

DIGITÁLNÍ TELEVIZE A DIGITÁLNÍ ROZHLAS SOUČASNOST A PERSPEKTIVY

Doc. Ing. Václav Žalud, CSc, Katedra radioelektroniky
FEL ČVUT, Technická 2, 160 00 Praha 6

Abstract:

V tomto příspěvku jsou popisovány základní varianty digitální televize, určené pro pozemní vysílání (DVB-T), družicové vysílání (DVB-S) a pro kabelové přenosy (DVB-C). Pozornost je zaměřena na systémové řešení těchto televizních soustav a také na hlavní problémy spojené s jejich realizací. Stručně jsou probírány i perspektivní standardy digitální televize, přinášející kromě zvýšené kvality přenosu také možnost mobilního příjmu a interaktivního režimu. V závěru je zmínka o systémech digitálního rozhlasu DAB a DRM.

Úvod

Od počátku sedmdesátých let min. st. bylo zřejmé, že přednosti digitální techniky jsou tak výrazné, že v televizi i v rozhlasu digitální systémy postupně nahradí dosavadní systémy analogové. **Digitální systémy** přinášejí celou řadu závažných funkčních výhod:

- Digitální rádiový přenos má především podstatně **větší energetickou účinnost**, kterou může ještě zvýšit kanálové kódování a další formy ochrany přenosu. Energetickou bilanci dále zlepšují pozemní monofrekvenční televizní sítě. To vše podporuje současné aktuální tendence vytváření energeticky co nejméně náročných „zelených rádiových systémů“.
- Digitální modulace, ve spojení s účinným zdrojovým kódováním (redukcí bitové rychlosti), zajišťujícím potlačení redundancí a irelevantní složky v přenášeném signálu, potom mají i znatelně **vyšší spektrální účinnost**, projevující se ve výrazné úspoře nedostatkových rádiových pásem. Tato uvolněná pásma („digitální dividenda“) lze potom využít nejen pro další tv. programy, ale také pro prudce rostoucí pozemní mobilní komunikaci ap.
- Digitální rádiová komunikace umožňuje pomocí nových metod digitálního zpracování signálů výrazně zlepšit také všechny další kvalitativní parametry rádiového přenosu a zajistit tak zvýšenou **kvalitu služeb QoS**. Mezi tyto metody patří nové koncepce účinných zdrojových kodeků, turbo kódy, LDPC kódy, diversita MIMO aj. Uvedené techniky zvyšují kvalitu fixních tv. přenosů, kterou pak spolehlivě zajišťují v celém obsluhovaném území - včetně jeho okrajů, potlačují vliv vícenásobných příjmů („duchy“), odstraňují zrnění ap. Otevírají také cestu k plně mobilní televizi s dokonalou interaktivitou, ať již budované na bázi „klasické“ digitální televize, nebo využívající síť mobilní komunikace třetí generace.

Implementace digitálních systémů je však podstatně komplikovanější, než systémů analogových. Digitální komunikace proto začíná nastupovat do praxe až v osmdesátých letech min. st. Tehdy se totiž dostaly monolitické integrované obvody již na úroveň, umožňující levnou realizaci i složitých digitálních radiokomunikačních systémů. Základem digitalizace obrazových signálů je celosvětový standard ITU R 601 z roku 1982. *Evropský institut ETSI (European Telecommunications Standards Institute)* a *Evropský komitét CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization)*, začaly v r. 1991 potom koncipovat projekt *digitálního video vysílání DVB (Digital Video Broadcasting)*.

Projekt DVB uvažoval digitální televizi jako jediný systém, aplikující zdrojové kódování video a audio signálů ve standardech MPEG-2. Dále se zde předpokládala aplikace ochranného kanálového kódování s dopřednou korekcí chyb FEC (*Forward Error*

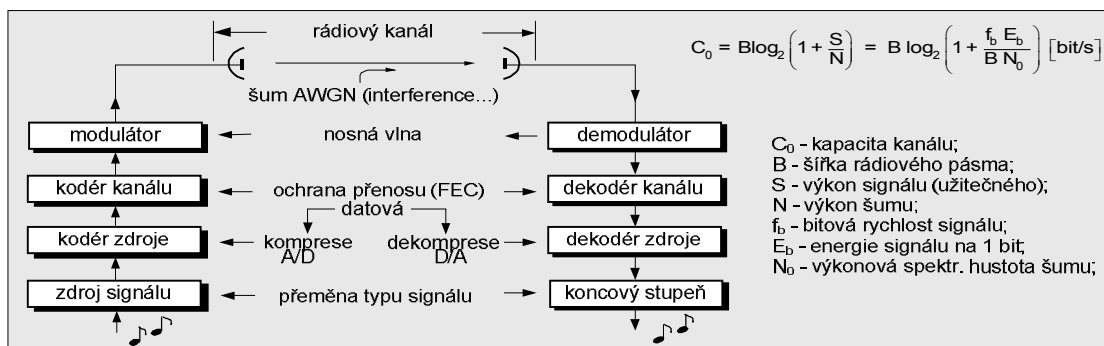
Correction), využívající blokové kódy RS (Reed - Solomon) a punkturované konvoluční kódy, adaptující se svou rychlostí na parametry aktuálního rádiového kanálu.

Při rádiovém přenosu se rozlišují v systému DVB tři verze, lišící se přenosovým médiem. Díky jednodušší legislativě i technologii se již v r. 1994 objevují standardy pro družicové systémy DVB-S (DVB-Satellite) a kabelové systémy DVB-C (DVB-Cable). Až za nimi následoval v r. 1995 pozemní systém DVB-T (DVB-Terrestrial). Tyto systémy se ovšem během vývoje různě modifikují. Vznikají jednak jejich pokročilé verze DVB-S2 (2005), DVB-C2 a DVB-T2 (2006), i nové standardy DVB-H ap. Významnou roli hraje ve vývoji digitální televize její konvergence s Internetem (IPTV) a s veřejnými mobilními sítěmi 3G (TVo3G). Standardy DVB-S a DVB-C mají k dispozici kanály zajišťující téměř bezchybný přenos QEF (Quasi Error Free), a proto mohou používat klasické modulace QAM s jedinou nosnou vlnou SC (Single Carrier). Naproti tomu DVB-T užívá pozemní kanály s vícecestným šířením a intenzivními interferencemi, kdy je k přenosu vhodnější vývojově mladší ortogonální frekvenční multiplex OFDM, aplikující přenos na více nosných MC (Multi Carrier).

