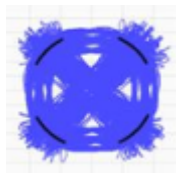


## Parameter magnitúdy chybového vektora v štandarde IEEE 802.11n

Virág Ladislav · Informačné technológie

05.01.2015



Článok pojednáva o vykonaných meraniach, ktoré sledovali závislosť magnitúdy chybového vektora (EVM) od vysielacieho výkonu pre rôzne modulačné a kódovacie schémy štandardu IEEE 802.11n. Na demonštrovanie správania sa modulácií s rôznym počtom stavov boli pre prezentáciu vybrané indexové čísla 9 (QPSK) a 11 (16-QAM)

spomínaných modulačných schém. Meranie prebiehalo na modulárnom systéme od spoločnosti NI na báze PXIe.

### Úvod

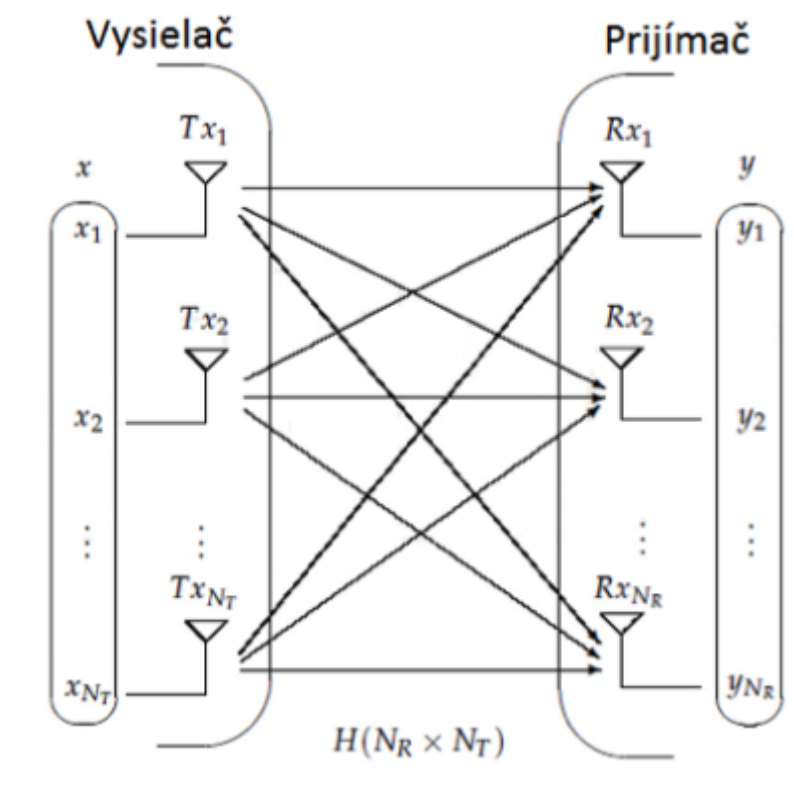
V dnešnej dobe je problematika hodnotenia prenosu vždy aktuálnou témou, nakoľko zámerom každej novej technológie prenosových systémov je priniesť zlepšenie vlastností predchádzajúcej generácie a docieľiť tak pokrok v danej oblasti výskumu. Technológia MIMO (Multiple Input Multiple Output) je populárnou a efektívnou metódou zlepšovania vlastností prenosových systémov, o čom svedčí aj jej celoplošné zavádzanie do najnovších nastupujúcich štandardov [1]. Výhodné vlastnosti MIMO systémov viedli k ich začleneniu do mnohých v súčasnej dobe používaných štandardov pre bezdrôtovú komunikáciu.

ITU (International Telecommunication Union) používa MIMO vo vysoko rýchlostnom paketovom prístupe HSPDA (High Speed Downlink Packet Access), časti UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) štandardu. MIMO je tiež súčasťou štandardov 802.11n a 802.11ac, ktoré sú používané bezdrôtovými smerovačmi a taktiež 802.16 pre mobilný WiMax, ktorý je využívaný mobilnými sieťami [3]. Ďalším, v súčasnej dobe nastupujúcim štandardom predstavujúcim štvrtú generáciu mobilných telekomunikačných sietí je LTE (Long Term Evolution), ktorý takisto inkorporuje MIMO.

