo realne podatke o prodaji servisa u Srbiji koji je uveden vremenski najbliže uvođenju *PayTV* od bilo kog drugog TV servisa u Srbiji. Imajući to u vidu, kao i sličan trend za procenjeni broj novih *PayTV* pretplatnika i realnu prodaju IPTV servisa, možemo zaključiti da su parametri za *Bass* model dobro izabrani.



Slika 5.5. Broj novih pretplatnika *PayTV* servisa mesečno u Srbiji prema *Bass* difuzionom modelu

Dalje, za simulaciju unapređenog modela koristimo ulazne podatke koje daju planeri mreže $UBR_{dvbt} = 24,1$ Mb/s i $UBR_{dvbt2} = 40,1$ Mb/s (korisni binarni protok za DVB-T

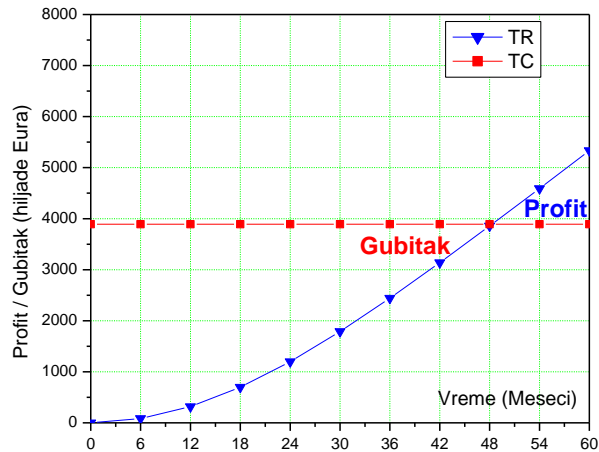
i DVB-T2 konfiguracije iz tabele 5.1), ulazne podatke provajdera sadržaja $MPG4SD = 2,5$ Mb/s (MPEG-4 binarni protok za SD TV), formule (4.27), (4.28) i (4.29), kao i dijagram sa slike 5.4 (broj RF kanala za određen broj TV programa u zavisnosti od primenjene tehnologije). Na osnovu vrednosti očitanih sa slike 5.4 i upotrebom formule (4.30) određuje se napredna digitalna dividenda a koja zavisi od broja TV programa za definisanu zonu servisa n . Pored ulaznih podataka od planera mreže i provajdera sadržaja, kao i kod osnovnog modela koriste se podaci o troškovima za nabavku odgovarajuće opreme dobijene od srpskih lokalnih predstavnika pomenutih kompanija (za izračunavanje TC). Za potrebe simulacije unapređenog modela ponovo je uzeto 12 kao broj glavnih predajničkih lokacija u Srbiji pri čemu se taj parametar sada označava sa t . Naravno, različiti nacionalni emiteri imaju različit broj predajnika.

$\sum_{t=1}^M SUB_t$ je suma kumulativnog broja pretplatnika izračunatih upotrebom diskretnog Bass modela (formule (4.22) and (4.23)), sa koeficijentima $p = 0,030$, $q = 0,060$ i varijacijom parametra m , $m = 45.000$ i $m = 75.000$.

Konačno, P je ulazna promenljiva koju nije lako proceniti jer zavisi od zaista mnogo različitih faktora. U ovoj disertaciji za tržište Srbije ona je procenjena uzimajući u obzir: velikoprodajnu cenu koju efikasni operator može da priušti da plati (ne tako ekskluzivan sadržaj), lokalni troškovi poslovanja operatora, nivo pretplate za slične servise (IPTV od telekom operatora), usluga se ne dobija u paketu sa drugim servisima i potreba da se na kraju ostvari zarada. Uzimajući sve ovo u obzir, vrednosti koje koristi simulacija za P (profit od jednog *PayTV* programa po pretplatniku za mesec dana) su 0,1€ i 0,2 €.

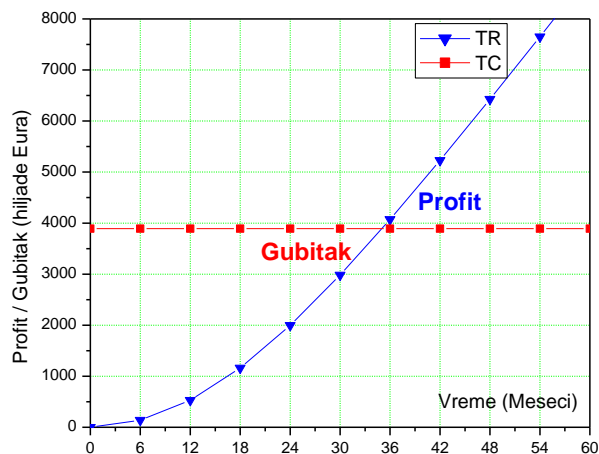
Za projekat digitalnog zemaljskog emitovanja u Srbiji procenjen broj TV programa za definisanu zonu pokrivanja (n) je 33, i na osnovu vrednosti očitanih sa slike 5.4 i upotrebom formule (4.30) određuje se broj TV programa za jedan multipleks za DVB-T - $j_1 = 9$, broj TV programa za jedan multipleks za DVB-T2 - $j_2 = 16$, $k = 4$ broj multipleksa / RF kanala i $a = 28$ TV programa. Rezultati simulacije unapređenog modela analize profita i gubitaka izvedene za slučaj Srbije, prikazani su na sledeća četiri dijagrama. Izuzev dve promenljive (P i m) sve imaju konstantne vrednosti definisane u ovom odeljku. Komercijalni parametar P i tržišni parametar m uzimaju se sa po dve različite vrednosti.

Na slici 5.6 prikazan je dijagram nivoa investicija (TC) i prihoda (TR) ako je $P = 0,1$ i $m = 45.000$, gde se vidi da se tačka profitabilnosti postiže oko 48 meseci nakon puštanja mreže u rad i aktiviranja servisa.



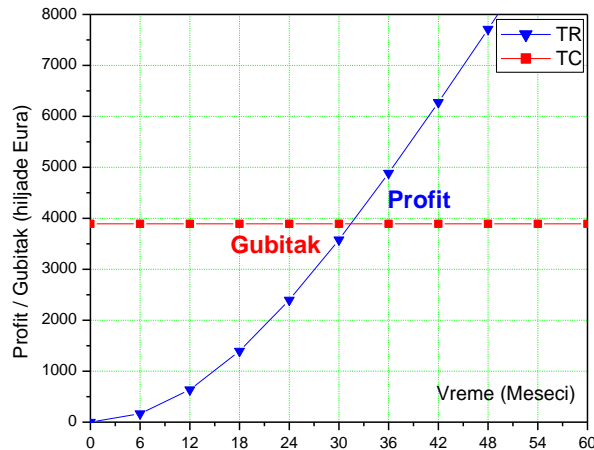
Slika 5.6. Simulacija unapređenog modela za $P = 0,1$ i $m = 45.000$

Na slici 5.7 prikazan je dijagram nivoa investicija (TC) i prihoda (TR) ako je $P = 0,1$ i $m = 75.000$, gde se vidi da se tačka profitabilnosti postiže oko 35 meseci nakon puštanja mreže u rad i aktiviranja servisa.



