

CHARAKTERIZACE ŠIROKOPÁSMOVÝCH SIGNÁLOVÝCH GENERÁTORŮ A ANALYZÁTORŮ

¹Ing. Martin Hudlička, Ph.D., ²Dr. Mohammed Salhi, ³Dr. David A. Humphreys

¹Český metrologický institut, Odd. primární metrologie mikrovlnné techniky,

e-mail: mhudlicka@cmi.cz

²Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Spolková republika Německo

³National Physical Laboratory, Teddington, Velká Británie

ÚVOD

V posledních letech dochází k bouřlivému rozvoji bezdrátových komunikací. Největší rozmach zaznamenává přenos dat a s ním spojený požadavek širokopásmového datového připojení vždy a všude. To vyžaduje použití náročných modulačních a kódovacích technik a také nová obvodová řešení, přičemž trendem je posun do stále vyšších kmitočtových pásem. V současnosti se objevují první aplikace pro zařízení pracující v pásmu 50 GHz až 75 GHz, kde dosahují teoretické přenosové rychlosti řádů Gbit/s a používané šířky pásma řádů stovek MHz až jednotek GHz.

Pro výrobu a testování nových zařízení jsou zapotřebí přístroje, které dokážou signály podle daného komunikačního standardu vytvořit a zároveň přístroje, které dokážou měřit vlastnosti těchto signálů. Aby si uživatel zařízení mohl být jist tím, že komunikační signály generuje a měří s vysokou přesností, je potřeba měřicí techniku charakterizovat (kalibrovat) podle standardů vyšší přesnosti. V tomto příspěvku budou uvedeny nové metody, jak testovat vybrané charakteristiky těchto zařízení. U signálových generátorů jde o určení kvality modulovaného signálu a v případě signálových analyzátorů určení komplexní odezvy kvadraturního demodulátoru. Motivací je vytvoření metod, které nebudou závislé na konkrétním výrobci měřicí techniky a které budou návazné na standardy vyšší přesnosti.

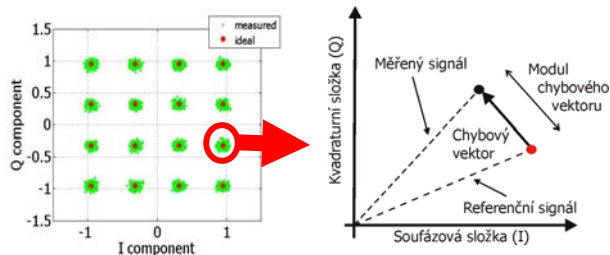
CHARAKTERIZACE SIGNÁLOVÝCH GENERÁTORŮ

V současné době pracují vektorové signálové generátory s nosnými kmitočty řádově 30 GHz a více a jsou schopné vytvářet širokopásmové signály se šířkami pásma cca 2 GHz. Tyto širokopásmové signály jsou vytvořeny pomocí tzv. generátoru libovolných průběhů (arbitrary waveform generator) a směřovány na nosný kmitočet. Ověření vlastností signálového generátoru spočívá v provedení mnoha testů a porovnání jejich výsledků s udávanými specifikacemi daného zařízení. Pro měření kmitočtu, výkonu, analogových modulací, fázového šumu apod. již existují zavedené metody, které jsou návazné na standardy vyšší přesnosti a na jednotky soustavy SI. Problematické je ověření kvality modulovaného signálu. Ta je nejčastěji vyjádřena veličinou modul chybového vektoru (EVM, error vector magnitude), která je definována jako odchylka mezi měřeným komplexním signálem po provedení určitých korekcí a jeho ideální replikou vytvořenou po demodulaci dat, viz Obr. 1. Tato veličina se obvykle vyjadřuje v procentech a její střední hodnota je definována jako