### Prenosový systém s viacerými vstupmi a viacerými výstupmi

Model prenosového systému s viacerými vstupmi a výstupmi (MIMO systém) je zobrazený na obr.1. Takýto typ komunikačného systému sa vyznačuje  $N_T$  vysielacími a  $N_R$  prijímacími anténami [2]. Antény  $T_{x1}, \dots, T_{xNT}$  vysielajú signály  $x_1, \dots, x_{NT}$  na prijímacie antény  $R_{x1}, \dots, R_{xNR}$ . Každá prijímacia anténa kombinuje prijaté signály, ktoré sa koherentne sčítavajú. Prijaté signály na anténach  $R_{x1}, \dots, R_{xNR}$  sú označené  $y_1, \dots, y_{NR}$ . Matematický popis prijatého signálu môžeme vyjadriť nasledovne

$$y_q = \sum_{p=1}^{N_T} h_{qp} \cdot x_p + b_q; \quad q = 1, \dots, N_R \quad (1)$$



Obr.1 Model MIMO systému.

MIMO kanál s plochými únikmi je opísaný vstupno-výstupným vzťahom [4]

$$\bar{y} = \mathbf{H} \cdot \bar{x} + \bar{b} \quad (2)$$

kde  $\mathbf{H}$  je  $(N_R \times N_T)$  komplexná matica kanála

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \dots & h_{1,N_T} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \dots & h_{2,N_T} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{N_R,1} & h_{N_R,2} & \dots & h_{N_R,N_T} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$h_{qp}$ ;  $p=1, \dots, N_T$ ;  $q=1, \dots, N_R$  je komplexný kanálový zisk, ktorý charakterizuje danú prenosovú cestu medzi vysielacou anténou  $T_{x_p}$  a prijímacou anténou  $R_{x_q}$ .  $\bar{x}=[x_1, \dots, x_{N_T}]^T$  je  $(N_T \times 1)$  komplexný vektor vyslaného signálu,  $\bar{y}=[y_1, \dots, y_{N_R}]^T$  je  $(N_R \times 1)$  komplexný vektor prijatého signálu,  $\bar{b}=[b_1, \dots, b_{N_R}]^T$  je  $(N_T \times 1)$  komplexný vektor aditívneho šumového signálu. Technológia MIMO sa ukázala ako vhodný nástroj pre zvýšenie kapacity komunikačnej linky bez potreby zvyšovania vysielacieho výkonu.

### Štandard IEEE 802.11n

V krátkosti si priblížime základné charakteristiky štandardu IEEE 802.11n. Hlavným zámerom tohto štandardu bolo priniesť zvýšenie teoretickej prenosovej rýchlosti oproti svojim predchodcom [5]. Vďaka úprave fyzickej vrstvy, podpore prenosového kanála o šírke 40 MHz a využitiu technológie MIMO je pri konfigurácii 4x4 antén možné dosiahnuť teoretické rýchlosti až 600 Mbps. Kľúčovým prvkom je použitie MIMO

technológie s podporou až štyroch priestorových signálových tokov. Zároveň je k dispozícii možnosť využitia 40 MHz šírky kanála namiesto 20 MHz. Ďalšie vylepšenia na fyzickej vrstve zahŕňajú zvýšenie počtu OFDM subnosných - zo 48 na 52 pri použití 20 MHz šírky kanála, pridanie možnosti skráteného ochranného intervalu a variantu kódovacej rýchlosti 5/6 oproti maximálne 3/4 pri predchádzajúcich štandardoch. Priamym prínosom týchto vylepšení je zvýšenie prenosovej rýchlosti z 54 Mbps pri 802.11a/g na 600 Mbps.

### Modulačné a kódovacie schémy štandardu IEEE 802.11n

Keďže v štandarde 802.11n je použitých viacero režimov kombinácií počtu priestorových signálových tokov, typov modulácií a kódovacích rýchlostí, bola zavedená takzvaná modulačná a kódovacia schéma (MCS - Modulation and Coding Scheme), ktorá jediným indexovým číslom určuje danú konfiguráciu prenosu [5]. V experimente sme skúmali niektoré konkrétne konfigurácie týchto modulačných schém.

