

Technické prostředky rádiových systémů, základní principy přenosu signálu, základní vlastnosti a vliv přenosového kanálu

Ing. Karel Ulovec, Ph.D.

ČVUT, Fakulta elektrotechnická

xulovec@fel.cvut.cz

Tyto podklady k přednášce slouží jako pomůcka pro studenty předmětu B2M37DTRA.
Žádné jiné využití (zveřejňování, kopírování, apod.) není povoleno bez projednání s autorem!

©



Technické prostředky rádiových systémů, základní principy přenosu signálu, základní vlastnosti a vliv přenosového kanálu

Technické prostředky rádiových systémů, základní principy přenosu signálu

- Obecné schéma přenosu informace komunikačním kanálem, radiokomunikační řetězec
- Přenosová kapacita kanálu (definice, souvislosti)

Základní vlastnosti a vliv přenosového kanálu

- Základní vlastnosti rádiových kanálů
- Vliv přenosového kanálu na přenos analogové a digitální TV

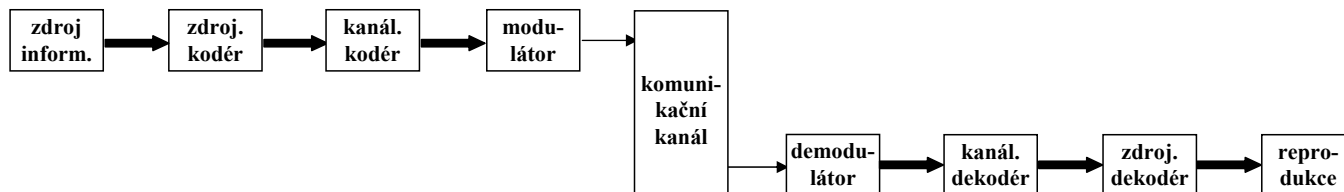
Rozšířená témata pro přípravu studentů ke zkoušce



Technické prostředky rádiových systémů, základní principy přenosu signálu

Obecné schéma přenosu informace komunikačním kanálem, radiokomunikační řetězec

- Kanálem se přenáší spojitý analogový signál ... úprava pomocí zdrojového a kanálového zpracování



Zdroj informace

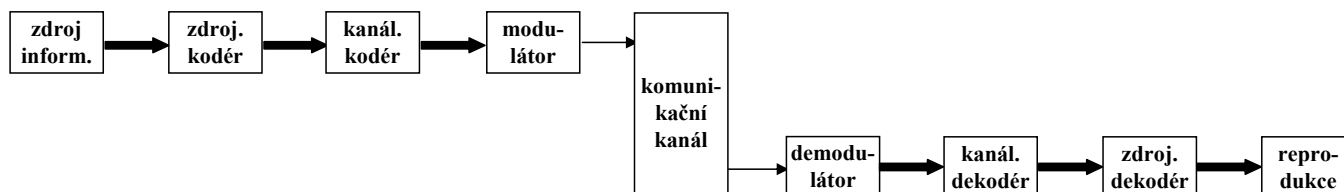
- Generuje zprávy (signál, data), které se mají přenést do místa reprodukce
- Míra vygenerovaných dat za jednotku času = bitová rychlost (b/s)

Zdrojové zpracování (kódování) – získat signál pro přenos

- Snímání (obrazu, zvuku, řeči)
- Digitalizace
- Komprese dat (zdrojové kódování)
- Signál v základním pásmu (BB, Baseband), nízkofrekvenční signál (LF, Low Frequency), informační signál, modulační signál / datový tok (často ve formátu multiplexu více typů obsahu)

Technické prostředky rádiových systémů, základní principy přenosu signálu

Obecné schéma přenosu informace komunikačním kanálem, radiokomunikační řetězec



Kanálové zpracování (kódování) – přizpůsobení informačního signálu/datového toku k přenosu

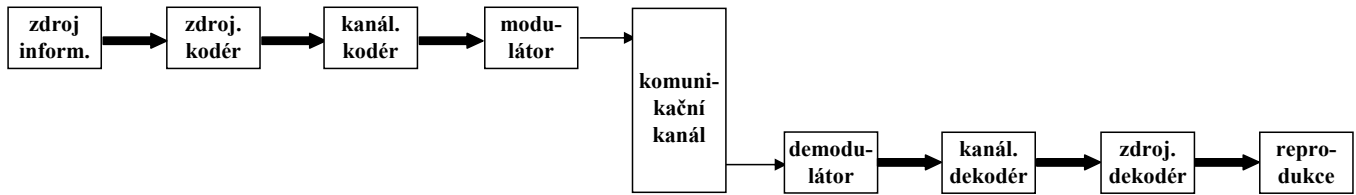
- Přizpůsobení datového toku (tvoření rámců, hlavičky)
- Znáhodnění datového toku
- Protichybové zabezpečení (ochranné kanálové kódování)
- Zabezpečený datový tok (rámce, multiplex)