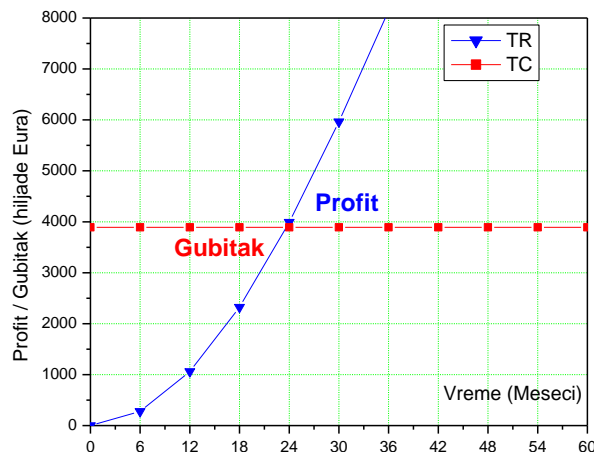
Slika 5.7. Simulacija unapređenog modela za $P = 0,1$ i $m = 75.000$

Na slici 5.8 prikazan je dijagram nivoa investicija (TC) i prihoda (TR) ako je $P = 0,2$ i $m = 45.000$, gde se vidi da se tačka profitabilnosti postiže oko 32 meseci nakon puštanja mreže u rad i aktiviranja servisa.



Slika 5.8. Simulacija unapređenog modela za $P = 0,2$ i $m = 45.000$

Na slici 5.9 prikazan je dijagram nivoa investicija (TC) i prihoda (TR) ako je $P = 0,2$ i $m = 75.000$, gde se vidi da se tačka profitabilnosti postiže oko 24 meseci nakon puštanja mreže u rad i aktiviranja servisa.



Slika 5.9. Simulacija unapređenog modela za $P = 0,2$ i $m = 75.000$

Analizirajući rezultate proračuna profita i gubitaka za Srbiju, možemo zaključiti sledeće: da bi se ispunio zahtev za brojem TV programa za definisano pokrivanje ($n = 33$), broj RF kanala treba da je $k = 4$ za oba standarda (DVB-T/T2), i zbog tehnoloških

inovacija DVB-T2 može da obezbedi $a = 28$ više *PayTV* programa nego DVB-T. U tom slučaju, simulacija unapređenog modela izračunava tačku profitabilnosti između dve i četiri godine nakon lansiranja servisa, uzavisnosti od izabranih parametara P i m . Najbrža profitabilnost cele investicije u infrastrukturu postiže se za $P = 0,2$ i $m = 75.000$ slučaj (dve godine) i najsporija za $P = 0,1$ i $m = 45.000$ slučaj (četiri godine). Pošto je unapređeni model nelinearan, može se videti sa dijagrama da dupliranjem mesečnog profita P za *PayTV* po pretplatniku po programu (razlika maloprodajne i velikoprodajne cene servisa) ne može se prepoloviti vreme do tačke profitabilnosti (ukupni profit). U zavisnosti od krajnjeg broja pretplatnika servisa, vreme do ukupnog profita se smanjuje sa 48 na 32 meseca za $m = 45.000$, dok se to vreme skraćuje sa 53 na 24 meseca za $m = 75.000$. Sa druge strane, ako skoro prepolovimo maksimalni broj pretplatnika (sa 75.000 na 45.000) vreme do ukupnog profita se povećava sa 35 na 48 meseci za $P = 0,1$, dok se to vreme povećava sa 24 na 32 meseca za $P = 0,2$.

Varijacija unapređenog modela opisana u prethodnom poglavlju, daje nove mogućnosti prihodovanja. Simulacija *varijacije unapređenog modela* daje rezultate (predstavljene u nastavku teksta) kada se pored *PayTV* servisa za potrebe dodatnih prihoda sprovodi i aukcija za deo oslobođenog frekvencijskog spektra prema definisanom modelu.

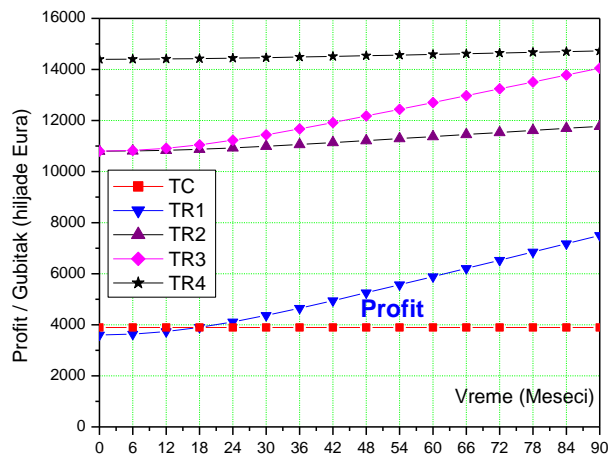
Vrednosti ulaznih parametara iste su kao kod simulacije unapređenog modela izuzev promenljive n , koja ne predstavlja više ulazni podatak već se izračunava preko formule (4.32). U ovoj varijaciji ulazna promenljiva je k (broj multipleksa) i ona može imati vrednosti pozitivnih celih brojeva. Za potrebe simulacije uzete su četiri vrednosti za k , i to 4, 5, 6 i 7. Upotrebom ove četiri vrednosti dobiće se dijagrami sa po četiri krive ukupnih prihoda TR (obeležene TR_1 , TR_2 , TR_3 i TR_4). Ukupne investicije TC se računaju upotrebom formula (4.24), (4.25) i (4.26). Model zatim koristi formule (4.27), (4.29) i (4.32) za dobijanje vrednosti j_1 , j_2 i n , respektivno. Da bi se izračunao raspoloživi spektar za aukciju S , koriste se formule (4.33)-(4.36), a za izračunavanje broja a *PayTV* programa, formula (4.38). Sada se formulom (4.37) izračunava vrednost prve komponente digitalne dividende MBA koja zavisi od prihoda od aukcije frekvencijskog spektra. Da bi se to izračunalo potrebne su još dve ulazne vrednosti, PS i POP . Definisanje POP je mnogo lakše jer je to statistička vrednost i prema upravo završenom popisu stanovništva u Srbiji 2011. godine, preliminarni rezultati govore da u zemlji živi 7,2 miliona stanovnika. Što se tiče cene spektra PS , tu vrednost je potrebno proceniti jer

se u Srbiji licence za frekvencijski spektar nisu prodavale aukcijskim procesom. Nakon analize podataka iz [ZEH10] procenjena vrednost za PS za opseg 800 MHz u Srbiji iznosi 0,1€/MHz/pop. To je vrlo konzervativna procena jer je motiv bio da se ne uzme velika vrednost čime bi se nerealno povećao prihod ove komponente. Na primer, vrednost 0,1€/MHz/pop je oko sedam puta manja od one koja je postignuta na aukciji u Nemačkoj u maju 2010. godine za opseg 800 MHz dok je slična cena na istoj aukciji postignuta za opseg 2 GHz (uobičajeno je da se plaća manja cena za više opsege nego za 800 MHz). Konzervativna cena je procenjena i zato što se u Srbiji ne očekuje dolazak novog mobilnog operatora (samo postojeća tri operatora će se nadmetati) kao i zbog toga što će se 800 MHz spektar barem u početku koristiti za ruralna područja gde ne postoji jak poslovni podsticaj (trenutna pokrivenost i kapaciteti u urbanim područjima su veoma dobri).

