Vlastnosti číslicově modulovaných signálů

1.1 Teoretický úvod

Číslicové signály lze přenášet v základním pásmu po metalických nebo optických vedeních. Pro maximální využití přenosových kapacit těchto médií je však výhodnější namodulovat tyto signály na vysokofrekvenční nosné vlny. Uvedený postup je pak zcela nezbytný pro rádiový přenos. Číslicovým modulačním signálem je nejčastěji binární signál PCM, který stejně jako v případě analogových modulací může ovlivňovat amplitudu, fázi nebo kmitočet nosné vlny. Protože může nabývat logických úrovní „1“ a „0“ nabízí se jako nejjednodušší modulační techniky modulace označované jako *BASK* (*Binary Amplitude Shift Keying*), *BFSK* (*Binary Frequency Shift Keying*) a *BPSK* (*Binary Phase Shift Keying*), případně označované jako *2ASK, 2FSK* a *2PSK*. Snaha o efektivnější využití přenosových kanálů však vedla k vývoji vícestavových modulací, které jsou charakteristické tím, že datový tok přicházející do modulátoru obvykle z tzv. kodéru kanálu je rozdělován do skupin o n bitech definujících *symbolovou abecedu* o $M = 2^n$ symbolech. Rychlost, se kterou se mění diskrétní stavy modulované nosné v důsledku symbolových změn, se nazývá *symbolová* (*modulační*) *rychlost* R_s (*symbol rate*) a vyjadřuje se v jednotkách *Baud* [Bd], [symb/s]. Vícestavové modulace tedy při stejné bitové rychlosti R_b přenášeného datového signálu vyjádřené v *bitech za sekundu* [b/s] snižují symbolovou rychlost vůči základním dvojstavovým modulacím. Jejich nevýhodnou vlastností je skutečnost, že se zvyšujícím se počtu stavů, se snižují vzájemné rozdíly mezi stavy modulované nosné vlny a tím klesá odolnost vůči rušení v přenosovém kanále.

Je li délka trvání symbolu modulačního signálu $T_s = 1/R_s$ můžeme číslicově modulovaný signál vyjádřit vztahem

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \cos[\omega_c t + \omega_n t + \varphi_n(t)] u(t - nT_s), \qquad (1.1)$$

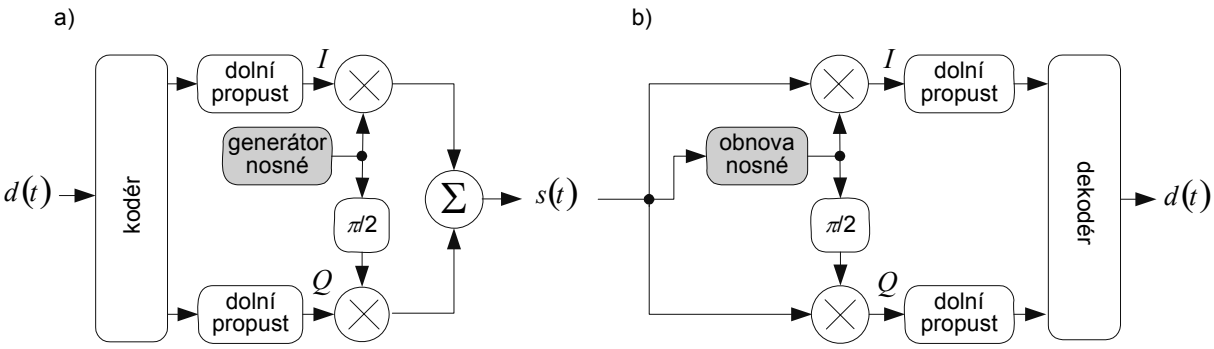
kde $\omega_c = 2\pi f_c$ úhlový kmitočet nosné, $u(t)$ je funkce vyjadřující obdélníkový puls o šířce T_s a výšce 1, C_n je amplituda, ω_n a $\varphi_n(t)$ fáze (resp. trajektorie fáze) n-tého symbolu ($nT_s < t \leq (n+1)T_s$).

Při použití standardních trigonometrických pouček můžeme vztah (1.1) upravit na tvar respektující rozdělení signálu do *synfázní I* a *kvadraturní* složky *Q*

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [I_n \cos(\omega_c t) + Q_n \sin(\omega_c t)] u(t - nT_s), \qquad (1.2)$$

kde $I_n = C_n \cos(\omega_n t + \varphi_n(t))$ a $Q_n = C_n \sin(\omega_n t + \varphi_n(t))$.

Na základě tohoto popisu lze vytvořit základní schéma modulátoru a demodulátoru jak je nakresleno na **Obr. 1.1**. Úlohou kodéru je převod obvykle používaného sériového datového toku $d(t)$ na paralelní a jeho rozdělení na složku A_k zpracovávanou ve kanálu I a B_k zpracovávanou v kanálu Q. Signály na výstupu dolních propustí charakterizují číslicovou modulaci v tzv. základním pásmu. Dalšími typickými činnostmi kodéru jsou například zpoždění datového symbolu v jedné z obou větví v případě ofsetových modulací, jakou je např. *O-QPSK* (*Offset Quadrature PSK*), *diferenciální kódování* používané u diferenciálních modulací jejichž typickým případem je *D-QPSK* (*Differential QPSK*) nebo *mapování* kdy kombinace na výstupu kodéru je dána určitým předpisem který vychází jak z okamžitých stavů A_k a B_k tak i ze stavů předchozích A_{k-1} a B_{k-1}. Mapování je typické pro modulaci $\pi/4$-*QPSK* nebo $\pi/4$-*DQPSK*.



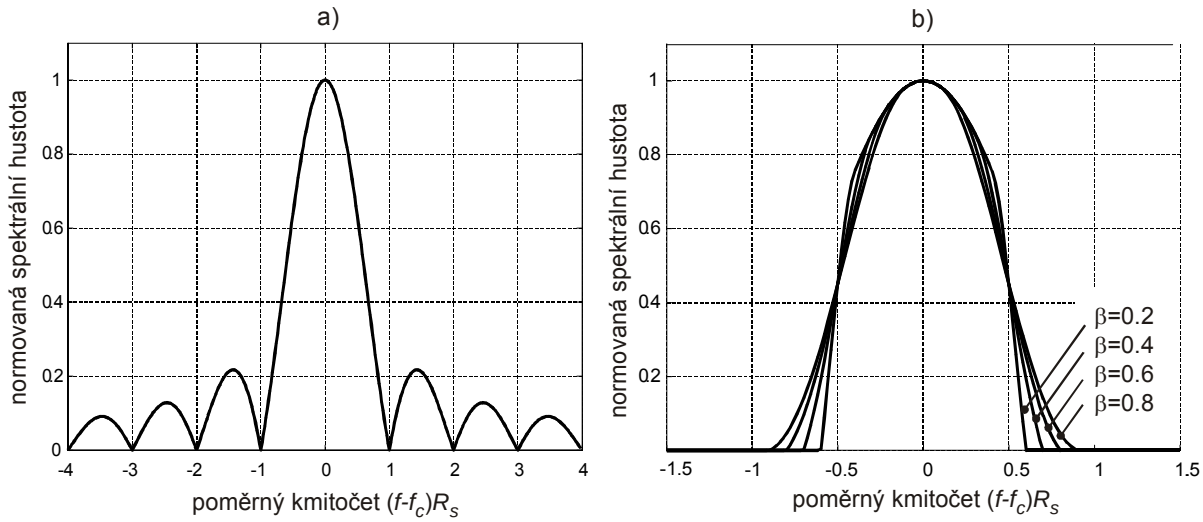
Obr. 1.1: Obecné schéma diskrétního modulátoru a) a demodulátoru b)

