

Jak porozumět pojmům a číslům v radioreléových spojích



Ing. Vojtěch Klusáček Ph.D.
Microwave development dept.

Motto:..jak to vlastně funguje v těch
rádiových spojích?..

Obsah přednášky

1. Rozdělení signálů, vlastnosti
2. Kapacita kanálu, vliv šumu
3. P2P spoje –modulace (QAM), spektrum, rozdělení
4. Moderní způsoby navýšení kapacity spojů (XPIC, MIMO, LoS MIMO)
5. Současné možnosti a cesty rozvoje

Rozdělení typů signálů a vlastností

• **Analogové signály** – tvořeny spojitě se měnící hodnotou – nabývají nekonečného množství stavů

Kvalitativním měřítkem je odstup signálu od šumu

Množství informace je úměrné kmitočtovému pásmu signálu

• **Digitální signály** – tvořeny signálem s předdefinovaným počtem stavů

Kvalita signálu se hodnotí chybovostí (BER)

Signál se přenáší s určitou periodou (počet vzorků/s) resp. symbolů/s

Signál je tvořen symboly ► symboly mohou mít n stavů, symboly tvoří „abecedu“

Kapacita systému je určena počtem přenesených symbolů/s [Bd], resp. bitů/s

Pokud n [počet bitů na symbol] potom přenesených stavů je $m=2^n$

Příklad 256QAM ► 8bitů na symbol ► $2^8=256$ stavů

1024QAM/112MHz BW symbolová rychlost 90Msymbolů/s=90MBd ► 900Mbitů/s

- Nyquistovo kritérium $v_{\text{vzork}} \geq 2 \cdot (\text{dostupná BW})$
- Přenosová rychlost $C[\text{bit/s}] = v_{\text{vzork}} \cdot \log_2 M$ (M ..počet stavů)

Příklad 256QAM $v_{\text{sym}} = 20[\text{Ms/s}]$ $C = 20 \cdot 8 = 160 \text{ Mb/s}$

S vícestavovou modulací roste přenosová rychlost, resp. můžeme pro přenos použít užší šířku pásma, ale pozor, nárůst kapacity s logaritmem!!

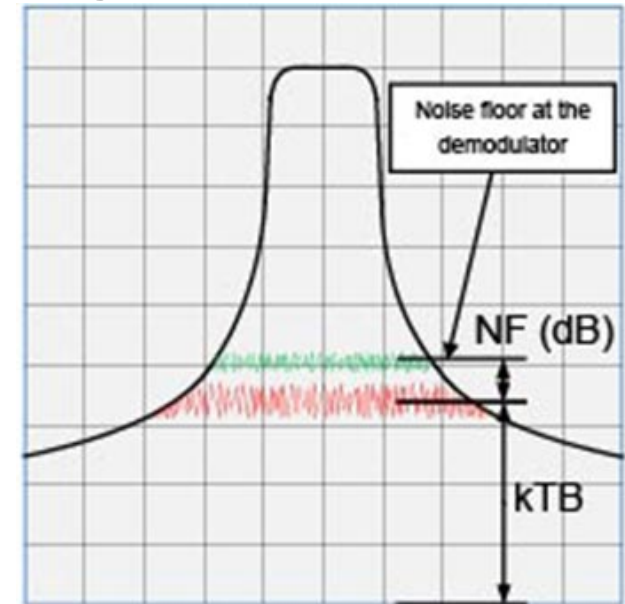
- **Max. kapacita kanálu –Shannonův teorém**

$$\begin{aligned} C &\leq W \log_2 \left[1 + \left(\frac{S}{n} \right) \right] && \text{where} \\ &\leq 3.322 \ W \log_{10} \left[1 + \left(\frac{S}{n} \right) \right] && C = \text{channel capacity (Mb/s);} \\ &\leq \approx 3.322 \ W \log_{10} \left(\frac{S}{n} \right) && W = \text{channel bandwidth (MHz);} \\ &\leq 0.3322 \ W \left[\frac{S}{N} \text{ (dB)} \right] && s/n = \text{channel signal to noise (power ratio);} \\ & && S/N = \text{channel signal to noise (dB)} = 10 \log_{10}(s/n) \end{aligned}$$

Příklad BW 28MHz s/n 30dB $C \leq 270 \text{ Mb/s}$ (256QAM 220MBd ALC)
spektrální efektivita 9.6 bit/s/Hz

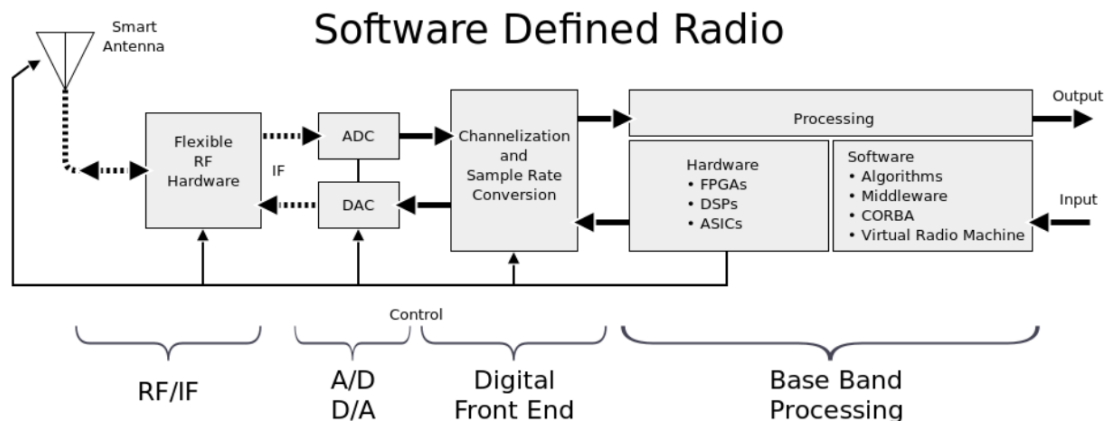
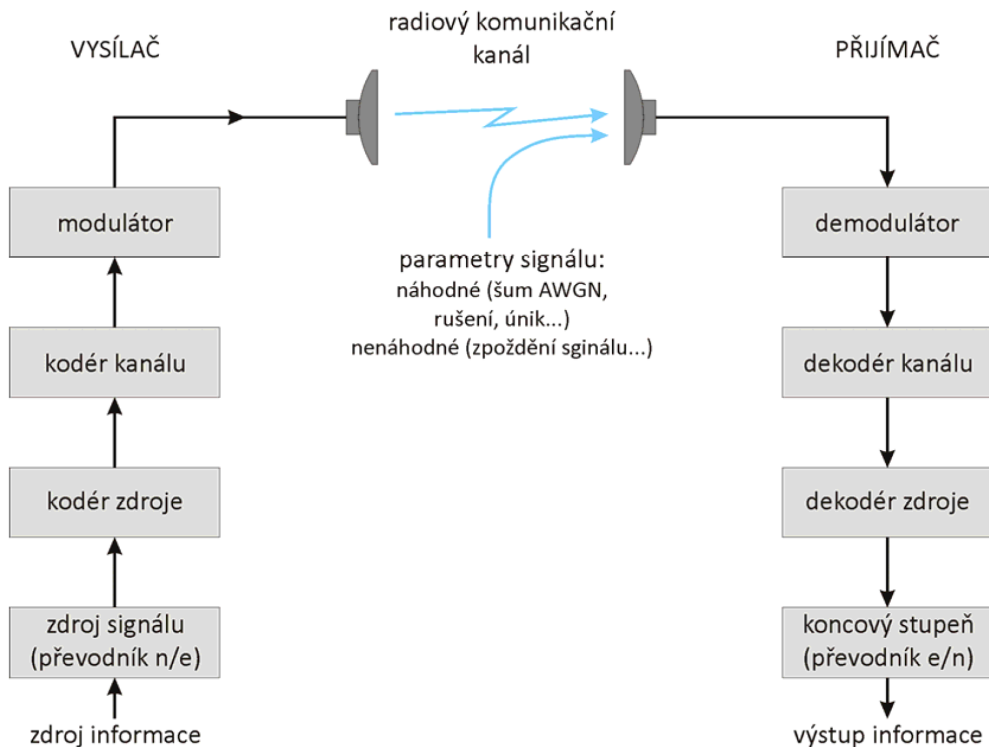
- „fyziku nelze ošálit!“

- Tepelný šum $P=kTB$ $P=-173\text{dBm/Hz} + 10\log(B)$
- Intermodulační šumy
- Přeslechy (vícecestné šíření)
- Impulzní šumy
- Poměr E_b/N_0 , E_s/N_0 (energie)
- Poměr $(SNR)_{\text{dB}} = 10\log_{10} \frac{\text{signal power}}{\text{noise power}}$
- Šum. číslo přijímače, antény
- Příklad BW 28MHz $P_{\text{ř}}=-98.5\text{dBm}$



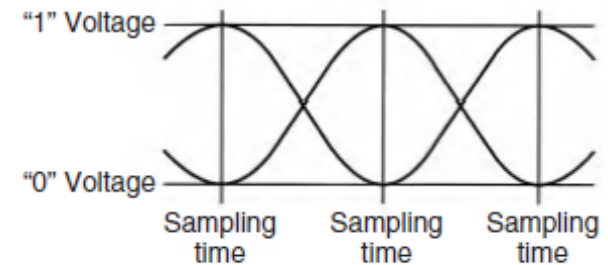
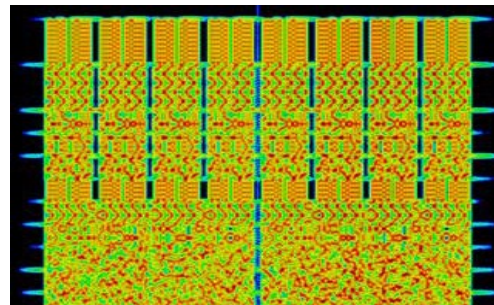
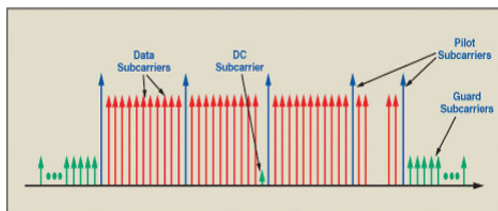
Obecné schéma digitálního mikrovlnného spoje