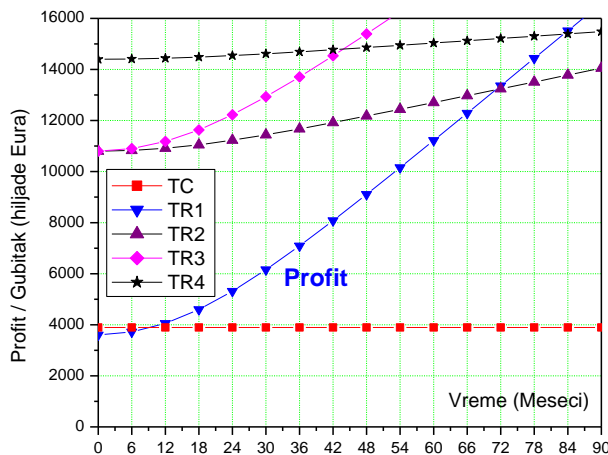
Konačno, ukupni prihodi se računaju formulom (4.39) gde se koriste iste vrednosti $Bass$ parametara kao u prethodnoj simulaciji. Rezultati su prikazani na slici 5.10 (za $P = 0,1$ i $m = 45.000$) i slici 5.11 (za $P = 0,2$ i $m = 75.000$). Na oba ova dijagrama nalaze se po četiri krive za TR , gde TR_1 odgovara $k = 4$, TR_2 odgovara $k = 5$, TR_3 odgovara $k = 6$ i TR_4 odgovara $k = 7$.

Dijagram sa slike 5.10 pokazuje da se investicija u DVB-T2 vraća odmah ako je broj multipleksa veći od 4. Kada je broj multipleksa jednak 4 i broj programa n jednak 36, sa DVB-T2 standardom dobija se jedan UHF kanal više ($2 \times 2,5$ MHz za LTE) i 12 TV programa za $PayTV$ servis (kriva TR_1), i profitabilnost se postiže 18 meseci nakon aukcije i lansiranja $PayTV$ servisa. U ostala tri slučaja profitabilnost se ostvaruje odmah nakon aukcije. Broj $PayTV$ programa ima najjači uticaj na profit tokom vremena. Ako se promeni maksimalan broj pretplatnika $PayTV$ servisa sa 45.000 na 75.000, kao i ako se profit od jednog $PayTV$ programa po pretplatniku mesečno promeni sa $P = 0,1$ € na $P = 0,2$ €, onda se simulacijom dobijaju rezultati kao na slici 5.11. Rezultati su slični kao na prethodnoj slici ali prihodi od $PayTV$ servisa dolaze brže. Zbog toga, u slučaju $k = 4$ i $n = 36$ (kriva TR_1) profitabilnost se postiže posle 9 meseci nakon aukcije i lansiranja $PayTV$ servisa. I ovde se u ostala tri slučaja (TR_2 , TR_3 i TR_4) profitabilnost ostvaruje odmah nakon aukcije, ali se vrednosti profita povećavaju brže nego na slici 5.10. Ako nismo zainteresovani samo za to kada će se ostvariti profitabilnost već i za to koliki će biti profit tokom vremena, na primer posle 3 ili 6 godina, sa slike 5.11 vidi se da će

posle 6 godina vrednost profita za slučaj TR_1 prevazići vrednost profita za slučaj TR_2 iako je početni prihod za TR_1 tri puta manji nego za slučaj TR_2 . Na ovaj način, predikcijom uz simulacioni model, menjajući tehnološke profile za DVB-T i DVB-T2, zatim MPEG-4 binarni protok, kao i broj multipleksa k , moguće je kontrolisati profitabilnost tokom vremena (bilo da hoćemo brzu profitabilnost ali sa manjim vrednostima tokom vremena ili odloženu profitabilnost sa većim vrednostima u kasnijoj fazi).



Slika 5.10. Simulacija varijacije unapređenog modela za $P = 0,1$ i $m = 45.000$



Slika 5.11. Simulacija varijacije unapređenog modela za $P = 0,2$ i $m = 75.000$

Nakon ove diskusije nameće se zaključak da tehnološka unapređenja DVB-T2 standarda snažno utiču na tehničku i ekonomsku efikasnost prilikom strateškog planiranja projekata i njihovih realizacija u praksi. Ako je infrastruktura za radio-difuziju bazirana i dalje na analognoj tehnologiji onda nakon ove analize, za izabrani slučaj simulacije, nema opravdanja da se ne implementira DVB-T2 standard jer pored tehnološke superiornosti vraća uložene investicije za par godina (samo uz *PayTV* servis) ili čak odmah (ako se doda i prihod od prodaje frekvencijskog spektra), u zavisnosti od tržišnih i komercijalnih procena i okolnosti. Naravno, model može biti primenjen na bilo koju drugu zemlju ili tržište, ali sa različitim DVB-T/T2 tehničkim profilom, različitim parametrima *Bass* difuzionog modela i drugim tehničkim, tržišnim i komercijalnim vrednostima promenljivih.

6. Zaključak

Traganje za novim putevima i tehnologijama u telekomunikacijama doveli su i do razvoja digitalizacije obrade i prenosa televizijskih signala. Proces digitalizacije sistema emitovanja TV programa zahteva revolucionarne promene koje je potrebno detaljno analizirati i ispitati iz različitih uglova [RELJ08] jer implementacija novih televizijskih tehnologija ima uticaj ne samo na tehničku efikasnost sistema već i na druge aspekte funkcionisanja televizijskih mreža [SUG12], čak ima i širi društveno ekonomski značaj.

Naime, nakon analize u ovoj disertaciji zaključujemo da ako digitalnu dividendu, dobijenu uvođenjem digitalnih televizijskih tehnologija, koristimo za uvođenje širokopojasnih servisa, povećavamo penetraciju tih servisa, a samim tim i BDP po stanovniku [WB09]. To znači da upotreba naprednih digitalnih tehnologija u televiziji

povećava BDP po stanovniku, što je jedan od najvažnijih ciljeva razvoja telekomunikacija svake zemlje uključujući i Srbiju. Analizom je utvrđeno da ako u trenutku prelaska na digitalno emitovanje 90% stanovništva bude pokriveno tim signalom [SRB09A], u Srbiji zbog uvođenja novih servisa u DVB-T/T2 mrežu, povećanje BDP po stanovniku trebalo bi biti oko 5%.