1. Nové technologie v digitální televizi DVB

Obecné Shannonovo schéma digitálních komunikačních systémů

Všechny digitální radiokomunikační systémy a tedy i digitální televize a rozhlas jsou založeny na obecném Shannonově schématu podle obr. 1 [1]. To se skládá z vysílací a přijímací části, spojených rádiovým kanálem. Na vstupu vysílací části je zdroj signálu, přeměňující přenášenou informaci na analogový elektrický signál. Ten se v kodéru zdroje nejprve v převodníku A/D digitalizuje a poté se podrobuje vlastnímu zdrojovému kódování. Jeho účelem je zmenšení rychlosti vstupního bitového toku, dosahované potlačením redundantní a irelevantní složky doprovázející vstupní data, proto se označuje jako redukce bitové rychlosti resp. komprese dat. V kodéru kanálu se k takto upraveným datům naopak určitá redundantní, avšak přesně kontrolovaná složka přidává. Ta je potom v přijímači využívána k odhalení a potlačení chyb. Tento typ ochrany se nazývá dopředná korekce chyb FEC (Forward Error Correction). K dalším způsobům ochrany rádiového přenosu patří ekvalizace (korekce frekvenčního zkreslení kanálu), diversita (vytvoření více nekorelovaných přenosových kanálů, odlišných ve frekvenci, čase, prostoru ap), prokládání (přeskupení bitů při přenosu v kanálu) a opakování přenosu ARQ (opakované vysílání chybně přenesených kódových skupin). Digitální signál, získaný tímto dvojitým kódováním, dále vchází do modulátoru. Zde se moduluje vhodným typem digitální modulace na vf nosnou vlnu a po frekvenční konverzi a výkonovém zesílení již vysílá. V přijímači probíhají procesy inverzní.



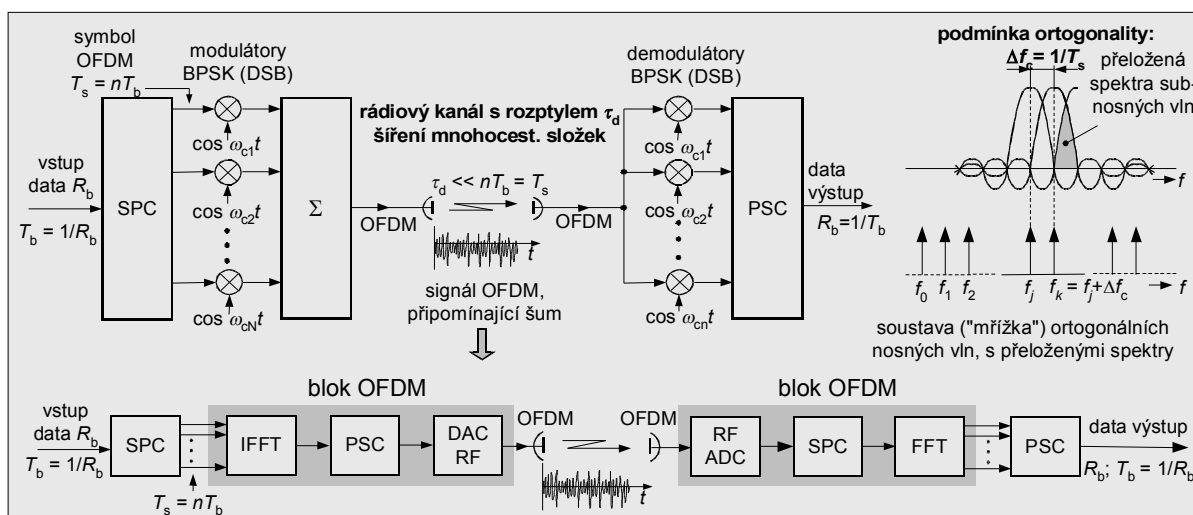
Obr. 1 Obecné Shannonovo schéma rádiového digitálního komunikačního systému

Přenosový formát OFDM a mnohonásobný přístup OFDMA

U moderních rádiových systémů s jedinou nosnou vlnou SC, určených pro velmi rychlou pozemní komunikaci v prostředí s mnohocestným šířením, je bitová perioda T_b již kratší, než rozptyl dob šíření τ_d dílčích mnohocestných složek. Vlivem toho zde vznikají výrazné intersymbolové interference mezi přijímanými symboly ISI, zvyšující chybovost přenosu. Radikálním řešením problému vzniku ISI je *ortogonální frekvenční multiplex* OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*) resp. mnohonásobný přístup OFDMA (*OFDM Access*). Ten má navíc velkou spektrální účinnost a značnou provozní flexibilitu, výhodnou při dynamickém přidělu nosných vln, při adaptivních modulacích a kódování ap.

Podstata multiplexu OFDM je znázorněna na obr. 2. Ve vysílači je rychlý sériový vstupní datový bitový tok o vysoké rychlosti R_b resp. krátké periodě $T_b = 1/R_b$ převáděn v sériově paralelním konvertoru SPC na větší počet N (desítky až tisíce) pomalých paralelních toků o podstatně delších periodách $T_s = NT_b \gg T_b$. Ty jsou modulovány na své individuální subnosné vlny $f_{c1}, f_{c2}, \dots, f_{cn}$ s odstupy Δf_c , ve slučovači sdružovány a ve formě kompozitního signálu OFDM vysílány. V přijímači se ze signálu OFDM synchronními demodulátory selektivně vyčlení jeho dílčí složky, z nichž se v konvertoru PSC skládá původní rychlý sériový datový signál. Subnosné vlny jsou voleny tak, aby vytvářely ortogonální soustavu ($\Delta f_c = 1/T_s$). Díky tomu může být jejich rozstup Δf_c mnohem menší, než u klasického multiplexu FDM, neboť vzájemné překrývání jejich postranních modulačních pásem zde nevádí. To zvyšuje u multiplexu OFDM jeho spektrální účinnost. Prodloužená perioda paralelních symbolů T_s (u videosignálů nejméně několik milisekund) je mnohem větší, než rozptyl zpoždění τ_d typických mnohocestných rádiových kanálů (nejvýše několik mikrosekund). Jednotlivé složky mnohocestného šíření se potom vzájemně časově téměř ztotožňují, takže zde dochází jen k malým intersymbolovým interferencím ISI. Ještě dalšího potlačení ISI až téměř na nulu, se zajistí doplněním každého symbolu OFDM o cyklický prefix CP, což je replika symbolu, vzatá z jeho konce a vkládaná na jeho začátek.

Realizace multiplexu OFDM v základní podobě s mnoha modulátory a demodulátory, by byla neúnosně komplikovaná. Moderní monolitické technologie však již nabízejí dostatečně rychlé a levné procesory IFFT/FFT (*Inverse Fast Fourier Transform/Fast Fourier Transform*), kterými lze v systému OFDM nahradit banku modulátorů OFDM a demodulátorů OFDM. Tím se této technologii naplno otevírá cesta do spotřební elektroniky.