Tab. 1 Modulačná a kódovacia schéma 802.11n [5]

MCS index	Počet priestorových tokov	Typ modulácie	Kódovacia rýchlosť	Prenosová rýchlosť (Mbit/s)			
				20 MHz kanál		40 MHz kanál	
				800 ns GI	400 ns GI	800 ns GI	400 ns GI
0	1	BPSK	1/2	6.5	7.2	13.5	15
1	1	QPSK	1/2	13	14.4	27	30
2	1	QPSK	3/4	19.5	21.7	40.5	45
3	1	16-QAM	1/2	26	28.9	54	60
4	1	16-QAM	3/4	39	43.3	81	90
5	1	64-QAM	2/3	52	57.8	108	120
6	1	64-QAM	3/4	58.5	65	121.5	135
7	1	64-QAM	5/6	65	72.2	135	150
8	2	BPSK	1/2	13	14.4	27	30
9	2	QPSK	1/2	26	28.9	54	60
10	2	QPSK	3/4	39	43.3	81	90
11	2	16-QAM	1/2	52	57.8	108	120
12	2	16-QAM	3/4	78	86.7	162	180
13	2	64-QAM	2/3	104	115.6	216	240
14	2	64-QAM	3/4	117	130	243	270
15	2	64-QAM	5/6	130	144.4	270	300
16	3	BPSK	1/2	19.5	21.7	40.5	45
17	3	QPSK	1/2	39	43.3	81	90
18	3	QPSK	3/4	58.5	65	121.5	135
19	3	16-QAM	1/2	78	86.7	162	180
20	3	16-QAM	3/4	117	130	243	270

21	3	64-QAM	2/3	156	173.3	324	360
22	3	64-QAM	3/4	175.5	195	364.5	405
23	3	64-QAM	5/6	195	216.7	405	450
24	4	BPSK	1/2	26	28.8	54	60
25	4	QPSK	1/2	52	57.6	108	120
26	4	QPSK	3/4	78	86.8	162	180
27	4	16-QAM	1/2	104	115.6	216	240
28	4	16-QAM	3/4	156	173.2	324	360
29	4	64-QAM	2/3	208	231.2	432	480
30	4	64-QAM	3/4	234	260	486	540
31	4	64-QAM	5/6	260	288.8	540	600
32	1	BPSK	1/2	N/A	N/A	6.5	7.2

Vysvetlenie jednotlivých hodnôt v Tab. 1 :

*MCS Index* - unikátne číslo pridelené konkrétnej kombinácii použitých priestorových signálových tokov, typu modulácie a kódovacej rýchlosti.

*Počet priestorových tokov* - použitím MIMO technológie je možné využívať na prenos až 4 priestorové signálové toky. V princípe to znamená využívanie rovnakého frekvenčného pásma pre vysielanie a prijímanie niekoľkých dátových tokov naraz. V nasledujúcom štandarde - 802.11ac sa ráta s použitím až 8 signálových priestorových tokov.

*Typ modulácie* - určuje typ modulácie použitej pri prenose. Čím je modulácia komplexnejšia, tým je možné dosiahnuť vyššie prenosové rýchlosti. Zároveň sú však potrebné vyhovujúcejšie podmienky prenosu, ako je nízka interferencia a dostatočná priama viditeľnosť medzi vysielateľom a prijímateľom, nakoľko so zvyšujúcou zložitosťou modulácie sa zvyšuje aj náchylnosť na chyby pri prenose.

*Kódovacia rýchlosť* - indikuje, aká časť dátového toku je používaná na prenos informačných dát. Je vyjadrená ako podiel, pričom najefektívnejšiu kódovaciu rýchlosť predstavuje 5/6, kde 83,35% dátového toku tvoria informačné dáta.

*GI (Guard Interval)* - ochranný časový interval, ktorý je vkladajú medzi vysielané pakety pre zvýšenie spoľahlivosti komunikácie.

*Frekvenčná šírka kanála* - v 802.11n sú štandardnými frekvenčnými šírkami kanála 20 MHz a 40 MHz. Je možné použiť aj iné hodnoty, kde sa pri výpočtoch prenosovej rýchlosti vychádza zo základných hodnôt v tabuľke, napríklad pri 10 MHz šírke kanála dosiahneme polovičnú prenosovú rýchlosť ako pri 20 MHz.