U ovoj disertaciji strategija digitalizacije emitovanja programa se analizira sa ciljem maksimalnog iskorišćenja digitalne dividende, pri čemu se najveći učinak postiže korišćenjem sledećih elemenata: efikasne kompresije koja obezbeđuje smanjenje binarnog protoka po TV programu, efikasnog standarda za prenos koji obezbeđuje povećanje binarnog protoka u jednom TV kanalu, više SFN mreža koje efikasnije koriste frekvencijski spektar i arhitekture mreže sa ubacivanjem velikog broja lokalnih TV programa.

U okviru dva najvažnija procesa za prelazak na digitalno zemaljsko emitovanje, kompresije i prenosa, postoji mogućnost izbora različitih tehnologija, MPEG-2 [ITU00] ili MPEG-4 verzija 10 [ITU10] i DVB-T [ETSI09] ili DVB-T2 [ETSI11A].

Nakon pregleda novih tehnika kompresije, u disertaciji je istaknut zaključak da MPEG-4 standard za isti kvalitet video signala zahteva manji protok bita nego MPEG-2 sistem kodovanja [FIS10]. Pored toga, pogodnost je da u okviru pripreme TV signala za prenos – multipleksiranja, mogu da se koriste isti multiplekseri za obe tehnologije kompresije, i MPEG-2 i MPEG-4. Poboľšanja koja su došla sa MPEG-4 tehnologijom kompresije praktično znače da je sada SDTV program umesto sa MPEG-2 4 Mb/s moguće kodovati sa 2 Mb/s binarnim protokom. Kod HDTV programa umesto 20 Mb/s sa MPEG-2 kompresijom moguće je kodovati sa manje od 10 Mb/s sa MPEG-4.

Sa druge strane, što se tiče tehnologija za emitovanje TV signala, analizirani su DVB-T i DVB-T2 standardi, pri čemu je posebna pažnja posvećena analizi onih elemenata koji poboljšavaju performanse DVB-T2 prenosa digitalne televizije u odnosu na DVB-T (OFDM u radio-difuziji, zaštitno kodovanje, raznovrsnost parametara za podešavanje performansi sistema, robusnost specifična za određeni servis, unapređena modulacija, Alamuti diverziteti tehnika, približavanje teoretski maksimalnom kapacitetu prenosa, direktna kompatibilnost sa IP mrežama) [DVB10]. Tehnološki napredak koji se postiže DVB-T2 standardom ide ka maksimiziranju binarnog protoka u kanalu za prenos. U

disertaciji je istaknuto povećanje kapaciteta DVB-T2 u odnosu na DVB-T za obe mrežne konfiguracije (MFN i SFN) u slučajevima kada se ostvaruje ista zona pokrivanja i isti kvalitet prijema signala. Povećanje je naročito značajno u SFN mrežama.

Analizom tehnologija zaključujemo da je za postizanje QEF kvaliteta DVB-T2 efikasniji u korišćenju frekvencijskog spektra, kao i da je njegov signal robusniji u prenosu od DVB-T odgovarajućeg signala. Ako poredimo spektralnu efikasnost u, na primer, Rajsovom kanalu uz isti *SNR* za oba standarda, onda za DVB-T dobijamo protok od 30 Mb/s, dok za DVB-T2 dobijamo 50 Mb/s, odnosno povećanje protoka podataka za skoro 70%. Sa druge strane, ako poredimo robusnost signala i fiksiramo protok na približno isti nivo za oba standarda, onda je za isti Rajsov kanal za DVB-T potreban *SNR* od 17,3 dB, dok je za DVB-T2 potreban *SNR* od 9,1 dB, odnosno potrebna je znatno manja snaga (oko 8 dB).

Četvrti faktor koji utiče na maksimiziranje digitalne dividende je arhitektura mreže. U disertaciji su predložena tri modela za arhitekturu mreže koja je zasnovana na IP/MPLS tehnologiji. U modelu CM svi TV programi, i nacionalni i lokalni, multipleksiraju se centralno. U modelu CMRA ponovo se svi TV programi, i nacionalni i lokalni, multipleksiraju centralno, ali u lokalnim centrima postoji filtriranje programa. U modelu RM samo nacionalni TV programi se multipleksiraju centralno, a u regionalnim centrima postoje lokalni multipleksi gde se programi lokalno ubacuju u sistem.

Uporedna analiza (vrednovanje parametara Ponuda lokalnih sadržaja, Složenost po regionima, Zahtevi u pogledu video transporta, Veličina digitalne dividende) daje rezultate iz kojih zaključujemo da je najbolje rešenje model RM (lokalni sadržaj ubačen lokalno) jer iako u odnosu na model CMRA ima veću složenost po regionima (cena opreme stalno opada i brzina obrade signala stalno raste) - ima manje zahteve za kapacitetom u mreži. Drugi kriterijum je značajniji jer će u budućnosti zahtevi za kapacitetom u mreži stalno da rastu.

Kada je uveden novi DVB-T2 standard (2009. godine) često se dešavalo da su radio-difuzne ustanove i mrežni TV operatori skeptični po pitanju novih standarda jer je izgledalo da se možda sa uvođenjem novog standarda zakasnilo - DVB-T je već postao široko rasprostranjen nakon više od decenije u upotrebi. Međutim, DVB-T2 tehnologije pružaju veći kapacitet u istom kanalu i oni koji sada uvode digitalno emitovanje TV

programa imaju idealnu priliku da izaberu standard koji neće skoro zastareti (približno se teoretski idealnim performansama sistema - Šenonovoj granici) [SHA48]. Oni emiteri koji već koriste DVB-T imaju jake razloge da uvedu i DVB-T2, a u budućnosti da potpuno pređu na novi standard. Spektralna efikasnost telekomunikacionih tehnologija postala je veoma važna u savremenim multimedijalnim komunikacijama i UHF frekvencijski opseg koji koriste TV servisi postaje veoma atraktivan za operatore mobilnih mreža jer obezbeđuje povoljne uslove propagacije signala. Iz inženjerskog ugla gledano, trebalo bi da su tehničke karakteristike ključne za izbor (i ove) tehnologije, međutim u poslednje vreme komercijalna isplativost i raspoloživost servisa nose prevagu u strateškom odlučivanju.

Moderni pravci razvoja upravljanja strateškim procesima [LAM06] [VER09] usmeravaju i ovo istraživanje na analizu prednosti i mana ne samo tehnološkog aspekta uvođenja novih standarda, već i ekonomsko-tržišnog aspekta koji u oblasti informacionih i komunikacionih tehnologija (ICT) sve češće ima presudan uticaj na *konačan* izbor primenjenih standarda. U disertaciji je naglašen multidisciplinarni pristup ovom problemu jer istraživanje obuhvata i ne-tehnološke aspekte razvoja digitalne televizijske mreže.