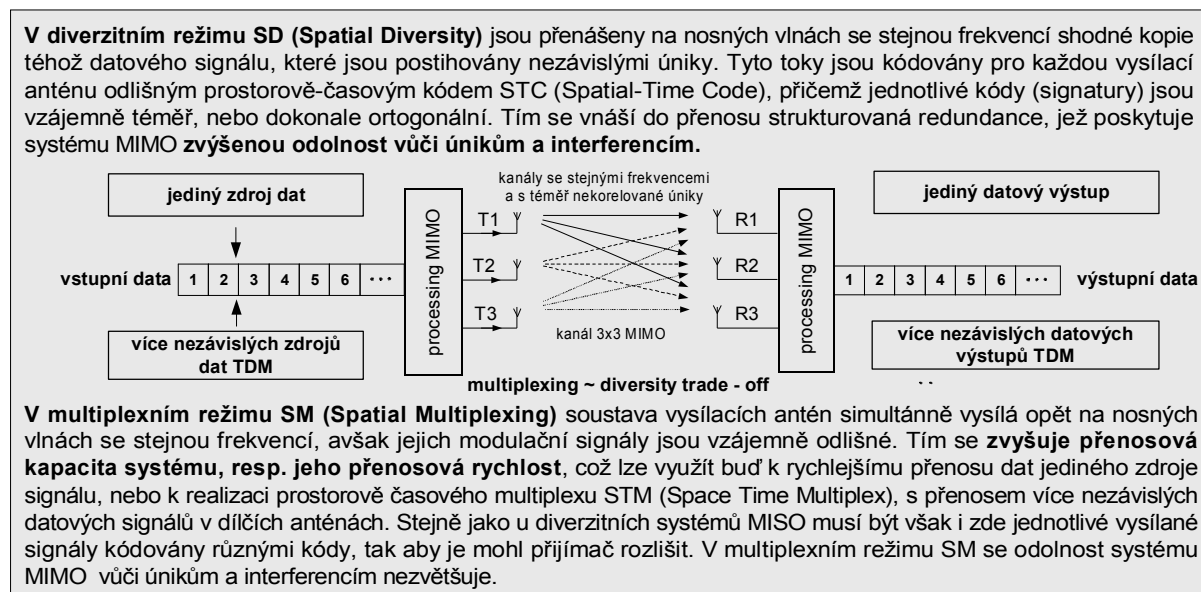


Obr. 2 Základní koncepce ortogonálního frekvenčního multiplexu OFDM

Prostorově-časová diverzita MIMO

Dvě či více vysílacích antén s jedinou přijímací vytváří systém s prostorovou diversitou MISO (*Multiple Input Single Output*), analogicky více přijímacích antén s jedinou vysílací vytváří systém s diversitou SIMO (*Single Output Multiple Input*). Při dostatečné vzájemné vzdálenosti vysílacích, nebo přijímacích antén, větší než je polovina délky vlny $\lambda/2$, zde vzniká více dílčích rádiových kanálů s nekorelovanými úniky. Toho se pak využívá k potlačení úniků přijímaného signálu a tím i ke zvýšení spolehlivosti spojení. Oba systémy se proto již dlouho využívají u krátkovlnných spojů, ale i u systémů mobilní komunikace ap.

Vývojově poslední, mimořádně účinnou variantou prostorové diverzity jsou systémy MIMO (*Multiple Input - Multiple Output*), s více vysílacími a současně i přijímacími anténami (obr. 3). Systémy MIMO mohou pracovat při přenosu jediného signálu v obvyklém režimu prostorové diverzity SD (*Spatial Diversity*), kdy zvětšují imunitu proti únikům. Lze je však nově využít, na rozdíl od MISO a SIMO, také v režimu prostorového multiplexu SM (*Spatial Multiplexing*); ten zvyšuje rychlost jediného přenášeného signálu, nebo umožňuje efektivní techniku multiplexního přenosu více nezávislých signálů, a to v původním nerozšířeném frekvenčním pásmu. Technika MIMO ve spojení s multiplexem OFDM se začíná intenzivně využívat kromě mobilní komunikace i v digitální televizi a rozhlasu.

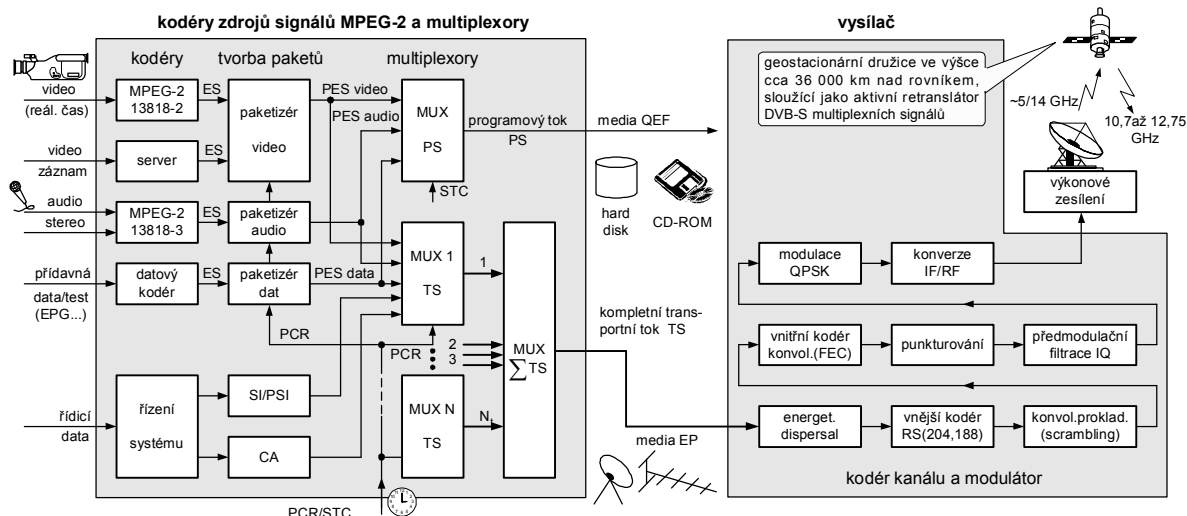


Obr. 3 Systém MIMO s možností pracovat buď v prostorovém diverzitním módu (SD) s přenosem jediného modulačního signálu - avšak se zvýšenou robustností přenosu, nebo v módu prostorového multiplexu (SM) - s možností multiplexního přenosu více signálů

2. Digitální televize DVB-S

Vysílač DVB-S

Na obr. 4 je uvedeno zjednodušené schéma zapojení kompletního vysílacího řetězce digitální družicové televize DVB-S. Jeho první částí je kódér zdrojů signálu, obsahující vlastní kódéry pro zdrojové kódování obrazových, zvukových a datových signálů a dále multiplexory pro jejich sdružování. Druhou částí je vlastní vysílač, složený z ochranných kódérů kanálu, prokladače, modulátoru a koncového výkonového stupně.