ALCOMA



Základy signálových modulací

- **amplitudová (PAM,PŠM,PPM), frekvenční (sat) –** historické spoje – citlivost!!
- **fázová modulace**
(BPSK,QPSK,m-PSK) –robustní, nízký pož. S/N
-použití – satelitní spoje, spoje na dlouhé vzdálenosti
- **QAM modulace (I Q složky) -2x PAM**
(16,32,64,128,..1024QAM)
V současnosti převažuje u P2P spojů – vysoká spektrální efektivita a přenosová kapacita na kanál, požaduje vysoký S/N (dle počtu stavů)
- **Složené modulace**
OFDM – odolná na multipath -sdružuje mnoho pomalu modulovaných QAM subnosných, použití Wifi, DVB-T
-nevýhody – složitá demodulace, zpoždění –dlouhé trvání symbolu, náchylná na fázový šum



2 PAM
4 QAM



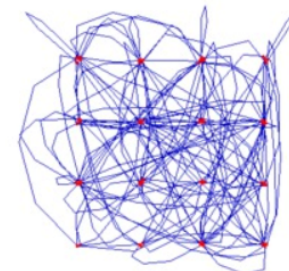
4 PAM
16 QAM



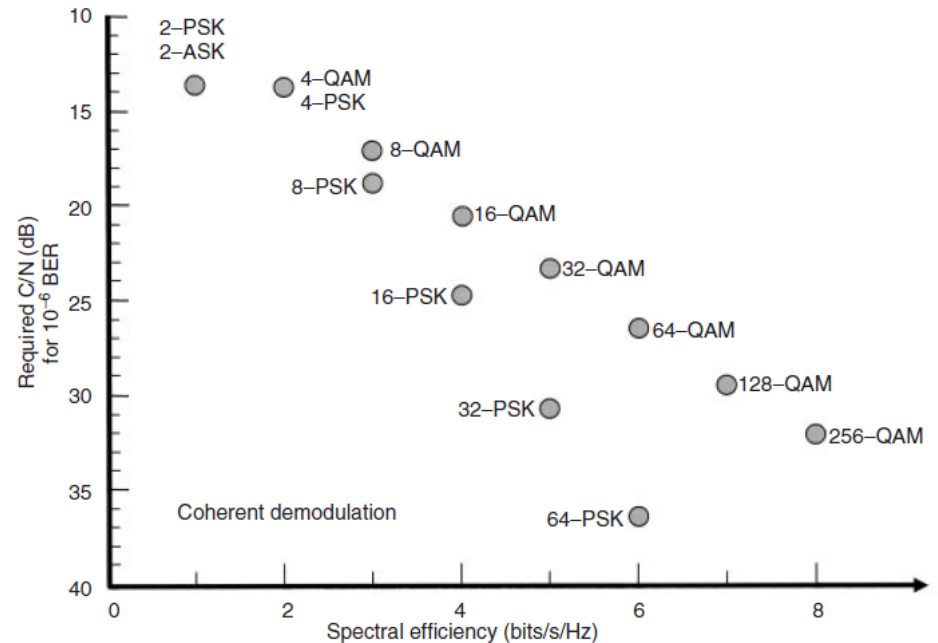
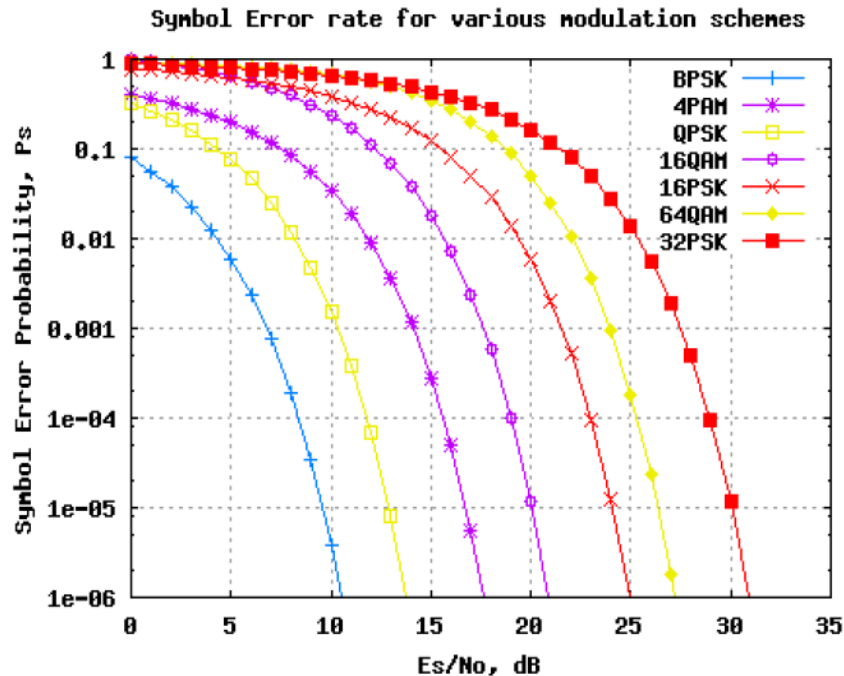
8 PAM
64 QAM



16 PAM
256 QAM

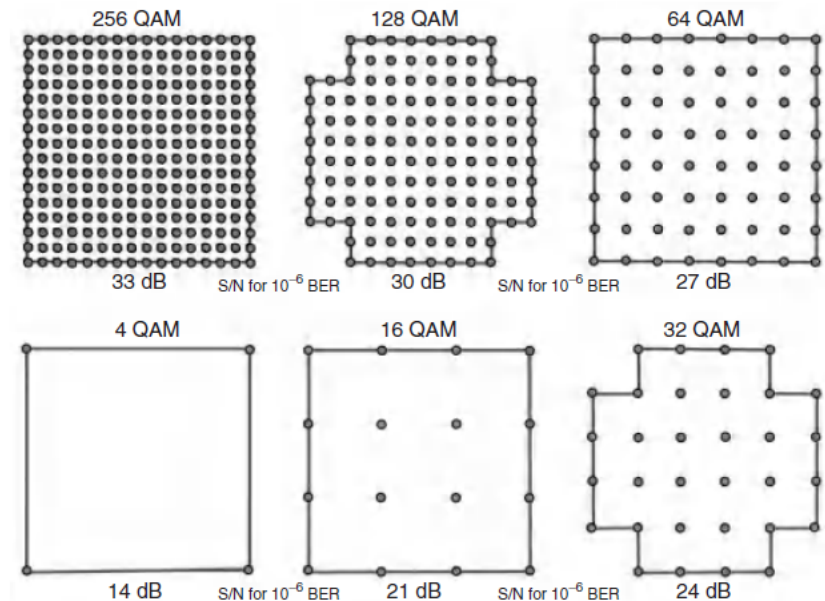
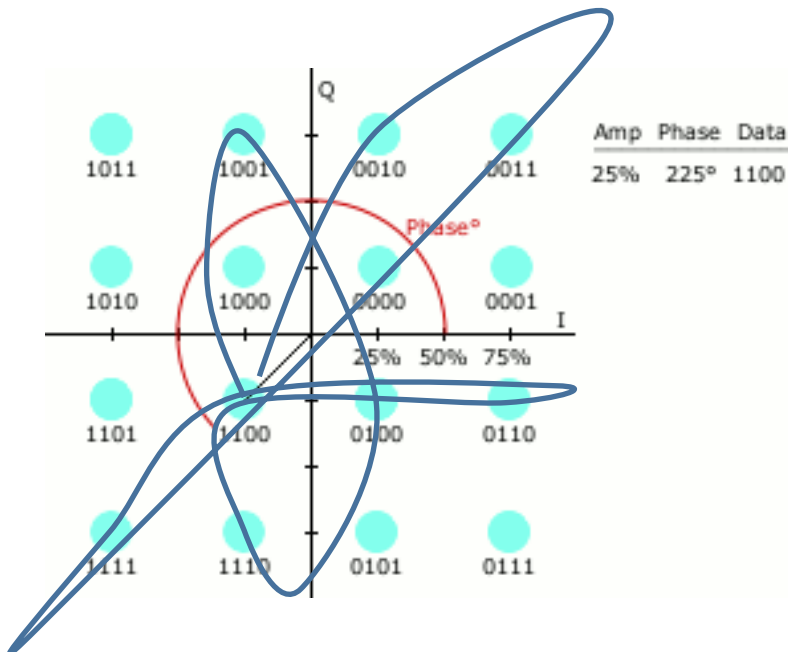


Porovnání spojů z hlediska $-E_s/N$



QAM (Quadrature amplitude modulation)

- ▲ Příklad reálné trajektorie signálu 16QAM
- ▲ Signál symboly pouze prochází, nezdržuje se.
- ▲ Celý konstelační diagram resp. signálový vektor se otáčí dle frekvence nosné vlny
- ▲ Počet bitů přenesených symbolem $\log_2(16) = 4$
- ▲ Spojité procházení symboly



