

Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční síť

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!

©



Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční síť

Digitální modulace s jednou nosnou vlnou

Spektrum signálu digitální modulace s jednou nosnou vlnou

Ortogonální frekvenčně dělený multiplex OFDM

- Princip, spektrum, ochranný interval, pilotní buňky, vlastnosti systémů s OFDM

Jednofrekvenční síť v systému s OFDM

Rotovaný konstelační diagram

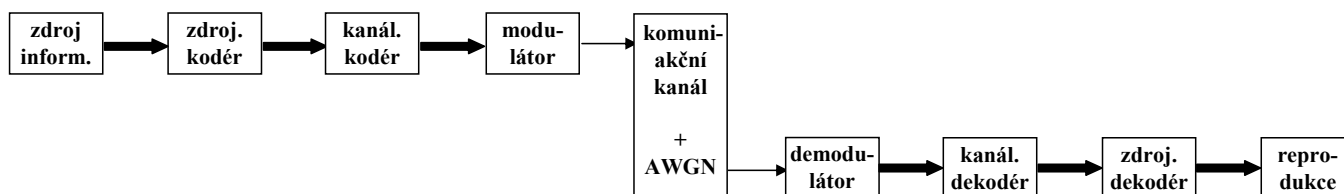
Hierarchická modulace, neuniformní modulace

Více úroňové kódování spojené s modulací

Rozšířená témata pro přípravu studentů ke zkoušce



Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční síť



Modulátor, modulace (mapování)

- Ke konkrétním stavům datového toku informačního signálu (bity, skupiny bitů) přiřazuje konkrétní stavy z modulačního prostoru, symboly (stavy) modulovaného signálu, vhodné pro přenos komunikačním kanálem
- Vstupuje informační signál, modulační signál / datový tok (často ve formátu multiplexu dat více typů obsahu), datová zpráva
- Vystupuje vysokofrekvenční signál (HF, High Frequency), rádiový signál (RF, Radio Frequency), modulovaný signál

Demodulátor, demodulace

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



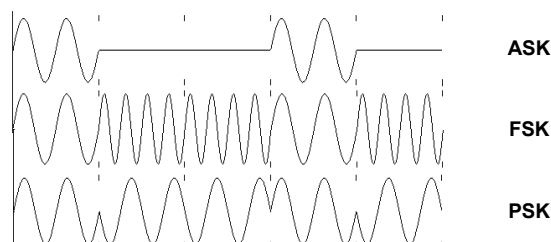
Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční síť

Digitální modulace s jednou nosnou vlnou

- Modulovaný signál nabývá stavů z konečné množiny
 - Stavy modulace, datové symboly
 - Počet stavů obvykle $M_D = 2^b$
- Přenášená informace je mapována na vysokofrekvenční signál – ovlivňovaný parametr:
 - Kmitočet ... FSK Frequency Shift Keying
 - Amplituda ... ASK Amplitude Shift Keying
 - Fáze ... PSK Phase Shift Keying
 - Či kombinace předchozích ... QAM Quadrature Amplitude Modulation (zároveň klíčování amplitudy a fáze)

$$s_n(t) = A_n(t)e^{j[\omega_n t + \Phi_n(t)]}$$

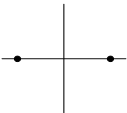
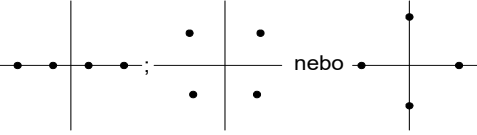
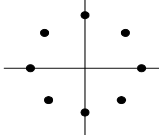
1 0 0 1 0



Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční síť

Digitální modulace s jednou nosnou vlnou

- Stav je platný po určité době – doba trvání symbolu T_s (symbolová doba, symbolový interval)
 - Symbolová rychlost $R = 1 / T_s$
- Jeden symbol je dán jedním či více vstupními bity
 - Počet bitů b
 - Počet stavů M_D
 - Bitová rychlost $R_b = b R_s$ $b = \log_2 M_D$
- Příklady M_D -stavových modulací:

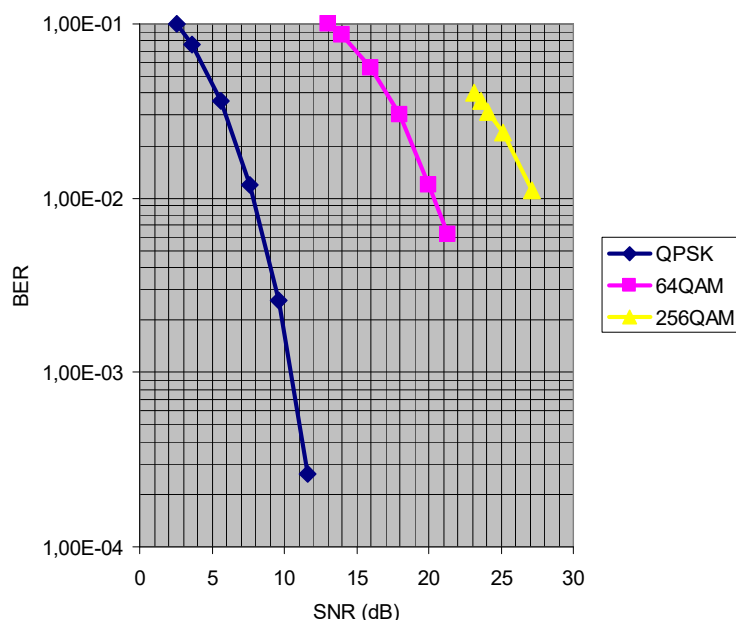
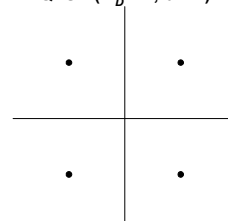
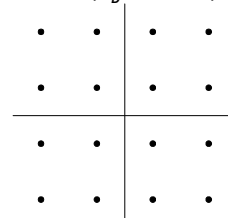
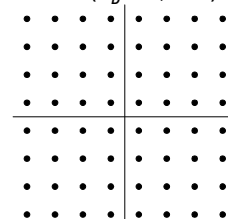
$b = 1, M_D = 2 \dots 2\text{-PSK} = \text{BPSK}$	$b = 2, M_D = 4 \dots 4\text{-ASK}; 4\text{-PSK} = \text{QPSK}$	$b = 3, M_D = 8 \dots 8\text{-PSK}$
		



Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční síť

Digitální modulace s jednou nosnou vlnou

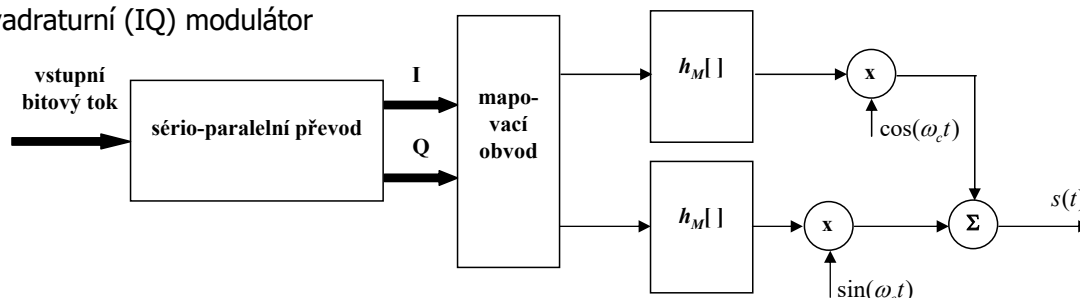
- S rostoucím počtem stavů roste bitová rychlost R_b
- S rostoucím počtem stavů se snižuje vzdálenost mezi stavy a tím odolnost při přenosu: na obr. $\text{BER} = f(\text{SNR})$, reálné měření

QPSK ($M_D = 4, b = 2$)16QAM ($M_D = 16, b = 4$)64QAM ($M_D = 64, b = 6$)

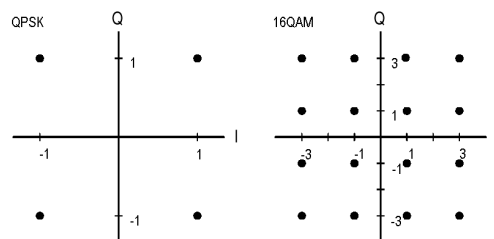
Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční sítě

Kvadrurní modulace QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

- Signál tvořen dvěma kvadrurními složkami
 - Soufázová složka I (Inphase), reálná část signálu komplexní obálky (cosinus)
 - Kvadrurní složka Q (Quadrature), imaginární část signálu komplexní obálky (sinus)
- Konstelční diagram – koncové body vektorů reprezentující signál v IQ rovině, IQ složky představují souřadnice koncového bodu vektoru (analogie s komplexními čísly)
- Kvadrurní (IQ) modulátor



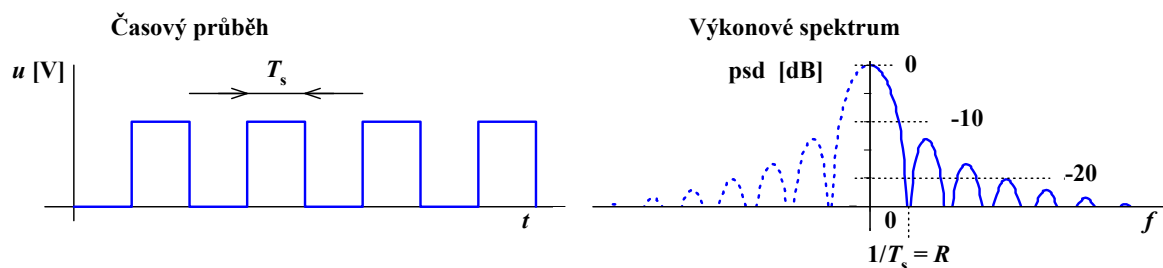
QPSK (Quadri Phase Shift Keying)	$\{-1, 1\}$
16-QAM ($a = 1$)	$\{-3, -1, 1, 3\}$
Neuniformní 16-QAM ($a = 2$)	$\{-4, -2, 2, 4\}$
Neuniformní 16-QAM ($a = 4$)	$\{-6, -4, 4, 6\}$
64-QAM ($a = 1$)	$\{-7, -5, -3, -1, 1, 3, 5, 7\}$
Neuniformní 64-QAM ($a = 2$)	$\{-8, -6, -4, -2, 2, 4, 6, 8\}$



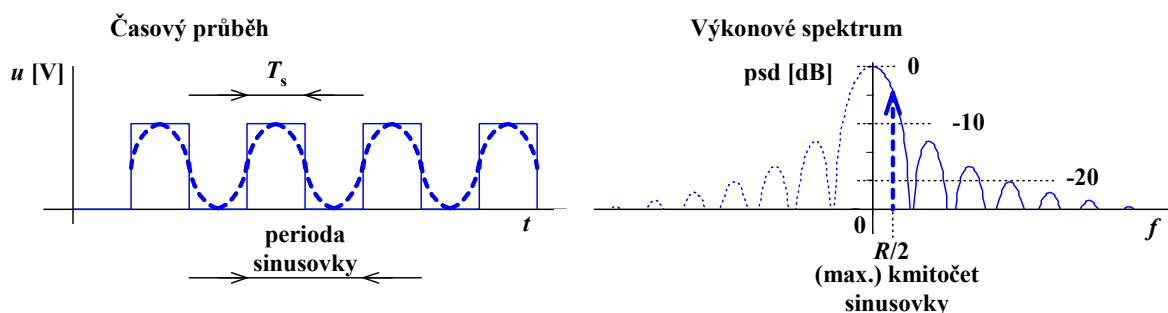
Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční sítě

Kvadrurní modulace QAM – filtrace $h_M[f]$

- Nejnepříznivější situace: sled 0 1 0 1 0 1 0 1 ...