SI = servisní informace; PSI = programové spec. informace; CA = podmíněný přístup; ES = elementární datový tok; PES = paketový el. datový tok; 1,2,3,...,N_i = dílčí transportní toky; PCR = program. hodinová reference; STC = systémové časování; QEF = téměř bezchybný; EP = náchylný k chybám; TS = transportní tok; PS = paketový tok; EPG = Electronic Program Guide

Obr. 4 Zjednodušené blokové schéma zapojení kompletního vysílacího systému digitální družicové televize DVB-S

Na vstup zdrojového kodéru vysílače DVB-S přicházejí digitalizované obrazové (video) a zvukové (audio) televizní signály a dále datové signály. Z obrazových signálů to mohou být signály "živého" televizního vysílání ze studia ("live" video), které se dále ve zdrojovém obrazovém kodéru kódují do formátu MPEG-2. Ten umožňuje vytvářet obrazové signály se čtyřmi stupni kvality, označovanými jako *úrovně*, které korespondují nízké, střední (hlavní), zdokonalené a vysoké rozlišovací schopnosti. Kromě toho je zde definováno ještě pět *profilů*, které specifikují technické prostředky, jimiž je dosahováno požadované komprese obrazového toku. Je to profil jednoduchý, profil hlavní, dále dva profily odstupňované a profil vysoký. Celkem tedy vzniká dvacet možných kombinací "úroveň - profil".

Na vstup zdrojového kodéru vysílače DVB-S mohou také přicházet obrazové signály z různých záznamových zařízení, dále sem vstupují stereofonní nebo vícekanálové zvukové signály, které se podrobují ve *zvukovém kodéru* zdrojovému kódování, rovněž do formátu MPEG-2 (audio). Konečně ke vstupu vysílače přicházejí i datové signály, přenášející přídatná data (např. informace o programech EPG ap.), která se případně mohou kódovat v *kodeřu dat*. Všechny tyto zakódované signály mají podobu spojených dlouhých sekvencí, označovaných jako *elementární toky ES (Elementary Stream)*. Pro další zpracování je však výhodné je v blocích *vytváření paketů* rozdělit do kratších dílčích bloků. Ty vytvářejí *paketizované elementární datové toky PES (Packetized Elementary Stream)*, o typické délce např. 2048 bytů. Paketizací se získá značná flexibilita ve vytváření různých variant výsledného přenášeného televizního signálu. Pakety PES jsou dále multiplexovány, a to dvojnásobem. Jednak přicházejí do *programového multiplexeru MUX PS*, který je sdružuje do výsledného *programového toku PS (Program Stream)*. Ten je určen buď pro přímý záznam na vhodné záznamové médium (CD-ROM, hard disk), nebo postupuje k dalšímu režijnímu zpracování. Uvedená záznamová media vykazují velmi malou chybovost $BER < 10^{-10}$, a proto se označují jako *téměř bezchybová QEF (Quasi Error-Free)*. Při družicovém nebo i jiném přenosu, při němž je signál postihován nejrůznějšími typy interferencí a šumem, je však nutné počítat s mnohem větší chybovostí $BER \geq 10^{-4}$, odpovídající mediím *náchylným k chybám EP (Error Prone)*. Pro ně by potom nebyl programový tok PS vhodný. Proto je zde k dispozici ještě *transportní multiplexer MUX TS*,

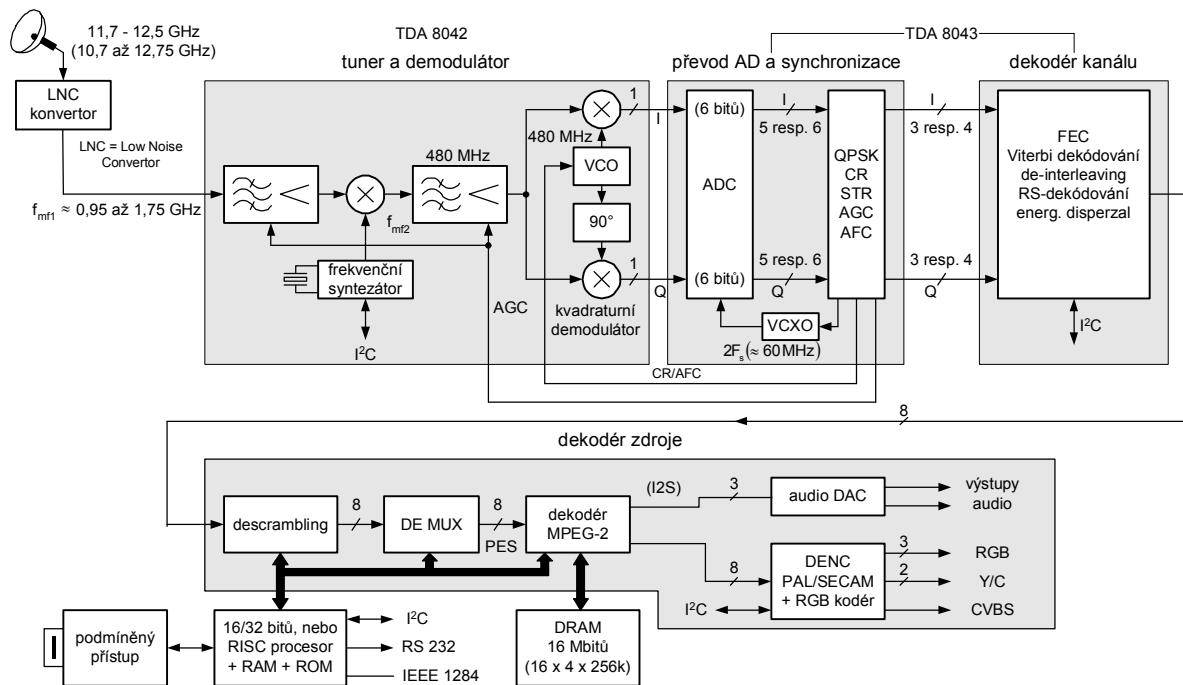
který formuje relativně krátké pakety o základní fixní délce 188 bytů, vytvářející *transportní paketový tok TS (Transport Stream)*, který je vhodný pro družicový, kabelový i pozemský rádiový přenos. Přenosová kapacita systému družicové televize DVB-S je velká, a proto může být v hlavním transportním multiplexeru *MUX ΣTS* také prováděno sdružování více dílčích programů popsaného typu; v jediném družicovém kanálu se potom může přenášet např. 4 až 6 tv programů, v závislosti na parametrech kódování ap. Ke správné funkci tohoto složitěho systému k němu musí být přiváděna ještě nejrůznější kontrolní a řídicí data, poskytující přijímačům systému *DVB-S servisní informace SI*, označované také jako *programově specifikované informace PSI*. Pomocí nich se přenášejí k přijímačům například uživatelské informace o vysílaných programech EPG, ale také technické informace o konfiguraci použitého kódování MPEG-2, o způsobech multiplexování ap. Souhrnný datový tok, obsahující všechny šířené informace (tv programy, data ...), se nazývá multiplex.