### **Magnitúda chybového vektora (EVM)**

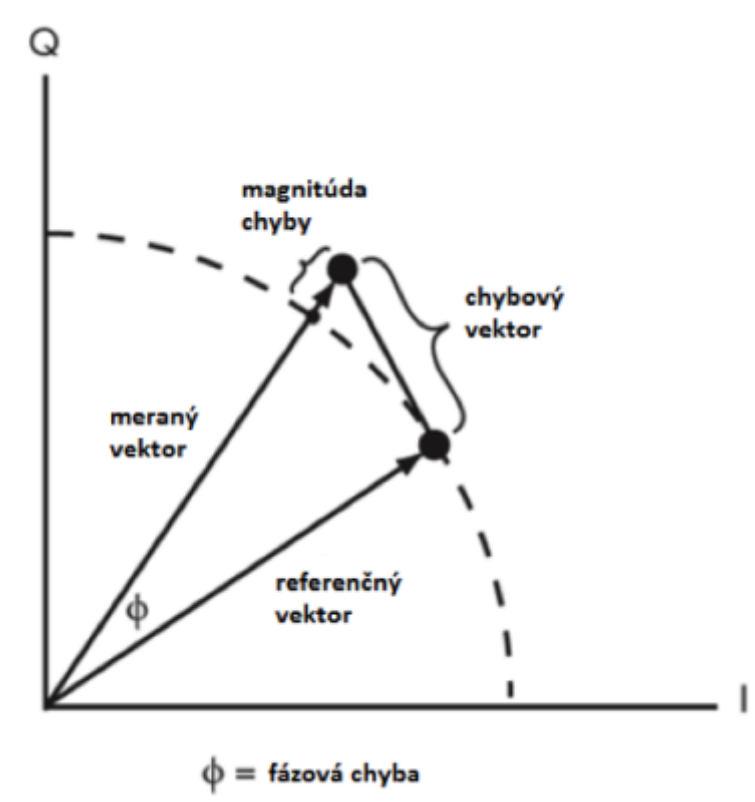
Magnitúda chybového vektora (EVM - Error Vector Magnitude) je kritériom merania a hodnotenia presnosti modulácie. Zahŕňa v sebe všetky potenciálne fázové a amplitúdové rušivé vplyvy, rovnako ako príspevok šumu [6]. Vyjadruje veľkosť

chybového vektora, posúvajúceho skutočné konštelačné body z ich ideálnej (správnej) polohy.

$$EVM_{db} = 10 \log \frac{P_{error}}{P_{reference}}$$

$$EVM_{dB} = 20 \log \frac{RMS \text{ magnitudy}}{RMS \text{ magnitudy najvzdialenejšieho bodu}} \quad (4)$$

Ide teda o podiel priemerného výkonu chybového vektora a priemerného výkonu referenčného vektora, ktorý je vyjadrený v decibeloch. Grafické znázornenie vidíme na obr. 2. V experimente bola EVM jedným z hlavných hodnotiacich kritérií prenosu, ktoré sme sledovali pri testovaní štandardu 802.11n pomocou MIMO systému 2×2.



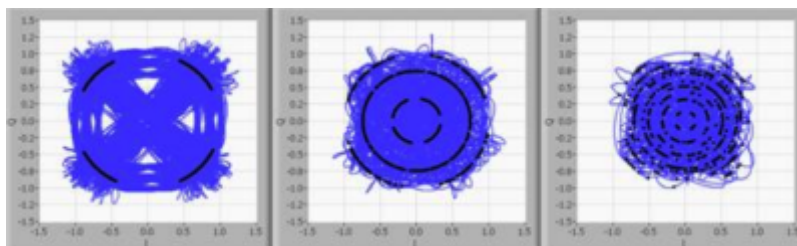
Obr. 2 Magnitúda chybového vektora (EVM).

Čo sa týka hodnotenia prenosu signálu, je dôležité mať na pamäti, že pri modulácii je fáza, amplitúda a frekvencia preložená do amplitúdy vektora I a Q. Z toho vyplýva, že chyby v základnom pásme sa prenášajú do RF signálu. Rozoznávanie vyslaných symbolov teda závisí od niekoľkých charakteristík IQ symbolov. Medzi ne patrí presnosť amplitúdy, fázy a frekvencie každého signálu v základnom pásme. Pre jednoduché modulačné schémy ako 4-QAM a BPSK sú tolerovateľné aj relatívne nepresné signály v základnom pásme, ale modulačné schémy vyšších rádov, ako napríklad 64-QAM a 256-QAM si vyžadujú čo najvyššiu presnosť v základnom pásme. Pri týchto modulačných schémach aj malé chyby ofsetu jednosmernej zložky, fázového šumu, kvadratúrneho zošikmenia, alebo nerovnováha IQ zisku môžu spôsobiť problémy pri rozlišovaní symbolov.