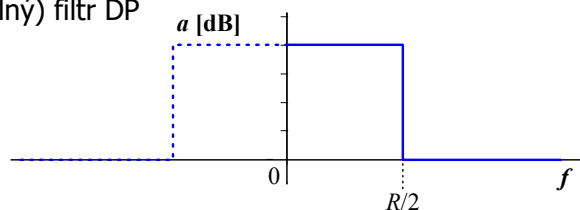
- Filtr musí propustit kmitočty alespoň do $R/2$ (čárkovaný sinusový signál v obr.)



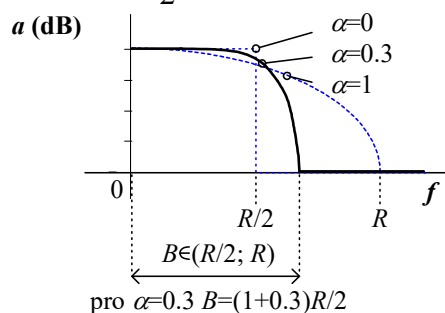
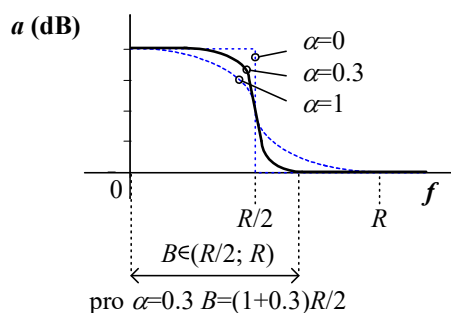
Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční síť

Kvadrurní modulace QAM – filtrace $h_M[\]$

- Ideální (nerealizovatelný) filtr DP



- DP s pozvolnějším útlumem a šířkou pásma $B = (1 + \alpha) \cdot \frac{R}{2}$



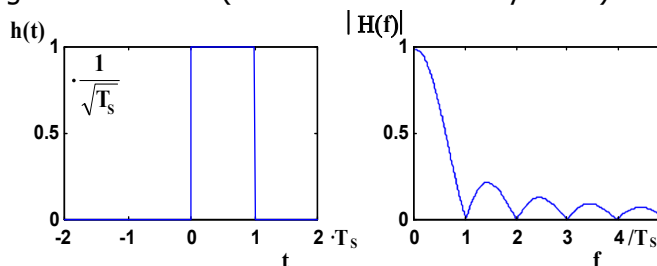
- Šířka pásma modulovaného VF signálu (okolo nosné vlny) $B_{VF} = 2B = (1 + \alpha) \cdot R$
 - Např.: $R \sim$ jednotky Mb/s ... $T_s \sim$ jednotky μ s ... $B_{VF} \sim$ jednotky MHz



Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční síť

Spektrum signálu digitální modulace s jednou nosnou vlnou

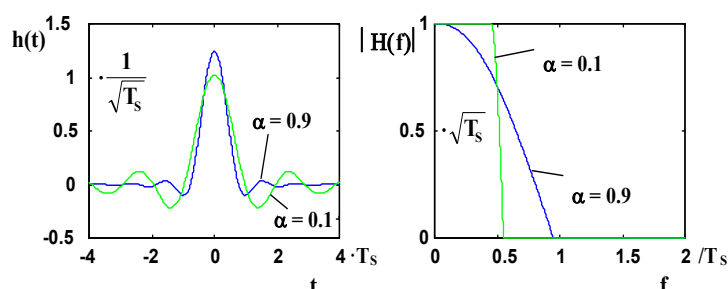
- Modulační signál tvarován tzv. modulačním impulsem (vzájemné násobení) – spektrum modulovaného signálu dáno tvarem spektra modulačního impulsu (konvoluce spekter)
- Obdélníkový modulační impuls – jeden symbol přenášené informace ovlivní úsek modulovaného signálu po dobu trvání právě 1 symbolu, tvar signálu nezměněn (v rámci relevantního symbolu)
 - Nekonečné spektrum, postranní laloky



- Modulační impuls se spektrem SqRRC – v časovém průběhu vymizí rychlé změny amplitudy, jeden symbol přenášené informace ovlivní delší úsek modulovaného signálu

- Tvar spektra podle volby koeficientu α
- Šířka pásma modulovaného signálu B_{VF} určena symbolovou rychlostí R a koeficientem α

$$B_{VF} = (1 + \alpha) \cdot R$$

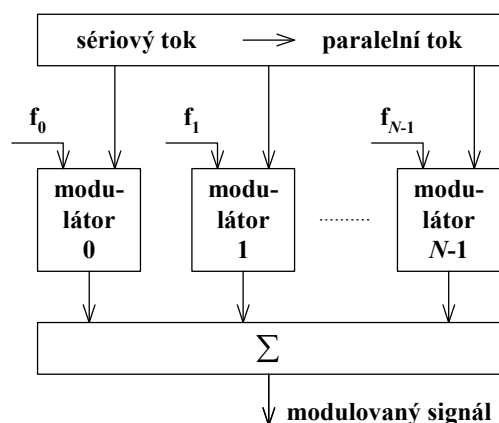


Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční sítě

Ortogonalní frekvenčně dělený multiplex OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

- N nosných vln
- Rozdělení dat do jednotlivých nosných vln
 - Dlouhé trvání symbolové doby T_s (N -krát oproti modulaci s jednou nosnou vlnou)
 - ... zvýšení odolnosti vůči přeslechům mezi vysílanými symboly ISI (Inter-Symbol Interference), důležité při šíření kanálem s odrazy
- Nosné vlny modulovány digitální modulací QAM
- Princip – sada paralelních modulátorů
- Signál získán zpětnou Fourierovou transformací (signál sestaven ve fr. doméně a transformací převeden do čas. domény)