Signál na výstupu kodéru má teoreticky nekonečně široké spektrum a proto je nutné provést jeho kmitočtové omezení tak, aby modulovaný signál měl požadovanou šířku pásma. Vlivem *časové disperze*, díky které se impuls o *symbolové periodě* T_s na výstupu dolní propusti časově rozptýlí do oblasti mnohem delší než T_s, dochází k takzvané mezisymbolové interferenci *ISI* (*Inter Symbol Interference*). Ta může způsobit po přenesení signálu kanálem, chybné vyhodnocení bitů. Pro kmitočtové omezení se proto často používá filtrace, která zaručí nulové hodnoty ISI v okamžicích vyhodnocení jednotlivých symbolů využívající dolní propusti s tzv. *modifikovaným kosinusovým spektrem*. Typickým představitelem je tzv. *raised-cosine* filtr s přenosem

$$H(f)=\begin{cases} T_s, & \text{pro} \quad 0 \le |f| < \dfrac{1\text{-}\beta}{2T_s}, \\ \dfrac{T_s}{2}\left[1-\sin\dfrac{\pi T_s}{\beta}\left(|f|-\dfrac{1}{2T_s}\right)\right], & \text{pro} \quad \dfrac{1\text{-}\beta}{2T_s} \le |f| < \dfrac{1+\beta}{2T_s}, \\ 0, & \text{pro} \quad \dfrac{1+\beta}{2T_s} \le |f|, \end{cases} \qquad (1.3)$$

kde *činitel tvaru* β (*rolloff-factor*) určuje nárůst šířky spektra vzhledem Nyquistově šířce pásma ($0.5R_s$). Protože nulové hodnoty *ISI* jsou požadovány na výstupech dolních propustí demodulátoru, bývá v praxi přenosová funkce raised-cosine filtru realizována dvěma dolními propustmi (v modulátoru a demodulátoru) s přenosem $\sqrt{H(f)}$ (*square root raised-cosine* filtr). Typický průběh spektra modulovaného signálu *MPSK* nebo *MQAM* (*M* značí obecně počet stavů) je na **Obr. 1.2**. Jiná strategie kmitočtového omezení je založena na použití *Gaussovských dolních propustí*, využívaných především u modulací *MSK* (*Minimum Shift Keying*). Po vynásobení složek *I* a *Q* nosnou vlnou resp. nosnou vlnou posunutou o $\pi/2$ a po sečtení signálů obou větví je k dispozici modulovaný signál, který bývá před vstupem do přenosového kanálu filtrován pásmovou propustí.

K *synchronní* (*koherentní*) *demodulaci* je potřebná referenční nosná vlna, která je v dokonalé kmitočtové a fázové shodě s nosnou vlnou přijímaného signálu. Ta je však u celé řady digitálních modulací potlačena, neboť neobsahuje žádnou informaci. Proto musí být součástí přijímače (demodulátoru) obvod pro *obnovu nosné vlny*. Dolní propusti na **Obr. 1.1b** mají za úkol potlačit součtovou složku součinu vstupního signálu a obnovené nosné. Výstup dolních propustí musí být následně vzorkován v okamžicích $mT_s + \tau$, kde τ je zpoždění kanálu a $m = 0, 1, 2, \ldots$ V těchto okamžicích je obvykle maximální poměr S/N v rámci symbolového intervalu. Součástí dekodéru musí tedy být i obvod pro *obnovu časování symbolů*. V dekodéru jsou dále obvody, jejichž činnost je inverzní k činnosti kodéru pro konkrétní modulace, tj. odstranění zpoždění, diferenciální dekódování nebo operace inverzní k procesu mapování a dále převod paralelních složek A_k a B_k na výstupní sériový datový tok $d(t)$.



Obr. 1.2: Typický charakter spektra modulovaných signálů MQAM a MPSK
a) s filtrací pomocí filtru s pravoúhlou impulsní charakteristikou,
b) s filtrací pomocí *square root raised-cosine* filtru.

Pro obnovu nosné vlny se používají dva základní postupy. První využívá pomocný nemodulovaný pilotní signál, druhý odvozuje referenční nosnou přímo ze vstupního signálu demodulátoru. Druhý postup je typický především pro modulace s oběma postranními pásmy jako jsou *MPSK* nebo *MQAM*. Konkrétní používané metody obnovení nosné bez použití pilotního signálu jsou: *Umocňující smyčka*, *Costasova smyčka*, *smyčka s rozhodovací zpětnou vazbou, APT* (*Adaptive Phase Tracking*) *a fázový derotátor (Phase derotator)* .

Všechny čtyři metody mají fázovou nejistotu $2\pi/M$ a je proto nutné tento problém odstranit buď systematickým vkládáním symbolů (využívaných také pro rámcovou synchronizaci) při nichž je přenášena nosná vlna s definovaným fázovým posuvem, *Mülerovým kódováním* (zpožděná modulace) nebo *diferenciálním kódováním*.

Konkrétní zapojení prakticky realizovaných modulátorů a demodulátorů číslicově modulovaných signálů, stejně jako podrobný popis vlastností jednotlivých modulací jsou uvedeny v přednáškovém skriptu. Ve stejném pramenu lze nalézt podrobný popis dílčích stavebních bloků modulátorů a demodulátorů včetně používaných filtrů a obvodů synchronizace.

