VPLYV ZDROJOV VYŽAROVANIA NA PREVÁDZKU BEZDRÔTOVÝCH SIETÍ

Zdeněk MATOUŠEK[1], Ján OCHODNICKÝ[2], František NEBUS[3], Mikuláš ŠOSTRONEK[4]

Abstrakt: Prenos informácií prostredníctvom bezdrôtových sietí je v posledných rokoch charakteristický využívaním signálov s digitálnou moduláciou. S narastajúcim počtom týchto systémov sa však v súčasnej dobe stáva stále väčším problémom zabezpečenie ich vzájomnej elektromagnetickej kompatibility s ďalšími prevádzkovanými systémami, t.j. prevádzky bez vzájomného rušenia. V článku sú popísané niektoré aktuálne problémy pri zabezpečení činnosti bezdrôtových sietí, ktoré sa využívajú na prenos informácií vo frekvenčnom pásme S (v zmysle IEEE štandardu č. 521/1984 frekvencie nosnej 2 ÷ 4 GHz).

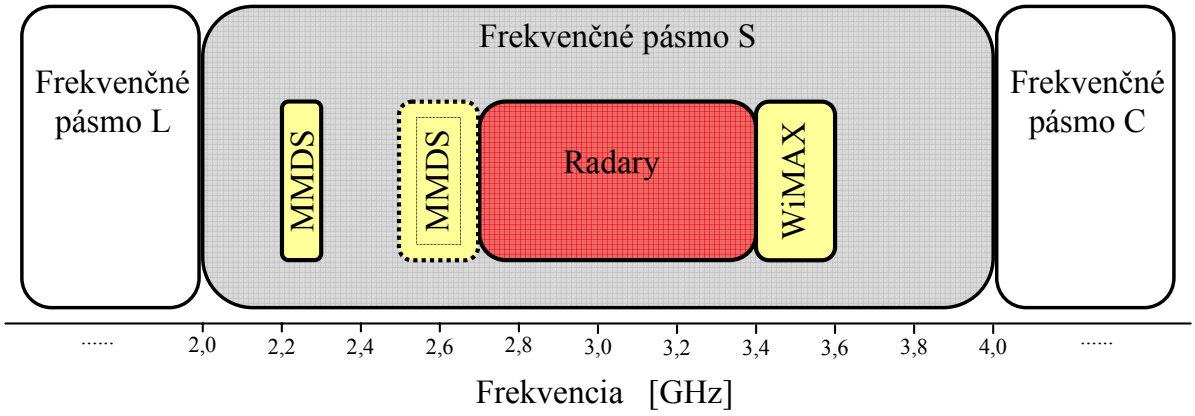
ÚVOD

Elektromagnetická kompatibilita (EMC – Electromagnetic Compatibility) je definovaná ako schopnosť systému alebo zariadenia pracovať vyhovujúcim spôsobom vo svojom vysokofrekvenčnom (VF) prostredí bez vytvárania neprípustného rušenia, ktoré by mohlo degradovať činnosť iných systémov alebo zariadení [1]. Z pohľadu EMC je možné posudzovať činnosť jednotlivých systémov v nasledujúcich dvoch oblastiach:

- oblasť elektromagnetickej interferencie (EMI – Electromagnetic Interference),
- oblasť elektromagnetickej susceptibility (EMS – Electromagnetic Susceptibility).

Oblasť elektromagnetickej interferencie sa pri tom zaoberá predovšetkým identifikáciou zdrojov rušenia, popisom a meraním rušivých signálov a identifikáciou prenosových trás týchto signálov. Naopak oblasť elektromagnetickej susceptibility sa zaoberá najmä technickými opatreniami, ktoré zvyšujú odolnosť systémov proti vplyvom rušenia [1].

Prvoradým predpokladom správnej vzájomnej činnosti jednotlivých systémov je z hľadiska EMC pridelenie rôznych frekvencií pre tieto systémy (tzv. frekvenčný manažment). Úlohu prideľovania pracovných frekvencií plní v rámci našej republiky Telekomunikačný úrad SR. Príklad pridelenia frekvencií vo frekvenčnom pásme S pre systémy MMDS, radary a WiMAX je uvedený na obr. 1.