Tehnološka superiornost novih standarda kompresije i emitovanja (MPEG-4 i DVB-T2) jasno je istaknuta u radu. Ipak, dolazi se do dileme za izbor jer složenost novih standarda, izostanak iskustva u implementaciji tih tehnologija, i mali izbor proizvođača nove opreme u prvo vreme smanjuje izgleda za masovniju primenu iste. Pored toga, dugoročne posledice kapitalnih investicija su veoma važne jer jednom uvedena tehnologija treba da bude u upotrebi dugi niz godina, a da zadovolji sve veći zahtevani kvalitet i kapacitet novih multimedijalnih servisa [SUG12].

Za temeljnu procenu efikasnosti izbora tehnologije u telekomunikacionom i radio-difuznom sistemu, pored analiza tehnologija potrebno je napraviti istinski tehnokoekonomski pristup u planiranju odgovarajuće mreže. Planiranje može biti kratkoročno (uticaj odluka na ukupne investicije i prihode je zanemarljiv, npr konfigurisanje uređaja), zatim srednjeročno (uticaj na investicije i prihode je prilično veliki, npr dimenzionisanje sistema), i dugoročno tj strateško planiranje koje se odnosi na nacionalnu mrežu i ima odlučujući uticaj na ukupne investicije i prihode (npr izbor tehnologije) [VER09]. Pored

informacija o mogućim tehnologijama, za strateško planiranje postoje još dva osnovna ulazna podatka. Jedan predstavlja uticaj tržišta i odnosi se na nivo potražnje korisnika za servisima zasnovanih na novim aplikacijama [ROG62] što pretočeno u tehnički jezik predstavlja nivo potrebnog kapaciteta prenosa. Drugi je trošak nabavke odgovarajuće opreme (komercijalni uticaj). U ovoj disertaciji predstavljen je algoritam tehnno-ekonomske analize procene efikasnosti izbora tehnologije za strateško planiranje mreže koji je u saglasnosti sa principima dugoročnog planiranja.

Nakon istraživanja [SUG11] [SUG12] [RELJ09A] [RELJ09B] [RELJ11] razvijeno je jedno rešenje problema izbora tehnologije digitalne televizije, koje primenjuje matematički model. Model koristi tehnološke, ekonomske i tržišne parametre koji opisuju različite postojeće sisteme. Upotrebom modela može se sveobuhvatno vrednovati sistem i precizno proceniti korist od digitalne dividende koja se dobija upotrebom najnovijih tehnologija.

Algoritam tehnno-ekonomske analize ima četiri osnovne faze [DEM86]: analiza problema, modeliranje, procena rada modela, revizija (usavršavanje) modela. Cilj istraživanja je ostvaren razvojem modela (na bazi algoritma) čijom se simulacijom može proceniti efikasnost izbora različitih tehnologija koje stoje na raspolaganju u oblasti digitalne televizije. U okviru analize, nakon prikupljanja podataka, problem je podeljen na delove: analiza prethodnih istraživanja u ovoj oblasti, pronalaženje izvora informacija o potencijalnim tehnologijama, analiza regulative u radio-difuziji i širokopolasnim telekomunikacijama, saradnja sa proizvođačima opreme (analiza troškova investiranja), saradnja sa operatorima mreža i emiterima (istraživanje o parametrima mreže), pronalaženje alata za podršku rešavanja definisane analize, prikupljanje statističkih podataka o tržištu.

Ključna tema za rešavanje problema procene efikasnosti je analiza performansi tehnologija kompresije i posebno DVB-T/T2 prenosa [RELJ09A] [RELJ09B]. U okviru te analize identifikovana su tehnološka poboljšanja kada se porede različite kombinacije standarda, a u ovom zaključku predstavljeni su primeri povećanog kapaciteta za prenos koji se koristi za uvođenje novih servisa.

Pre modeliranja koncipiran je idejni projekat, definisana topologija mreže za digitalno emitovanje TV programa i mrežni parametri koji utiču na rad modela. U okviru

modeliranja koristi se tzv *bottom-up* princip koji polazi od zahteva za servisima, a mreža se dimenzioniše tako da krajnji korisnici imaju prijem servisa u propisanom kvalitetu. Ovakav pristup u modeliranju izabran je jer se planira nova mrežna infrastruktura, a tada se mreža optimizuje u smislu najveće efikasnosti u eksploataciji. U algoritmu se na osnovu pregleda postojećih tehnologija definišu parametri digitalnog radio-difuznog sistema koji daju numerički opis karakteristika različitih sistema sa stanovišta tehno-ekonomske analize. Na osnovu ovako definisanih parametara formira se model [SUG11].

Sam model za procenu efikasnosti tehnologija predstavljen je u vidu matematičkih formula čijim se sukcesivnim izvršavanjem sprovodi algoritam tehno-ekonomske analize. Model poredi kombinacije različitih tehnologija i procenjuje njihovu efikasnosti i to za tri tipične kombinacije: MPEG-2/DVB-T (koristi se u zemljama koje duže vreme imaju digitalnu zemaljsku televiziju), i naprednih tehnologija MPEG-4/DVB-T (Slučaj MPG4T), odnosno MPEG-4/DVB-T2 (Slučaj MPG4T2). Tehnički parametri sistema se određuju tako da se za svaku kombinaciju tehnologija dobija isti kvalitet servisa za istu zonu pokrivanja ali, u zavisnosti od tehničke efikasnosti primenjene kombinacije, na raspolaganju su različiti kapaciteti za prenos servisa. Koncept modela polazi od procene troškova radio-difuznog sistema ako se koriste nove tehnologije, MPEG-4/DVB-T i MPEG-4/DVB-T2, a zatim se ti troškovi porede sa troškovima za standardni digitalni sistem emitovanja, MPEG-2/DVB-T. Radi poređenja tehnologija određuju se troškovi uspostavljanja sistema (investicije), formira se razlika troškova tehnologija koje se porede, i ta razlika investicija (ili cela investicija) se poredi sa prihodima koji se u modelu računaju na osnovu dobiti od uštede u kapacitetu prenosa (prihodi koji nastaju od novih servisa omogućenih upotrebom novih tehnologija). Primenom predloženog modela može se eksplicitno odrediti tačka preseka kriva troškova i prihoda u vremenu, od koje počinje period profitabilnosti (engl. *break-even point*) jedne od posmatranih tehnologija koje se porede odnosno nove infrastrukture za radio-difuziju. Osnovni model proračunava parametre sistema za slučaj difuzije jednog TV paketa – multipleksa. Dobit od uštede u kapacitetu prenosa ogleda se u dodatnim servisima koji su u osnovnom modelu ilustrovani kroz prenos podataka [SUG11].