Druhou část vysílacího řetězce DVB-S tvoří vlastní vysílač, tj. bloky pro kanálové kódování a pro modulaci. Transportní paketový tok TS je zde nejprve podrobován energetickému dispersalu, který rovnoměrně rozprostírá spektrum modulovaného signálu po celém radiovém kanálu. Takto upravený transportní tok vchází na RS vnější kodér. Dále následuje konvoluční prokladač (typu Forney), pomocí něhož jsou shluky (bursty) chyb vznikající na trase signálu převáděny na chyby osamocené, které vnější dekodér přijímače již může snadno korigovat. Za prokladačem je zařazen vnitřní kodér, uskutečňující důkladné konvoluční kódování s nízkou základní rychlostí $r_c = 1/2$. Je-li však poměr signál/šum na vstupu přijímače příznivější, je možné výstup konvolučního kodéru punkturovat (tečkovat), tj. vypouštět z něho část zakódovaných bitů. Tak lze vytvářet zvýšené kódové rychlosti $r_c = 2/3, 3/4, 5/6$ a $7/8$, vedoucí sice ke slabší ochraně, avšak poskytující vyšší přenosové rychlosti. Punkturovaný signál se frekvenčně filtruje, přivádí k modulátoru QPSK a po frekvenční translaci a výkonovém zesílení vysílá.

Pro přenos modulovaného signálu se zde využívalo původně pásmo 11,7 až 12,5 GHz (později rozšiřované), s transponderem umístěným na geostacionární družici ve výšce cca 40 000 km. Příslušný družicový kanál má sice velký útlum, avšak vytváří téměř jen přímou vlnu LOS (*Line of Sight*) bez mnohocestného šíření, zajišťující stabilní příjem. K modulaci jediné nosné vlny se používá čtyřstavová modulace QPSK, která je odolná vůči šumu, interferencím ap. Má sice malou spektrální účinnost a tedy vyžaduje velké šířky pásma, avšak ty jsou v používaných mikrovlnných rozsazích snadno dosažitelná. Přenos se může uskutečňovat v široké škále šířek pásma rádiového kanálu od 26 až po 54 MHz (přednostně 27 až 36 MHz, což jsou pásma starší družicové televize s analogovou modulací FM). Při nejširším pásmu 54 MHz a nejslabším kódování $7/8$ se dosáhne nejvyšší přenosové rychlosti 68 Mbit/s, naopak při pásmu 26 MHz a nejdůkladnějším kódování $1/2$ je rychlost jen 19,7 Mbit/s. Tyto velké rychlosti poskytují systémům DVB-S možnost přenosu signálů televize s vysokou rozlišovací schopností HDTV (*High Definition Television*).

Přijímač DVB-S

Přijímač DVB-S je znázorněn ve zjednodušeném blokovém schématu na obr. 5. Ve vnější anténní jednotce přijímače je nízkošumový konvertor LNC, převádějící přijímaný signál z pásma 12 GHz do pásma první širokopásmové mezifrekvence 950 až 1 950 MHz. Na vstupu vnitřní jednotky přijímače je tuner, kde po nízkošumovém zesílení dochází ve směšovači k další přeměně na druhou, úzkopásmovou mezifrekvenci 480 MHz. Přeladitelný heterodynní signál a úzkopásmový filtr za směšovačem (obvykle SAW) zde už realizují selekci zvoleného rádiového kanálu, o různé šířce pásma 26 až 54 MHz. Tento kanál přenáší multiplexní signál s více tv a rozhlasovými programy, daty ap. Jeho demodulaci v kvadraturním demodulátoru se získají demodulované složky I, Q v základním pásmu.

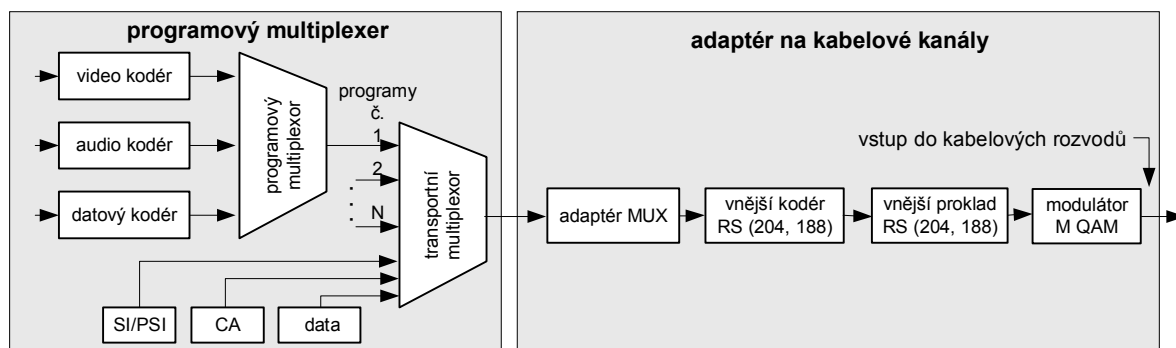


Obr. 5 Zjednodušená koncepce přijímače digitální družicové televize DVB-S; mikrovlnné pásmo přijímaných signálů může být modifikováno lokálními (národními) standardy

Tyto složky se v převodníku ADC (vzorkování ≈ 60 MHz a rozlišení 6 bit) převádějí do digitální podoby. Po frekvenční filtraci se podrobují kanálovému dekódování a tím se z nich získávají transportní pakety o délce 188 bytů. Ty se dále v případě podmíněného přístupu CA descramblují a demultiplexer z nich vybírá podle uživatelem zvoleného programu příslušné paketové toky PES. Dekodér MPEG-2 z nich rekonstruuje video a audio signály (digitální video signály Y, U, V ve formátu CCIR 656). Ty jsou přiváděny k digitálnímu kodéru DENC (Digital Video Encoder), který potom umožňuje jejich konverzi na analogové složky RGB určené pro jakostní reprodukci v tv přijímači. Pro nenáročné aplikace (videomagnetofon) se hodí analogové výstupy ve formátech PAL, NTSC a SECAM.