### Odchýlka nosnej frekvencie

Ide o rozdiel nosnej frekvencie na vysielači a prijímači. Táto odchýlka je spôsobená Dopplerovým javom a prejavuje sa ako fázový šum. Zmeny frekvencie je možné vnímať

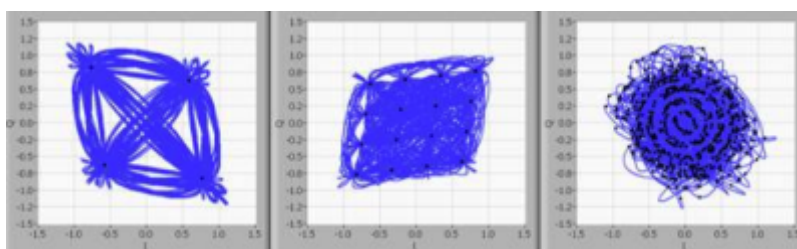
ako zmeny fázy. Prejavujú sa ako rozmazanie konštelačného diagramu pri zachovaní bodov od počiatku. Fázový šum vytvorí okamžitú chybu frekvencie signálu v základnom pásme. Na príkladoch v obr. 3 sú ilustrované konštelačné diagramy, kde je pozorovaný fázový šum -50 dBc pri ofsete 1 kHz [6].



Obr. 3 Fázový šum v 4-QAM, 16-QAM a 64-QAM [6]

### Kvadrátúrne zošikmenie

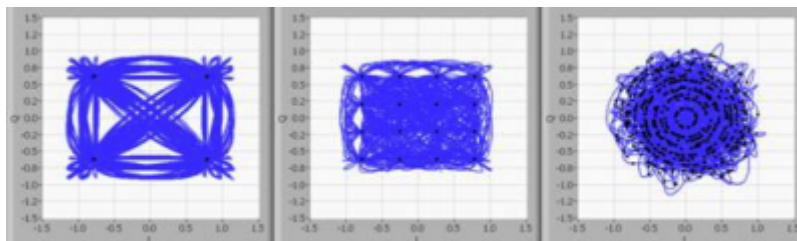
Zdrojom tejto chyby je zvyčajne splitter lokálneho oscilátora, ktorý rozdeľuje lokálny oscilátor na signály kvadrátúrnych zložiek I a Q. Za ideálnych podmienok by sa tieto zložky mali líšiť vo fáze o 90 stupňov. Na modulácie nižších rádov nemá kvadrátúrne zošikmenie výrazný vplyv, no modulačné schémy vyšších rádov, ako 64-QAM, sú ním značne postihnuté. Na obr. 4 vidíme ilustráciu kvadrátúrneho zošikmenia o 16%.



Obr.4 Kvadrátúrne zošikmenie v 4-QAM, 16-QAM a 64-QAM [6]

### Nerovnováha IQ zisku

Najčastejšou príčinou nerovnováhy IQ zisku je amplitúdová chyba na digitálno-analógovom prevodníku kvôli nevyváženosti medzi jednotlivými analógovými zmiešavačmi. V modulačných schémach vyšších rádov môže nerovnováha IQ zisku aj o zopár dB spôsobiť nesprávne demodulovanie signálu (obr.5).



Obr.5 Nerovnováha IQ zisku v 4-QAM, 16-QAM a 64-QAM [6]

### Experiment s použitím systému na báze PXIe

Experiment bol vykonávaný na modulárnom systéme na platforme NI PXIe 1075. Systém sa skladá z dvoch základných modulov: NI PXIe-5663E je RF vektorový signálový analyzátor modulárneho charakteru s frekvenčným rozsahom od 10 MHz do 6,6 GHz. V našej konfigurácii je prispôbený na analyzovanie dvoch kanálov súčasne.

NI PXIe-5673E je vektorový signálový generátor taktiež modulárneho charakteru, jeho frekvenčný rozsah je len o niečo menší - od 85 MHz do 6,6 GHz. Týmto systémom sa dajú generovať dva samostatné kanály. Podpora systému PXIe je plne implementovaná v programovom a vývojovom prostredí LabVIEW, ktoré poskytuje pri práci s týmto systémom pomerne vysoký užívateľský komfort [7]. Z hardvérového vybavenia boli použité okrem samotného NI PXIe 1075 aj antény Geozondas Antenna AU-1.0G4.5GR. Základné vlastnosti týchto antén zobrazuje tab. 2.