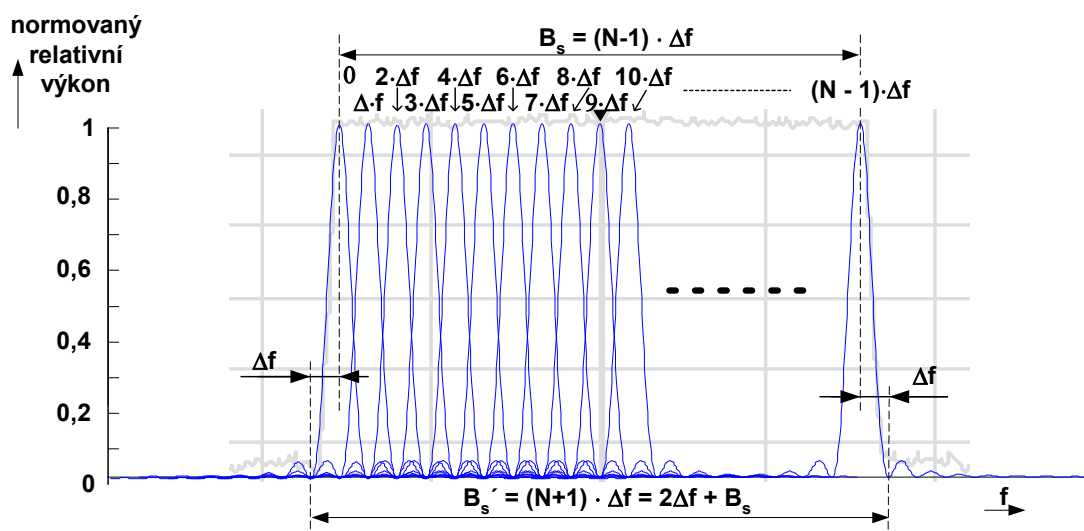
$$s(d) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{j2\pi d n / N} \quad 0 \leq d \leq N-1$$



Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční sítě

Spektrum OFDM

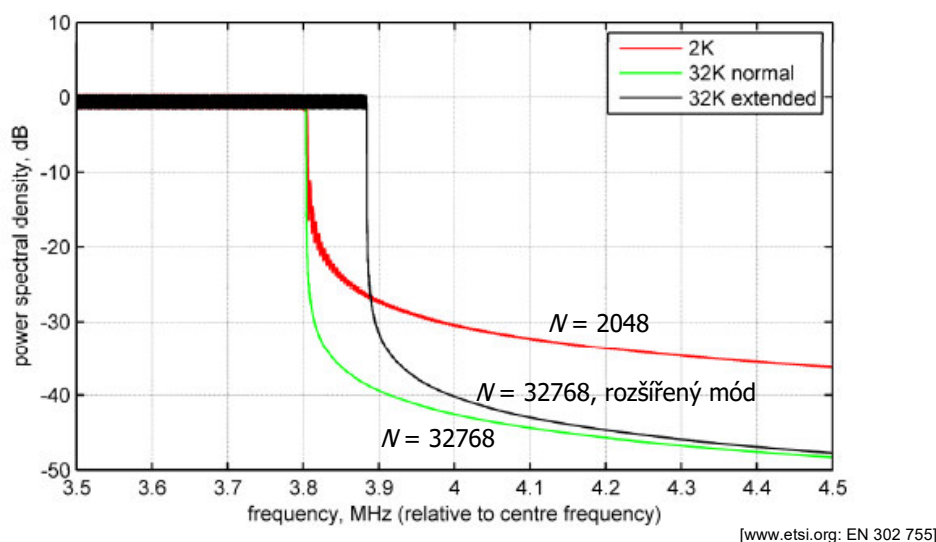
- Signál a tedy i jeho spektrum je dán/dáno stavem všech nosných vln
 - OFDM symbol (délka T_s)
 - Časový průběh podobný šumu pro velká N (centrální limitní věta)
- Nosné vlny jsou ortogonální (maximum každé se překrývá s minimy všech ostatních)
 - $\Delta f = 1/T_s$ a v případě ochranného intervalu (viz. dále) $\Delta f = 1/T_u$



Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční sítě

Spektrum OFDM – vliv počtu dílčích nosných vln

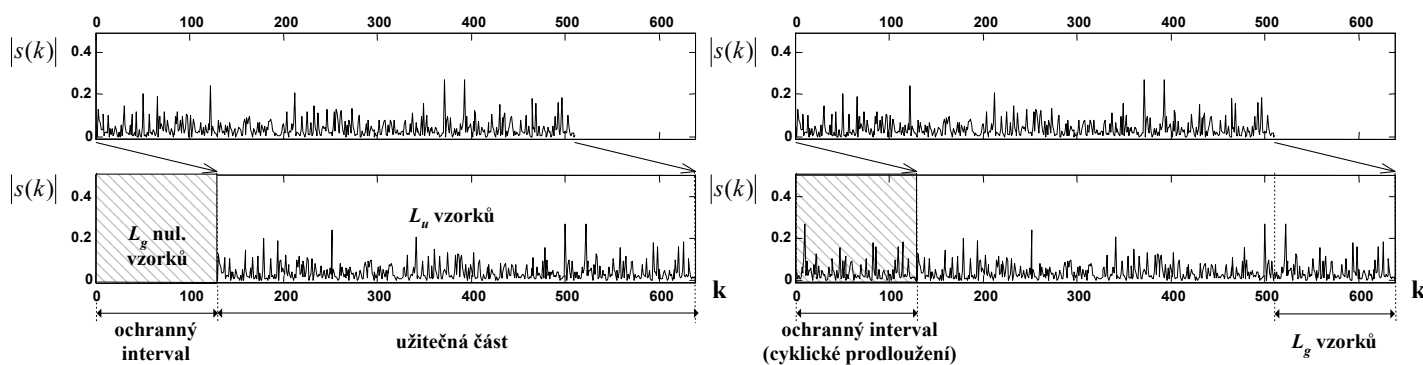
- Příklad pro nominální šířku pásma 8 MHz
- Pouze část spektra okolo poslední nosné vlny
- Velké rozměry FFT ... rychleji klesá nežádoucí vyzařování - důležité pro módy s rozšířenou šířkou pásma (rozšířený mód)



Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční sítě

Ochranný interval (Guard Interval) v systému s OFDM

- Další snížení vlivu odrazů – signál má čas „doznít“
- Více možností
 - Vložit nulové vzorky
 - Zopakovat část symbolu – tzv. cyklické prodloužení
 - Vložit pseudonáhodnou posloupnost
- Využívá se při synchronizaci



Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční sítě

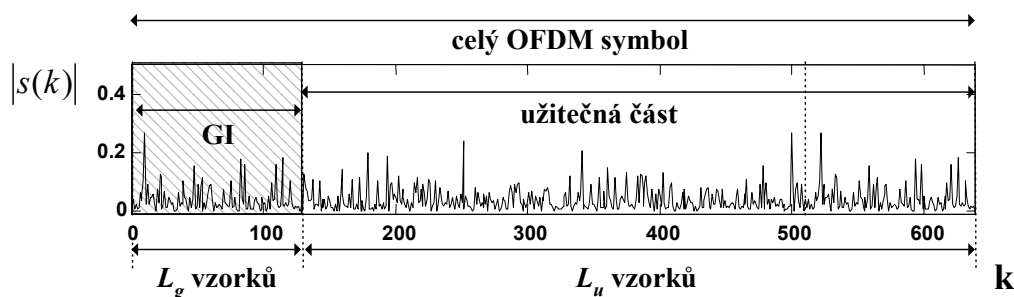
Ochranný interval (Guard Interval) v systému s OFDM

- Snižuje spektrální účinnost a užitečnou přenosovou rychlost v poměru

$$\frac{L_u}{L_u + L_g} = \frac{T_u}{T_s} = \frac{T_u}{T_u + \Delta T}$$

ΔT je délka ochr. intervalu o L_g vzorcích

T_u je délka užitečné části symbolu o L_u vzorcích



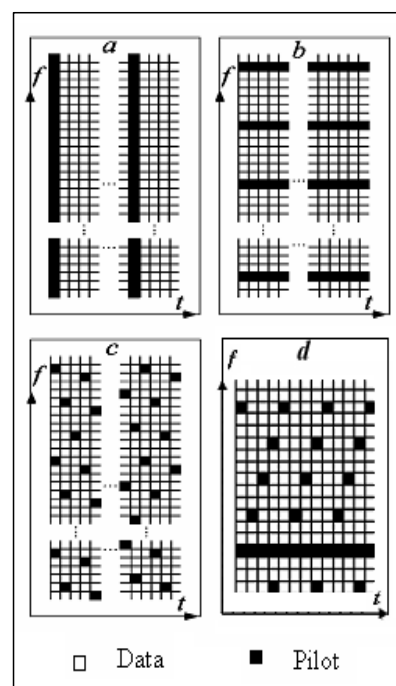
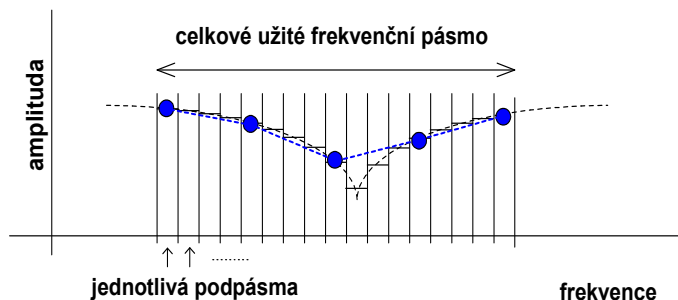
- Doba trvání (celého) symbolu $T_s = T_u + \Delta T$
- $\Delta T / T_u$ např. 1/4, 1/8, 1/16, 1/32
- OFDM s ochranným intervalem $\Rightarrow \Delta f = 1/T_u$



Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční sítě

Pilotní OFDM buňky

- Buňka (OFDM cell) dána polohou v čase (konkrétní OFDM symbol) a ve frekvenci (konkrétní dílčí nosná vlna)
- Nejsou modulovány užitečnými daty; amplituda i fáze jsou známy (např. dány standardem)
- Obvykle vysílány s vyšším výkonem než datové buňky
- Různé možnosti rozložení v čase a frekvenci
 - Viz obr. – kontinuální (a, b) vs. rozprostřené (c) nebo kombinace (d)
- Synchronizace, odhad stavu kanálu (a následná ekvalizace)
 - V přijímači je měřena amplituda a fáze – slouží k odhadu vlivu kanálu; důležité pro odstranění vlivu odražených signálů

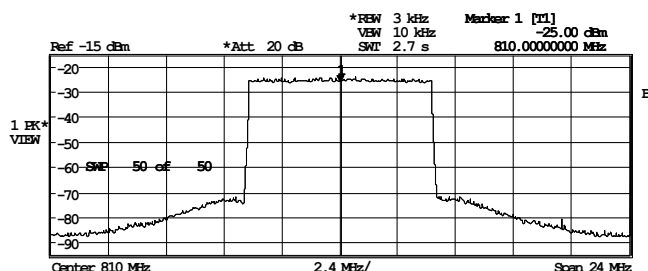


Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční sítě

Vlastnosti systémů s OFDM

- Výhodný tvar spektra s ohledem na využití kmitočtového pásma
- Výhodný tvar spektra s ohledem na rušení vně kanálu (především sousedních kanálů)
- Odolnost proti úzkopásmovému rušení
 - Při užití OFDM s protichybovým zabezpečením lze určitý počet chyb opravit
- Odolnost proti vícecestnému šíření (dlouhý symbolový interval, ochranný interval, odhad stavu kanálu a kompenzace využitím pilotních buněk)
 - Odolnost se zvyšuje s rostoucí délkou trvání ochranného intervalu
 - Mohou vznikat jednofrekvenční sítě SFN (Single Frequency Network) – viz dále