Modulace

- Ke konkrétním stavům datového toku (bity, skupiny bitů) informačního signálu jsou přiřazeny konkrétní stavy z modulačního prostoru, symboly (stavy) modulovaného signálu, vhodné pro přenos komunikačním kanálem ... mapování
- Vysokofrekvenční signál (HF, High Frequency), rádiový signál (RF, Radio Frequency), modulovaný signál

Technické prostředky rádiových systémů, základní principy přenosu signálu

Obecné schéma přenosu informace komunikačním kanálem, radiokomunikační řetězec



Kanálové kódování společné s modulací

- V moderních systémech lze těžko jednoznačně oddělit kanálové kódování a modulaci
- (Popřípadě zjednodušené schéma přenosu vypouští blok modulace)

Komunikační kanál

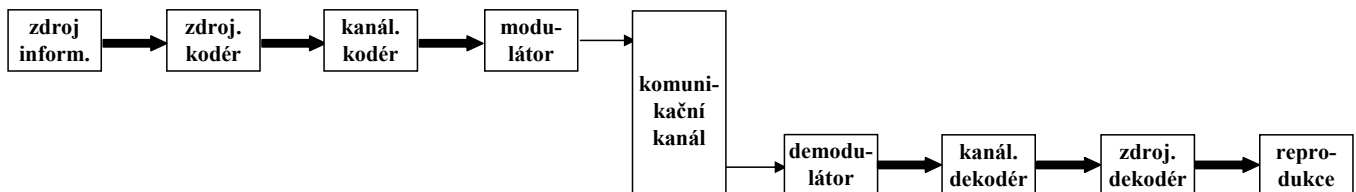
- Prostředek zajišťující přenos informace – VF vedení, koaxiální kabel, optický kabel, bezdrátový spoj (terestrický, satelitní), světelný paprsek
- Nezanedbatelně může ovlivnit přenos informace – způsobení chyb v datovém toku

Demodulátor

- Inverzním způsobem vůči modulátoru získat z modulovaného signálu (zabezpečený) datový tok – ke každému konkrétnímu stavu modulačního prostoru (+ vliv kanálu) přiřadit (například nejpravděpodobnější) stav informačního datového toku

Technické prostředky rádiových systémů, základní principy přenosu signálu

Obecné schéma přenosu informace komunikačním kanálem, radiokomunikační řetězec



Kanálové dekódování

- Známý způsob zpracování při kanálovém kódování (např. doplněná redundance) je při dekódování využit pro detekci či opravu chyb v datovém toku

Zdrojové dekódování

- Z komprimovaného datového toku je rekonstruován datový tok (pokud možno co nejvíce podobný původnímu)

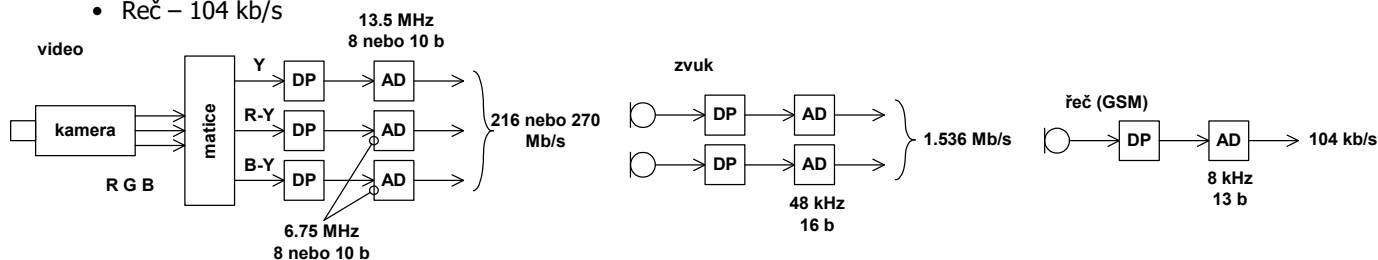
Reprodukce

- Datový tok (informační signál) je převeden na obraz, zvuk způsobující fyziologický vjem

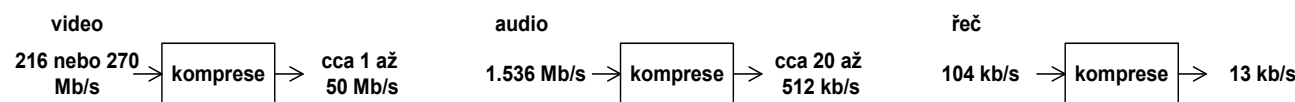
Technické prostředky rádiových systémů, základní principy přenosu signálu