Tab.2 Technická špecifikácia antény Geozondas AU-1.0G4.5GR [8]

Parameter	Hodnota
frekvenčný rozsah	1 - 4,5 GHz
zisk pri 1 GHz	- 1,6 dBi
zisk pri 4 GHz	+ 11 dBi
zisk pri 4,5 GHz	+ 9 dBi
pomer stojatých vln (VSWR)	2,5
šírka lúča roviny H pri -3dB	105° - 35°
šírka lúča roviny E pri -3dB	70° - 35°
polarizácia	lineárna vertikálna
rozmery	113x123x57 mm
hmotnosť	0,5 kg

Experiment bol zameraný na meranie prenosových vlastností protokolu 802.11n pomocou 2x2 MIMO systému. Pre tento účel je súčasťou systému NI PXIe 1075 programové vybavenie s názvom Generation and Analysis Interactive Example for WLAN. Poskytuje viacero protokolov WLAN pre testovanie, pričom úlohu sme zamerali na EVM pre protokol 802.11n. V rámci nastavení generátora bolo potrebné vybrať číslo karty prístroja, ktorá má generovať signál, ďalej úroveň výkonu a referenčné hodiny, ktoré má daná karta použiť. Ďalšie nastavenia kanála sa nachádzajú v kategórii General Settings. Najdôležitejším atribútom v tejto kategórii je index modulačnej a kódovacej schémy, ktorý určuje použitý typ modulácie, počet priestorových tokov a kódovaciu rýchlosť (viď tab. 1).

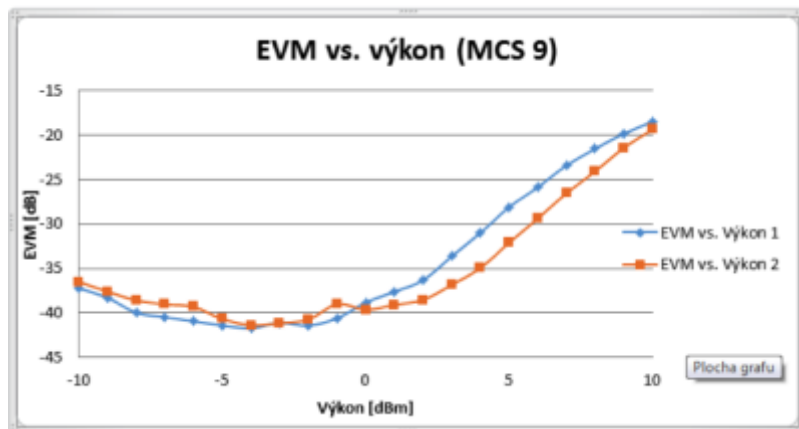
## Výsledky merania

Sledovali sme vplyv použitého vysielacieho výkonu na parameter EVM pre rôzne indexové čísla modulačnej a kódovacej schémy pri zachovaní rovnakých podmienok okolia počas celého merania. Aby sme demonštrovali správanie modulácií s rôznym počtom stavov, zvolili sme indexové čísla 9 (QPSK) a 11 (16-QAM). Počiatočnú hodnotu vysielacieho výkonu pre každú z antén sme nastavili na -10 dBm. Túto úroveň sme zvyšovali s krokom 2 dBm, až kým systém neohlásil chybu dosiahnutia hraničnej hodnoty výkonu, maximálne však do úrovne 10 dBm. Počas celej doby merania neboli použité žiadne skreslenia, prídavné šumy, či iné rušivé prvky. V tab. 3 vidíme namerané hodnoty pre modulačnú a kódovaciu schému (MSC) s indexovým číslom 9. Okrem hodnoty EVM pre jednotlivé kanály zaznamenali aj ďalšie parametre, a to odchýlku nosnej frekvencie, nerovnováhu IQ zisku a kvadrátne zošikmenie (opísané vyššie).

Tab. 3 MCS 9

výkon [dBm]	EVM1 [dB]	EVM2 [dB]	odchýl. nosnej frekv. [Hz]	nerovnováha IQ zisku [dB]1	nerovnováha IQ zisku [dB]2	kvadrátúrne zošikmenie [°]1	kvadrátúrne zošikmenie [°]2
-10	-37.22	-36.5	-879.54	0.23	0.34	-0.6	-1.18
-8	-39.96	-38.6	-713.12	-0.34	-0.11	1.95	0.6
-6	-40.95	-39.3	-517.8	0.3	0.23	-2.71	0.56
-4	-41.72	-41.4	-513.75	0.47	-0.05	1.1	-2.23
-2	-41.42	-40.7	-503.95	-0.37	-0.02	-0.31	-0.08
0	-38.82	-39.6	-901.56	-0.11	-0.13	-1.67	-0.39
2	-36.31	-38.5	-712.78	0.31	0.19	-0.93	-1.67
4	-30.99	-34.9	-867.07	-0.52	0.07	-0.95	2.03
6	-25.87	-29.4	-662.03	0.17	-0.21	3.75	-0.88
8	-21.56	-24.1	-646.9	0.4	-0.18	3.21	-1.37
10	-18.52	-19.4	-642.66	0.28	-0.2	3.83	-1.05

Graf na obr. 6 znázorňuje nameranú závislosť magnitúdy chybového vektora od použitého vysielacieho výkonu pre MCS 9. Modrou farbou je znázornený prvý kanál, oranžovou druhý. Vidíme, že závislosť magnitúdy chybového vektora od vysielacieho výkonu nie je lineárna, ale má premenlivý charakter.