Konstelační diagram –QAM

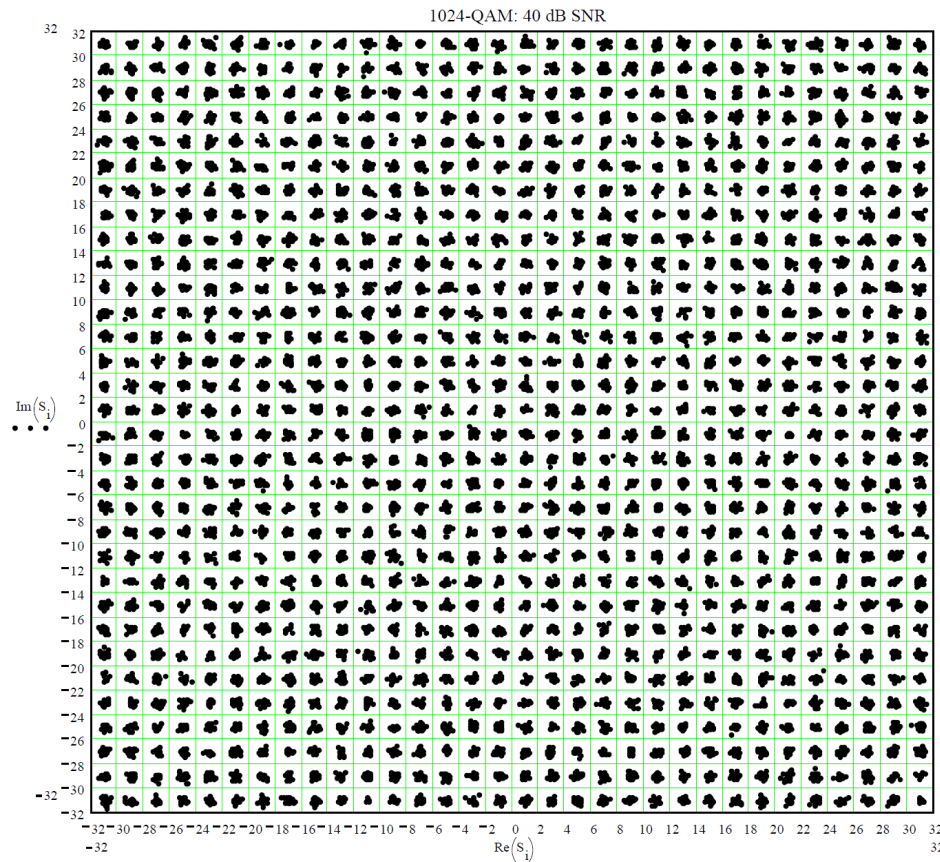


Figure 3 – 1024-QAM at SNR = 40 dB

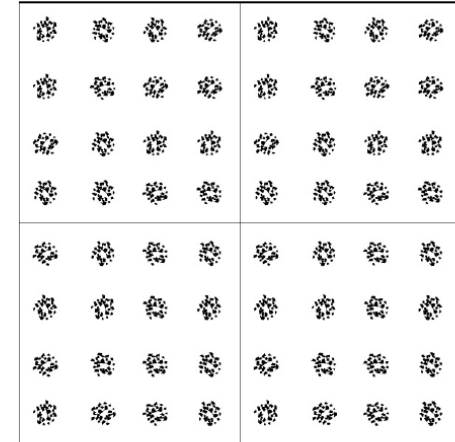


Fig. 1B CW Interference

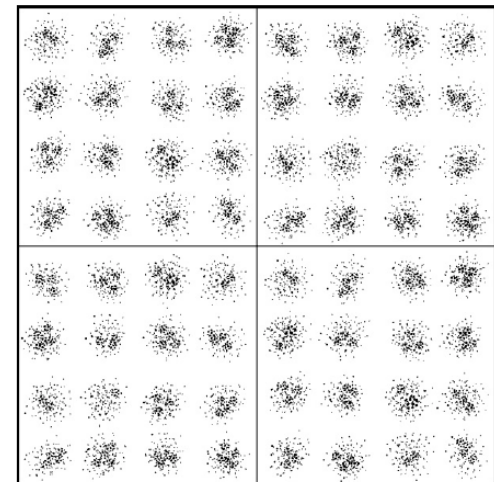
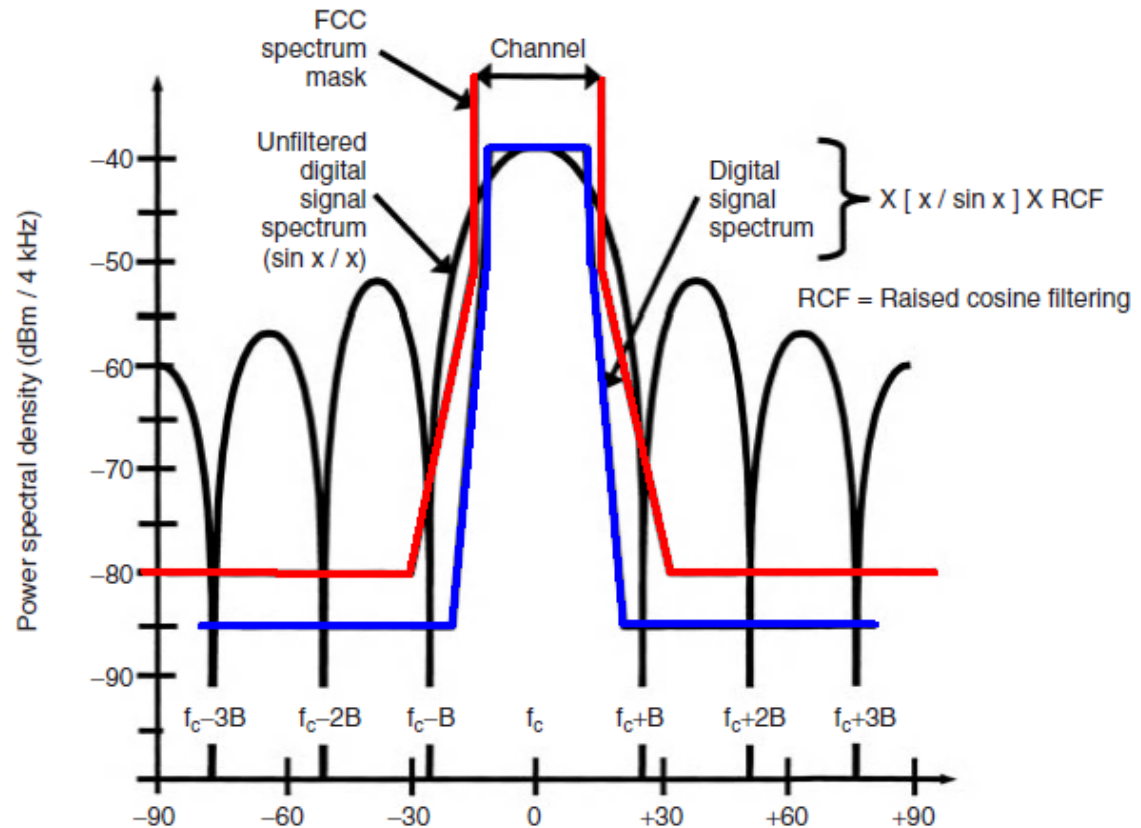
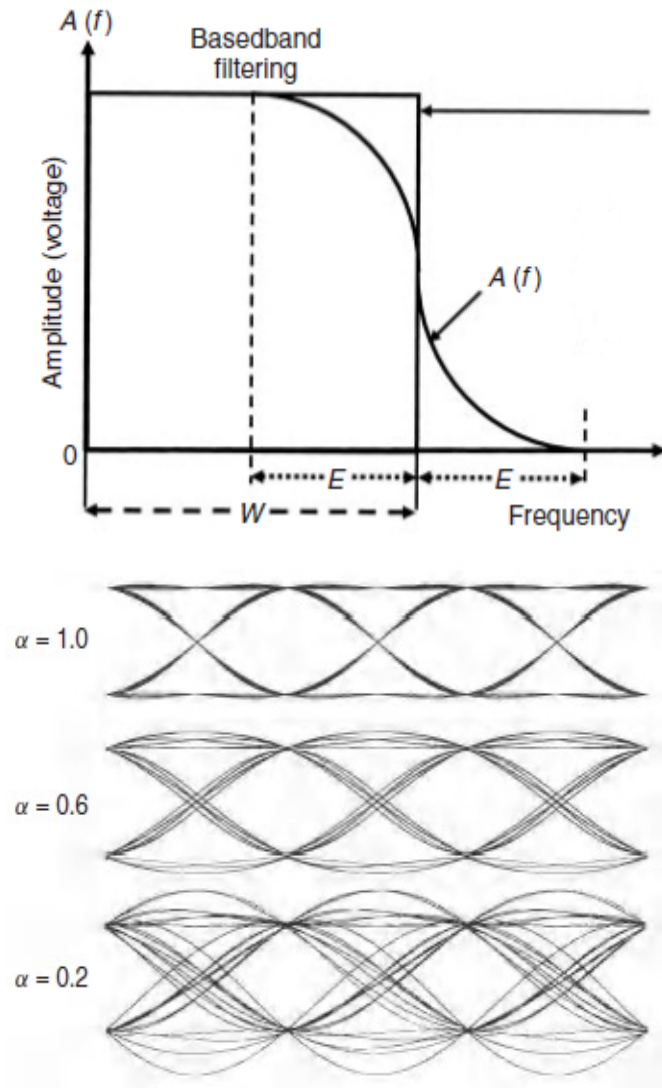


Fig. 1A Noise

Spektrum QAM – filtrace



- konstelační diagram, EVM, rušení atd.
- různá modulace-různý maximální použitelný vysílací výkon – čtvercové modulace/128QAM,(20dBm QAM /24dBm QPSK)

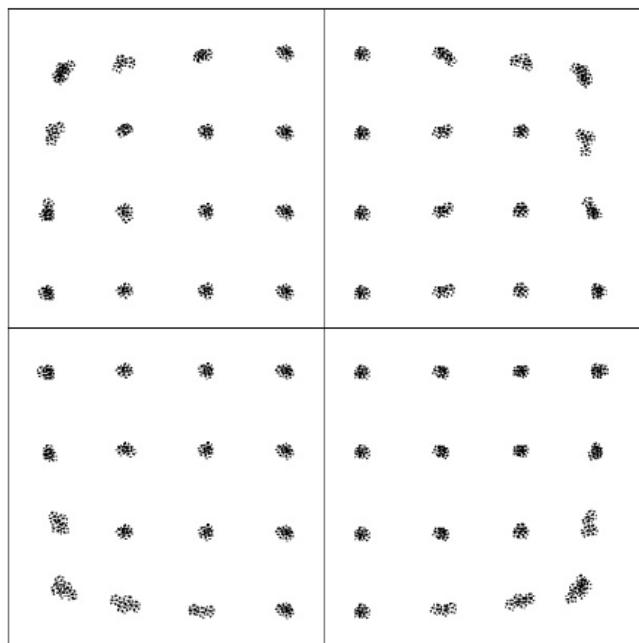
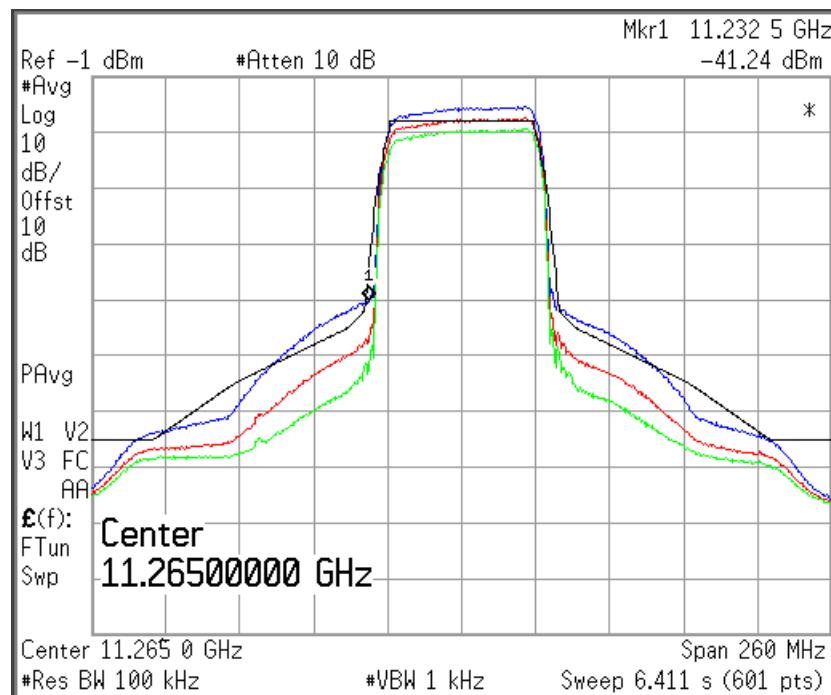