Zdrojové zpracování – digitalizace, komprese

- Digitalizace – vzorkování, kvantování, vyjádření kódovým slovem
 - Minimální vzorkovací kmitočet = 2 x maximální kmitočet přenášeného signálu
 - Příklady: obraz (pouze jas) 2 x 6,5 MHz; zvuk 2 x 20 kHz; řeč: 2 x 3 kHz
 - Počet kvantizačních hladin = 2^{počet bitů slova}
- Bitové rychlosti nekomprimovaného datového toku – příklady
 - Video – SDTV 4:2:2 (CCIR 601, ITU 601, SDI – sériový přenos nekomprimovaného digitalizovaného obrazového signálu) 270 Mb/s; HDTV cca 1 Gb/s
 - Zvuk (2 kanály) – 1.5 Mb/s
 - Řeč – 104 kb/s



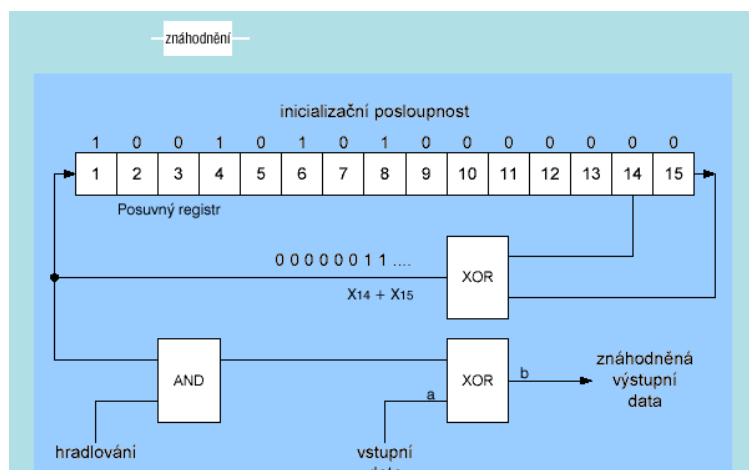
- Bitové rychlosti komprimovaného datového toku – příklady



Technické prostředky rádiových systémů, základní principy přenosu signálu

Kanálové zpracování – znáhodnění datového toku

- Zrovnoměrnění rozložení energie; zamezí shluku jedniček či nul
- Pomocí sčítání (binární, modulo 2) dat bit po bitu s pseudonáhodnou posloupností (PRBS = Pseudo-random Binary Sequence); příklad: ... 0 0 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0 0 1 ...
- Na přijímací straně opětovné sčítání – tím získáme původní posloupnost dat



a	p	a XOR p = b
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

b	p	b XOR p = a
0	0	0
1	1	0
1	0	1
0	1	1



Technické prostředky rádiových systémů, základní principy přenosu signálu

Kanálové zpracování – protichybové zabezpečení

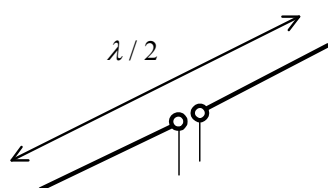
- BER (Bit Error Ratio) = počet chybně přenesených bitů / počet celkově přenesených bitů za jednotku času
- Prokládání – rozptýlení shluku chyb, rovnoměrné rozprostření informace do časově-kmitočtového prostoru
- Ochranné kanálové kódování – zavedení úmyslné redundance pro možnost opravy (korekční) či alespoň detekce (detekční) chyb (samoopravné kódy FEC, Forward Error Correction)
- Využívání diverzity (viz dále MIMO, MISO, SIMO)
- Opakování přenosu – vyžaduje zpětný kanál (ARQ, Automatic Repeat Request)
- Hybridní ARQ (HARQ, Hybrid ARQ) – kombinuje FEC a ARQ (je výhodné využít i částečně porušená data a kombinovat je s daty opakovaně přenášenými, při opakovaném přenosu je možno data více zabezpečit)
- Adaptivní modulace/kódování – podle stavu kanálu; nutno provádět měření a předávání „naměřených hodnot“



Technické prostředky rádiových systémů, základní principy přenosu signálu

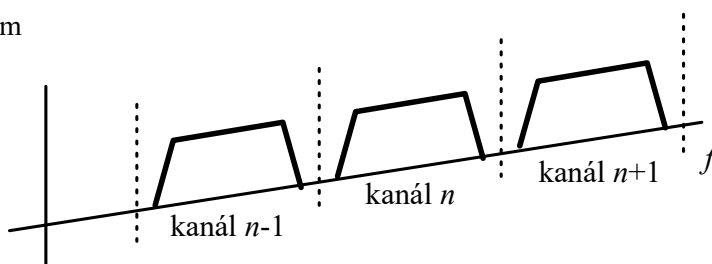
Modulace

- Úprava signálu do formy vhodné pro přenos komunikačním kanálem (vyslat / přijmout anténou) signálu
 - Signál v základním pásmu nelze vyzářit anténou (25 Hz až 6.5 MHz vs. rozměry antény) – modulací se signál přeloží do vysokých frekvencí, k vyzáření pak stačí jediná anténa
 - Využitím nosných vln s různými kmitočty se do frekvenčního prostoru poskládá několik přenosů (ačkoli existují rovněž různé techniky umožňující přenos více různých informací společným rádiovým kanálem)
- Ovlivňování vysokofrekvenčního signálu (nosné vlny) signálem přenášejícím informaci (informačním signálem, modulačním signálem), získáme modulovaný signál