1.2 Zadání

1. Zobrazte signály QPSK, π/4-QPSK, 8PSK, 16QAM v kmitočtové oblasti při použití filtrů typu Rectangular a Raised-Cosine. Srovnejte šířku pásma signálu v závislosti na použité dolní propusti s teoretickými předpoklady.
2. Zobrazte I a Q složky demodulovaných signálů QPSK, π/4-QPSK, 8PSK, 16QAM v časové oblasti a IQ rovině – konstelační i vektorový diagram. Porovnejte časové průběhy a diagramy pro oba typy filtrů – Rectangular a Root Raised-Cosine.
3. Na osciloskopu zobrazte VF signál modulovaný QPSK, modulační data zvolte tak, aby probíhaly přechody stavů jak po obvodu vektorového diagramu, tak jeho středem. Pozorujte a popište, jaký vliv mají tyto dva typy přechodů mezi stavy vliv na VF signál.
4. Určete souvislost posloupností bitů se stavy modulace 16QAM zobrazené ve vektorovém diagramu.

1.3 Pokyny pro měření

Ad 1. a 2. Propojte generátor číslicových modulací a signálový analyzátor FSQ 3. Na RF vstup analyzátoru připojte RF výstup generátoru. Dále na I a Q vstupy základního pásma (*basebandu*) analyzátoru připojte I a Q výstupy generátoru. Na generátoru nastavte:

- modulační signál: pseudonáhodný,
- typ modulace: postupně podle zadání,
- symbolová rychlost: 100 000 symb/s (Baud),
- typ filtru: s pravoúhlou impulsní charakteristikou (RECTANGLE)
- nosný kmitočet 100 MHz,
- výkon výstupního nemodulovaného nosného kmitočtu -20 dBm,
- ostatní parametry ponechejte na přednastavených hodnotách.

Následuje nastavení spektrálního analyzátoru pro změření spektra modulovaného signálu. Po restartu (stisku tlačítka PRESET) nastavte nejprve střední kmitočet tak, aby odpovídal nosnému kmitočtu – klávesou FREQ, dále softkey Center a zadání hodnoty 100 MHz pomocí číselné klávesnice. Dále je potřeba nastavit šířku zobrazovaného pásma, vhodná je hodnota 2 MHz. K nastavení použijete klávesu SPAN a dále zadání hodnoty pomocí číselné klávesnice. Dalším nastavením je volba referenční úrovně spektrálního analyzátoru na -10 dBm. Použijte klávesu AMPT a dále opět zadání hodnoty z číselné klávesnice. Na závěr nastavíme kmitočtové rozlišení spektrální analýzy – klávesou BW, následně softkey RES BW MANUAL a zadáním číselné hodnoty. Doporučenou hodnota je 1 až 2 kHz. Pokud je potřeba, je pro měření vlastností spektra a snazší překreslení jeho tvaru možné využít markery – jejich funkce jsou pod klávesami MKR a MKR→. Obecné informace pro obsluhu spektrálních analyzátorů naleznete na plakátě umístěném na chodbě před laboratoří PA-527. V tomto nastavení je možné měřit spektra signálů s různými modulacemi jak je požadováno v bodech 1 a 2.

Stejné měření proveďte pro případ použití filtru *Raised Cosine* (v generátoru je označen zkratkou COS) s *rolloff* faktorem 0.5. Ověřte, zda průběhy odpovídají teoretickým předpokladům. Výsledky zdůvodněte v závěrečném zhodnocení měření.

Pro zobrazení generovaného signálu v IQ rovině a také zobrazení průběhů obou složek v čase, případně zobrazení nemodulovaných dat analyzátor FSQ 3 přepněte do režimu vektorové signálové analýzy (VSA – Vector Signal Analysis) – použijte k tomu softkey VSA na dolní straně displeje analyzátoru.

Displej analyzátoru je možno využít k zobrazení jednoho velkého grafu nebo dvou grafů poloviční velikosti. Přepínat mezi těmito stavy je možno po stisku klávesy DISP pomocí softkey FULL SCREEN a SPLIT SCREEN. V případě děleného displeje – split screen je možno mezi jeho částmi A a B přepínat pomocí dolní softkey SCREEN A, SCREEN B. Co v jednotlivých částech displeje bude zobrazeno, lze volit v menu měření. Lze jej vyvolat stiskem klávesy MEAS a dále softkey MEAS SIGNAL. Pokud dále zvolíme softkey REAL/IMAG, objeví se v aktivní půli displeje dva časové průběhy – složky I a Q. Stiskem softkey IQ(CONST/VECTOR) je možné zobrazit konstelační resp. vektorový diagram v IQ rovině. Mezi oběma diagramy je možno přepínat opakovaným stiskem této softkey.

Je-li potřeba měření pozastavit, je možno provádět analýzu pouze jednoho běhu odpovídajícího počtu symbolů (viz RESOLUTION LEN). Po stisku klávesy SWEEP je možno pomocí softkeys SINGLE SWEEP a CONTINUOUS SWEEP přepínat mezi zobrazením jednoho běhu a neustálým obnovováním zobrazení.

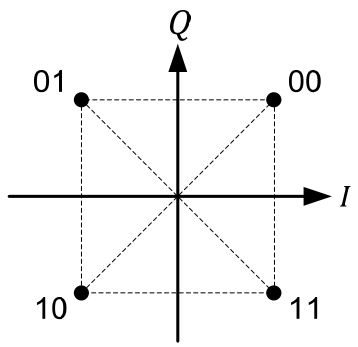
Nyní proveďte nastavení vektorové analýzy. Ve výchozím menu VSA (lze se do něj dostat také stiskem dolní softkey VSA Home) stiskněte klávesu NEXT, poté pomocí softkey RF PATH resp. BASEBAND ANALOG vyberte požadovaný zdroj signálu pro analýzu. V prvních bodech měření je možno použít obou variant – zkuste porovnat rozdíl. V bodě 3 bude nutno použít BASEBAND ANALOG.

Ve výchozím menu VSA dále musíme nastavit vlastnosti modulovaného signálu. Začněme softkey MODULATION SETTINGS, v následujícím menu zvolíme softkey SYM RATE a zadáme skutečnou symbolovou rychlost modulačního signálu – podle zadání 100 kHz. Dále je nutno zvolit mapování – softkey MODULATION MAPPING, požadované modulační mapování (podle zadání) zvolíme pomocí rotačního kodéru. Další využitou softkey je FILTER, zde vyberte položku NONE (poslední řádek). Pokračujeme softkey POINTS/SYM, tedy počet bodů na symbol. Zde volíme hodnotu 8. Do předchozí úrovně menu se vrátíme klávesou PREV.

Nastavení pokračuje volbou softkey DEMOD SETTINGS, zde položku RECORD LEN nastavíme na hodnotu Auto, RESOLUTION LEN volte podle potřeby. Pro zakreslování do grafů je však vhodné (vzhledem k 100 µs rozsahu grafu a 100 kBd rychlosti symbolů) zobrazit právě 10 symbolů – proč to tak je? Nyní se opět navraťte do předchozího menu klávesou PREV nebo HOME VSA, zvolte aktivní dolní zobrazení stiskem softkey SCREEN A (B) a pokračujte stiskem softkey RANGE. Zde je potřeba zvolit možnost BIN (demodulovaná data jsou v tabulce zobrazena binárně - je možné přijatou sekvenci bitů porovnat s vysílanou) a opět stikem PREV se vrátit.