Fig. 1F Compression



Porovnání masky spoje ACCP a ACAP

128QAM BW 28MHz

vlevo 24.22MBaud – vpravo 26.53MBaud

„**napumpování** spektra kanálu přináší **rušení** do sousedního“

ALCOMA

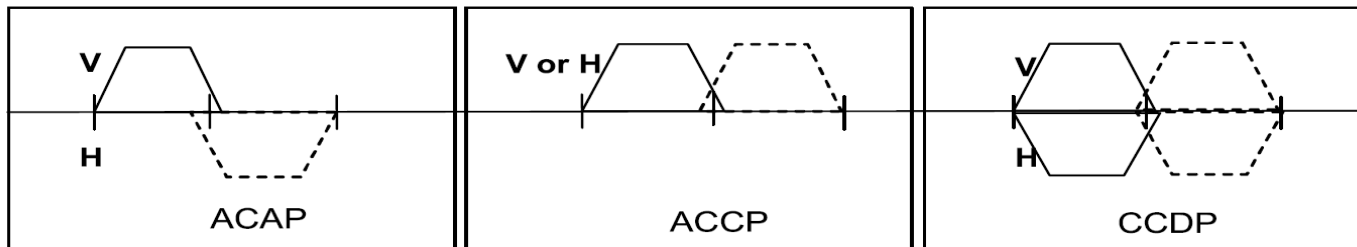
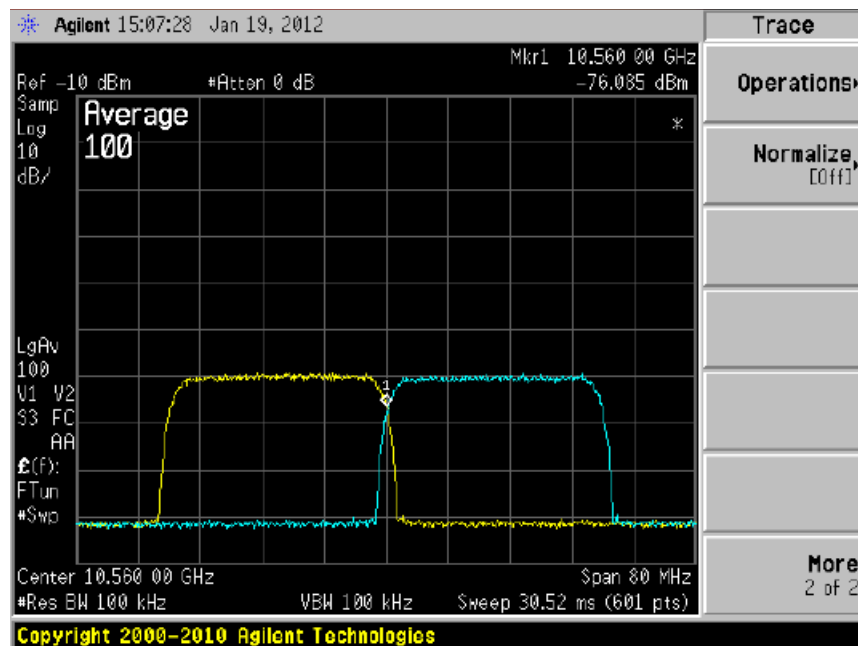
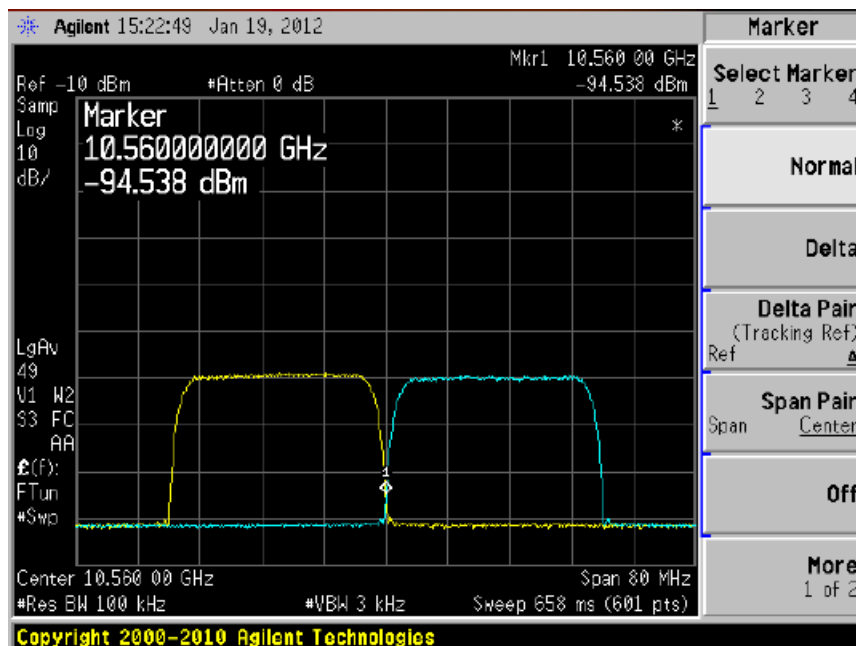
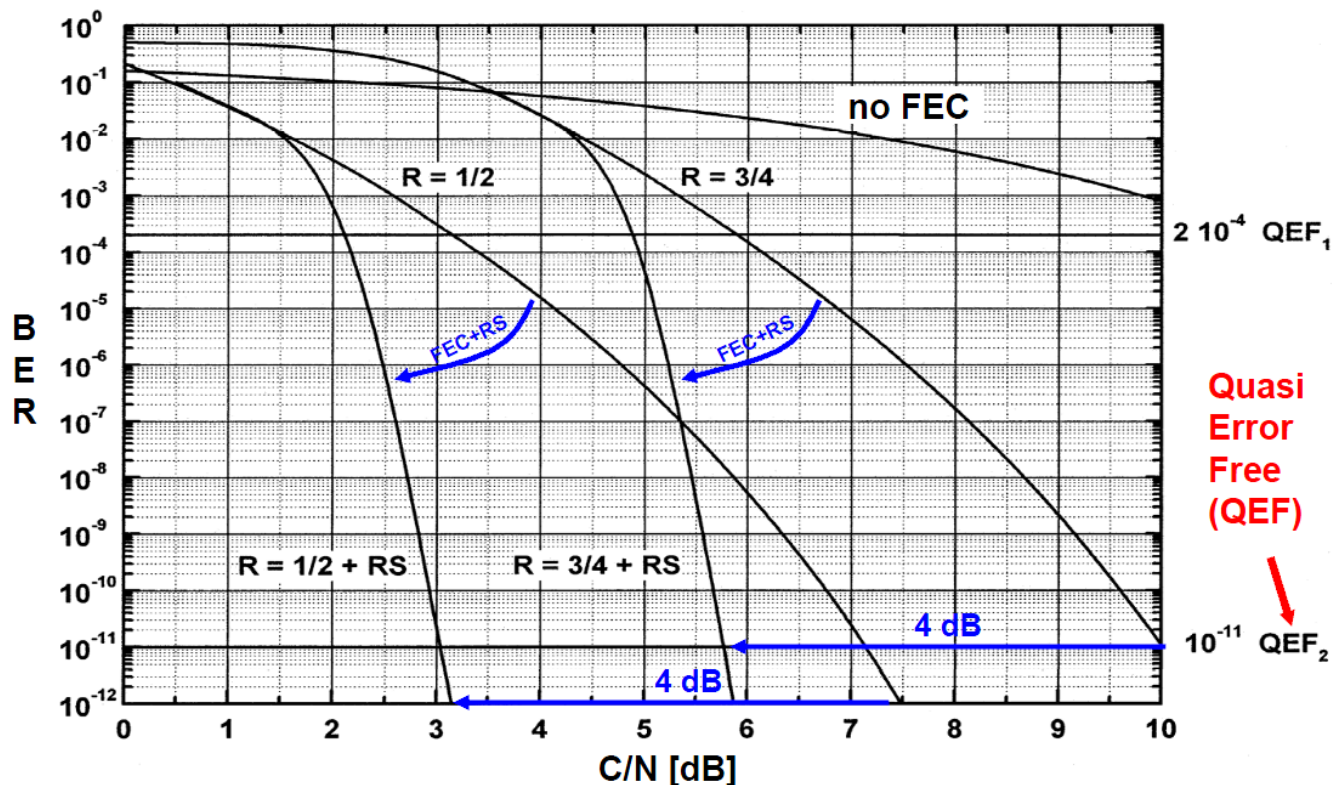


Figure 2a: Examples of channel arrangements on the same route

Použití FEC

- Přidání redundantní informace do datového toku – použije se pro identifikaci a opravu bitových chyb a burstových chyb
- Kompromis mezi navýšením toku a schopností opravit chyby (typické aplikace, stav QEF)
- Použití různých technik kódování – Reed Salamon , LDPC



Hlavní vf parametry spojů

- za vysokou přenosovou kapacitu se platí nižší citlivosti
- fyzika se nedá obejít