$$\lambda = \frac{c}{f} \dots f = 25 \text{ Hz až } 6.5 \text{ MHz} \rightarrow \lambda = 12000 \text{ km až } 46 \text{ m}$$

$$100 \text{ MHz} \rightarrow \lambda = 3 \text{ m}$$



Technické prostředky rádiových systémů, základní principy přenosu signálu

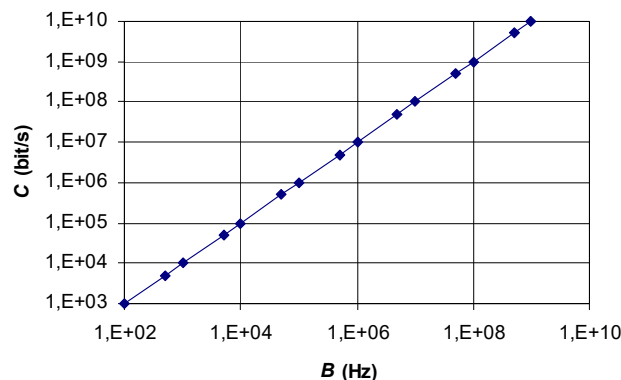
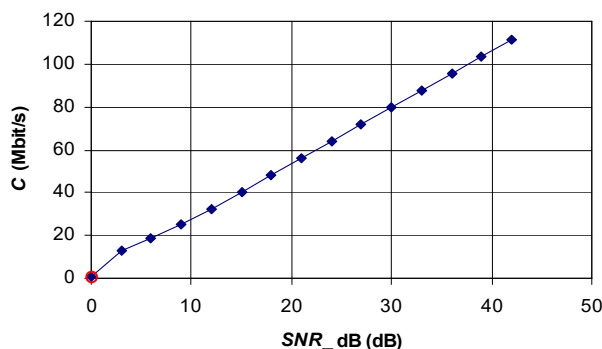
Přenosová kapacita kanálu

- Ve smyslu Shannonova teoremu (1948): C je maximální počet bitů přenesených za 1 sekundu (bit/s) s chybovostí **BER blížící se k nule**, v rádiovém kanálu o šířce pásma B , za přítomnosti pouze šumu, SNR ... poměr výkonů užitečného signálu ku šumu

$$C = B \log_2(1 + SNR)$$

- Základ logaritmu je 2
- SNR se ve vztahu vyskytuje ve smyslu poměru výkonů (nikoliv dB hodnota)
- Např. pro $B = 8$ MHz:

a pro $SNR = 1000$ ($SNR_{dB} = 30$ dB):



Technické prostředky rádiových systémů, základní principy přenosu signálu

Přenosová kapacita kanálu $C = B \log_2(1 + SNR)$ – důsledky a souvislosti

- Není možné přenášet data vyšší rychlostí (než C) a zároveň dosáhnout přijatelně nízké hodnoty chybovosti (blížící se nule)
- SNR ve vzorci představuje kritickou mez – pokud se šum zvýší nad limitní (SNR se sníží pod kritickou mez), než pro který je systém navržen, chybovost značně narůstá
 - Mohou existovat systémy, které přizpůsobují kanálové zpracování signálu (např. volbou modulace) aktuálnímu stavu kanálu, tj. hodnotě SNR , a tedy C je optimální vzhledem k vlastnostem kanálu
 - Mohou existovat systémy, které přizpůsobují využitou B maximálně aktuálním možnostem, a tedy umožňují přenos s co nejvyšší C
- Při uvážení časově omezeného kanálového kódování v systému s rušením nelze přenést informaci zcela bez chyb, tak jako v ideálním systému bez rušení, vhodnou volbou kanálového kódování se můžeme limitně přiblížit; podstatné rovněž je zpoždění zpracování signálu vlivem kanálového kódování a dekódování
- Pokud se rychlost přenosu dat blíží kapacitě, vlastnosti modulovaného signálu se blíží vlastnostem šumu
- Srovnání teoretických a reálných hodnot (např. C a skutečné, užitečné, bitové rychlosti přenosu dat) poskytuje představu o míře využití kanálu



Technické prostředky rádiových systémů, základní principy přenosu signálu

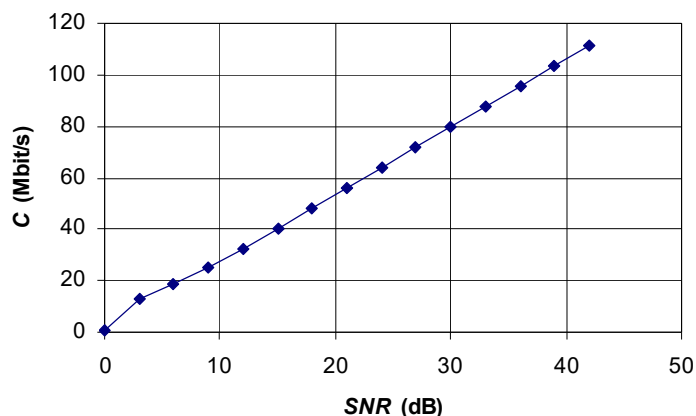
Přenosová kapacita kanálu $C = B \log_2(1 + SNR)$ – příklady

1) Digitální vysílání terestrické televize DVB-T v 8 MHz kanále (při volbě parametrů 64QAM, CR 3/4, GI 1/8) dosahuje užitečnou bitovou rychlost 24,9 Mb/s a pro příjem vyžaduje je minimální $SNR = 19$ dB.