Spektrum signálu získané spektrálním analyzátořem:



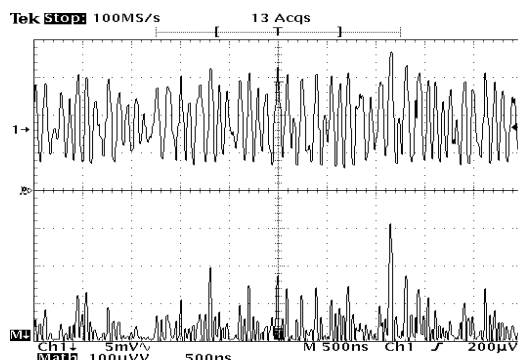
Úzkopásmové rušení:



Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční sítě

Vlastnosti systémů s OFDM

- Při ztrátě ortogonality nosných vln dochází k přeslechům mezi nosnými vlnami ICI (Inter-Carrier Interference)
 - Např. vlivem nepřesného vzorkování – pak rozestup nosných vln v přijímači nedopovídá stavu na vysílači
 - Ale také vlivem vzájemného pohybu vysílače a přijímače (Dopplerův efekt) v prostředí s odraženými signály (od pohyblivých překážek) – při mobilním příjmu je lepší volit větší rozestupy nosných vln
- Šumový charakter časového průběhu signálu (v obr. nahoře: Časový průběh signálu OFDM)
 - Vysoký poměr špičkové hodnoty výkonu oproti střední hodnotě – důležité pro koncové stupně zesilovačů ve vysílačích (v obr. dole: Okamžitá hodnota výkonu signálu OFDM)



Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční síť

Jednofrekvenční síť (SFN, Single Frequency Network) v systému s OFDM

- Systém s OFDM umožňuje budování jednofrekvenční sítě, ve které se opakovaně užívá stejného kmitočtu pro vysílání z různých vysílačů – výhodné při nedostatku kmitočtů
 - Přijímač (v systému s OFDM) je schopen přijímat signál skládající se z různě opožděných příspěvků
 - Odražený signál či signál vysílaný z jiného vysílače na stejném kmitočtu mají stejné účinky
- Důležité podmínky: vysílány jsou zcela stejné signály
 - Stejná data
 - Stejná technologie – dodržení standardu, stejné algoritmy zpracování signálu
 - Synchronizované signály - synchronizace pomocí GPS



Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční síť

Jednofrekvenční síť (SFN, Single Frequency Network) v systému s OFDM

- Rozsah sítě – max. vzdálenost vysílačů určena délkou trvání ochranného intervalu
 - Pro rozlehlé sítě nutno volit velký počet nosných vln
 - Příklady délky ochranného intervalu a maximální vzdálenosti vysílačů pro terestrické vysílání digitální TV druhé generace (v 8 MHz kanále):

Ochranný interval [μ s] --- Vzdálenost vysílačů [km]

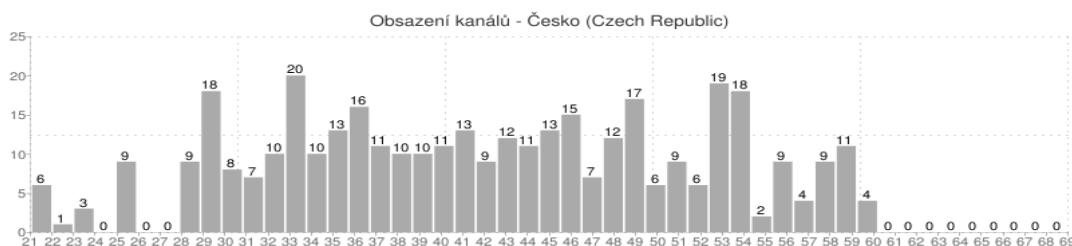
		$\Delta T / T_u$						
		1/128	1/32	1/16	19/256	1/8	19/128	1/4
F F T	32 K	28 --- 8,4	112 --- 33,6	224 --- 67,2	266 --- 79,8	448 --- 134,4	532 --- 159,6	N/A
	16 K	14 --- 4,2	56 --- 16,8	112 --- 33,6	133 --- 39,9	224 --- 67,2	266 --- 79,8	448 --- 134,4
	8 K	7 --- 2,1	28 --- 8,4	56 --- 16,8	66,5 --- 19,95	112 --- 33,6	133 --- 39,9	224 --- 67,2
	4 K	N/A	14 --- 4,2	28 --- 8,4	N/A	56 --- 16,8	N/A	112 --- 33,6
	2 K	N/A	7 --- 2,1	14 --- 4,2	N/A	28 --- 8,4	N/A	56 --- 16,8
	1 K	N/A	N/A	7 --- 2,1	N/A	14 --- 4,2	N/A	28 --- 8,4