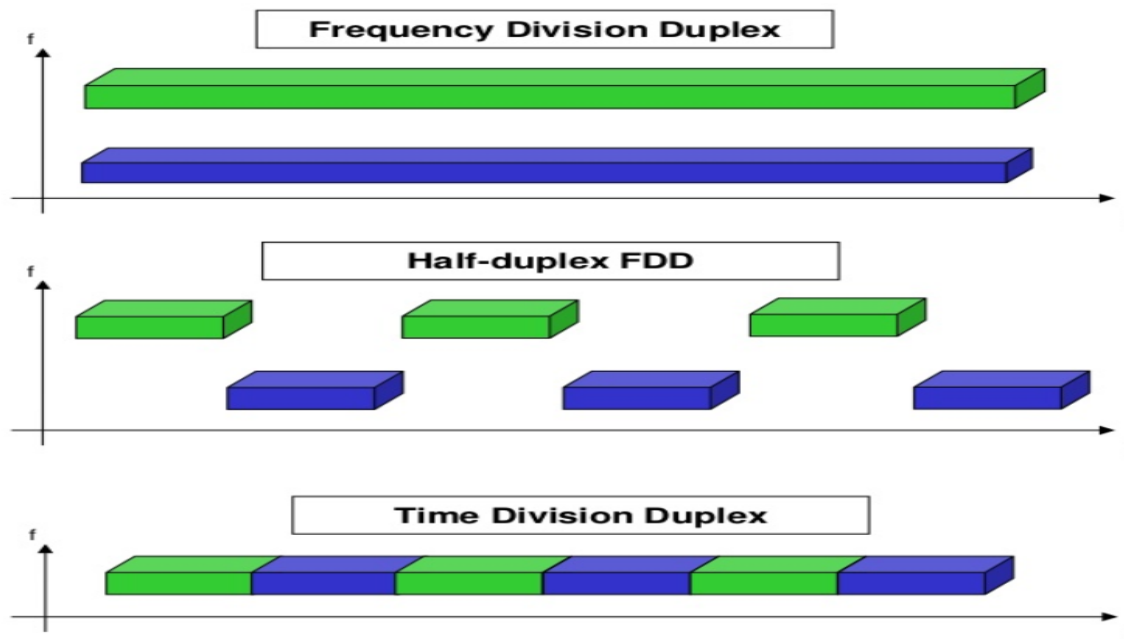
Orientační tabulka přenosové kapacity dle MODULACE a BW

(uvážována středně silná korekce chyb FEC)

	3,5MHz	7MHz	14MHz	20MHz	28MHz	citliv./28MHz	40MHz	56MHz	80MHz	112MHz	SNR	
BPSK	2.8	5.5	11	15.7	22	-89	31.4	44	62.9	88		
QPSK	5.5	11	22	31.4	44	-86	62.9	88	125.7	176	9.7	
16	11	22	44	62.9	88	-79	125.7	176	251.4	352	15.7	
32	13.8	27.5	55	78.6	110	-76	157.1	220	314.3	440	18.7	
64	16.5	33	66	94.3	132	-73	188.6	264	377.1	528	21.7	
128	19.3	38.5	77	110	154	-70	220	308	440	616	24.7	
citlivost	-79.0	-77.0	-74	-72	-70	dBm	-69	-68	-66	-65	práh šumu	-173dBm/Hz
256	22	44	88	125.7	176	-68	251.4	352	502.9	704	27.7	
512	24.8	49.5	99	141.4	198	-65	282.9	396	565.7	792	30.7	
1024	27.5	55	110	157.1	220	-61	314.3	440	628.6	880	34.7	

Základní typy spojů z hlediska typu přenosu

- ▲ FDD- Způsob realizace obousměrné komunikace, kdy se oba datové toky přenášejí najednou
- ▲ Datové toky jsou odděleny rozdílným umístěním v kmitočtovém spektru
- ▲ Signálové oddělení odvodů RX a TX zajišťuje duplexer (frekvenční filtr s velkým oddělením)
- ▲ Nenavyšuje latenci dat, neboť data se vysílají v reálném čase a není třeba je ukládat.



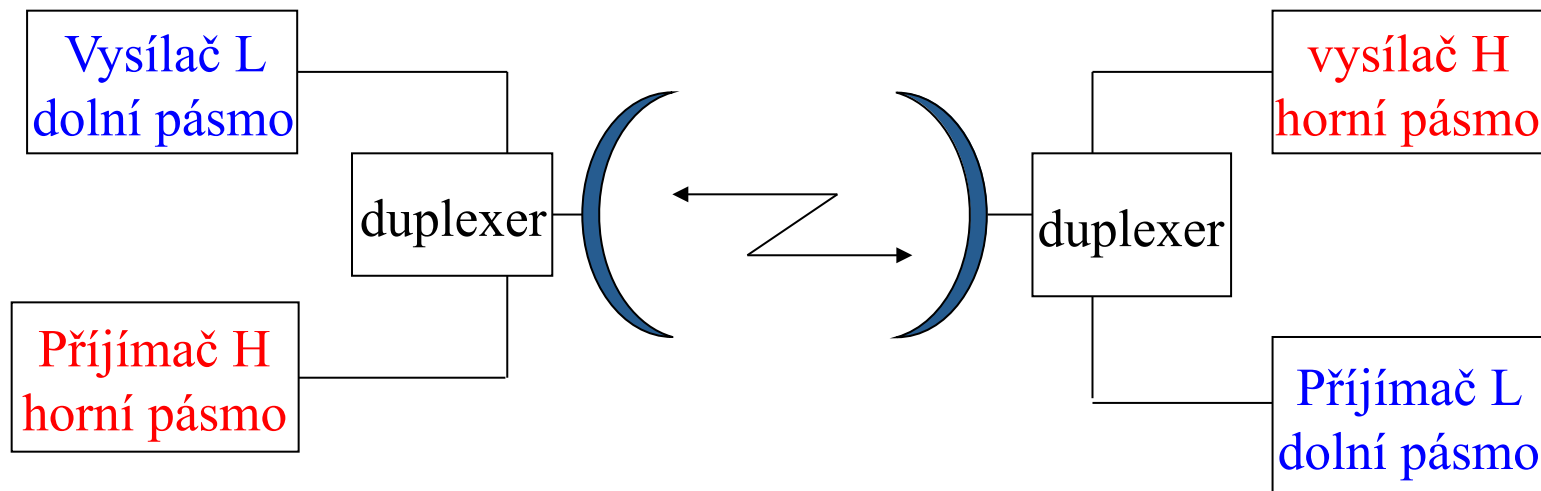
Základní typy spojů z hlediska konstrukce

Kmitočtový multiplex – jednotka používá vždy pár kmitočtů v dolním a horním pásmu (duplexní odstup)

Jednotka vysílá i přijímá zároveň – oddělení vysílače a přijímače filtrem s vysokým oddělením – tzv. duplexer

rozšíření – polarizační oddělení spojů, XPIC, LoS MIMO

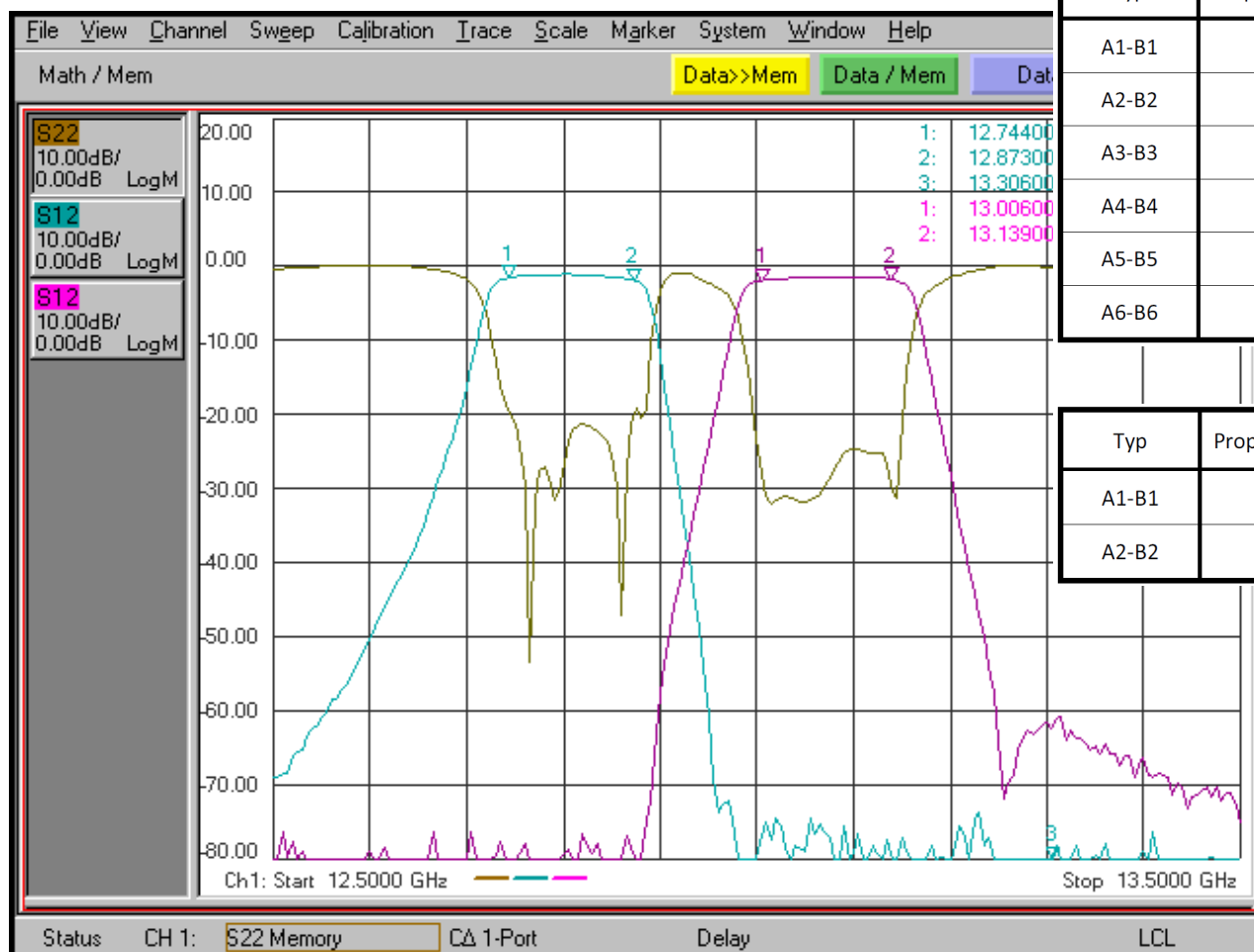
Hardware –superheterodyny (jedno nebo více směšování)



Vlastnosti duplexeru

ALCOMA

Kmitočtová charakteristika duplexeru – určuje izolaci mezi přijímačem a vysílačem



Typ	Propustné pásmo A (GHz)	Propustné pásmo B (GHz)
A1-B1	10,715 – 10,835	11,205 – 11,325
A2-B2	10,795 – 10,915	11,285 – 11,405
A3-B3	10,875 – 10,995	11,365 – 11,485
A4-B4	10,955 – 11,075	11,445 – 11,565
A5-B5	11,035 – 11,155	11,525 – 11,645
A6-B6	11,075 – 11,195	11,565 – 11,685