- Podle teorému je kapacita C pro $SNR = 19$ dB v šířce 8 MHz přibližně 50,6 Mb/s. Systém dokáže využít teoretickou kapacitu na 49,2 procenta.
- Teoretické minimální SNR je při $C = 24,9$ Mb/s v šířce 8 MHz přibližně 8,8 dB. Skutečná hodnota minimálního SNR je vzdálena od teoretické hodnoty o 10,2 dB.

2) Digitální vysílání terestrické televize DVB-T2 v 8 MHz kanále (256QAM, CR 5/6, GI 1/32) dosahuje užitečnou bitovou rychlost 47,3 Mb/s (v rozšířeném módu) a pro příjem vyžaduje minimální $SNR = 23$ dB.

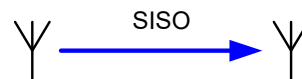
- Podle teorému je kapacita C pro $SNR = 23$ dB v šířce 8 MHz přibližně 61,2 Mb/s. Systém dokáže využít teoretickou kapacitu na 77,3 procenta.
- Teoretické minimální SNR je při $C = 47,3$ Mb/s v šířce 8 MHz přibližně 17,7 dB. Systém je vzdálen od teoretického min. SNR o 5,3 dB.



Technické prostředky rádiových systémů, základní principy přenosu signálu

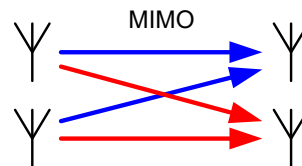
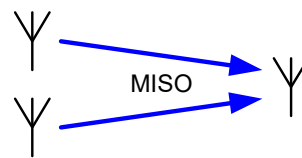
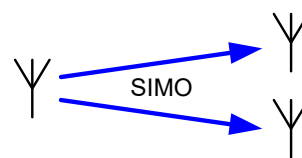
Systémy s jedinou vysílací a přijímací anténou

- Jediná vysílací a přijímací anténa Single-Input Single-Output (SISO)



Systémy s více anténami

- Jen na přijímací straně Single-Input Multiple-Output (SIMO)
- Jen na vysílací straně Multiple-Input Single-Output (MISO)
- Na vysílací i přijímací straně Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)
- Vzniká více nezávislých přenosových cest (nekorelované úniky)
- Lze rovněž využít různé polarizace antén



MIMO, MISO, SIMO

- Diverzitní příjem
 - Vysílají / přijímají se kopie signálu (např. při přijímací diverzitě výběr nej kvalitnějšího / kombinace signálů)
 - Snižuje se tím BER
 - Vhodné pro malé odstupy SNR
- Řízení anténních svazků
 - Vhodným napájením anténní řady lze ovlivnit celkovou vyzařovací charakteristiku
- Prostorový multiplex
 - Nekorelované přenosové cesty lze využít k násobnému užití kanálu (více uživatelů, násobná přenosová rychlost)



Základní vlastnosti a vliv přenosového kanálu

rozsah vln kmitočtový rozsah	názvy a zkratky dle vlny (česky) / kmitočtu (anglicky)	příklady využití
100000 km – 10000 km 3 Hz – 30 Hz	extrémně dlouhé vlny, EDV Extremely Low Frequency ELF	komunikace s ponorkami
10000 km – 1000 km 30 Hz – 300 Hz	superdlouhé vlny, SDV Super Low Frequency SLF	komunikace s ponorkami
1000 km – 100 km 300 Hz – 3 kHz	ultradlouhé vlny, UDV Ultra Low Frequency ULF	komunikace v dolech
100 km – 10 km 3 kHz – 30 kHz	velmi dlouhé vlny, VDV Very Low Frequency VLF	navigace, kmitočtové a časové normály, bezdrátové měřiče pulsu
10 km – 1 km 30 kHz – 300 kHz	dlouhé (kilometrové), DV Low Frequency LF	AM rozhlas, DRM , námořní komunikace, letecká dálková navigace, komunikace v energetice
1 km – 100 m 300 kHz – 3 MHz	střední (hektametrové), SV Medium Frequency MF	AM rozhlas, DRM , amatérské pásmo
100 m – 10 m 3 MHz – 30 MHz	krátké (dekametrové), KV High Frequency HF	AM rozhlas, DRM , vojenská komunikace, občanské pásmo (CB)
10 m – 1 m 30 MHz – 300 MHz	velmi krátké (metrové), VKV Very High Frequency VHF	FM rozhlas, TV (I., II., III. pásmo), DAB , letecká, lodní komunikace, amatérské pásmo
1 m – 10 cm 300 MHz – 3 GHz	ultrakrátké (decimetrové), UKV Ultra High Frequency UHF	TV (IV., V. pásmo), DAB , radar, GSM, CDMA, GPS, průmyslové aplikace, Bluetooth, Zigbee, WiFi, WiMax
10 cm – 1 cm 3 GHz – 30 GHz	superkrátké (centimetrové), SKV Super High Frequency SHF	pozemské směrové spoje, družicové spoje (také TV, rozhlas) , radary, UWB, WiFi, WiMax
1 cm – 1 mm 30 GHz – 300 GHz	extrémně krátké (milimetrové), EKV Extremely High Frequency EHF	radary, naváděcí systémy, radioastronomie, vysokorychlostní mikrovlnný přenos dat, výzkum
1 mm – 0,1 mm 300 GHz – 1 THz	decimilimetrové	výzkum