Stejné měření proveďte pro případ použití filtru *Raised Cosine* s *rolloff* faktorem 0.5.

Ad 3. Pro VSA nastavte jako zdroj analyzovaného signálu BASEBAND ANALOG, modulační mapování nastavte na přirozenou (Natural), QPSK a zobrazte na analyzátoru vektorový diagram. Na generátoru zvolte rovněž QPSK modulaci, jako zdroj modulačních dat zvolte DATA LIST. Bitovou posloupnost v tomto „datalistu“ zvolte takovou, aby probíhaly přechody mezi symboly po obvodu vektorového diagramu (např. z 00 do 01) a také přechody středem diagramu – přes nulu (např. z 00 do 10). Mapování dibitů do jednotlivých stavů je zobrazeno na **Obr. 1.3.** Na osciloskopu sledujte modulovaný VF signál z výstupu generátoru, a zakreslete jej. Zjistěte, jaký vliv mají oba typy přechodů mezi stavy na tvar modulační obálky. Stejné měření proveďte pro filtr *Raised Cosine* jako v předchozích bodech měření.



Obr. 1.3: Mapování dibitů do jednotlivých stavů modulace

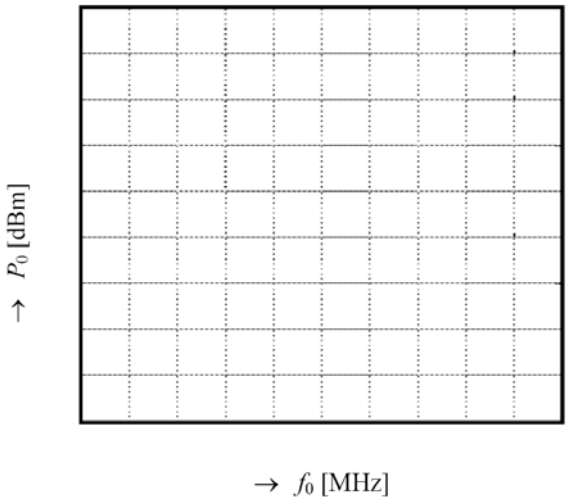
Ad 4. Pro VSA nastavte jako zdroj analyzovaného signálu BASEBAND ANALOG, modulační mapování nastavte na QAM se 16 stavy. Zobrazte signál v IQ rovině a zjistěte, jaké čtyřbitové kombinace přísluší k jednotlivým bodům vektorového diagramu. Zvolte nejprve posloupnost bitů modulačního signálu např. 0000 1111. Zobrazí se pozice obou bodů. Pak vytvářejte postupně všechny kombinace logických jedniček a nul v další čtveřici bitů a zaznamenávejte odpovídající přechody. Po přiřazení všech 16 stavů odpovídajícím bitům vytvořte takovou posloupnost čtveřic bitů, aby se ve vektorovém diagramu zobrazily pouze přechody po jeho obvodu (viz čárkovaně v odstavci 1.3. Ad 3).

1.4 Vypracování

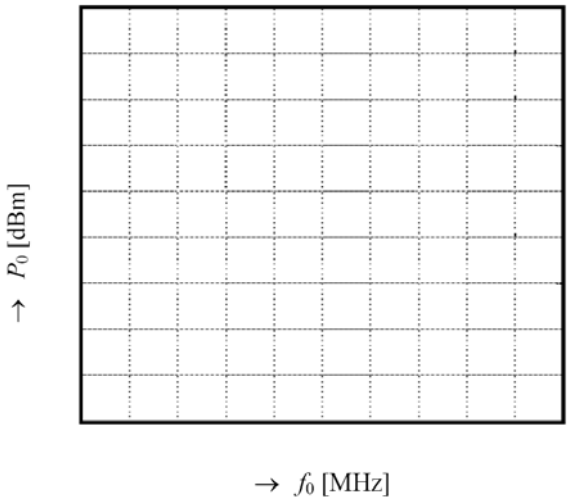
Ad 1. Spektra digitálně modulovaných signálů