Priroda ciklusa u tehno-ekonomskim istraživanjima veoma je važna jer omogućava postepeno usavršavanje modela, što je primenjeno u ovoj disertaciji. Nakon prve dve

faze algoritma, kao i procene rada osnovnog modela, pristupilo se reviziji odnosno usavršavanju od čega je proizašao *unapređen* model. Unapređen model ima sledeće modifikacije u odnosu na osnovni model: porede se DVB-T i DVB-T2 uzimajući u obzir istu kompresiju za oba slučaja – MPEG-4, koristi se više od jednog multipleksa, digitalna dividenda koristi profitabilniji servis (*PayTV*) u odnosu na širokopoljasni internet, zatim primenjuje se *Bass* difuzioni model za predviđanje broja korisnika koji prihvataju novu tehnologiju ili servis [BAS69] [BAS01] i unapređeni model procenjuje period posle koga će biti ostvarena profitabilnost u odnosu na celu investiciju u MPEG-4/DVB-T2 tehnologije, a ne samo u odnosu na razliku u nivou investicije što je slučaj u osnovnom modelu. Veoma važna komponenta unapređenog modela je primena *Bass* diskretnog modela [SRI86] na tehno-ekonomsku analizu izbora tehnologija digitalne televizije.

Kao što je istaknuto, u disertaciji su definisana dva modela, osnovna i unapređena verzija koja ima jednu varijaciju. Za ove modele izvršena je simulacija koja je primenjena na televizijsko tržište Srbije, ali se može primeniti i na druga tržišta uz prilagođenje ulaznih parametara. Za primer Srbije definisani su ulazni podaci za simulaciju: tehnički, geografski, organizacioni, ekonomski i tržišni. Kao izvor informacija o ulaznim podacima koriste se mrežni operatori, provajderi TV sadržaja, multipleks operatori i proizvođači opreme za ceo sistem.

Nakon analize rezultata proračuna *osnovnog* modela za Slučaj MPG4T i MPG4T2 u Srbiji, možemo zaključiti sledeće:

Slučaj MPG4T: Razlika u tehnologijama koje se porede je samo u sistemu kompresije, sistem emitovanja je isti – DVB-T. Zbog vrlo male razlike u ceni, u Slučaju MPG4T izbor sigurno pada na MPEG-4 kompresiju jer je moguće preneti više servisa, a prihodi od tih servisa dostižu povećane investicije (zbog nove tehnologije) nakon oko jedne godine što MPEG-2 kompresiju čini manje atraktivnom u ovoj komparaciji.

Slučaj MPG4T2: Kada se uvede DVB-T2 tehnologija vidimo da se razlika u nivou investicija povećava u odnosu na Slučaj MPG4T, ali ipak sistem dostiže profitabilnost za manje od dve i po godine jer prihodi stižu brže zbog više servisa koje dopušta DVB-T2 u odnosu na DVB-T.

Iz ovih rezultata vidi se da upotreba kombinacije tehnologija MPEG-2/DVB-T ne može više lako da se opravda. Ako se porede direktno kombinacije tehnologija MPEG-4/DVB-T2 i MPEG-4/DVB-T i koriste isti ulazni parametri kao za slučajeve MPG4T i MPG4T2 onda se prema osnovnom modelu dobija devet SDTV programa po multipleksu u oba sistema (jedan pun DVB-T multipleks sa MPEG-4 kompresijom) i u ovom slučaju napredna digitalna dividenda je 16 Mb/s. Tri godine je potrebno do profitabilnosti, što je nešto duže nego u slučaju MPG4T2 ali ima smisla jer sada međusobno poredimo novije tehnologije gde je dobitak u kapacitetu (kao i prihodi) manji nego kada se poređenje vrši sa tehnologijama prethodne generacije.

Nakon procene rezultata simulacije osnovnog modela izvršena je revizija tog modela. U ovom zaključku već je naglašeno da je revidiran model definisan kao unapređena verzija osnovnog i koristi rezultate analize prvih simulacija osnovnog modela, a nudi rešenja za realnije scenarije. Za procenu brzine prihvatanja servisa u mreži tokom vremena upotrebljava se *Bass* difuzioni model za koji su određeni parametri prilagođeni za *PayTV* servis u Srbiji [SUG12].

Analizirajući rezultate simulacije unapređenog modela za Srbiju, možemo zaključiti: da bi se ispunio zahtev za 33 TV programa za definisano pokrivanje, potrebno je četiri RF kanala za oba standarda emitovanja (DVB-T/T2), i zbog tehnoloških inovacija DVB-T2 može da obezbedi 28 više *PayTV* programa nego DVB-T. U tom slučaju, simulacija unapređenog modela izračunava tačku profitabilnosti koja se nalazi u opsegu između dve i četiri godine nakon lansiranja servisa, u zavisnosti od izabranih parametara P (mesečni profit DVB mrežnog operatora po jednom *PayTV* programu po pretplatniku izražen u evrima) i m (ukupno tržište odnosno krajnji broj kupaca servisa tokom ukupnog trajanja servisa na tržištu). Simulacija je izvršena za četiri kombinacije ovih parametara. Za predložene ulazne podatke, profitabilnost cele investicije u infrastrukturu postiže se u najkraćem roku za vrednosti $P = 0,2$ i $m = 75.000$ (dve godine), a na profitabilnost se najduže čeka za vrednosti parametara $P = 0,1$ i $m = 45.000$ (četiri godine). Unapređeni model je nelinearan i može se videti sa dijagrama prikazanih u radu da dupliranjem mesečnog profita P za *PayTV* po pretplatniku po programu (razlika maloprodajne i velikoprodajne cene servisa) ne može se prepoloviti vreme do tačke profitabilnosti (ukupni profit). U zavisnosti od krajnjeg broja pretplatnika servisa, vreme do ukupnog profita se smanjuje sa 48 na 32 meseca za $m =$

45.000, dok se to vreme skraćuje sa 53 na 24 meseca za $m = 75.000$. Sa druge strane, ako skoro prepolovimo maksimalni broj pretplatnika (sa 75.000 na 45.000) vreme do ukupnog profita se povećava sa 35 na 48 meseci za $P = 0,1$, dok se to vreme povećava sa 24 na 32 meseca za $P = 0,2$.

Unapređeni model se dalje usavršava varijacijom prihoda od digitalne dividende gde se pored *PayTV* servisa istovremeno uvodi i aukcijska prodaja oslobođenog frekvencijskog spektra za potrebe širokopojasnog mobilnog pristupa četvrte generacije [SUG12]. Rezultati simulacije ovog modela za Srbiju pokazuju da se investicija u DVB-T2 vraća odmah ako je broj multipleksa veći od 4. Kada je broj multipleksa jednak 4, sa DVB-T2 standardom profitabilnost se postiže 18 ili 9 meseci nakon aukcije i lansiranja *PayTV* servisa, što zavisi od izbora parametara *Bass* modela i profita po *PayTV* kanalu. Pored toga, uz ovaj simulacioni model, sa različitim tehnološkim profilima za DVB-T i DVB-T2, zatim MPEG-4 binarnim protocima, kao i brojem multipleksa k , može se predvideti vrednost profita tokom vremena (bilo da hoćemo brzu profitabilnost ali sa manjim vrednostima tokom vremena ili odloženu profitabilnost sa većim vrednostima u kasnijoj fazi).