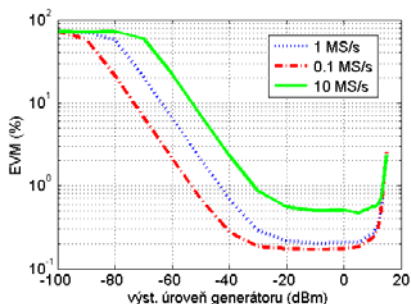
$$EVM_{RMS} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_k}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (I_{k,ref}^2 + Q_{k,ref}^2)}} \cdot 100 \quad (\%), \quad N \gg 1, \quad (1)$$

kde $e_k = (I_{k,ref} - I_k)^2 + (Q_{k,ref} - Q_k)^2$, I_k a Q_k představují soufázovou a kvadraturní složku měřeného signálu a $I_{k,ref}$ a $Q_{k,ref}$ představují soufázovou a kvadraturní složku referenčního signálu, N je počet vzorků¹. Veličina EVM je určena pomocí vektorového signálového analyzátoru nebo libovolným vzorkovačem (osciloskop, PXI vzorkovací karty, ...) spolu s patřičným programovým vybavením. Lze definovat i další veličiny vypovídající zejména o zdroji chyb v modulovaném signálu, jako např. nevyváženost složek I, Q (IQ imbalance), kvadraturní chyba (QE, quadrature error) vypovídající o míře ortogonalitě mezi složkami I a Q apod.

¹ Signál o libovolné amplitudě a fázi lze složit ze dvou pomocných signálů o téže kmitočtu s vhodnými amplitudami, které jsou vzájemně v kvadratuře (s konstantním vzájemným fázovým posunem 90°). Tyto dvě složky se nazývají soufázová I (in-phase) a kvadraturní Q (quadrature). Vykreslením vzájemně závislosti nízkofrekvenčních signálů I a Q dostáváme tzv. stavový diagram, pokud si odmyslíme přechody mezi stavy (symboly), dostáváme tzv. konstelační diagram modulace, tedy pouze polohy detekovaných symbolů v komplexní rovině. Pro každý ze symbolů modulace existuje ideální poloha v komplexní rovině (pro příklad QPSK jsou to souřadnice {1, 1}, {-1, 1}, {1, -1}, {-1, -1}), která se obecně odlišuje od naměřené polohy po amplitudovém normování.



Obr. 1 Definice veličiny EVM



Obr. 2 Měřený parametr EVM v závislosti na výstupní úrovni generátoru

Chyby modulovaného signálu jsou obvykle určeny následovně: vf modulovaný signál na vstupu analyzátoru je směšovačem převeden na nižší kmitočet, na kterém je s velkou rychlostí navzorkován A/D převodníkem (obvykle více než 12-bitovým). Na základě znalosti parametrů modulovaného signálu je provedena jeho demodulace a určeny původní přenášené symboly. Ze znalosti symbolů a druhu modulace je vytvořena ideální replika modulovaného signálu a je porovnána s měřeným signálem.

Teoretický popis chybových parametrů modulovaného signálu předpokládá, že měřicí přístroj sám nevnese do procesu žádnou chybu. Toto ovšem není v praxi splněno. Na Obr. 2 je ukázka měřeného parametru EVM pro různé výstupní úrovně generátoru. Je zřejmé, že kvalita modulovaného signálu vytvořeného arbitrary waveform generátorem by měla být přibližně konstantní pro danou symbolovou rychlost a že vysoké hodnoty EVM pro nízké úrovně pod -40 dBm jsou dány malým dynamickým rozsahem analyzátoru a vyšší hodnoty EVM pro vysoké výstupní úrovně nad +5 dBm zase nelinearitami zesilovače v generátoru a přebuzením prvního směšovače v signálovém analyzátoru. Je tedy otázkou, nakolik lze údaje přístroje věřit a za jakých podmínek lze měření uskutečnit. Před samotným výpočtem chybových parametrů doporučují normy upravit vstupní signál tak, aby byly eliminovány některé

systematické chyby vzniklé přenosem signálu a procesem měření

- časový posun δ mezi referenčním a měřeným signálem
- normování amplitudy měřeného signálu k amplitudě referenčního signálu
- konstantní kmitočtový ofset mezi měřeným a referenčním signálem
- konstantní posun složek I a Q vlivem parazitních stejnosměrných signálů