Typ	Propustné pásmo A (GHz)	Propustné pásmo B (GHz)
A1-B1	12,751 – 12,863	13,017 – 13,129
A2-B2	12,863 – 12,975	13,129 – 13,241

časový multiplex (TD) – spoj používá většinou jeden kmitočet v pásmu – poloduplex, není třeba duplexer-cena

jednotka vysílá a protistanice přijímá (anebo naopak)

Rozšíření funkcí – MIMO, polarizace, synchronizace jednotek v síti

Hardware – maximální jednoduchost – použití přímé kmitočtové konverze

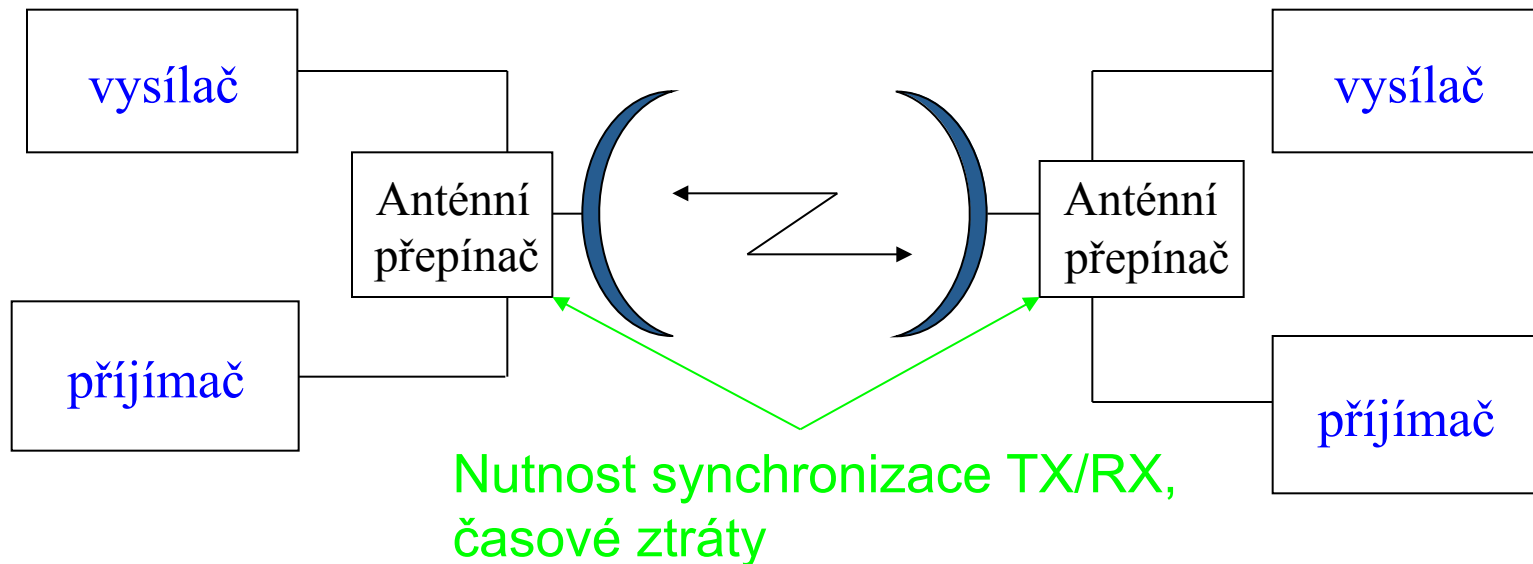
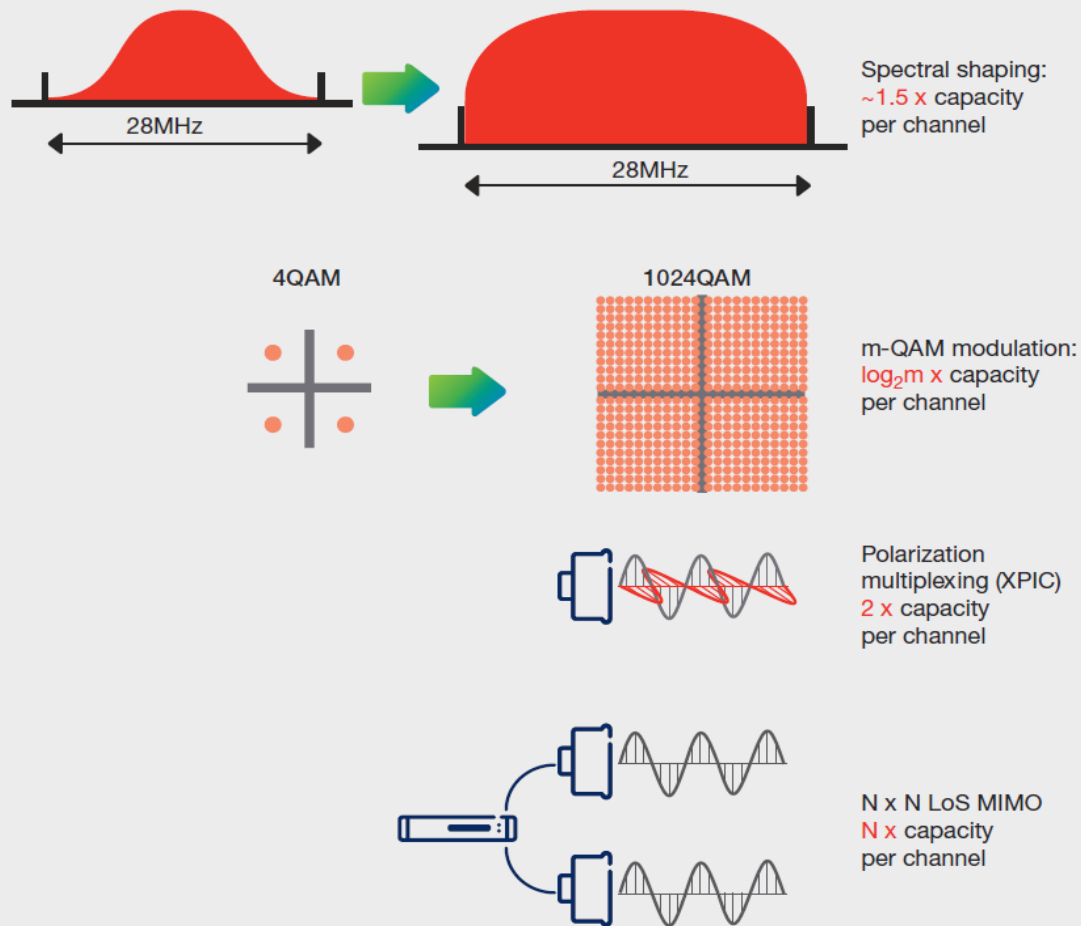


FIGURE 3 Evolution of spectral efficiency for microwave links



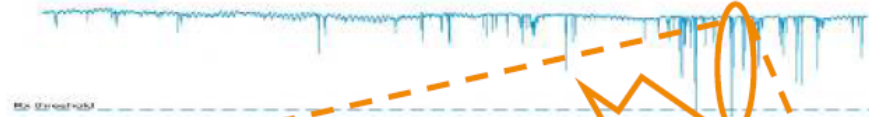
- Neustálý tlak na navyšování datové kapacity
- Spektrum není nevyčerpatelný zdroj

Řešení problému

- Zlepšení spektrální efektivity (změna modulace) !
- Změna kmitočtového pásma !
- Adaptivní modulace !
- XPIC (cross polarization interference cancelation) !
- (LOS) MIMO !

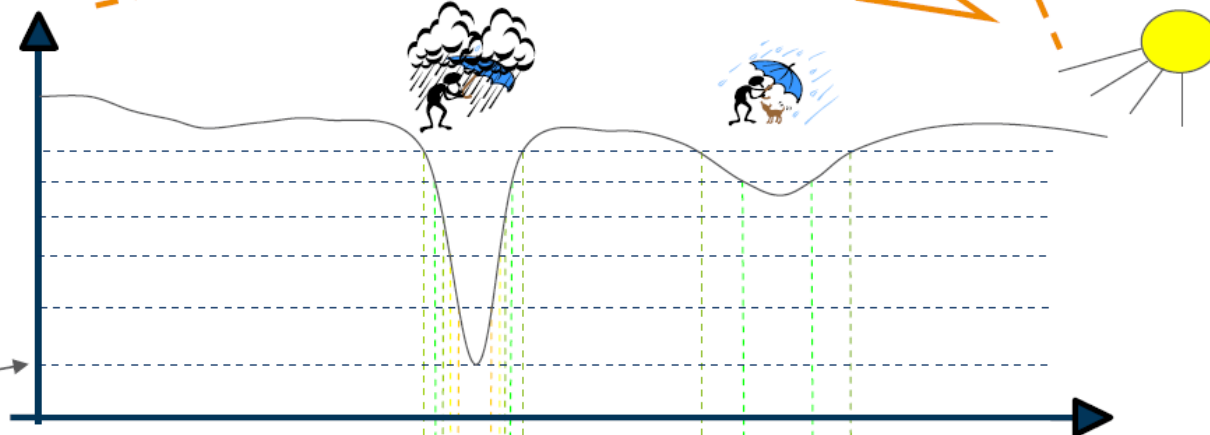
"HITLESS" ADAPTIVNÍ MODULACE

Úroveň signálu
během 6 měsíců:



Úroveň signálu

512 QAM
256 QAM
128 QAM
64 QAM
16 QAM
4 QAM prahová
úroveň



Propustnost spoje*

500 Mbps
455 Mbps
402 Mbps
352 Mbps
233 Mbps
114 Mbps

Maximální propustnost spoje

Využití provozem
s nízkou prioritou

Využití provozem
s nízkou prioritou

Využití provozem s vysokou prioritou

Dostupnost

99.5%
99.9%
99.95%
99.99%
99.995%
99.999%

<9 hodin/ rok
nedostupnost

<1 hodina / rok
nedostupnost

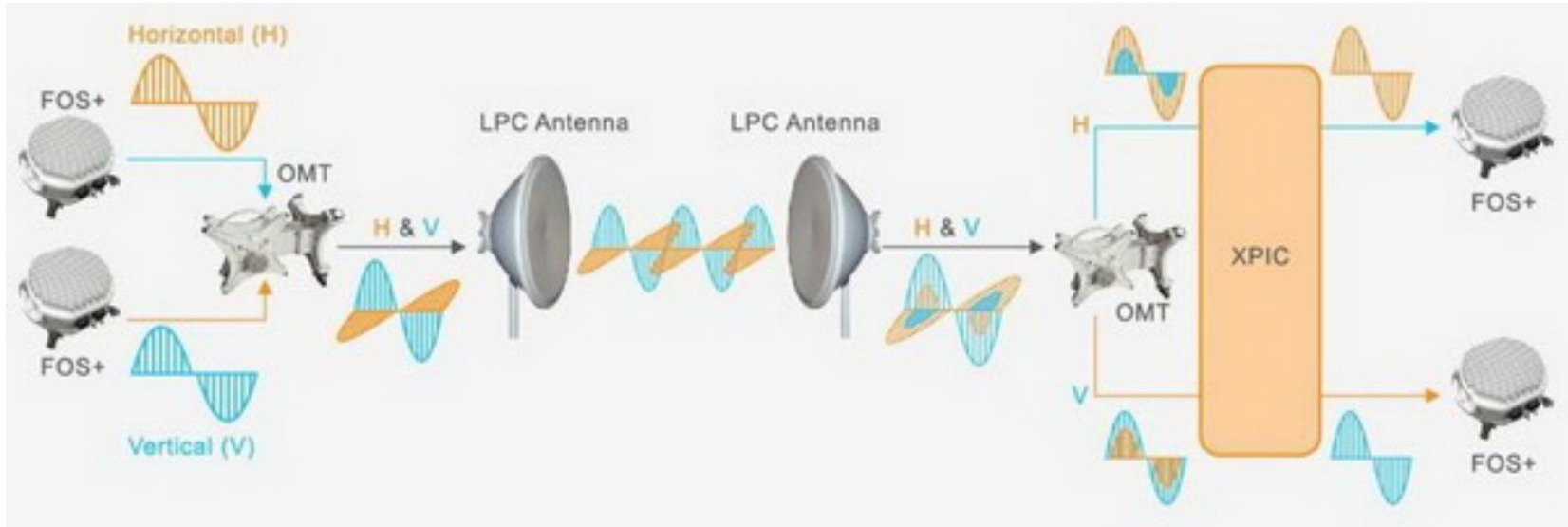
5 minut/rok
nedostupnost

Time

*Max Line interface capacity

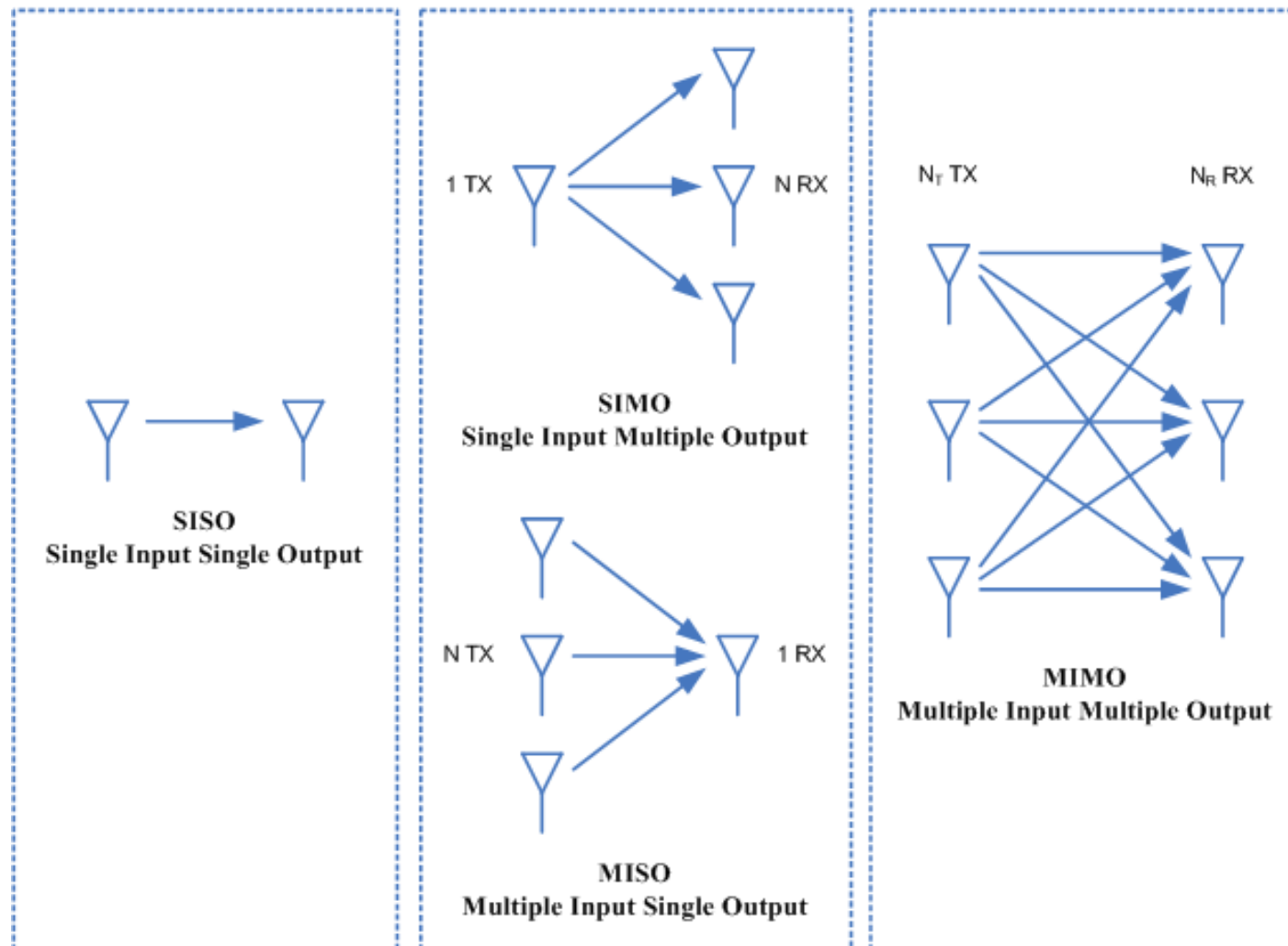
XPIC

ALCOMA



- Využívá najednou obě polarizace na stejném kanálu
- Paradoxně při ACAP plánování zamezuje použití sousedních kanálů
 - a tedy (globálně) nepřináší výhodu lepšího využití spektra
- Poplatky závisí na regulátorovi – může být výhodnější
- Složitější nastavování, problém s depolarizací (déšť)
- Výhody – záloha (1+1), pokud není vyhnutí, 1 anténa na 2 jednotky, cena OMT

Rozdělení – SISO, MISO, MIMO

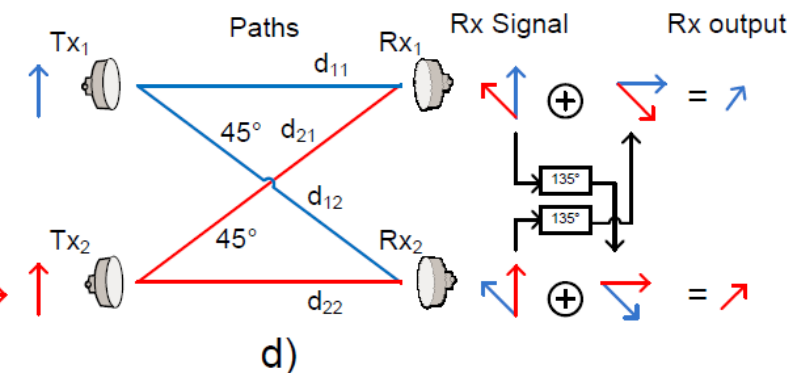
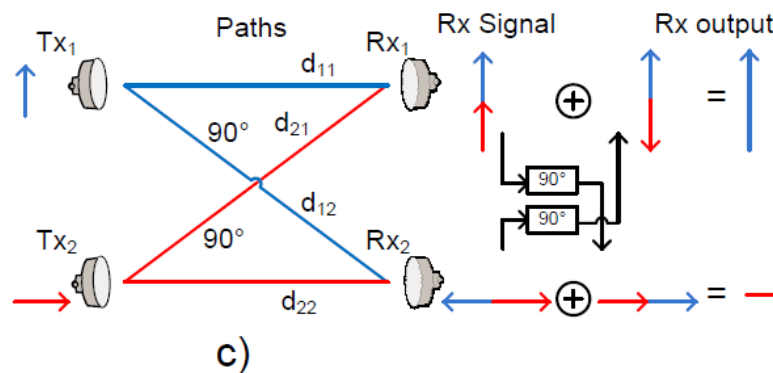
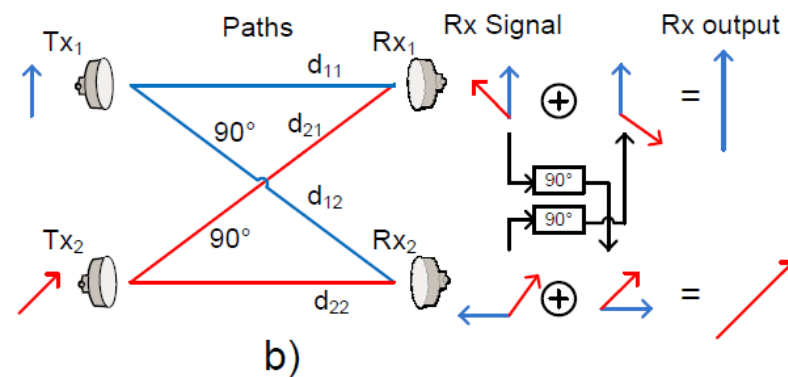
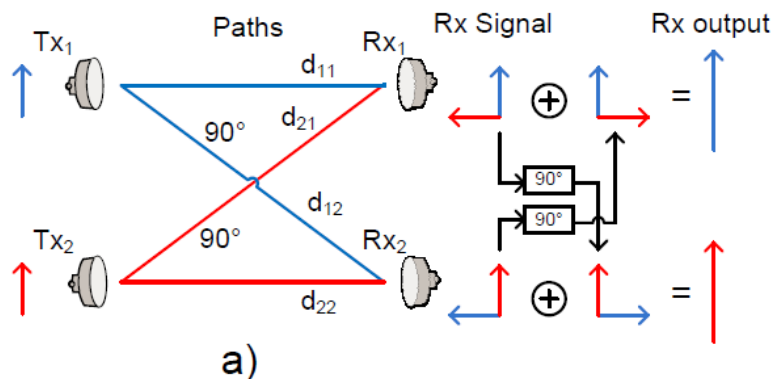