Obr. 1 Príklad pridelenia frekvencií vo frekvenčnom pásme S pre systémy MMDS, radary a WiMAX

[1] **doc. Ing. Zdeněk MATOUŠEK, PhD.,** tel: 0960 423 885, e_mail: Zdenek.Matousek@aos.sk
[2] **doc. Ing. Ján OCHODNICKÝ, PhD.,** tel: 0960 423 880, e_mail: Jan.Ochodnicky@aos.sk
[3] **doc. RNDr. František NEBUS, PhD.,** tel: 0960 423 884, e_mail: Frantisek.Nebus@aos.sk
[4] **Ing. Mikuláš ŠOSTRONEK, PhD.,** tel: 0960 423 244, e_mail: Mikulas.Sostronek@aos.sk
Katedra elektroniky, AOS gen. M. R. Štefánika v Liptovskom Mikuláši, Demänová 393, 031 06 Liptovský Mikuláš

Ani pridelenie rôznych frekvencií v rámci daného frekvenčného pásma však pri činnosti jednotlivých systémov nemusí postačovať na zabezpečenie správnej vzájomnej činnosti týchto systémov. Do úvahy je nutné brať aj ďalšie skutočnosti, medzi ktoré je možné napríklad zaradiť:

- výkonové pomery pri činnosti jednotlivých systémov,
- spôsob modulácie a z nej vyplývajúce spektrum signálov,
- vzájomnú polohu (vzdialenosti) jednotlivých systémov,
- spôsob spracovania prenášaných informácií,
- parametre anténových systémov atď.

V ďalšej časti tohto článku bude pozornosť venovaná práve niektorým z vyššie uvedených skutočností, pričom za zdroje rušiacich signálov budú z hľadiska EMI považované aktívne monoimpulzové radary. Systémy MMDS a WiMAX budú z hľadiska EMS považované za prijímacie zariadenia, na ktoré tieto rušiace signály pôsobia. Medzi týmito systémami sa predpokladá priama rádiová viditeľnosť, vzájomné nasmerovanie maxím smerových charakteristík antén a rovnaká polarizácia elektromagnetických vĺn [2]. Takýto komplex uvedených zariadení bude v ďalšej časti článku považovaný za bezdrôtovú rádiovú sieť, ktorá pracuje v podmienkach aktívneho rušenia.

KONFIGURÁCIA BEZDRÔTOVEJ RÁDIOVEJ SIETE V PODMIENKACH AKTÍVNEHO RUŠENIA

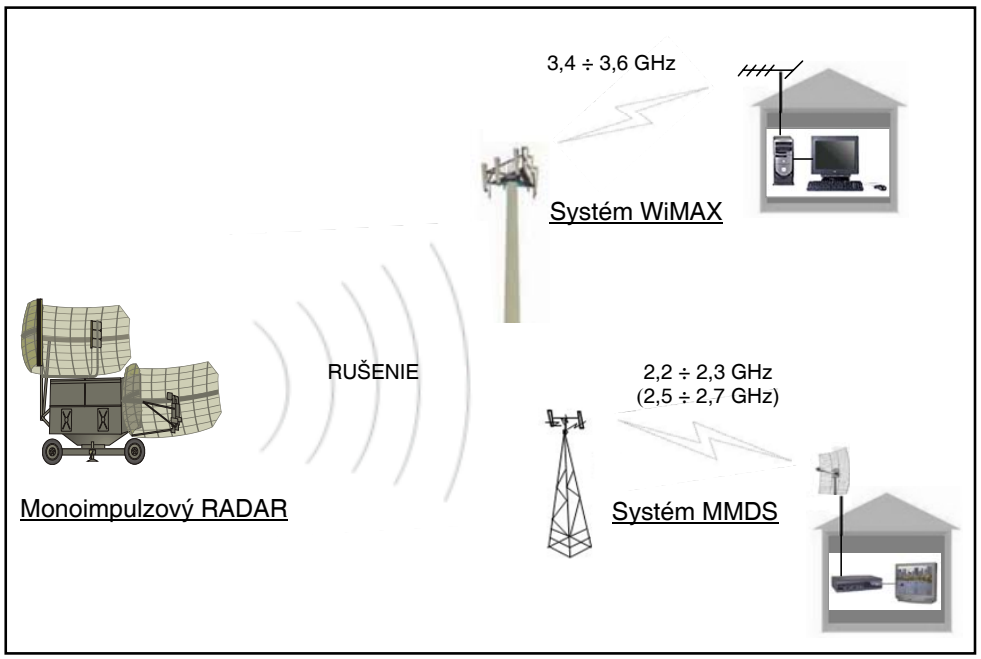
Ako už bolo povedané vyššie, ďalej analyzovanú bezdrôtovú rádiovú sieť pracujúcu v podmienkach aktívneho rušenia tvoria:

- systém MMDS (angl. Multichannel Multipoint Distribution Service),
- systém WiMAX (angl. Worldwide Interoperability for Microwave Access),
- aktívne monoimpulzové radary.

Systém MMDS je viackanálový a viacbodový systém slúžiaci na distribúciu televízneho signálu. Na digitálny prenos signálov využíva kvadratúrnu amplitúdovú moduláciu (64-QAM). Je používaný na území Slovenska a okolitých štátov, pričom pôvodne boli pre tento systém stanovené Telekomunikačným úradom SR pracovné frekvencie v rozsahu 2,5÷2,7 GHz. Tieto frekvencie by však od 1. 1. 2012 mali byť prevedené do frekvenčného pásma 2,2÷2,3 GHz. U týchto systémov je možné rátať so ziskom antény v smere maxima hlavného laloku smerovej charakteristiky $G_P \approx 20$ dB a citlivosťou prijímača $P_{P\min} \approx -90\,\text{dB}$.

Systém WiMAX je celosvetový interoperabilný mikrovlnový systém využívaný k širokopásmovému prístupu na internet. Je určený k prenosu dát na väčšie vzdialenosti (vo voľnom priestore až do 20 km). Na prenos dát využíva v závislosti od kvality prenosového kanála digitálnu moduláciu BPSK ½, QPSK ½ až 64-QAM ¾ s pracovnou frekvenciou v pásme 3,4÷3,6 GHz. U týchto systémov je možné rátať so ziskom antény G_P na úrovni jednotiek dB a citlivosťou prijímača $P_{P\min} \approx -100 \div -110\,\text{dB}$.

Aktívne monoimpulzové radary slúžia na zisťovanie vzdušných cieľov (lietadiel, vrtuľníkov, atď.) v rámci svojho dosahu (spravidla stovky km). Pri svojej činnosti vyžarujú VF výkonové impulzy so šírkou na úrovni jednotiek μs. Telekomunikačným úradom SR boli pre radary pracujúce vo frekvenčnom pásme S pridelené pracovné frekvencie v rozsahu 2,7÷3,4 GHz. U týchto systémov je možné rátať so ziskom antény v smere maxima vyžarovania $G_R \approx 40$ dB a impulzovým výkonom vysielača $P_V \approx 60\,\text{dB}$. Minimálna konfigurácia vyššie definovanej bezdrôtovej rádiovej siete pracujúcej v podmienkach aktívneho rušenia je uvedená na obr. 2.



Obr. 2 Minimálna konfigurácia bezdrôtovej rádiovej siete v podmienkach aktívneho rušenia

VÝKONOVÉ POMERY V RÁMCI BEZDRÔTOVEJ RÁDIOVEJ SIETE V PODMIENKACH AKTÍVNEHO RUŠENIA

Medzi základné parametre vyššie uvedenej bezdrôtovej rádiovej siete pracujúcej v podmienkach aktívneho rušenia, ktoré je nutné definovať pri analýze výkonových parametrov patria:

- impulzový výkon vysielača radaru P_V [dB],
- výkon rušiaceho signálu radaru P_R na frekvenciách systémov MMDS resp. WiMAX, kde $P_R = P_V - \Delta P$ [dB],
- zisk antény radaru G_R [dB],
- očakávaný výkon na výstupe antény P_P systému MMDS resp. WiMAX [dB],
- citlivosť prijímača $P_{P\min}$ systému MMDS resp. WiMAX [dB],
- ziskom antény G_P systému MMDS resp. WiMAX [dB],
- vzdialenosť medzi anténou radaru a anténou systému MMDS resp. WiMAX [m].