Prilikom planiranja i realizacije strateških projekata digitalne televizijske mreže, tehnološka unapređenja ostvarena u MPEG-4 i DVB-T2 standardima snažno utiču na tehničku i ekonomsku efikasnost celog sistema. Ako je infrastruktura za radio-difuziju bazirana na analognoj tehnologiji, onda nakon ove analize nema dilema da je potrebno implementirati DVB-T2 standard jer pored predstavljenih tehnoloških poboljšanja, za izabrani slučaj simulacije u Srbiji uložene investicije se vraćaju za par godina (prihodi su od *PayTV* servisa) ili u nekim slučajevima čak odmah (ako se frekvencijski spektar prodaje na aukciji), naravno u zavisnosti od tržišnih i komercijalnih procena i okolnosti. Model može biti primenjen kod bilo kog mrežnog operatora, sa različitim tehničkim, tržišnim i komercijalnim vrednostima promenljivih, kao i različitim parametrima *Bass* difuzionog modela i regulative za aukcijsku prodaju frekvencijskog spektra, koji se prilagođavaju na okolnosti neke druge zemlje.

Doprinosi ove disertacije oblasti telekomunikacija, a naročito digitalne televizije su sledeći:

- Analiza i komparacija tehnologija digitalne televizije;
- Predlog različitih arhitektura televizijskih mreža i izbor optimalne strukture mreže;
- Definisanje algoritma tehno-ekonomske analize problema strateškog planiranja digitalne televizijske mreže;
- Razvoj *osnovnog* modela za procenu efikasnosti izbora tehnologija digitalne televizije;
- Razvoj *unapređenog* modela i njegove varijacije za procenu efikasnosti izbora tehnologija digitalne televizije;
- Adaptacija parametara diskretnog *Bass* difuzionog modela za servis *PayTV* u okviru zemaljskog emitovanja digitalnog televizijskog programa u Srbiji.

Literatura

- [ALA98] S. M. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications," *IEEE Journal on Select Areas in Communications*, Vol. 16, No. 8, pp. 1451-1458, October 1998.
- [BAS01] F. M. Bass, K. Gordon, T. Ferguson and M. Githens, "DIRECTV: Forecasting Diffusion of a New Technology Prior to Product Launch," *INTERFACES*, Vol. 31, No. 3, pp. S82-S93, 2001.
- [BAS69] F. M. Bass, "A new Product Growth for Model Consumer Durables," *Management Science*, Vol. 15, No. 5, pp. 215-227, 1969.
- [BRO08] T. X. Brown, D. C. Sicker, "Examining the Viability of Broadband Wireless Access under Alternative Licensing Models in the TV Broadcast Bands," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2008, Article ID 470571, 2008.
- [DEM86] W. E. Deming, *Out of the crisis*, (Cambridge, Mass.: MIT Center for Advanced Engineering Study), p. 88, 1986.

- [DVB08] DVB Report, “TM-H NGH Study mission report (Final),” TM-NGHSM055r1, June 2008.
- [DVB10] DVB Blue Book, “Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2),” DVB Document A133, June 2010.
- [ETSI00] ETSI Technical Report, “Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the use of MPEG-2 Systems, Video and Audio in satellite, cable and terrestrial broadcasting applications” ETSI TR 101 154 V1.4.1, July 2000.
- [ETSI06] ETSI European Standard (Telecommunications series), “Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers,” ETSI EN 300 401 V1.4.1, January 2006.
- [ETSI09] ETSI European Standard (Telecommunications series), “Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television,” ETSI EN 300 744 V1.6.1, January 2009.
- [ETSI11A] ETSI European Standard, “Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2),” ETSI EN 302 755 V1.2.1, February 2011.
- [ETSI11B] ETSI Technical Specification, “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation” ETSI TS 136 211 V10.2.0, June 2011.
- [FIS10] W. Fischer, *Digital Video and Audio Broadcasting Technology*, 3rd edn. (Springer, Heidelberg), pp. 3-4, pp. 765-767, 2010.
- [GALL62] R. G. Gallager, “Low-density parity-check codes,” *IRE Transactions on Information Theory*, Vol. 8, Issue 1, pp. 21-28, January 1962.
- [HOI06] A. Hoikkanen, “Economics of Wireless Broadcasting over DVB-H Networks,” *Proceedings of the 5th Wireless Telecommunications Symposium (WTS’06)*, Pomona, CA, USA, 27-29 April 2006.
- [IEEE09] Institute of Electrical and Electronic Engineers Standards Associations, “Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems” IEEE802.16-2009, 2009.
- [ITU00] International Telecommunications Union – Telecommunication Standardization Sector, “Information technology – Generic coding of moving pictures and associated audio information: Video,” ITU-T H.262, February 2000.

- [ITU10] International Telecommunications Union – Telecommunication Standardization Sector, “Advanced video coding for generic audiovisual services,” ITU-T H.264, March 2010.
- [ITU11] International Telecommunications Union – Radiocommunication Sector (Broadcasting service), “Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios,” ITU-R BT.601-7, March 2011.
- [KIM08] J. Kim, D. Lee, J. Ahn, D. Ahn, B. Ku, “Is HAPS Viable for the Next-Generation Telecommunication Platform in Korea?,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2008, Article ID 596383, 2008.
- [LAC08] I.Lacković, P.Manasijević, D.Marković, “Software Application for Coverage Prediction for Analogue and Digital Broadcasting Services in VHF and UHF Band,” *Zbornik radova XVI Telekomunikacioni forum – Telfor 2008*, pp. 311-314, Beograd, novembar 2008.
- [LAM06] T. Lamanauskas, D. Korsakaite, “Assesment of Guidelines for Regulatory Policy on the Basis of Technical and Managerial Analysis of Broadband Penetration,” *Journal of Information sciences*, No. 36, pp. 26-52, 2006.
- [LIL04] G.Lilien, A.Rangaswamy, *Marketing Engineering: computer-assisted marketing analysis and planning*, Revised 2nd Edition, (Trafford Publishing, Canada), p. 259, 2004.
- [LIN75] H. Linstone, M. Turoff, *The Delphi Method: Techniques and Applications*, (Reading, Mass.: Adison-Wesley), 1975.
- [MAS09] Analysys Mason, DotEcon and Hogan&Hartson, “Exploiting the digital dividend – a European approach,” *Report for the European Commission*, 14 August 2009.
- [OECD04] Organisation for Economic Co-operation and Development, “Recommendation of the OECD Council on Broadband Development,” OECD C(2003)259/FINAL, February 2004.
- [OECD09] Organisation for Economic Co-operation and Development, “The role of communication infrastructure investment in economic recovery,” OECD DSTI/ICCP/CISP(2009)1/FINAL, May 2009.
- [OECD10] Organisation for Economic Co-operation and Development, “Broadband Price and Speed Evolution,” *Report*, April 2010.
www.oecd.org/dataoecd/18/31/41551958.xls Accessed 5 April 2012.