Označíme-li měřený signál vzorkovaný v diskrétních okamžicích jako $t[n]$ a referenční rekonstruovaný signál jako $r[n]$, je nutno před výpočtem EVM nejprve nalézt chybový vektor $e_x[n]$ a tento minimalizovat

$$e_x[n] = (x_1 + jx_2)t[n] \exp[-(x_3 + j\kappa x_4)(n-1)] - (x_5 + jx_6) - r[n], \quad n = 1, \dots, N \quad (2)$$

kde $\kappa = 2\pi T_{\text{symb}}$, $(x_1 + jx_2)$ je komplexní koeficient pro úpravu zisku, x_3 vyjadřuje útlum, x_4 je kmitočtový ofset a $(x_5 + jx_6)$ představuje posun počátku. Určení koeficientů x_1 až x_6 vede na úlohu nalezení globálního minima funkce šesti proměnných, kterou lze řešit více či méně optimálně. V případě komunikačních standardů založených na metodě OFDM přibývají některé další parametry. V signálových procesorech měřicích přístrojů je nutné vyhodnotit výsledky měření v reálném čase a je použita pouze suboptimální metoda. Exaktní řešení optimalizační úlohy je popsáno např. v [1] pro standard UMTS. Pokud bychom chtěli porovnat výsledky měření EVM získané pomocí software v signálovém analyzátoru nebo externího software, museli bychom znát přesně metodu, jakou byla optimalizace v daném přístroji provedena. Z důvodu firemního tajemství nejsou tyto informace k dispozici. Pro nezávislé posouzení kvality modulovaných průběhů je v rámci projektu „IND16 Ultrafast“ vyvíjen volně šiřitelný software pro analýzu základních digitálně modulovaných signálů a výpočet nejistoty měření. V současnosti je k dispozici verze pro prostředí MATLAB a v budoucnosti se předpokládá spustitelná verze. Více informací a aktuální verzi aplikace lze stáhnout na stránkách projektu [2].

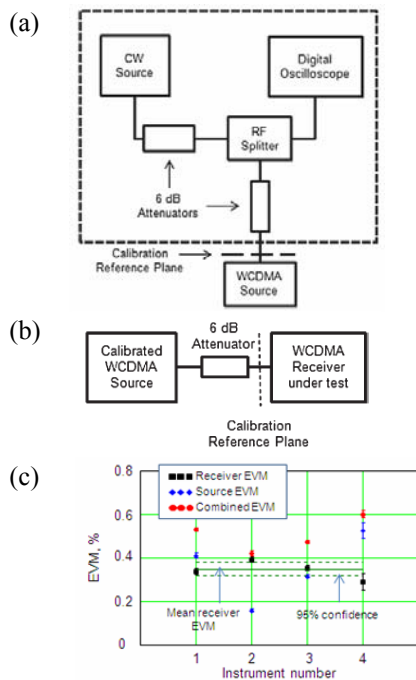
Metrologicky návaznou metodou (návaznost na standardy vyšší přesnosti a na jednotky soustavy SI) je tzv. waveform metrologie, tedy velmi rychlé navzorkování modulovaného průběhu a jeho následné zpracování pomocí validované metody s otevřeným přístupem ke všem výpočetním krokům. Rychlé navzorkování je provedeno pomocí vzorkovacího nebo digitálního osciloskopu s velkou šířkou pásma [3]. Návaznost na standardy vyšší přesnosti je zajištěna pomocí elektro-optického vzorkovacího systému [4].