Základní vlastnosti a vliv přenosového kanálu

Základní vlastnosti rádiových kanálů

– Útlum

- Modelování útlumu vlivem ztrát při šíření pomocí útlumu $d^{-\gamma}$, kde d je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem, γ je koeficient ztrát šířením mezi 2 (volné prostředí) až 7 (členité prostředí), útlum v dB:

$$P_L = 10\gamma \log(d)$$

– Šum

- Vliv šumu vzhledem k systému – zpracovávaná šířka pásma kmitočtů B_{syst}
- Výkon šumu $P_s = N_0 \cdot B_{syst}$, N_0 je spektrální výkonová hustota šumu
- Poměr výkonů užitečného signálu a šumu $SNR = P_{sig} / P_s$
- V decibelové míře $SNR_{(dB)} = 10 \log_{10} (P_{sig} / P_s)$
- Modelování pomocí AWGN kanálu:
Additive – průchod signálu kanálem se šumem je modelován přičtením náhodného signálu
White – náhodný signál má rovnoměrnou spektrální výkonovou hustotu N_0
Gaussian – náhodný signál nabývá hodnot Gaussovského rozdělení (střední hodnota je 0 a rozptyl souvisí s výkonem)

Noise



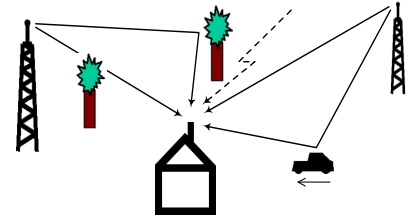
Základní vlastnosti a vliv přenosového kanálu

Základní vlastnosti rádiových kanálů

– Vícecestné šíření

- Vlivem odrazů (od nepohyblivých a pohyblivých objektů)
- Výsledkem je únik – na přijímací anténě jsou sčítány příspěvky s uvažováním fáze; je-li fázový posuv mezi přímým a odraženým signálem lichý násobkem 180° , výsledný signál je zeslaben
- Pokud zpoždění odraženého signálu (případně délka rozptylu signálu v čase) se blíží či přesahuje dobu trvání symbolu, dochází k překrývání sousedních datových symbolů – **mezisymbolová interference ISI** (Inter-Symbol Interference)
- Modelování pomocí součtu opožděných replik původního signálu $s(t)$ – v každé cestě jsou definovány relativní útlum l_i a relativní zpoždění τ_i (relativní vůči první cestě)

$$v(t) = \sum_i l_i e^{j2\pi f \tau_i} s(t)$$



- Dva základní typy dle ne/existence přímé cesty šíření:
Kanál typu Rician ... obsahuje základní nejsilnější přímou cestu (přijem na kvalitní směrové anténě)
Kanál typu Rayleigh ... není obsažena základní nejsilnější přímá cesta (přijem na všesměrovou anténu)

– Dopplerův efekt

- Pokud jsou vysílač a/nebo přijímač (či překážka způsobující odraz) v pohybu – vlivem pohybu dochází ke změně frekvence – u systému s více nosnými vlnami může docházet k **mezinosné interferenci ICI** (Inter-Carrier Interference)
- Modelování pomocí posunutí (či rozmítání) kmitočtu nosné vlny