Spektrum modulovaného signálu – QPSK

R_s = 100 ksymb/s, filtr: RECTANGLE

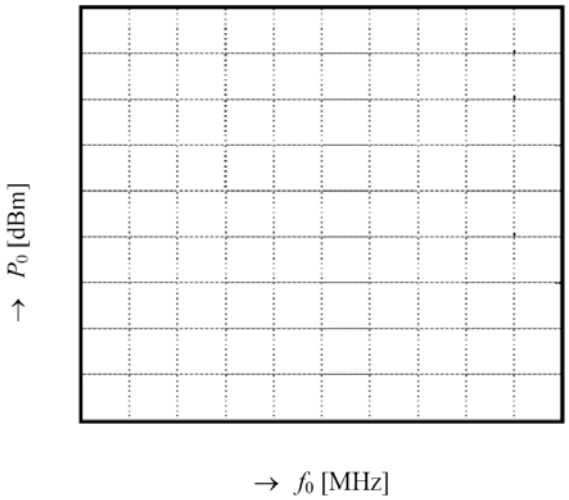


R_s = 100 ksymb/s, filtr: COS

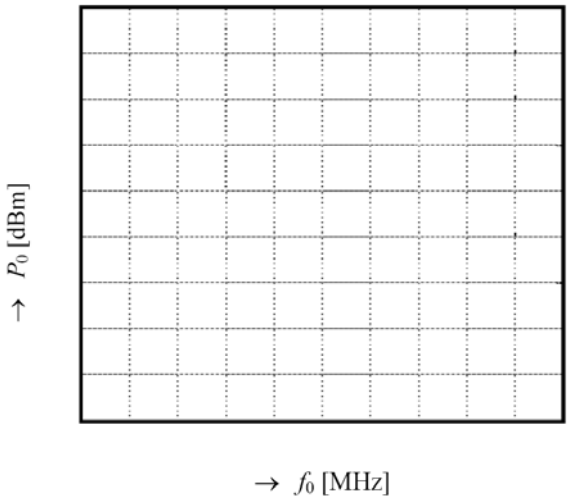


Spektrum modulovaného signálu – π/4-QPSK

R_s = 100 ksymb/s, filtr: RECTANGLE

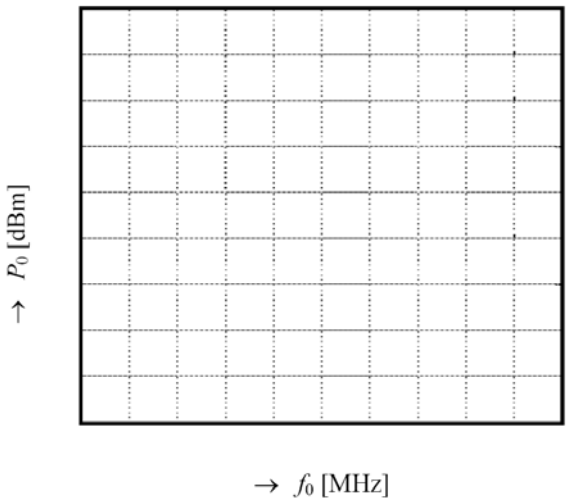


R_s = 100 ksymb/s, filtr: COS

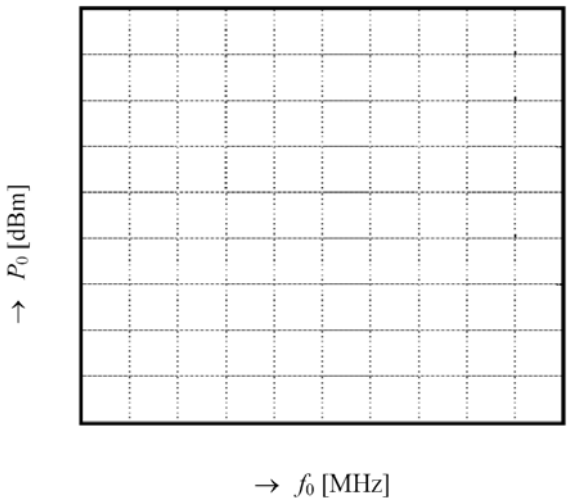


Spektrum modulovaného signálu – 8PSK

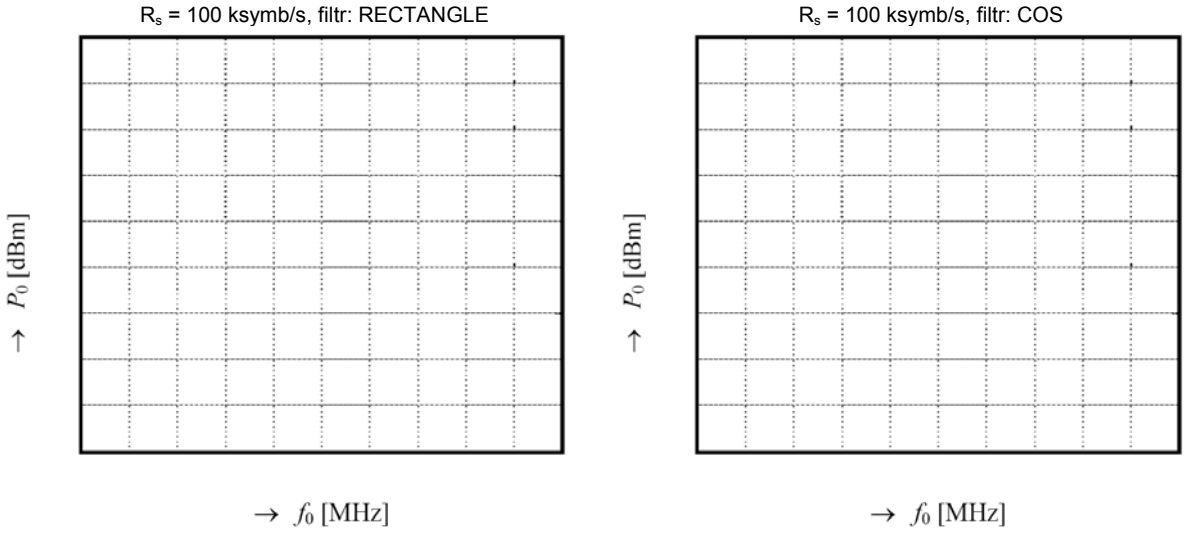
R_s = 100 ksymb/s, filtr: RECTANGLE



R_s = 100 ksymb/s, filtr: COS

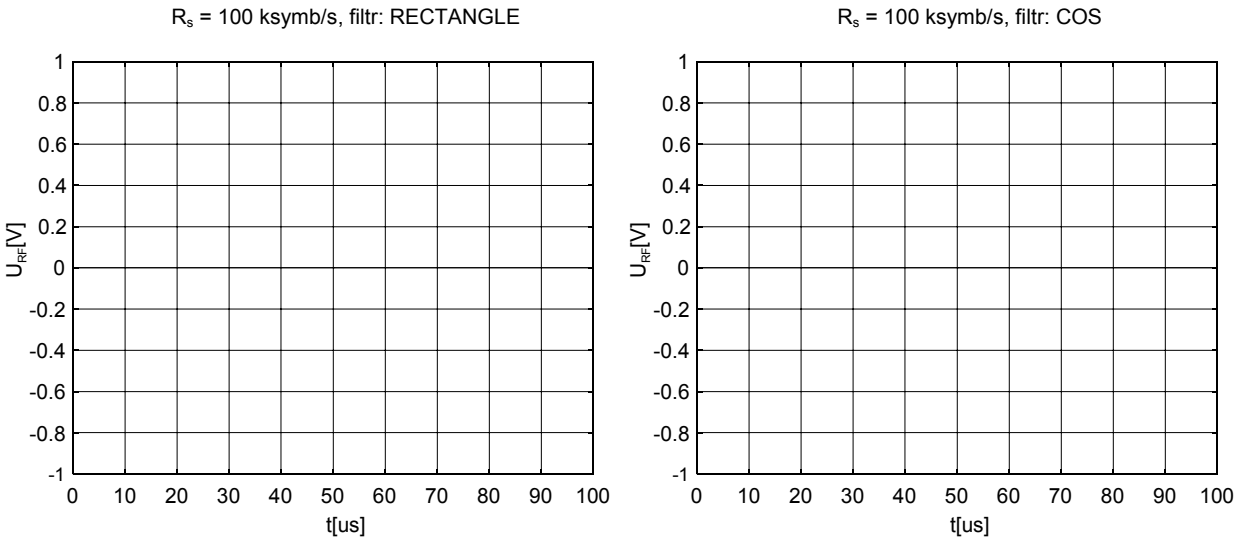