Použití vzorkovacího osciloskopu

V současnosti jsou k dispozici vzorkovací osciloskopy se šířkami pásma přesahujícími 100 GHz, které umožňují zachytit modulovaný průběh přímo na nosném kmitočtu a poskytují přímou návaznost na základní jednotky SI. Vyznačují se také velkým vertikálním rozlišením (> 12 bitů) a jsou schopné vysoké míry převzorkování signálu. Počet bodů, které lze současně uložit, se pohybuje od několika tisíc do několika stovek tisíc. Bez provedení korekce časové základny osciloskopu se dopouštíme chyby při následných výpočtech (Fourierova transformace předpokládá vzorky odečtené v ekvidistantních intervalech). Např. chyba časové základny při měření WCDMA signálu je v řádu $\pm 0,1$ rad po dobu měření několik hodin. Mezi hlavní nevýhody měření vzorkovacím osciloskopem patří velmi dlouhé časy

odečtu pro nízké symbolové rychlosti a také požadavek periodického vstupního signálu. Pro charakterizaci signálových generátorů v „běžných“ laboratorních podmínkách se tedy vzorkovací osciloskop nehodí, nicméně v principu jde o velmi přesnou metodu.

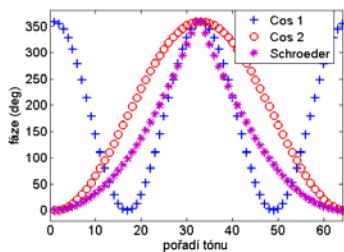
Použití real-time osciloskopu



Obr. 3 Měření vlivu generátoru a analyzátoru na EVM odděleně [5]

Hlavním rozdílem osciloskopu pracujícího v reálném čase (real-time oscilloskop) oproti vzorkovacímu osciloskopu je měření celého průběhu najednou po příchodu spouštěcího signálu a tedy velmi rychlé měření. Paměť pro uložení vzorků je v řádu milionů až desítek milionů vzorků a šířky pásma pro jeden vzorkovač se v dnešní době pohybují kolem 30 GHz². Nevýhodou je nízké vertikální rozlišení (typicky 8 bitů a méně, průměrováním lze zvýšit až na 11 bitů), což vede na poměrně nízký dynamický rozsah měření. Osciloskopy s vertikálním rozlišením 12 bitů a více jsou dnes dostupné jen pro šířky pásma do 4 GHz. Při výpočtu nejistoty měření hraje roli nelineární chování použitého A/D převodníku a chyby časové základny. Jak bylo popsáno výše, při měření parametru EVM je důležité oddělit vliv zdroje signálu a analyzátoru na parametr EVM. Bez detailní znalosti vnitřní architektury přístrojů se jedná o poměrně složitou úlohu. V článku [5] je popsána metoda, pomocí které lze určit příspěvek generátoru a analyzátoru k EVM odděleně. Nejdříve je pomocí digitálního real-time osciloskopu charakterizován generátor (pomocný generátor nemodulovaného signálu slouží ke korekci časové základny osciloskopu) a tento „kalibrovaný generátor“ je potom připojen k analyzátoru, který zkoumáme. Toto je schématicky znázorněno na Obr. 3 (a), (b) a výsledné EVM pro 4 různé analyzátorů signálu je vyneseno v grafu na Obr. 3 (c). Zároveň je vyneseno nejistota měření s intervalem spolehlivosti 95 %.