- [RAD11] V. Radojicic, B. Bakmaz, G. Markovic, "Diffusion of Internet Protocol Television (IPTV) service demands: An empirical study in the Serbian market," *African Journal of Business Management*, Vol. 5(17), pp. 7224-7231, September, 2011.
- [RAT11] Republička agencija za elektronske komunikacije, "Pregled tržišta telekomunikacija u Republici Srbiji u 2010. godini," Maj 2011.
- [REI05] U. Reimers, *DVB: the family of international standards for digital video broadcasting*, 2nd edn. (Springer, Heidelberg), 2005.
- [RELJ08] I. Reljin, "DVB – druga generacija digitalnih standarda," *Zbornik radova XXVI Simpozijum o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju – PosTel 2008*, pp. 251-258, Beograd, 16. i 17. decembar 2008.
- [RELJ09A] I. Reljin, A. Sugaris, "DVB Standards Development," *Proceedings of the 9th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS'09)*, pp. 263-272, Niš, Serbia, October 2009.
- [RELJ09B] I. Reljin, A. Sugaris, "DVB-T2", *Telekomunikacije, RATEL*, Godina II, Broj 04, pp 9-20, 2009.
- [RELJ11] I. Reljin, A. Sugaris, "Modeliranje procesa izbora tehnologija digitalne televizije," *Zbornik radova XXIX Simpozijum o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju – PosTel 2011*, pp. 279-286, Beograd, 6. i 7. decembar 2011.
- [ROG62] E. Rogers, *Diffusion of Innovations*, (Glencoe: Free Press), 1962.
- [SHA48] C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," Reprinted with corrections from *The Bell System Technical Journal*, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656, July, October, 1948.
- [SKI06] D. Skiöld, "An economic analysis of DAB & DVB-H," *EBU Technical Review* Vol. 2006 No. 305, 31 January 2006.
- [SRB09A] Vlada Republike Srbije, "Strategija za prelazak sa analognog na digitalno emitovanje radio i televizijskog programa u Republici Srbiji," Službeni glasnik RS broj 53/09, jul 2009.
- [SRB09B] Vlada Republike Srbije, "Strategija razvoja širokopojasnog pristupa u Republici Srbiji do 2012. godine," Službeni glasnik RS broj 84/09, septembar 2009.
- [SRI86] V. Srinivasan, C. Mason, "Nonlinear least squares estimation of new product diffusion models," *Marketing Science*, Vol. 5, No. 2, pp. 169–178, 1986.

- [SUG11] A. Sugaris, I. Reljin, "Digital broadcasting techno-economic efficiency simulation model," *Elektronika Ir Elektrotehnika*, Vol. 17, No. 3 (109), pp. 109-114, 2011.
- [SUG12] A. Sugaris, I. Reljin, "DVB-T2 Technology Improvements Challenge Current Strategic Planning of Ubiquitous Media Networks," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Vol. 2012, in Press, 2012. doi:10.1186/1687-1499-2012-52
- [TAD99] R. Tadayoni, K.E. Skouby, "Terrestrial digital broadcasting: convergence and its regulatory implications," *Telecommunications Policy*, Vol. 23, No. 2, pp.175-199, 1999.
- [VER09] S.Verbrugge, K.Casier, J.V.Ooteghem, B.Lannoo, "Practical Steps in Techno-Economic Evaluation of Network Deployment Planning," *White Paper, Ghent University, Department of Information Technology, INTEC Broadband Communication Networks*, 19 November 2009.
[http://www.ict-oase.eu/public/files/IBCN TE WhitePaper 200911.pdf](http://www.ict-oase.eu/public/files/IBCN_TE_WhitePaper_200911.pdf)
Accessed 5 April 2012.
- [WB09] World Bank, "Information and Communications for Development 2009: Extending Reach and Increasing Impact," ISBN: 978-0-8213-7605-8, May 2009.
- [YIP07] J. Yip, "Digital TV Development: Techno-Economic Planning Considerations," *Proceedings of the Digital TV Symposium, Session 9: Business Planning and Regulatory Issues, Asia-Pacific Broadcasting Union*, Kuala Lumpur, Malaysia, 26-29 March 2007.
- [ZEH10] S. Zehle, G. Friend, "Twice-shy network operators reject high spectrum prices," *News analysis*, 23. September 2010.
<http://www.computerweekly.com/Articles/2010/09/23/243013/Twice-shy-network-operators-reject-high-spectrum-prices.htm> Accessed 5 April 2012.

Biografija autora

Osnovni podaci

Rođen u Beogradu gde se i školovao. Maturirao 1988. godine u Srednjoj matematičkoj školi “25. maj”, Beograd, sa zvanjem Programer. Diplomirao (1995. godine, smer Elektronika i telekomunikacije, tema “Projektovanje satelitskih sistema”) i magistrirao (2000. godine, oblast Digitalni prenos informacija, tema “Primena asinhronog transfer moda u digitalnim satelitskim mrežama”) na Elektrotehničkom fakultetu, Univerzitet u Beogradu.

Kretanja u službi

Nakon diplomiranja radio u RTS – Radio Televizija Srbije u sektoru za tehnički razvoj. Od 2000. godine radio u američkoj kompaniji za razvoj novih tehnologija B2C2 Incorporated, u Londonu, kao *European Technical Support Manager* za IP/DVB proizvode. Nakon toga, 2002. godine vraća se u RTS, na poziciju *Project Manager* radeći na razvoju strategije naprednih komunikacionih mreža. U tom periodu

učestvovao na EU projektu restrukturiranja RT Crne Gore kroz edukaciju zaposlenih za oblast *Digital Broadcasting Transition*. Kao *Business Development Manager* od 2004. godine radio kod sistem integratora TeleGroup Beograd.

Od 2009. godine radi kao predavač u Visokoj ICT školi na predmetima iz oblasti televizije i multimedijalnih telekomunikacija.

Usavršavanja

Tokom karijere usavršavao se kroz kurseve za oblasti i za projekte na kojima je radio, kao na primer: *DSNG System*, London (1998), *Internetworking with MS TCP/IP*, London (2000), *IP/DVB system - PCI/USB receivers*, London (2001), *WiMAX radio planning*, Berlin (2006), *WiMAX business strategies*, Prague (2007).

Projekti

Učestvovao je ili rukovodio projektima različitih nivoa, od implementacije postojećih tehnologija do planiranja strateškog značaja. Među značajnijim projektima ubrajaju se RCUB i RTS projekat internet provajdinga preko satelita, RTS i Sagem projekat digitalizacije RR linkova, RTS projekat Simulcast prenos preko satelita, projekat razvoja DVB-S2 standarda, DVB-T Pilot Projekat RTS, IP/MPLS mreža Telekoma Srbije i Telekoma Srpske, bežična pristupna mreža televizije za IP video streaming, WiMAX i VoIP Pilot Projekat za Telekom Srbija.

Objavljeni radovi

Tokom karijere kao autor ili koautor objavio je tridesetak radova na domaćim i stranim konferencijama, kao i u domaćim i međunarodnim časopisima uključujući i one sa impakt faktorom.