Spektrum modulovaného signálu – 16QAM

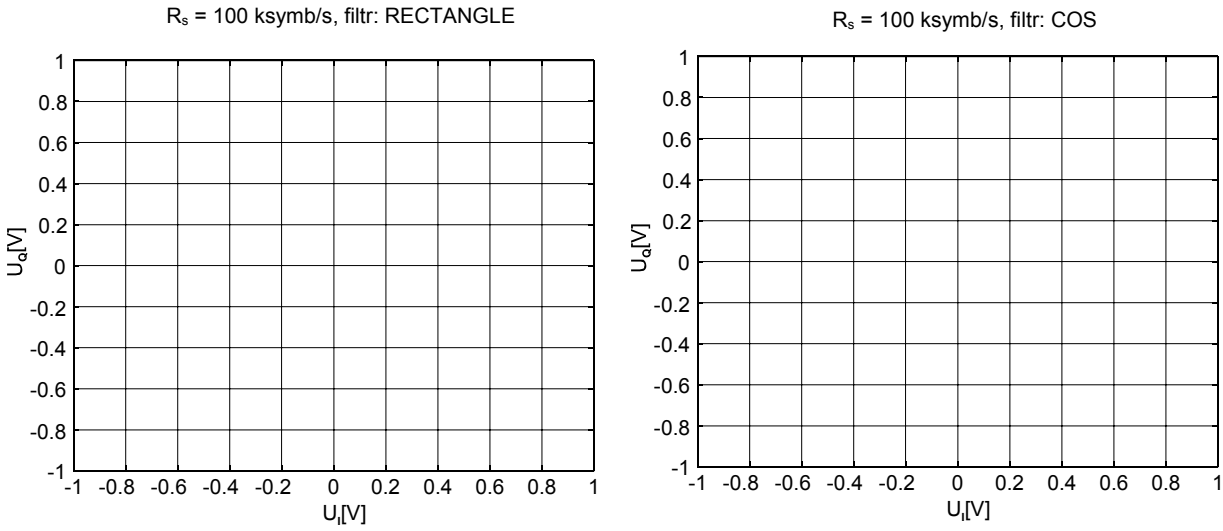


Ad 2. Vlastnosti demodulovaných signálů

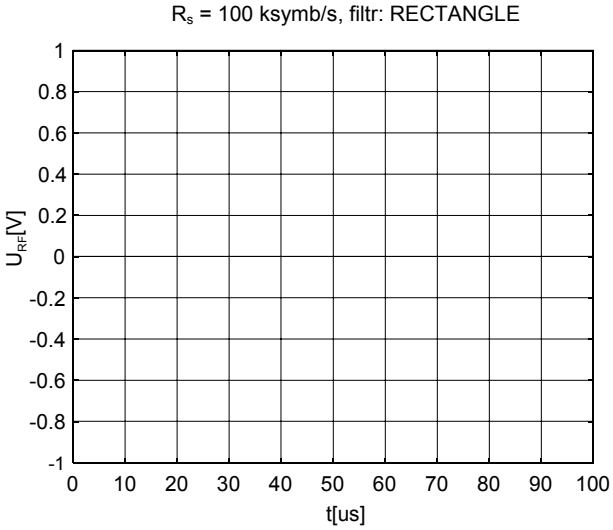
Časové průběhy složek I a Q – QPSK

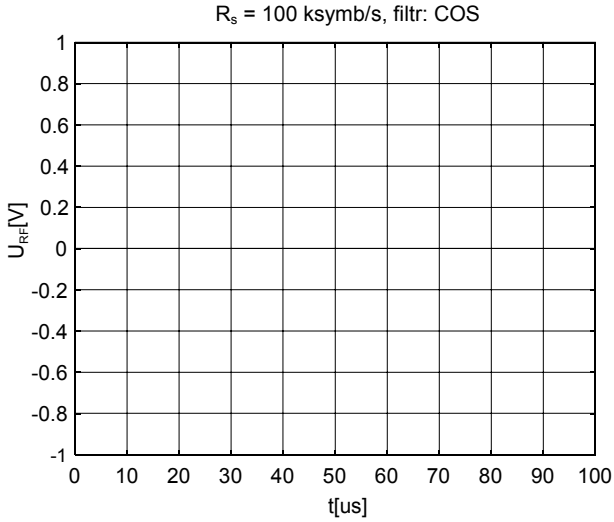


Konstelační / vektorové diagramy – QPSK

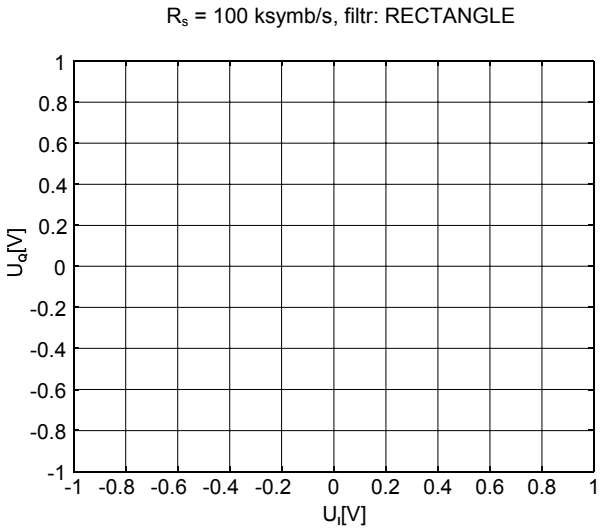


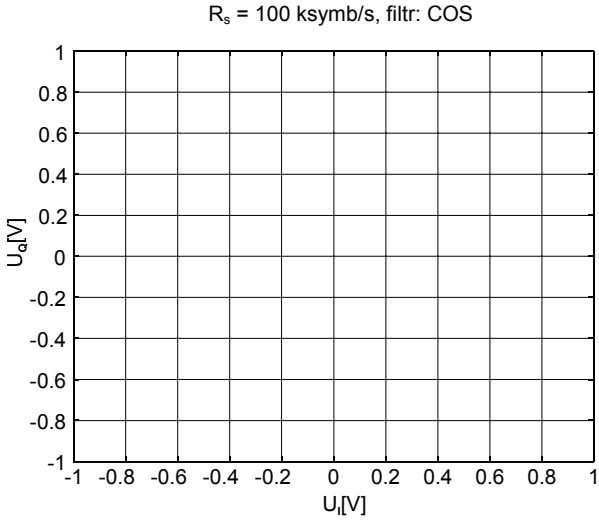
Časové průběhy složek I a Q – π/4-QPSK



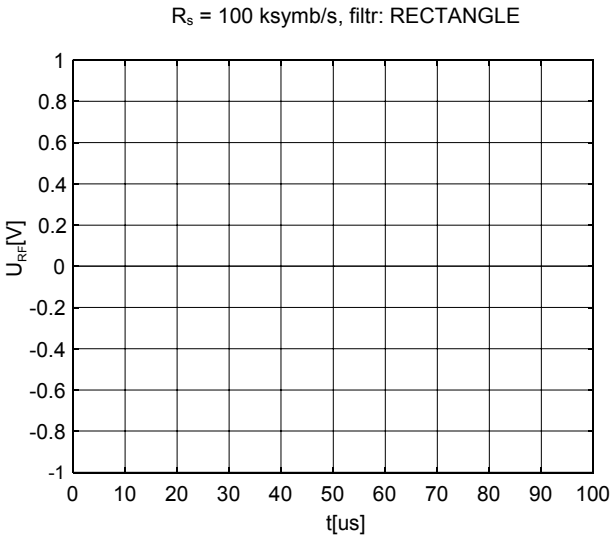


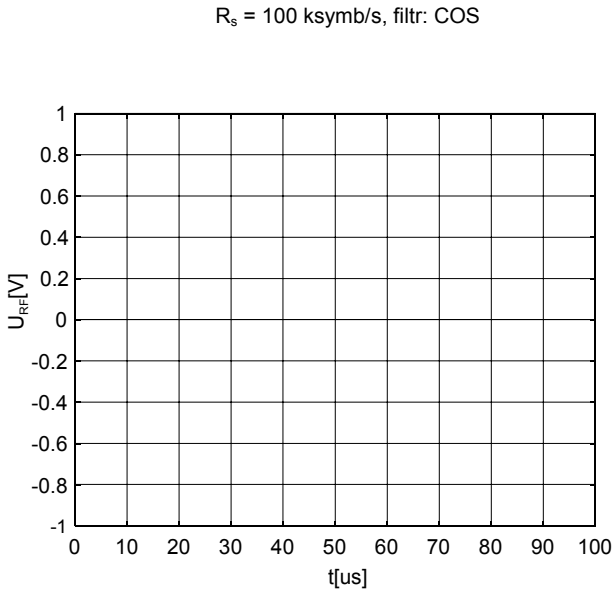
Konstelační / vektorové diagramy – π/4-QPSK