V zmysle tzv. Majákovej rovnice je potom možné očakávať na výstupe antény systému MMDS resp. WiMAX prijatý výkon rušiaceho signálu P_P daný vzťahom [3]

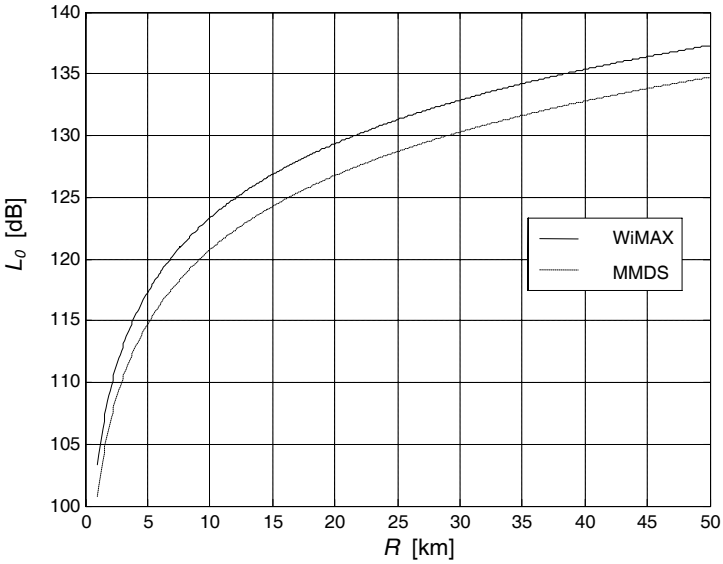
$$P_P = P_R + G_R + G_P - L_0 = P_V - \Delta P + G_R + G_P - L_0 , \qquad (1)$$

kde $\Delta P = P_V - P_R$ je rozdiel medzi výkonom signálu radaru na pracovnej frekvencii a výkonom rušiaceho signálu na frekvenciách systémov MMDS resp. WiMAX [dB],

$L_0 = 32{,}44 + 20\log R_{[km]} + 20\log f_{[MHz]}$ je tlmenie elektromagnetickej energie [dB] pri jej šírení vo voľnom priestore na vzdialenosť R [km],

$f_{[MHz]}$ je frekvencia rušiaceho signálu [MHz].

Grafická závislosť tlmenia elektromagnetickej energie pri jej šírení vo voľnom priestore pre stredné frekvencie systému MMDS resp. WiMAX v závislosti od vzdialenosti R je uvedená na obr. 3.



Obr. 3 Grafická závislosť tlmenia elektromagnetickej energie L_0 pre stredné frekvencie systému MMDS resp. WiMAX od vzdialenosti R

Systémy MMDS resp. WiMAX budú rušené v prípade, kedy bude hodnota prijatého výkonu rušiaceho signálu P_P na výstupe ich antén väčšia ako je vyššie uvedená citlivosť ich prijímačov $P_{P\min}$. Podmienka rušenia týchto systémov aktívnymi monoimpulzovými radarmi pracujúcimi vo frekvenčnom pásme S je daná vzťahom

$$P_P \geq P_{P\min} \tag{2}$$

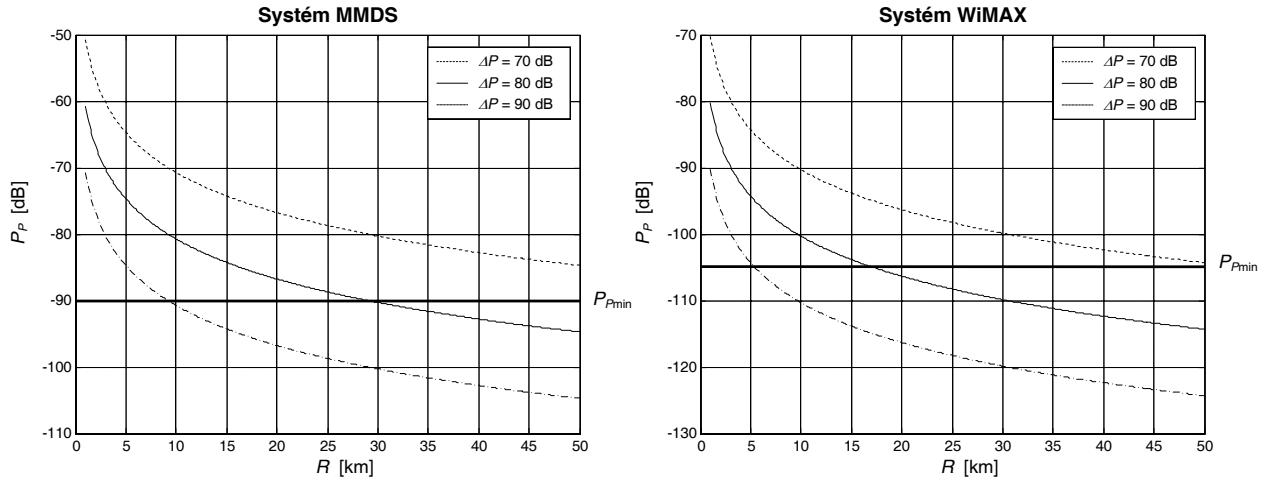
V zmysle vzťahu (1) je potom možné stanoviť teoretickú vzdialenosť, do ktorej je možné pre daný rozdiel ΔP medzi výkonom signálu radaru na pracovnej frekvencii a výkonom rušiaceho signálu na frekvenciách systémov MMDS resp. WiMAX predpokladať rušenie v systéme vyššie definovanej bezdrôtovej rádiovej siete.