Důvody použití MISO, MIMO

- **Eliminace vlivu vícecestného šíření** – založeno na statistice – pravděpodobnost úniku na dvou anténách je nižší (řádově) než na jedné anténě
- **Navýšení kapacity** – nutným předpokladem je vysoké SNR a možnost jednotlivé signály (cesty) od sebe oddělit
- **Eliminace rušení** - vhodným náfázováním signálu u přijímače i vysílače je možno rušící signál dostat do „nuly“
- **Nutný předpoklad pro funkčnost systému je nezávislost signálových cest (v čase, v prostoru atd.), vše se děje na STEJNÉM KMITOČTU**

Jak funguje LoS MIMO 2x2

ALCOMA

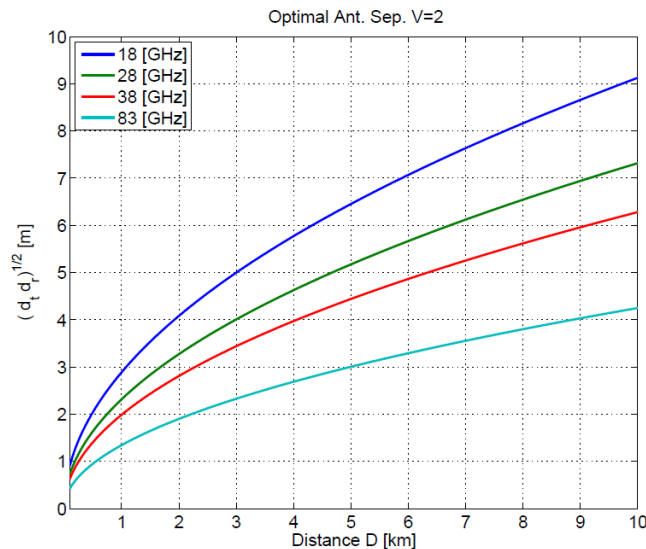
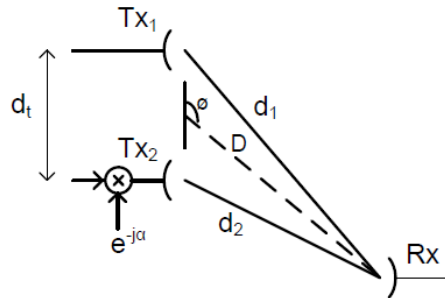


LOS P2P spoje – nemají vícecestné šíření, redundance cest vytvořena v prostoru a fázováním

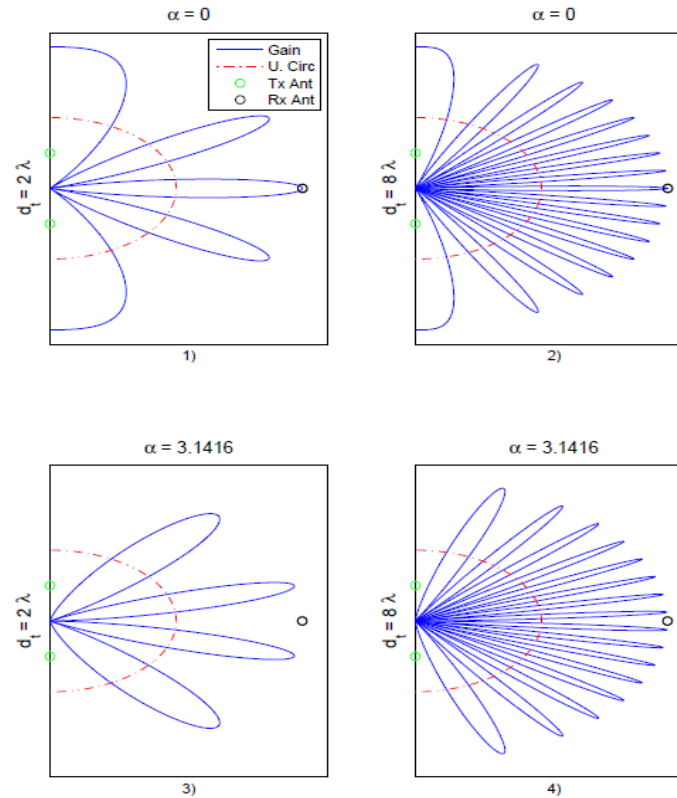
Předpoklady funkce – oba TX fázově zavěšeny, vzdálenost antén n násobkem vlnové délky, zpracování signálů přijímaných oběma anténami najednou – práce s fázovým posuvem

d) Neoptimální stav – výsledná amplituda signálu je nižší

LoS MIMO z pohledu antén(áře)



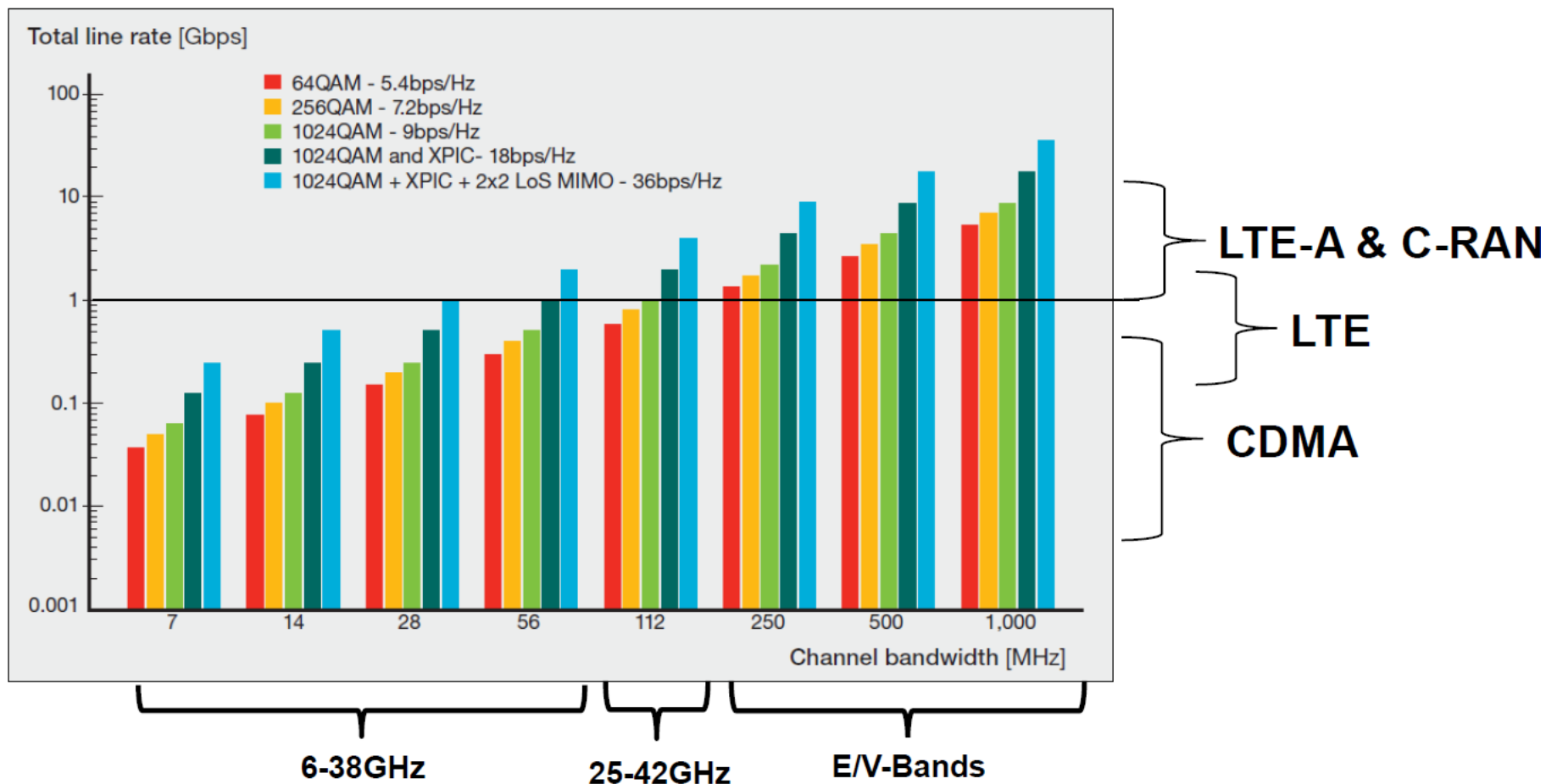
Optimální vzdálenost anténu LoS MIMO pro různá pásma



Čím jsou TX antény vzdálenější, tím je vyzařovací diagram členitější

Analýza rozvoje RR spojů z hlediska následných aplikací

ALCOMA



1. Navyšování kapacity spojů
 - a) Zvyšování QAM (4096) – kapacita narůstá pouze s poměrem logaritmů!! Problémy se šumem a linearitou
 - b) Přejít do vyšších kmitočtových pásem (E-band) s vyšší možnou šířkou pásma. Problémy s útlumem v atmosféře, cena
 - c) XPIC, LoS MIMO

2. Snižování ceny – vysoká integrace („one chip radio“), velkosériová výroba (rozvoj sítí LTE atd..) – cenový rozdíl mezi komerčními a profesionálními zařízeními narůstá

Děkuji za pozornost!



- **Hartley's teorém $C = 2W \log_2 M$**

Příklad 256QAM 28MHz $C=2 \cdot 28 \cdot 4 = 224 \text{ Mb/s}$

- **Max. kapacita kanálu –Shannonův teorém**

$$\begin{aligned} C &\leq W \log_2 \left[1 + \left(\frac{s}{n} \right) \right] && \text{where} \\ &\leq 3.322 \ W \log_{10} \left[1 + \left(\frac{s}{n} \right) \right] && C = \text{channel capacity (Mb/s);} \\ &\leq \approx 3.322 \ W \log_{10} \left(\frac{s}{n} \right) && W = \text{channel bandwidth (MHz);} \\ &\leq 0.3322 \ W \left[\frac{S}{N} \text{ (dB)} \right] && s/n = \text{channel signal to noise (power ratio);} \\ & && S/N = \text{channel signal to noise (dB)} = 10 \log_{10}(s/n) \end{aligned}$$

Příklad BW 28MHz s/n 30dB $C \leq 270 \text{ Mb/s}$ (256QAM 220MBd ALC)

- **„fyziku nelze ošálit!“**