3. Digitální televize DVB-C

Standard DVB-C je určen pro přenos televizních signálů kabelovou sítí. Užívá prakticky stejné principy digitalizace a zpracování signálů v základním pásmu jako standard DVB-S. Odchyluje se pouze v tom, že neaplikuje vnitřní konvoluční ochranné kódování, které zde totiž není nutné, neboť přenos signálů po kabelech má relativně malý útlum a není zatížen šumem a interferencemi, jako je tomu naopak při rádiových přenosech v sítích DVB-T. Kvalitní přenosový kanál také dovoluje použití vícečetných modulací 16QAM, 32QAM, 64QAM, 128QAM a 256QAM. Pro všechny tyto modulace jsou k dispozici šířky pásma 2 MHz, 4 MHz, 6 MHz, 8 MHz a 10 MHz. Takže např. při použití spektrálně nejefektivnější modulace 256QAM je možné ve standardním kanálu kabelové televize s šířkou pásma 8 MHz přenášet digitální datový tok rychlostí okolo 60 Mbit/s. To by umožňovalo např. přenos multiplexu obsahujícího 12 televizních programů se standardní jakostí určenou kódováním MPEG-2, včetně stereofonních zvukových doprovodů ve zvýšené kvalitě HiFi (High Fidelity).



Obr. 6 Programový multiplexer a vysílač – adaptér ke kabelovým kanálům systému DVB-C

V televizi DVB-C se používají pro přenos po kabelu frekvenční pásma zhruba od 50 MHz do 450 (860) MHz, nejčastější jsou však jen pásma od 200 MHz do 300 MHz. Vyšší pásma jsou již nevhodná pro zvětšující se útlum komerčně dostupných koaxiálních kabelů.

Na obr. 6 je znázorněn kompletní vysílací řetězec standardu DVB-C. Koncepce přijímače je v podstatě inverzní ke koncepci vysílače.

4. Digitální televize DVB-T

V systémech pozemní digitální televize DVB-T by při použití konvenčních modulací s jedinou nosnou vlnou (SC) mohlo docházet k intersymbolovým interferencím ISI. Tomu lze zabránit přechodem k modulacím s více nosnými vlnami MC, z nichž byl pro televizi DVB-T vybrán kódovaný ortogonální frekvenční multiplex COFDM. Ten navíc umožňuje realizovat pokrytí určitých území monofrekvenčními televizními sítěmi SFN (*Single Frequency Network*). U konvenčních tv sítí je celé obsluhované území pokrýváno menším počtem vysílačů s velkými výkony, které pracují na různých kanálech. U sítí SFN je toto území pokrýváno velkým počtem vysílačů s malými výkony, které vysílají tytéž signály (soubory kanálů) na těchže frekvencích, avšak díky aplikaci formátu COFDM se vzájemně neruší. Tato koncepce potom vede ke značným úsporám frekvenčních pásem, i k úsporám energetickým.

Parametr	mód 2k	mód 8k
efektivní počet nosných N	2048 (aktiv. 1706)	8 192 (aktiv 6818)
užitečná symbolová perioda T_s	224 ms	896 ms
ochranný interval T_g	$T_s/4$, resp $T_s/8$, resp $T_s/32$	$T_s/4$, resp $T_s/8$, resp $T_s/32$
odstup nosných $\Delta f = 1/T_s$	4464 Hz	1116 Hz
varianty modulace nosných	QPSK/16-QAM/64-QAM	QPSK/16-QAM/64-QAM
použité šířky pásma B_{RF}	4 MHz, 5 MHz, 6 MHz, 7 MHz, 8 MHz	

Tab. 1 Základní parametry standardu pozemní digitální televize DVB-T, pro přenosový formát OFDM a módy 2k / 8k

Volba hlavních systémových parametrů je u multiplexu OFDM, určeného pro televizní standard DVB-T, výsledkem celé řady kompromisů. Závisí například na dosažitelných pracovních rychlostech procesorů FFT použitých ve vysílačích i přijímačích OFDM ap. Kritická je zejména volba počtu N subnosných vln OFDM, symbolové periody T_s a délky cyklického prefixu T_g a také modulačního způsobu dílčích nosných vln. Tyto

parametry jsou shrnuty v tab. 1, a to jednak pro *mód OFDM 2k* (2048 individuálních nosných vln v rádiovém kanálu o šířce 8 MHz) a dále pro *mód OFDM 8k* (8192 individuálních nosných vln v témže kanálu) (ETSI/EBU 300 744). Mód 2k je vhodný pro jediný vysílač, anebo pro monofrekvenční síť SFN na relativně malých lokalitách. Mód 8k může být využit buď ve spojení s jediným vysílačem, nebo u sítě SFN pokrývajících velké lokality.

Individuální nosné vlny mohou být ve standardu DVB-T modulovány ve formátu QPSK, nebo 16-QAM anebo 64 QAM. Zvolený typ modulace potom určuje přenosovou kapacitu systému, potřebnou šířku rádiového pásma B_{RF} i jeho odolnost vůči šumu a interferencím. Uvedené parametry je však možné ovlivňovat také volbou rychlosti ochranného kódování. Obecně platí zásada:

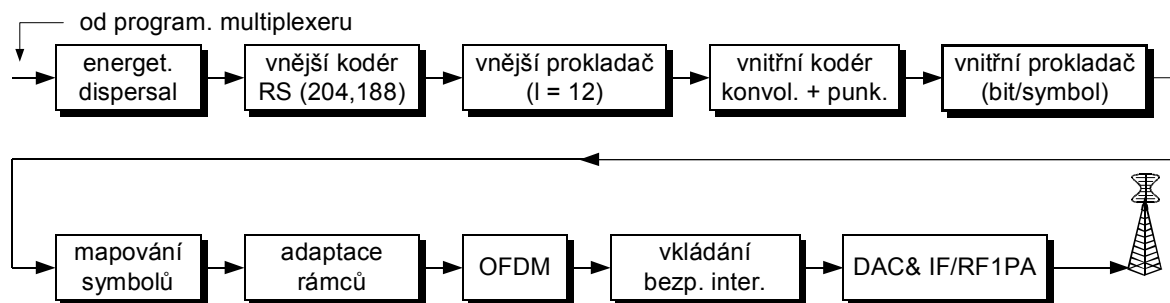
Čím důkladnější je ochrana přenosu, ať již dosažená použitím modulace nižšího řádu, nebo důkladnějším kódováním, tím nižší je dosažitelná přenosová bitová rychlost.