V nasledujúcom príklade systému bezdrôtovej rádiovej siete pracujúcej v podmienkach aktívneho rušenia boli analyzované vzdialenosti, do ktorých je možné predpokladať rušenie systémov MMDS resp. WiMAX aktívnym monoimpulzovým radarom.

Analyzovaná bola bezdrôtová rádiová sieť s nasledujúcimi parametrami:

- impulzový výkon vysielača radaru $P_V = 60\,\text{dB}$,
- rozdiel medzi výkonom signálu radaru na pracovnej frekvencii a výkonom rušiaceho signálu na frekvenciách systémov MMDS resp. WiMAX $\Delta P = 70, 80, 90$ dB,
- zisk antény radaru $G_R = 40\,\text{dB}$,
- citlivosť prijímača systému MMDS $P_{P\min MMDS} = -90\,\text{dB}$,
- citlivosť prijímača systému WiMAX $P_{P\min WiMAX} = -105\,\text{dB}$,
- zisk antény systému MMDS $G_{PMMDS} = 20\,\text{dB}$,
- zisk antény systému WiMAX $G_{PWiMAX} = 3\,\text{dB}$.

Analýza bola vykonaná pre vzdialenosti medzi anténou radaru a anténou systému MMDS resp. WiMAX $R = 1 \div 50$ km a hodnoty $\Delta P = 70, 80, 90$ dB. Výsledky uvedenej analýzy sú uvedené na obr. 4.



Obr. 4 Výsledky analýzy vzdialenosti rušenia v bezdrôtovej rádiovej sieti pracujúcej v podmienkach aktívneho rušenia

Uvedené hodnoty ΔP predstavujú vzhľadom k stanovenému výkonu vysielača $P_V = 60$ dB výkon rušiaceho signálu radaru $P_R = 100, 10, 1$ mW. Z grafov uvedených na obr. 4 je možné vyvodiť nasledujúce závery:

1. ***Systém MMDS***

   Pri odstupe výkonu signálu P_V monoimpulzového radaru na pracovnej frekvencii vzhľadom k jeho nežiaducim produktom (výkon rušiaceho signálu P_R) o 70 dB je predpoklad rušenia systému na vzdialenosti väčšie ako 50 km od radaru. Ak bude hodnota $\Delta P = 80$ dB, môže byť systém rušený až do vzdialenosti 30 km od radaru. Pokiaľ bude hodnota $\Delta P = 90$ dB, bude systém MMDS rušený až do vzdialenosti 9,5 km.

2. ***Systém WiMAX***

   Pri odstupe výkonu signálu P_V monoimpulzového radaru na pracovnej frekvencii vzhľadom k jeho nežiaducim produktom (výkon rušiaceho signálu P_R) o 70 dB je predpoklad rušenia systému do vzdialenosti 50 km od radaru. Ak bude hodnota $\Delta P = 80$ dB, môže byť systém rušený až do vzdialenosti 17 km od radaru. Pokiaľ bude hodnota $\Delta P = 90$ dB, bude systém WiMAX rušený až do vzdialenosti 5 km.