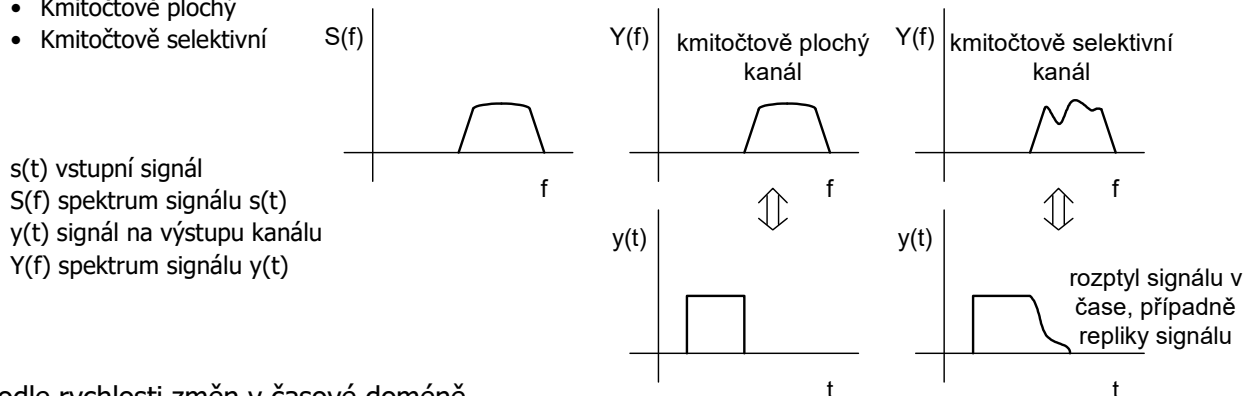


Základní vlastnosti a vliv přenosového kanálu

Základní dělení kanálu s únikem

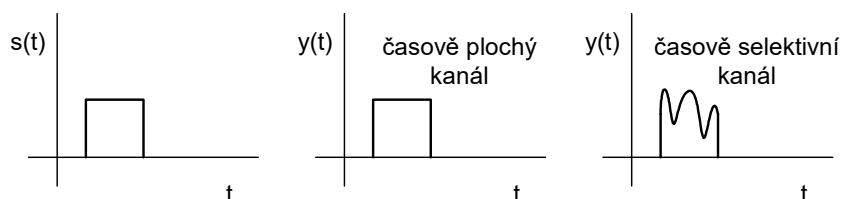
– Podle vlastností přenosové funkce (ve frekvenční doméně)

- Kmitočtově plochý
- Kmitočtově selektivní



– Podle rychlosti změn v časové doméně

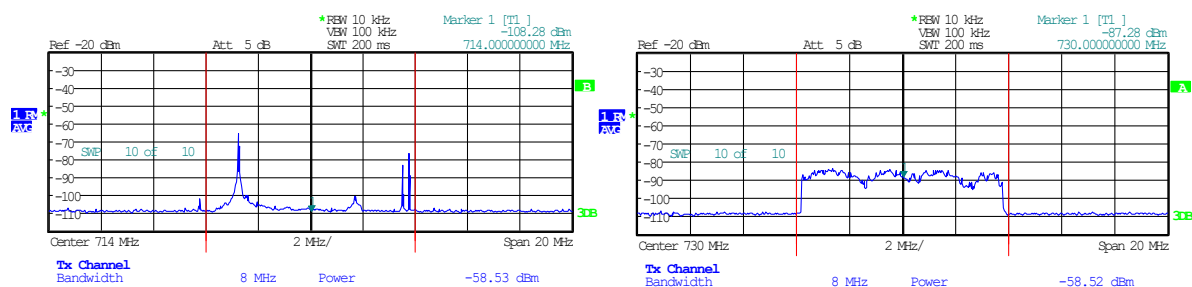
- Časově plochý
- Časově selektivní – změny (amplitudy a fáze) rychlejší než doba symbolu