Obr.6 EVM vs. výkon pre MCS 9

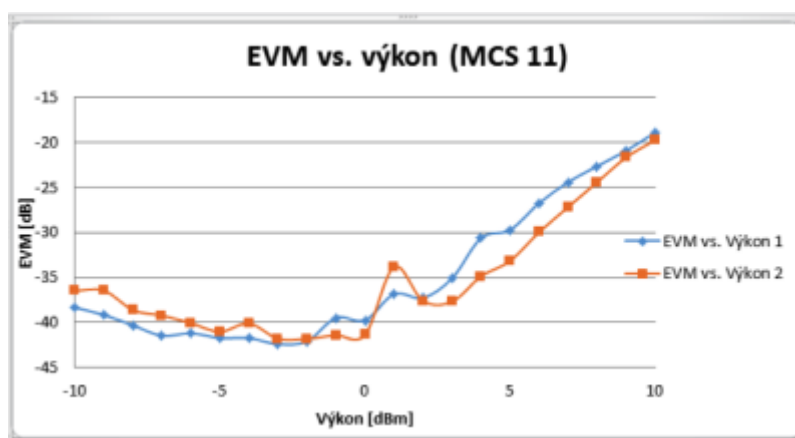
Namerané hodnoty pre modulačnú kódovaciu schému s indexovým číslom 11 sú v tab. 4. Graf na obr. 7 vykazuje podobnú charakteristiku EVM vs. výkon ako pri MCS 9, tiež nesie výrazné známky nelinearity.

Tab.4 MCS 11

výkon [dBm]	EVM1 [dB]	EVM2 [dB]	odchýl. nosnej frekv. [Hz]	nerovnováha IQ zisku [dB]1	nerovnováha IQ zisku [dB]2	kvadrátúrne zošikmenie [°]1	kvadrátúrne zošikmenie [°]2
-10	-38.33	-36.5	-724.13	-0.03	-0.24	3.52	-0.54

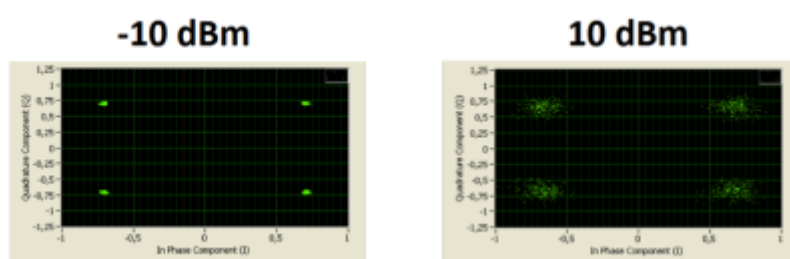


-8	-40.31	-38.6	802.96	-0.06	-0.19	-1.34	-0.54
-6	-41.18	-40.1	-849.2	-0.22	-0.09	-1.25	-0.44
-4	-41.71	-40.1	-865.79	-0.02	-0.18	-1.01	-0.38
-2	-42.06	-41.8	-887.05	-0.01	0.21	-3.76	0.82
0	-39.74	-41.4	-886.8	0.34	0.14	-0.67	-2.33
2	-37.25	-37.6	-885.19	-0.51	0.05	-1.02	2.29
4	-30.62	-34.9	-874.1	-0.16	-0.11	-1.26	-0.3
6	-26.76	-30	-901.66	0.3	0.21	-3.03	0.44
8	-22.66	-24.5	-933.7	0.34	0.25	-2.99	0.46
10	-18.92	-19.8	-994.69	-0.43	0.2	-2.1	1.7