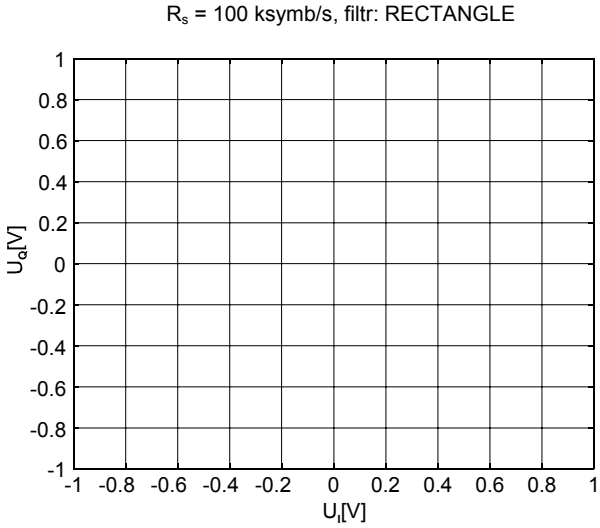


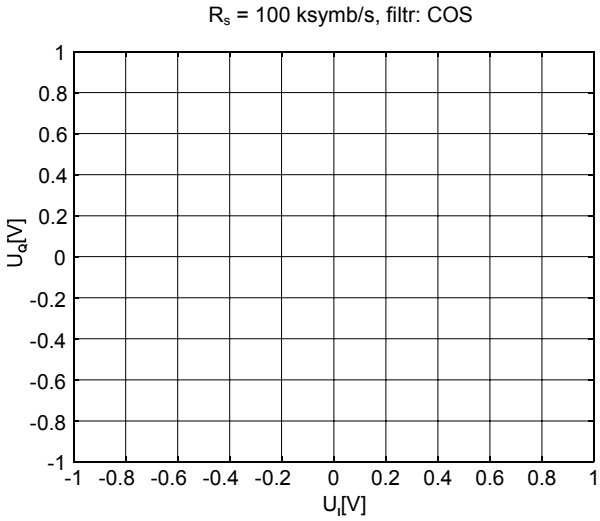
Časové průběhy složek I a Q – 8PSK



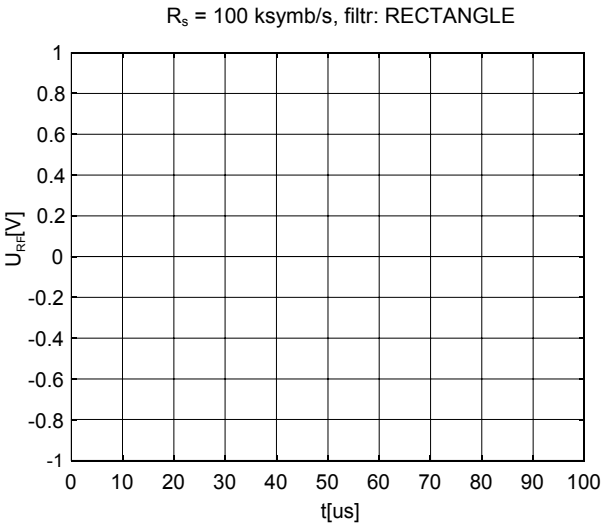


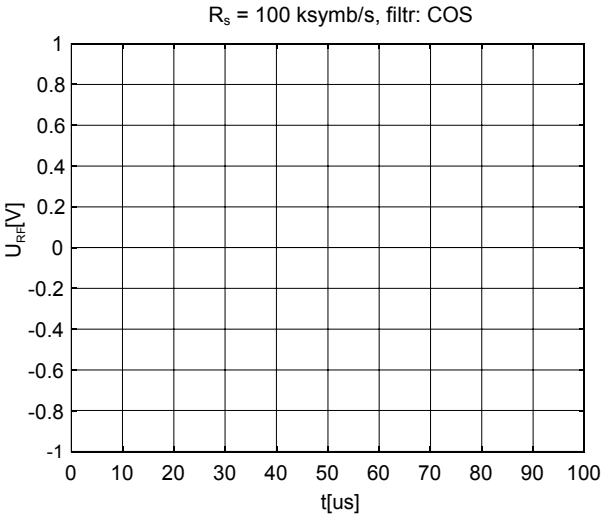
Konstelační / vektorové diagramy – 8PSK



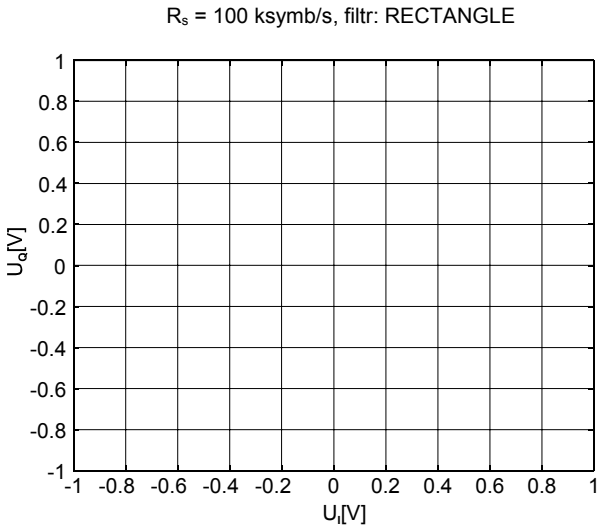


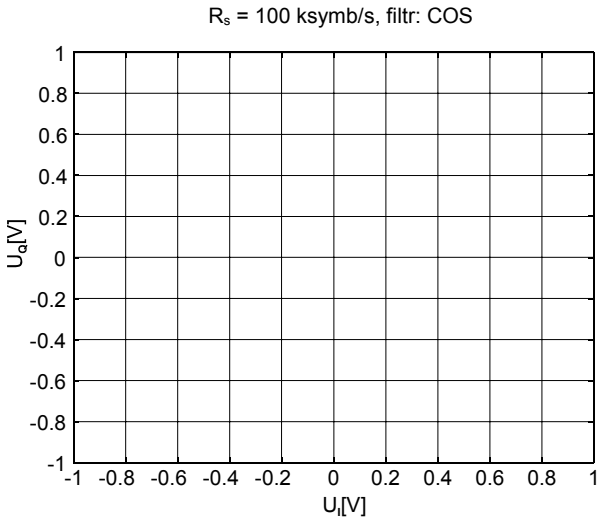
Časové průběhy složek I a Q – 16QAM





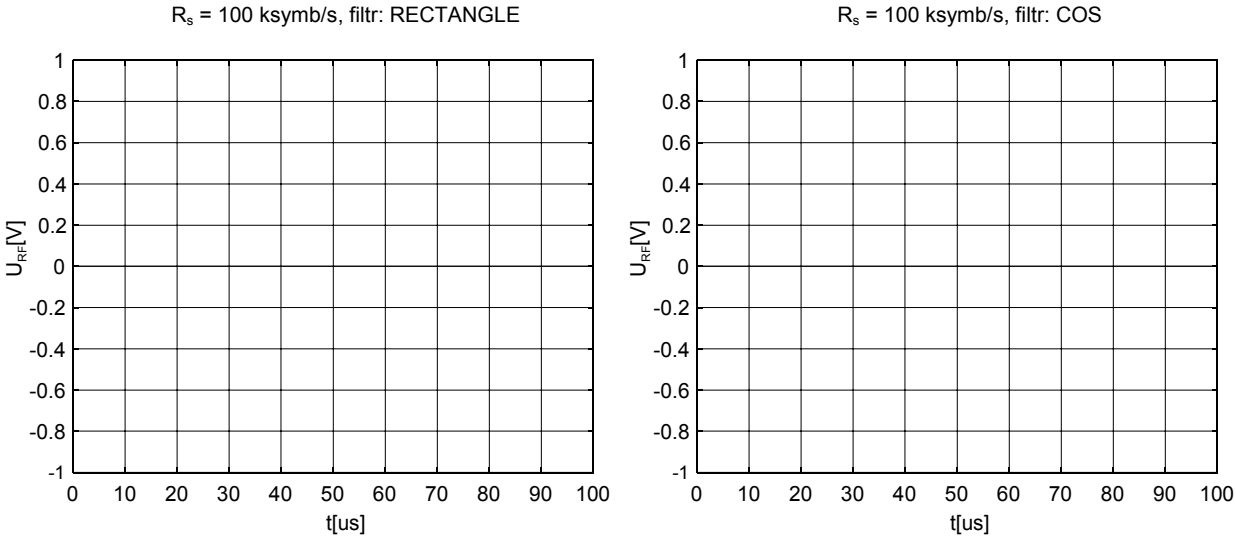
Konstelační / vektorové diagramy – 16QAM



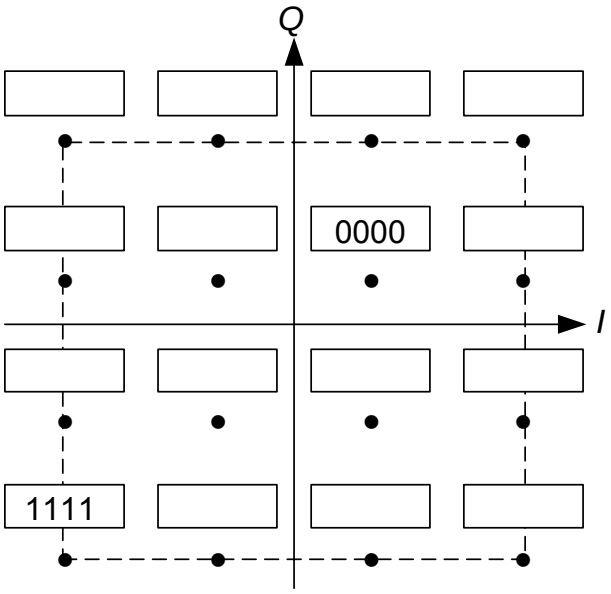


Ad 3. Vlastnosti časového průběhu modulovaného VF signálu

Časové průběhy VF signálu – QPSK



Ad 4. Souvislost posloupností bitů se stavy modulace 16QAM ve vektorovém diagramu.



1.5 Poznámky k ovládání generátoru SMIQ2B

1.5.1 Všeobecná pravidla pro práci s generátorem

Z důvodu omezení případného chybného nastavení přístroje z předchozího měření je vhodné před měřením provést restart generátoru pomocí tlačítka [PRESET].