Vedle uvedených konvenčních modulací se u DVB-T uplatňuje ještě *hierarchická modulace*. V tomto případě je modulační datový tok rozdělen na tok přenášející data s vysokou prioritou a na tok s nízkou prioritou. Tok s vysokou prioritou je chráněn efektivním konvolučním kódem, např. s rychlostí $r_c = 1/2$, takže na přijímací straně jednoznačně určuje v konstelačním diagramu individuální symboly (stavy modulované nosné vlny), resp. jejich složky I,Q. Tok s daty s nízkou prioritou je chráněn méně efektivním konvolučním kódem, např. s rychlostí $r_c = 5/6$. K modulaci individuálních nosných je využíván takovým způsobem, aby definoval "mrak" konstelačních bodů, seskupených kolem jednoznačných pozic v konstelačním diagramu, jež jsou určeny datovým tokem s vysokou prioritou. Při dobrém poměru nosná/šum C/N , mohou být identifikovány všechny body konstelačního diagramu a oba datové toky mohou být detekovány. Při horším poměru C/N sice přesná identifikace a tedy i detekce všech bodů v konstelačním diagramu není možná, avšak je ještě alespoň možné pro libovolný z těchto bodů určit alespoň kvadrant, v němž se nachází. Za této situace je ještě možné vyhodnotit data s vysokou prioritou. Je-li tedy v systému například použita základní modulace 16-QAM, jsou 4 body konstelačního diagramu, ležící v jeho určitém kvadrantu demodulovány jako jediný bod v témže kvadrantu modulace QPSK. Demodulovaný signál je tedy degradován, avšak není ztracen.

Vysílač a přijímač standardu DVB-T

Na obr. 7 je znázorněno skupinové schéma kodéru a vlastního vysílače digitální pozemní televize standardu DVB-T. Jeho hlavní specifickou zvláštností oproti DVB-S je použití multiplexu OFDM. Kódování kanálu je zde téměř shodné s vysílačem DVB-S, navíc je zde jen vnitřní prokladač. Modulátor OFDM je řešen aplikací monolitického procesoru IFFT (viz obr. 2). Za modulátorem následují obvody pro vkládání cyklického prefixu a konečně měnič frekvence nahoru (*up-converter*) a výkonový koncový zesilovač PA (*Power Amplifier*).

V přijímači se v podstatě realizují inverzní operace vůči vysílači. Přijímaný signál je po nízkošumovém zesílení podroben první a druhé frekvenční konverzi, a to až na nulový mF kmitočet. Tím se jeho spektrum převede do základního pásma (směšování na nulovou mezifrekvenci). Zde je potom vzorkován frekvencí N/T_s , odpovídající dvojnásobku frekvence nejvyšší nosné vlny v uvedeném základním pásmu. V praxi je užitečná šířka pásma poněkud nižší, než je polovina vzorkovací frekvence, čímž se usnadní filtrace potřebná k potlačení zkreslení typu *aliasing* při vzorkování; toto omezení se realizuje odstraněním několika dílčích nosných vln na okraji vf. pásma. Dále je takto upravený signál zpracováván v procesoru FFT s N vzorky (body), a to vždy v čase kratším, než je celková symbolová perioda T_s . Poté následuje dekódování a další operace, obdobné podetekčnímu zpracování signálu v systémech DBS-S.



Obr. 7 Zjednodušená koncepce kompletního vysílače digitální pozemní televize DVB-T; vypuštění vnitřního prokladače se získá schema odpovídající družicovému standardu DVB-S

5. Vývoj systémů DVB (DVB-H, IP TV, DVB-SH, DVB-S/C/T a TVo3G)

Základní standardy DVB se nepřetržitě vyvíjejí. Již v roce 2004 bylo standardizováno digitální televizní vysílání pro mobilní příjem DVB-H (*DVB-Handheld*) a v roce 2005 digitální televizní vysílání na bázi protokolu Internet IPTV (*DVB-Internet Protocol Television*). Rozšířením standardu DVB-H do satelitního pásma S (frekvence okolo 2,2 GHz) vzniká standard DVB-SH (*DVB-Satellite Handheld*). Dále se vyvíjejí rovněž tři základní standardy, a to směrem k jejich vylepšeným modifikacím DVB-S2 (2006), DVB-C2 (2010) a DVB-T2 (2009), umožňujícím mj. jakostní přenos HDTV. Pracuje se také na zcela nových aplikacích pro datové přenosy IPDC (*Internet Protocol Datacast*). Tyto nové generace směřují ke zvýšení kvality samotného televizního přenosu, rozšiřování sortimentu poskytovaných služeb a k podstatnému zdokonalení mobility a interaktivity přenosu. A právě v posledních dvou parametrech nepochybně do vývoje televize zasáhne její konvergence s pozemní mobilní komunikací třetí a vyšších generací. V současné době je již v pokročilém stadiu vývoje např. systém mobilní interaktivní televize TVo3G (*Television over 3G*).

6. Digitální rozhlas DAB

Počátkem devadesátých let *Evropský komitét Eureka 147* a *Evropský telekomunikační standardizační institut ETSI* začaly pracovat na vývoji nového systému *digitálního rozhlasového vysílání DAB (Digital Audio Broadcasting)*. Ten je určen k šíření rozhlasových programů a dalších přidružených informací v pásmech nad 300 MHz. Pro přenos zde byl zvolen kódovaný ortogonální frekvenční multiplex COFDM, to jak ve spojení se stacionárními tak i s mobilními přijímači. Může být využíván nejen při pozemním vysílání, ale též při vysílání z družic, případně i při přenosu metalickými nebo optickými spoji. Přitom se ve všech těchto režimech zaručuje velmi vysoká kvalita příjmu, srovnatelná se systémy CD (Compact Disk). Standard DAB má tři charakteristické rysy:

- Pro zdrojové kódování aplikuje metodu *MUSICAM*. Ta např. umožňuje redukovat bitovou rychlost lineárně kódovaného stereofonního signálu, se vzorkováním 48 kHz a se 16 bitovou reprezentací vzorků, z hodnoty $48 \cdot 16 \cdot 2 = 1536$ kbit/s na pouhých 192 kbit/s. Přitom dosažitelná kvalita přenosu je plně porovnatelná s kvalitou reprodukce pomocí disku CD.
- Problém mnohocestného šíření signálu v pozemských kanálech řeší pomocí kódovaného ortogonálního frekvenčního multiplexu COFDMA.
- Jsou-li signály COFDM vysílané větším počtem vysílačů DAB synchronizovány tak, aby v libovolném okamžiku vysílaly prakticky stejné bity, mohou pracovat na stejných frekvencích.

Tyto vysílače potom vytvářejí monofrekvenční síť SFN, podobně jako u standardů DVB-T, která zajišťuje celému systému velmi vysokou spektrální i energetickou účinnost.