CHARAKTERIZACE SIGNÁLOVÝCH ANALYZÁTORŮ



Obr. 4 Fázové profily multitone signálů, ukázka pro 64 tónů

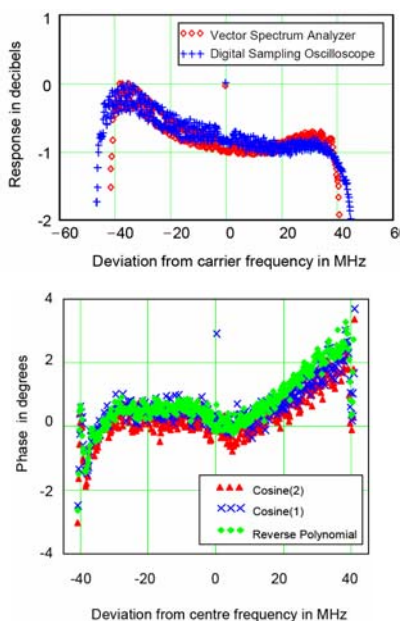
Pro ověření parametrů digitálně modulovaných signálů existují vektorové signálové analyzátorů pracující s nosnými kmitočty až 67 GHz (bez použití externích směšovačů) a šířkami pásma demodulace cca 300 MHz (stav říjen 2013). Vzorkování se děje na mezifrekvenci nebo v základním pásmu pomocí analogově-číslicových (A/D) převodníků s velkým dynamickým rozsahem (typicky 12-14 bitů). Dalšímu nárůstu šířky pásma demodulace v současnosti brání právě vlastnosti těchto převodníků. Ve velmi krátké době se předpokládá komerční nasazení systémů pracujících v oblasti 60 GHz až 90 GHz se šířkami pásma až 1,7 GHz [6]. Stejně jako v případě generátorů i zde existuje množství parametrů, které lze testovat s velkou přesností a návazně na základní jednotky SI (vř výkon, kmitočet, analogová demodulace, fázový šum, ...), problematické je určení komplexní odezvy

kvadraturního demodulátoru. Skalární (výkonovou) odezvu lze určit pomocí etalonových měřičů výkonu, ovšem bez informace o fázové odezvě. Na rozdíl od přístrojů jako je např. vektorový analyzátor obvodů, které obsahují vlastní vř generátor a při měření tak lze určit relativní fázi měřené veličiny, signálové analyzátorů potřebují pro určení fázové odezvy buzení signálem s mnoha kmitočtovými složkami se známými fázovými poměry mezi složkami. Jako nejvhodnější se jeví použití tzv. multitone (také multisine, mnohatónových) signálů, které se v kmitočtové oblasti skládají z velkého počtu složek se známými amplitudami, fázemi a vzájemným kmitočtovým odstupem

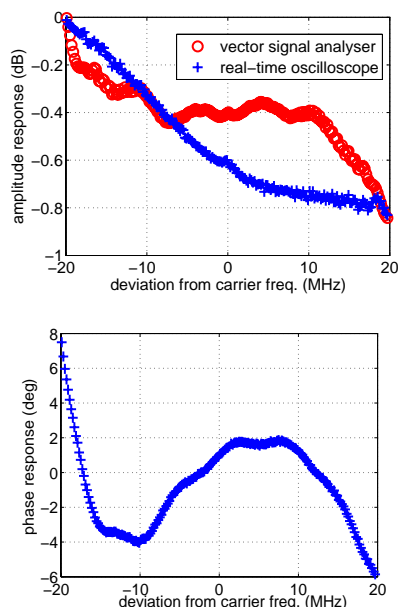
$$s(t) = \sum_{i=0}^{N-1} A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) + j \sum_{i=0}^{N-1} B_i \sin(\omega_i t + \varphi_i), \quad (3)$$

kde A a B jsou obecně konstanty, N je počet tónů a φ_i je fáze i -tého tónu, ω_i je úhlový kmitočet i -tého tónu. Vhodnou volbou parametrů lze docílit mnoha různých profilů fáze a rozložení amplitud v kmitočtové oblasti. Ukázka tří různých profilů fáze pro 64 tónů je na Obr. 4. Takovéto průběhy dokážou vytvořit moderní signálové generátory pomocí arbitrary waveform generátoru a poté jsou namodulovány na nosnou vlnu. Generátor není ideální a tak ani vytvořený mnohatónový signál nemusí být věrnou podobou matematické předlohy. Metrologicky návaznou cestou, jak určit

² Někteří výrobci nabízí i osciloskopy pracující v reálném čase se šířkou pásma 60 GHz nebo 100 GHz, ovšem jde pouze drobný trik spočívající v rozdělení měřeného kmitočtového pásma na několik dílčích a poté nasměšování do pásma 0 až 30 GHz a vzorkování převodníkem 30 GHz.