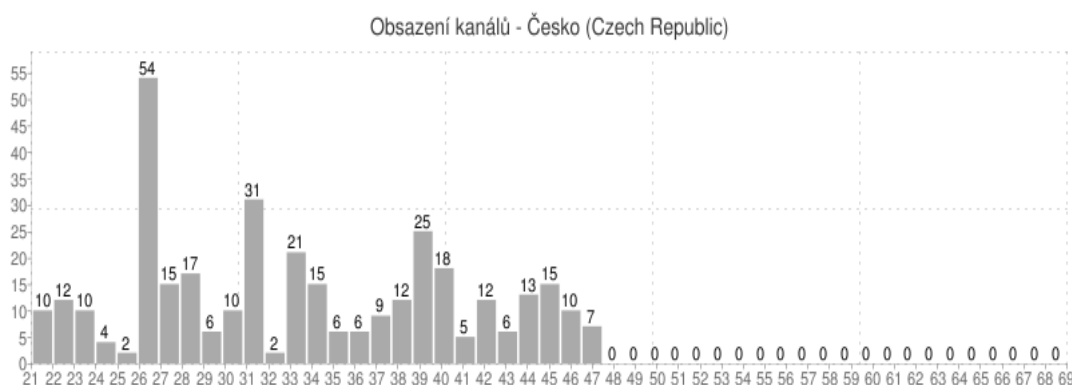
Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční síť

Jednofrekvenční síť v systému s OFDM

- Na obr. počty násobného užití kmitočtu v ČR
- [<http://www.mapavysilacu.cz/channelspectrum.html>, 2017]



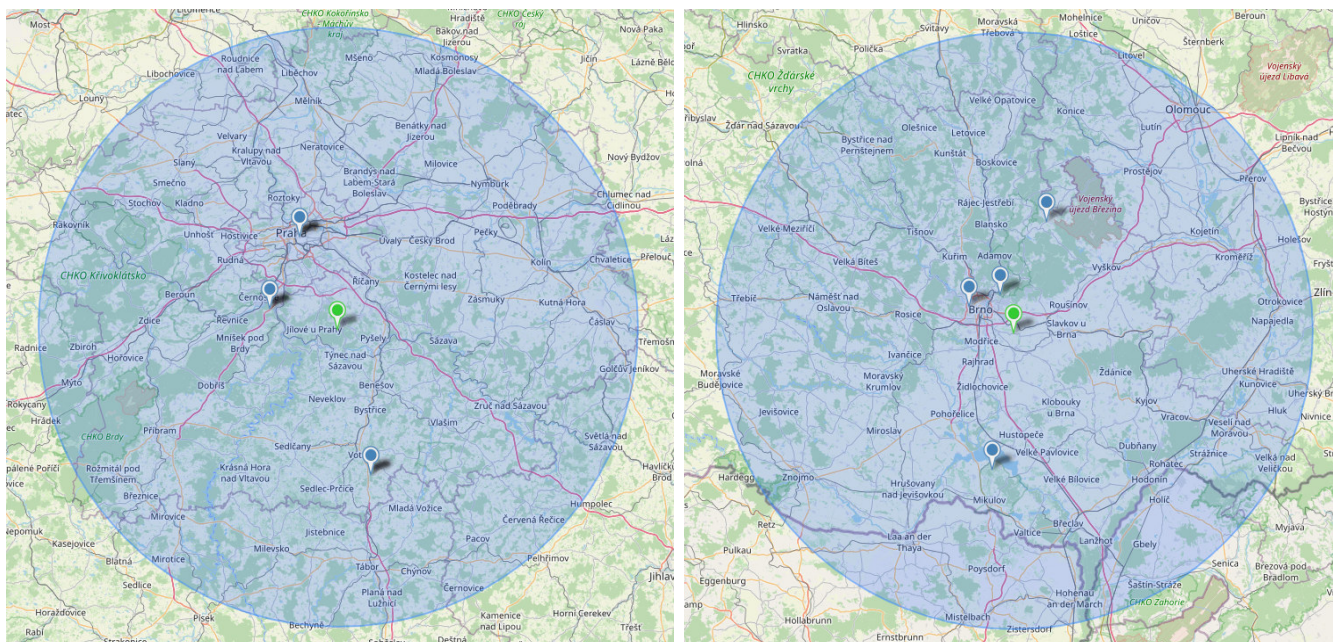
- [<http://www.mapavysilacu.cz/channelspectrum.html>, březen 2021]



Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční síť

Jednofrekvenční síť v systému s OFDM

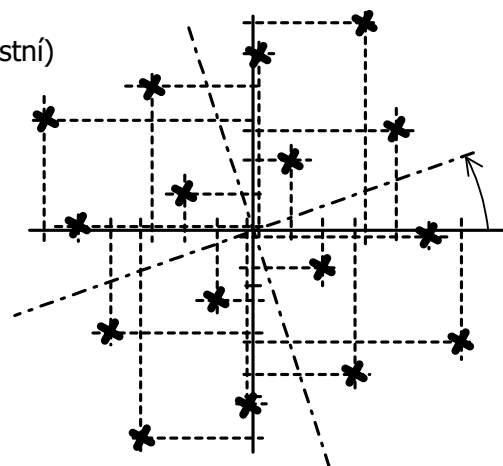
- Na obr. případ vysílání DVB-T druhé generace: SFN 40. kanál, vysílače s výkonem nad 1 kW, kruhy o průměru 134 km
- [<http://www.mapavysilacu.cz/mapnearest.html>, březen 2021]



Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční sítě

Rotovaný konstelační diagram

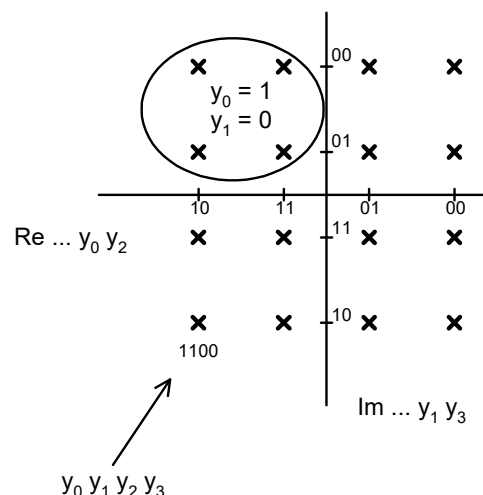
- Natočením konstelačního diagramu QAM modulace (v obr. např. o 16,8 stupňů)
- Každý bod diagramu má jedinečnou hodnotu na I a na Q složce
- Bod lze jednoznačně určit i při znalosti hodnoty pouze jedné ze složek
- I a Q složka jsou odděleny při procesu prokládání a jedna ze složek opožděna – hodnoty složek jsou vysílány v různém čase
- V systémech s OFDM jsou rovněž frekvenčně proloženy - vysílány na různých frekvencích
- Lepší výsledky
 - Menší počet stavů modulace (lze více natočit)
 - Vyšší kódové poměry (samotné kódování je méně robustní)
 - Složité modely kanálu (úniky způsobí výmaz některých částí spektra) – zisk cca 0,7 dB
- Nepůsobí zhoršení v kanále AWGN



Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční sítě

Hierarchická modulace

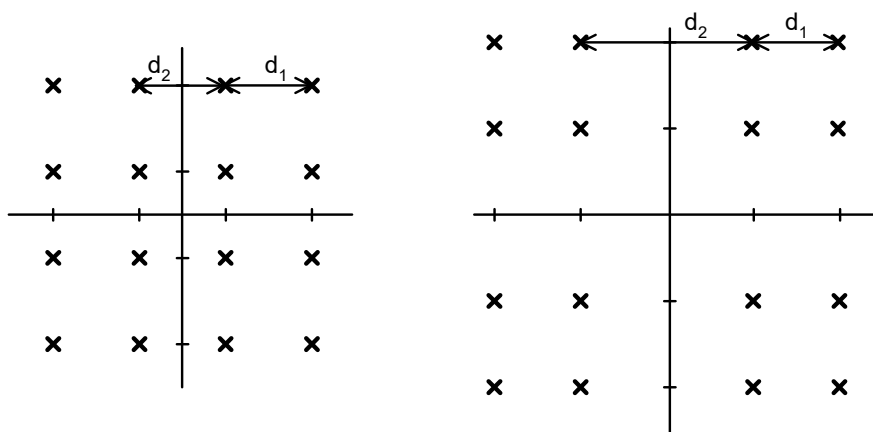
- Některé bity přenášené informace mohou být přenášeny s menší chybovostí
- Např. hierarchická modulace 16-QAM/QPSK
 - V každém kvadrantu bity y_0 a y_1 mají konstantní hodnoty
 - Při demodulaci jsou stavy pro bity y_0 a y_1 rozpoznávány ze čtyř možných (postačuje určit, ve kterém kvadrantu stav leží) – to odpovídá QPSK
 - Ve srovnání s chybovostí pro modulaci 16-QAM je chybovost pro QPSK nižší
 - Bity y_0 a y_1 odpovídají více zabezpečenému přenosu
 - Celá čtveřice bitů tvoří symboly modulace 16-QAM
 - Při demodulaci 16-QAM může být využita informace z předchozí QPSK demodulace
 - Stavy pro bity y_2 a y_3 rozpoznávány z 16 možných
 - Bity y_2 a y_3 odpovídají méně zabezpečenému přenosu
- U hierarchické modulace je výhodné užít rovněž neuniformní modulaci



Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční síť

Uniformní / neuniformní modulace

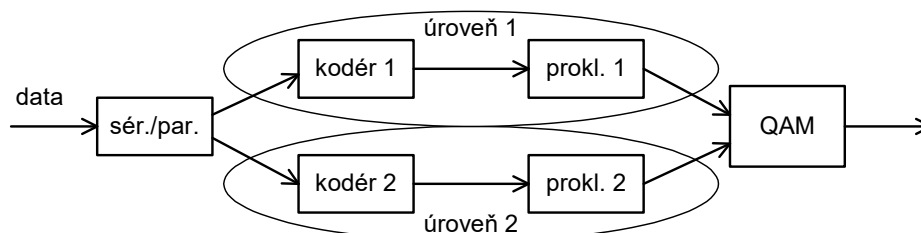
- Více zabezpečený datový tok může být přenesen s ještě nižší chybovostí
- Skupiny stavů s konstantními hodnotami bitů jsou oddáleny
- Poměr $d_2/d_1 = \alpha$
 - $\alpha = 1$... uniformní
 - $\alpha > 1$... neuniformní (např. v obr. $\alpha = 2$)



Modulace v systémech pro přenos digitální televize a rozhlasu, jednofrekvenční síť

Více úroňové kódování spojené s modulací

- Současná optimalizace protichybového zabezpečení kódováním a modulací
 - Různé skupiny bitů jinak zabezpečeny (např. jiné punkturování ze stejného mateřského kódu)
- Možné též společně s hierarchickou modulací
- Využití
 - Některé bity v jedné službě více zabezpečeny
 - Různé služby ve společném multiplexu mohou být různě zabezpečené



Témata pro přípravu studentů ke zkoušce

Digitální modulace s jednou nosnou vlnou

- Příklady modulací s jednou nosnou vlnou
- Symbolová a bitová rychlost
- Kvadrurní modulace, konstelační diagram
- Spektrum

Ortogonalní frekvenčně dělený multiplex OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

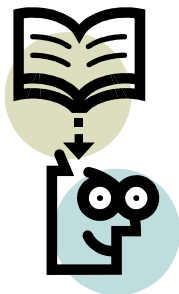
- Princip
- Spektrum
- Časový průběh
- Ochranný interval
- Pilotní buňky
- Vlastnosti systémů s OFDM

Jednofrekvenční síť (SFN, Single Frequency Network) v systému s OFDM

- Význam SFN
- Proč je právě systém s OFDM vhodný?
- Podmínky sítě SFN/OFDM, rozsah sítě SFN/OFDM



Děkuji za pozornost,



prosím vaše dotazy ...