Specifikace projektu *Eureka 147 DAB* pro digitální rozhlas DAB definují tři rozdílné přenosové módy. Ty se liší přidělenými rádiovými pásmy, dále předpokládanými oblastmi využití a také dalšími systémovými parametry. Základní charakteristiky těchto módů jsou shrnuty v tab. 2. Mód I a mód II je zde určen pro systémy pozemských vysílačů DAB, mód III se potom uplatní v systémech družicových nebo pozemských. Vzhledem ke stejnému přenosovému formátu COFDM je implementace digitálního rozhlasu DAB dosti podobná implementaci digitální televize DVB-T

Parametr DAB	mód I	mód II	mód III
aplikace	SFN	pozemský lok. pokrytí	pozemský + družic.
odstup vysílačů	cca 60 km	cca 15 km	cca 8 km
rádiové frekvence	< 375 MHz	< 1,5 GHz	< 3 GHz
užit. symb. perioda T_s	1,0 ms	250 μ s	125 μ s
ochranný interval T_g	250 μ s	62,5 μ s	31,25 μ s
šířka pásma B_{OFDM}	1 536 kHz	1 536 kHz	1 536 kHz
počet nosných N_{OFDM}	1 536	384	192
odstup nosných	1 kHz	4 kHz	8 kHz
celková bitová rychlost	2,4 Mbit/s	2,4 Mbit/s	2,4 Mbit/s

Tabulka 2 Základní parametry systému *Eureka 147 DAB*, pro tři různé přenosové módy

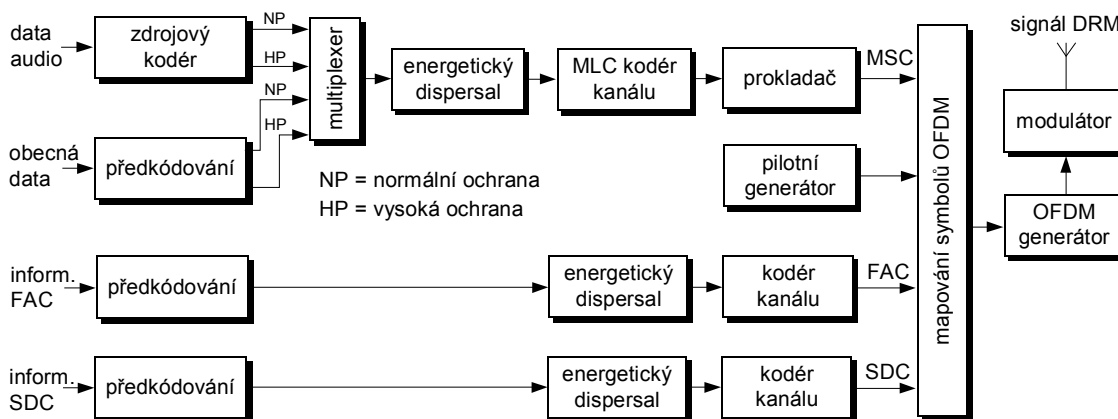
7. Digitální rozhlas DRM

Pro rozhlasové vysílání se tradičně využívá přenos s analogovou modulací AM, realizovaný hlavně v pásmech dlouhých vln (DV), středních vln (SV) a částečně i krátkých vln (KV), rozkládajících se zhruba od 150 kHz do 30 MHz. V těchto pásmech je přenos z hlediska intenzity přijímaného signálu velmi stabilní, je však postihován vysokou úrovní různých interferencí. Kvalitativní parametry rozhlasového vysílání lze zlepšit jedině přechodem na digitální systémy. Digitalizace se v této oblasti začala prosazovat nejdříve ve vyšších frekvenčních pásmech řádu stovek MHz a vyšších, a to ve formě rozhlasu DAB. Mají-li však být využity zmíněné specifické příznivé vlastnosti šíření vln také v tradičních nižších rozhlasových pásmech a přitom se má dosáhnout vysoké kvality přenosu, je nutné přejít i zde od analogových rozhlasových soustav na digitální. Z těchto důvodů mezinárodní telekomunikační unie ITU vydala v roce 2002 doporučení pro zavádění nového standardu DRM (*Digital Radio Mondiale*) pro digitální rozhlasové vysílání v pásmech DV, SV a KV. Tento standard díky progresivním digitálním technikám, v porovnání s dosavadním konvenčním rozhlasovým vysíláním s modulací AM, výrazně zlepšuje jakost reprodukováného signálu, a to na úroveň analogového rádia VKV/FM. Kromě toho umožňuje přenášet kromě jakostních audio signálů ještě texty, statické obrazy a počítačové programy (*datacasting*), je zde možný i přenos doplňkových dat RDS (*Radio Data System*), již aplikovaný v konvenčním vysílání VKV/FM. Standard DRM také nabízí podstatně vyšší komfort obsluhy přijímačů. Po technologické stránce je řešen tak, že může využívat klasické

rozhlasové vysílače AM. Potřebné kódování lze potom realizovat v první fázi vývoje pomocí běžného osobního počítače, podobně lze řešit i dekódování v přijímačích DRM. Univerzální počítač je v této aplikaci ovšem výhodnější nahradit levnými jednoúčelovými monolitickými moduly. Nástup systémů DRM do praxe tedy nevyžaduje ve vysílačích žádné podstatnější investice, individuální přijímače však musí být zcela nové.

V systému rozhlasu DRM se důsledně uplatňují metody adaptivních modulací a kódování. Jako základní modulační formát se využívá kombinace kódovaného multiplexu COFDM, s kvadraturními modulacemi QAM subnosných vln. Ten doplňuje vhodné víceúrovňové kanálové konvoluční kódování MLC (*Multi-Level Coding*), prokládání a vysílání pilotních symbolů pro odhad stavu kanálu. Tato opatření v souhrnu účinně potlačují vliv selektivních i plochých krátkodobých úniků. Multiplex COFDM přenáší zakódovaný signál na větším počtu modulovaných ortogonálních subnosných vln. Primární modulační konstelace jsou 64-QAM a 16-QAM, v nepříznivých kanálech se využívá modulace QPSK. Základní koncepce vysílače DRM je znázorněna na obr. 8.

Principiální výhody digitální technologie rozhlasu DRM jsou tak závažné, že se zavádí i do VKV pásma dosavadního analogového rozhlasu FM. Zde může díky větším dostupným šířkám pásma přinést zvýšenou kvalitu reprodukce, a to zhruba na úrovni kompaktních disků CD.



Obr. 8 Základní koncepce vysílače DRM

Závěr

Technika televizního a rozhlasového přenosu směřuje zcela jednoznačně k digitálním systémům, které přinesou uživatelům zvýšení kvality a rozšíření sortimentu poskytovaných služeb. Z celospolečenského hlediska pak digitalizace nabízí podstatné úspory drahocenných - a v současnosti už značně přeplněných rádiových pásem. Významné jsou v době energetických krizí také výrazné energetické úspory, a to jak na straně vysílačů tak individuálních přijímačů, které mají mj. příznivý dopad na naše životní prostředí.

Literatura:

- [1] Žalud, V.: Moderní radioelektronika. 1. vydání. BEN - vydavatelství technické literatury, Praha 2000.
- [2] Hrstka, J: Druhá generace standardu pro zemské digitální televizní vysílání. Sdělovací technika č. 1, 2009.
- [3] Kratochvíl, T.: Standardy DVB pro zemské digitální... Sděl. technika č. 3, 2009.