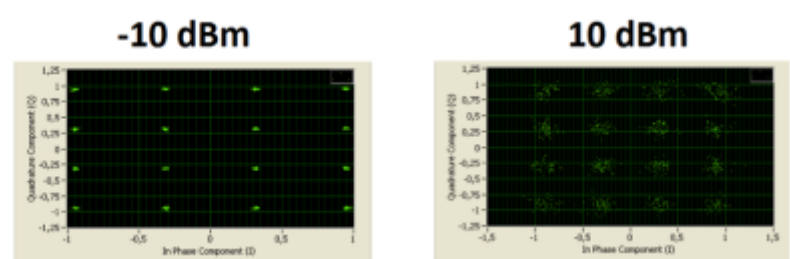


Obr.7 EVM vs. výkon pre MCS 11

Zaujímavosťou je výkyv magnitúdy chybového vektora môžeme pozorovať v druhom kanáli a pre každú z MCS pri inej hodnote vysielacieho výkonu. Menej výrazný výkyv nastáva v MCS 9 pri výkone blížiacom sa k 0 dBm a výraznejší pri MCS 11 pri výkone v oblasti za 0 dBm (napr. pri MCS 15 bol tento výkyv pri hodnotách 3 až 5 dBm). V zásade je možné zhodnotiť, že jednotlivé závislosti sú si veľmi podobné, nebadateľné výrazné zhoršenie prenosu z hľadiska magnitúdy chybového vektora pri použití viacstavových modulácií. Pre lepšiu predstavu sú konštelčné diagramy prijímaných signálov na obr. 8 a obr.9.



Obr.8 Konštelčné diagramy pre MCS 9 pri -10 dBm a 10 dBm



## Obr.9 Konštelačné diagramy pre MCS 11 pri -10 dBm a 10 dBm

### Záver

Pomocou modulárneho systému na báze PXIe sme sledovali závislosti magnitúdy chybového vektora od vysielacieho výkonu v štandarde 802.11n. Protokol 802.11n sme testovali v dvoch rôznych konfiguráciách, použili sme varianty modulačnej a kódovacej schémy s QPSK a 16-QAM moduláciami. Z meraní sa ukázalo, že v laboratórnych podmienkach bez rušivých vplyvov nebol výrazný rozdiel vo vlastnostiach systému pre jednotlivé modulačné a kódovacie schémy protokolu 802.11n. Napriek tomu možno konštatovať, že závislosť magnitúdy chybového vektora od vysielacieho výkonu nie je lineárna. Zároveň z nameraných hodnôt vidno, že väčší vysielací výkon nemusí nevyhnutne spôsobiť menšiu hodnotu EVM. Pri veľkých výkonoch sme pozorovali zvýšenie tejto hodnoty.

Celkovo sa dá zhodnotiť, že merania závislosti EVM od vysielacieho výkonu môžu slúžiť na nájdenie optimálnej úrovne použitého výkonu pre konkrétny systém za daných podmienok prostredia. Mohlo by byť zaujímavé sledovať aj iné závislosti pri rôznych scenároch, ako je napríklad kvalita prenosu na väčšie vzdialenosti alebo komunikácia bez priamej viditeľnosti cez prekážky.

### Podakovanie



Tento príspevok vznikol vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj, pre projekt: Univerzitný vedecký park TECHNICAL COM pre inovačné aplikácie s podporou znalostných technológií, kód ITMS: 26220220182, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja. Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku / Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ.

### Literatúra

1. Ben Zid, M., Raouf, K. and Bouallègue, A.: MIMO Systems and Cooperative Networks Performances, in: Advanced Cognitive Radio Network, Scientific Research Publishing, 2012. ISBN: 193-506-874-1.
2. Raouf, K. and Zhou, H.: Advanced MIMO systems, Scientific Research Publishing, 2009. ISBN: 978-1-935068-02-0.
3. Almers, P., Bonek, E., Burr, A., Zcink, N., Debbah, M.: Survey of channel and radio propagation models for wireless MIMO systems, in: EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking Vol. 2007 (No. 1), pp.1-19, 2007.
4. Langton, Ch. - Sklar, B.: Finding MIMO [online]. 2011 [cit. 2011-4-10]. Dostupné na internete:  
<http://complextoreal.com/wp-content/uploads/2013/01/mimo.pdf>
5. IEEE 802.11n-2009: Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and

---

Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput, ISBN: 978-0-7381-6046-7.

6. National Instruments: Sources of Error in IQ Based RF Signal Generation. Dostupné na internete:  
<http://www.ni.com/white-paper/5657/en/>
7. National Instruments: Getting Started Guide - NI 6,6 GHz MIMO Platform. Dostupné na internete:  
<http://www.ni.com/pdf/manuals/373158c.pdf>
8. Geozondas: Technical Specifications of AU-1.0G4.5GR, 2009. Dostupné na internete:  
[http://www.geozondas.com/description1.php?pusl2=1&table=antennas\\_table\\_transposed&id=5](http://www.geozondas.com/description1.php?pusl2=1&table=antennas_table_transposed&id=5)

---

Spoluautormi článku sú Gladišová Iveta a Gamec Ján, Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita Košice

---