Obr. 5 Amplitudová (a) a fázová (b) odezva spektrálního analyzátoru se šířkou pásma 80 MHz měřená pomocí vzorkovacího osciloskopu



Obr. 6 Amplitudová (a) a fázová (b) odezva spektrálního analyzátoru se šířkou pásma 40 MHz měřená pomocí real-time osciloskopu

fázovou odezvu signálového analyzátoru, je změření mnohatónového signálu pomocí vzorkovacího nebo real-time osciloskopu a následně pomocí signálového analyzátoru. Měřený signál je v obou případech stejný a lze jej odstranit dekonvolucí a zbyde tak jen odezva analyzátoru. Pro zajištění plochého kmitočtového spektra je nutno učinit kompromis mezi poměrem špičkového a průměrného výkonu (PAPR, peak to average ratio) v časové oblasti a fázovou odezvu v kmitočtové oblasti. Na Obr. 5 je uveden příklad měření amplitudové a fázové odezvy analyzátoru se šířkou pásma demodulace 80 MHz pomocí vzorkovacího osciloskopu a na Obr. 6 podobné měření pro jiný analyzátor se šířkou pásma demodulace 40 MHz pomocí real-time osciloskopu. Z obrázků je patrná určitá amplitudová a fázová odchylka v šířce pásma demodulace, která při návrhu reálných systémů již může hrát roli a bez jejího uvažování nemusí měřené výsledky souhlasit s teoretickým očekáváním.

ZÁVĚR

V příspěvku byl podán současný stav a zároveň nové výzvy při charakterizaci moderní měřicí techniky pro generování a měření vlastností digitálně modulovaných signálů. Byly ukázány obecné metody, které jsou nezávislé na výrobci měřicí techniky vhodné pro šířky pásma, které jsou v současné době používány (cca 300 MHz pro signálové analyzátorů a cca 2 GHz pro generátory). Může se zdát, že pomocí současné měřicí techniky již byly navrženy a vyrobeny miliony mobilních telefonů a jiných komunikačních zařízení a potřeba přesnější charakterizace měřicí techniky se může jevit neopodstatněná. Jedním z argumentů je, že v budoucnu se očekává prudký nárůst šířek pásma a nutnost použití metod popsanych v tomto příspěvku bude aktuální (za zmínku stojí např. úspěšný přenos TV signálu rychlostí 10 GBit/s na kmitočtu 120 GHz při olympijských hrách v Pekingu v roce 2008 nebo plánovaný ambiciózní přenos TV signálu ve formátu 4k na olympijských hrách v Tokiu v roce 2020 na kmitočtu 300 GHz).

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek vznikl v rámci řešení projektu EMRP IND16 „Metrology for ultrafast electronics and high-speed communications“. EMRP je zkratka pro společný koordinovaný evropský metrologický výzkumný program spolufinancovaný z prostředků MŠMT a Evropské unie. Více informací na <http://www.ptb.de/emrp/ultrafast.html>.

LITERATURA

- [1] Jensen, T. L., Larsen, T.: Robust Computation of Error Vector Magnitude for Wireless Standards, *IEEE Trans. on Communications*, ročník 69, č. 2, únor 2013, str. 648-657.
- [2] Internetové stránky projektu Metrology for ultrafast electronics and high-speed communications, [cit. 30. 10. 2013] Dostupné na <http://www.ptb.de/emrp/ultrafast.html>
- [3] Humphreys, D. A., Dickerson, R. T., Yanecek, A.: Making Traceable EVM Measurements with Digital Oscilloscopes, *Agilent Measurement Journal* 04/2008, s. 46-51.
- [4] Seitz, S., Bieler, M., Spitzer, M., Pierz, K., Hein, G., Siegner, U.: Optoelectronic measurement of the transfer function and time response of a 70-GHz sampling oscilloscope, *Measurement Science and Technology*, vol. 16, no. 7, 2005, s. L7-L9.
- [5] Humphreys, D. A., Miall, J: Traceable Measurement of Source and Receiver EVM using a Real-Time Oscilloscope, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, ročník 62, č. 6, červen 2013, str. 1413-1416.
- [6] International Technology Roadmap for Semiconductors, [cit. 30. 10. 2013] Dostupné na <http://www.itrs.net/>