Z tohto pohľadu je možné konštatovať, že systém WiMAX je z hľadiska rušenia monoimpulzovým radarom odolnejší ako systém MMDS.

VÝSLEDKY PRAKTICKÝCH MERANÍ

Výsledky vyššie uvedených teoretických analýz boli overené praktickými meraniami spektier vysielaných signálov, ktoré boli vykonané v blízkosti postavení monoimpulzových radarov pracujúcich vo frekvenčnom pásme S. Vysielače týchto radarov boli pritom osadené magnetrónovými VF generátormi s pracovnými frekvenciami od 2,7 GHz do 3,1 GHz. Merania

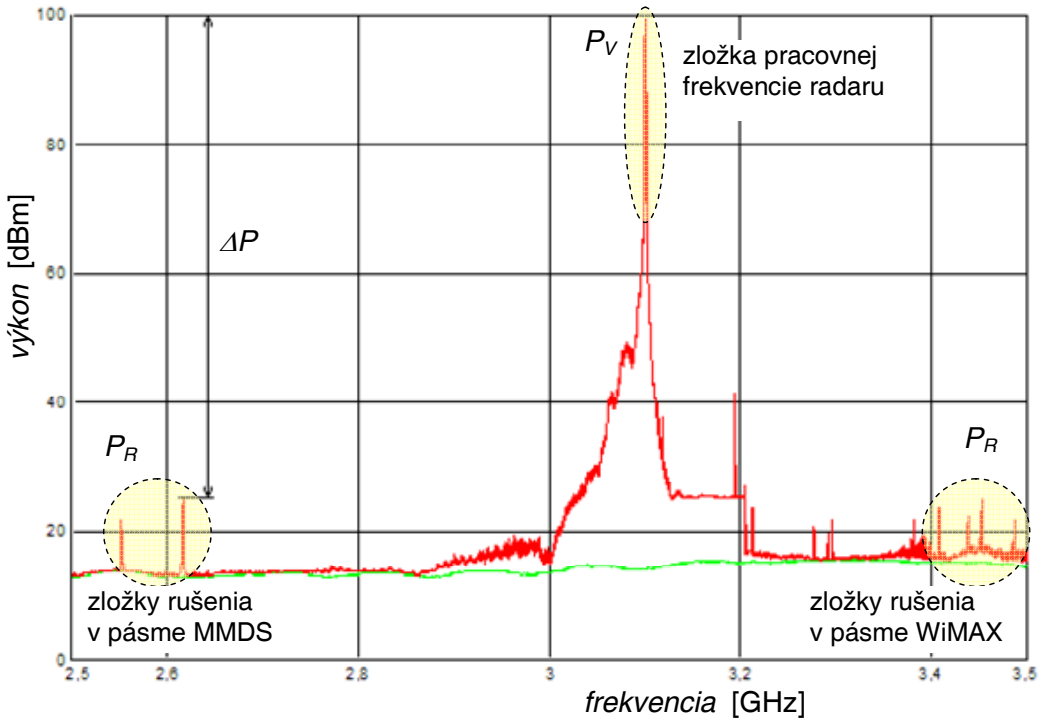
boli vykonané podľa platných štandardov [4] v tzv. vzdialenej zóne šírenia elektromagnetickej energie, pre ktorej vzdialenosť R_{min} platí vzťah

$$R_{min} \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad [\mathrm{m}], \tag{3}$$

kde D je najväčší rozmer antény radaru [m],

λ je vlnová dĺžka vyžarovanej elektromagnetickej energie [m].

Výsledky meraní potvrdili teoretické predpoklady, že magnetrónové generátory ako zdroje nekoherentných VF signálov môžu produkovať nežiaduce spektrálne zložky, ktoré sú frekvenčne značne vzdialené od ich pracovných frekvencií. Tieto spektrálne zložky potom môžu spôsobovať rušenie elektronických systémov pracujúcich v priľahlých frekvenčných pásmach. Príklad nameraného spektra vysielaného signálu jedného z typov monoimpulzového radaru je uvedený na obrázku 5.