Základní vlastnosti a vliv přenosového kanálu

Vliv přenosového kanálu – experiment s přenosem analogové a digitální TV

- Shodný výkon obou přijímaných signálů cca -58,5 dBm



Analog. TV

- Mírný šum
v obraze



Dig. TV

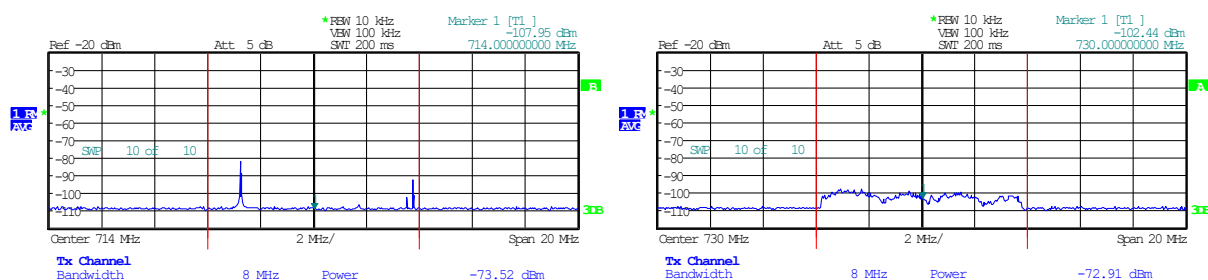
- Bez chyb



Základní vlastnosti a vliv přenosového kanálu

Vliv přenosového kanálu – experiment s přenosem analogové a digitální TV

- Shodný výkon obou přijímaných signálů cca -73 dBm



Analog. TV

- Šum v obraze



Dig. TV

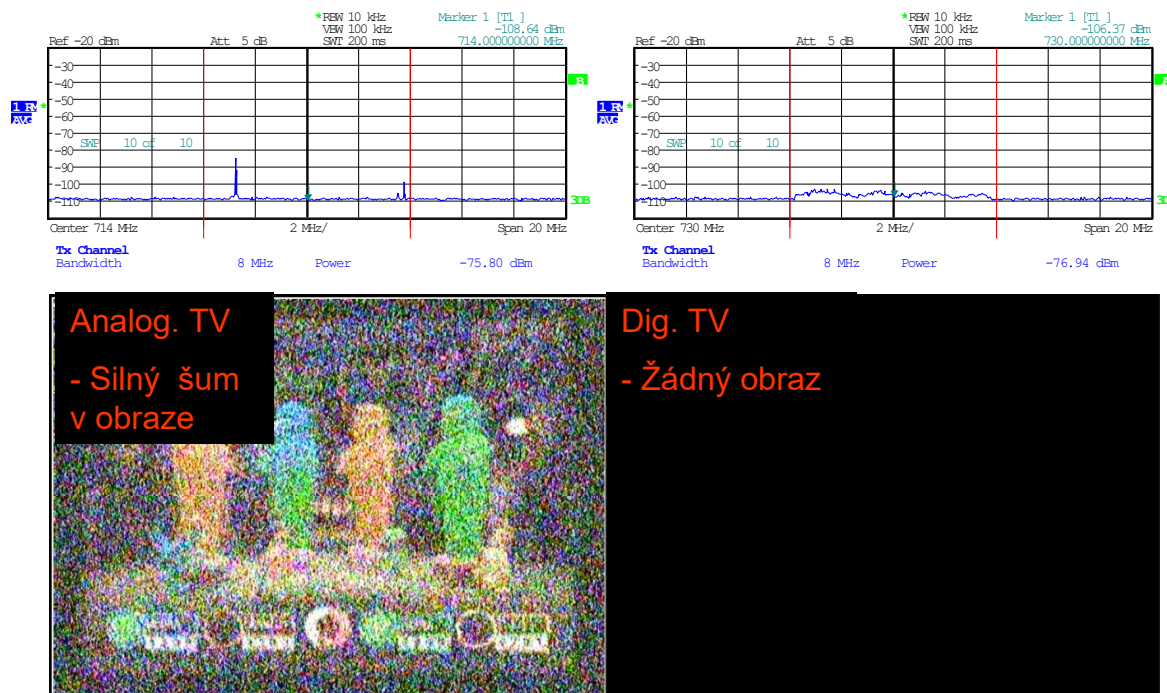
- Náhodné
poruchy v obraze



Základní vlastnosti a vliv přenosového kanálu

Vliv přenosového kanálu – experiment s přenosem analogové a digitální TV

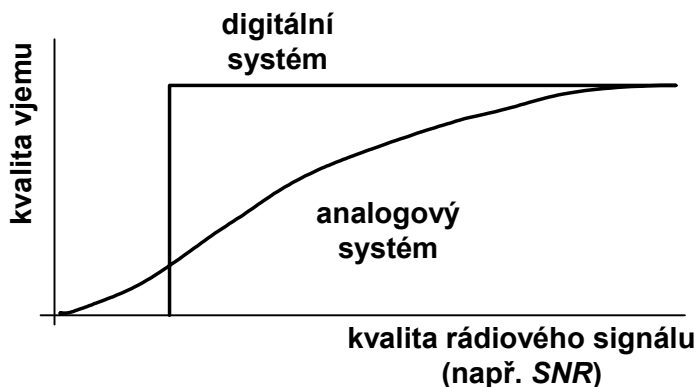
- Shodný výkon obou přijímaných signálů cca -76 dBm



Základní vlastnosti a vliv přenosového kanálu

Vliv přenosového kanálu – experiment s přenosem analogové a digitální TV

- Se snižující kvalitou rádiového signálu (SNR , BER) postupně klesá vnímaná kvalita obrazu analogové TV
- Kvalita obrazu digitální TV (daná zpracováním zdrojového signálu a kompresí) se nemění až do určité kritické hranice (minimální SNR , maximální BER). Je nutno připustit, že za touto hranicí je obraz analogové TV ještě rozpoznatelný ovšem s velmi zhoršenou kvalitou



Témata pro přípravu studentů ke zkoušce

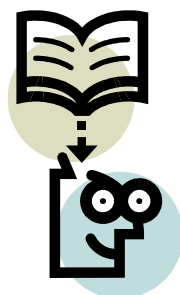
Základní principy přenosu signálu

- Obecné schéma přenosu informace komunikačním kanálem (význam jednotlivých bloků)
- Přenosová kapacita kanálu (definice, důsledky a souvislosti)

Základní vlastnosti rádiových kanálů (útlum, šum, vícecestné šíření, Dopplerův efekt)



Děkuji za pozornost,



prosím vaše dotazy ...