1a) K nastavení žádané položky menu generátoru slouží tlačítka [SELECT] (vstup do podřízeného menu nebo volba položky menu), [RETURN] (návrat do nadřazeného menu) a knoflík MENU/VARIATION (listování v položkách menu). Cílové položky menu lze vybrat i tlačítky [⇨], [⇦].

1b) Nastavení číselné hodnoty parametru lze provést pomocí číselné klávesnice DATA/INPUT a potvrzením některým z tlačítek [G/n], [M/µ], [k/m] nebo pokud je parametr bezrozměrný tlačítkem [x1 ENTER]. Změnu parametru lze provést i pomocí tlačítek [⇨], [⇦] (natavení pozice (řádu) ve které má být parametr změněn) a pomocí knoflíku MENU/VARIATION (nastavení hodnoty na příslušné pozici). Potvrzení parametru je stejné jako v předchozím případě.

1c) Do režimu nastavení kmitočtu a amplitudy nosné výstupního signálu lze vstoupit přímo pomocí kláves [FREQ] a [LEVEL].

1d) Modulaci nosné lze zapnout resp. vypnout tlačítkem [MOD ON/OFF].

1e) VF signál na výstupu RF 50 Ω lze zapnout resp. vypnout tlačítkem [RF ON/OFF].

1.6 Použité přístroje

Signálový analyzátor FSQ 3	1ks
Generátor SMIQB2	1ks
Osciloskop _____	1ks

1.7 Zhodnocení měření

(Zdůvodnění výsledků v jednotlivých bodech)