Obr. 5 Príklad nameraného spektra vysielaného signálu monoimpulzovým radarom

Z uvedeného obrázku je zrejmé, že v nameranom spektre vysielacieho impulzu tohto radaru sa objavujú aj zložky, ktoré sú z hľadiska svojej frekvencie mimo frekvenčného pásma vyčleneného pre radary Telekomunikačným úradom SR. Aj keď je ich výkonová úroveň o viac ako 70 dB nižšia ako spektrálna zložka zodpovedajúca pracovnej frekvencii, v technickej praxi sa prejavovali ako rušiace signály pre systémy MMDS (merané v pásme 2,5÷2,7 GHz) a systémy WiMAX (merané v pásme 3,4÷3,5 GHz).

ZÁVER

Existenciu ľudstva bez bezdrôtových rádiových sieťových technológií si dnes už môžeme ťažko predstaviť. V poslednom desaťročí sa totiž stali aj pre bežný život v podstate nenahraditeľné. Aj v najbližšom období sa predpokladá ich ďalší rozmach a uplatnenie v oblastiach, ktoré si dnes môžeme len ťažko predstaviť. Práve z tohto dôvodu je treba mať stále na zreteli skutočnosť, že pri ich prevádzkovaní je nevyhnutnou nutnosťou striktné dodržiavanie zásad obidvoch hlavných oblastí elektromagnetickej kompatibility. Ich nedodržiavanie totiž môže pri ich využívaní priniesť negatívne dôsledky.

Ako príklad je možné uviesť vzájomnú činnosť vyššie analyzovaného systému, v rámci ktorého sa pri nedodržaní zásad EMC môžu vyskytnúť nasledujúce negatívne javy:

- Rušenie televízneho signálu v systéme MMDS, ktoré sa prejavuje so vzrastajúcou úrovňou rušiacich signálov od periodických výpadkov obrazu a zvuku synchrónne s otáčkami antény radaru, cez tzv. „zamŕzanie“ obrazu a zvuku až po ich úplný výpadok.
- Rušenie prenosu dát v systéme WiMAX, ktoré sa prejavuje poklesom jeho prenosových rýchlostí a pri dlhodobom nasmerovaní antény radaru do smeru na anténu systému až úplným výpadkom prenosu dát.

Samostatnou kapitolou pri prevádzkovaní systémov MMDS a WiMAX v blízkosti vysoko výkonových zdrojov elektromagnetickej energie (radar sa zaň považuje) je možnosť poškodenia ich citlivých častí, za ktoré je možné považovať napr. vstupné obvody nízkošumových konvertorov. Nakoľko systémy MMDS a WiMAX pracujú v tzv. licencovaných pásmach (za ich využívanie sa platí), je nutné, aby tieto pásma neboli z hľadiska EMC rušené žiadnym rušivým signálom. Riešením vyššie uvedených problémov môže byť na strane radaru zaradenie zodpovedajúcich filtrov do traktu medzi jeho vysielač a anténový systém alebo zavedenie radarov s tzv. koherentným vysielačom. Na strane systémov MMDS a WiMAX by mohlo byť v niektorých prípadoch riešením použitie prijímačov s adaptívnym riadením citlivosti prijímačov alebo použitie tzv. adaptívnych antén. Tým by sa však tieto systémy stali zložitejšími a aj zodpovedajúcim spôsobom drahšími.

BIBLIOGRAFICKÉ ODKAZY

1. SVAČINA, J.: *Encyklopedie EMC.* Ústav radioelektroniky FEKT VUT v Brne, Brno, 2004, uverejnené na IA: http://www.urel.feec.vutbr.cz/EncyklopedieEMC/index.php
2. GOEDBLOED, J.: *Electromagnetic Compatibility*, Prentice Hall, Hertfordshire (Netherlands), 1990, ISBN 0-13-249293-8.
3. MATOUŠEK, Z. – ŠPIRKO, Š. – HYKEL, A.: *Evaluation of Jamming Signal Sources Effect on Receiver in Non-Stacionary System.* In *Proceedings of 11th International Conference on Mechatronics,* Trenčianske Teplice (Slovakia), Jun 4 – 6, 2008. 6 s. ISBN 978-80-8075-305-4.
4. MONTROSE, M. I. – NAKAUCHI, E. M.: *Testing for EMC Compilance. Approaches and Techniques.* IEEE Press, Willey-Interscience, 2004, ISBN 0-471-43308-X.