MERANIE INTENZITY A HODNOTENIE OKAMŽITEJ EXPOZÍCIE OSÔB

Martin MARKO, Marián BABJAK, Peter SIEBERT *)

Úvod

Príspevok zoznamuje s niektorými problémami merania podľa EN 50492:2006 (*Basic standard for local strength measurement of human exposure by electromagnetic field in the vicinity of basic stations)*, ktorá je základnou normou na miestne meranie intenzity expozície osôb elektromagnetickým poľom v blízkosti základňových staníc. Norma je pripravovaná na vydanie v slovenskom preklade v roku 2007 SÚTN.

Táto základná norma špecifikuje metódy merania v blízkosti základňovej stanice, spôsobov merania a následné spracovanie, ktoré je použité na stanovenie elektromagnetického poľa na mieste práce pre vyhodnotenie expozície človeka vo frekvenčnom rozsahu 100 kHz až 300 GHz.

Okrem popisu všeobecného procesu merania je uvedená analýza miesta práce a sú definované algoritmy na určenie typu meraní v závislosti na jeho cieli a typoch zdrojov vyžarovania.

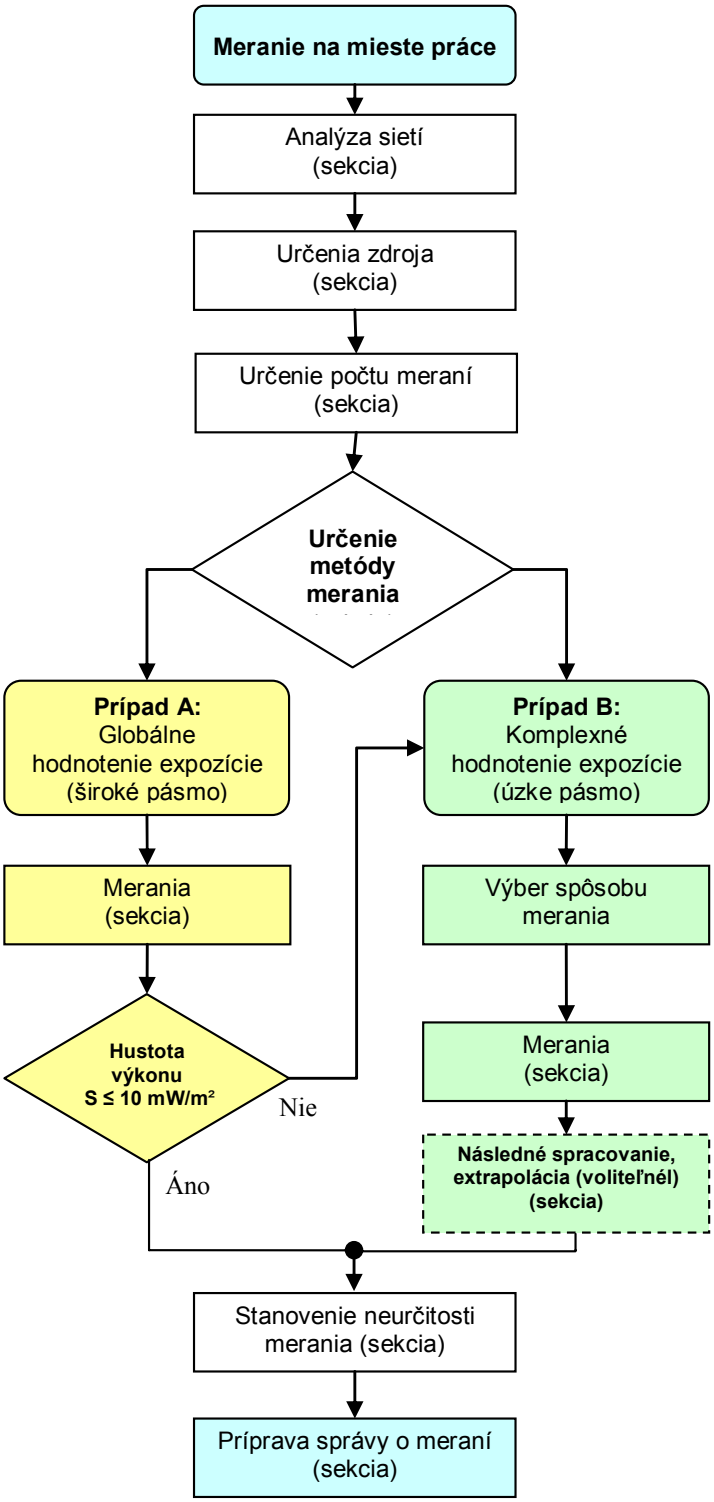
Všeobecný postup merania

V tejto časti príspevku je na vývojovom diagrame vysvetlený postup (obr.1), ktorý je potrebné dodržať pri určení metód, systémov merania a následnom spracovaní, ktoré sú použité pri určení elektrického poľa na mieste práce pri vyhodnotení expozície človeka.

V rámci analýzy miesta práce je potrebné brať do úvahy všetky neprenosné zdroje, ktoré pracujú v rozsahu od 10 MHz do 6 GHz. Na identifikáciu zdrojov pracujúcich od 100 kHz do 10 MHz a zdrojov, ktoré pracujú v rozsahu nad 6 GHz (napr. spoje bod - bod, systémy zabezpečujúce spojenie bod – viac bodov alebo radary) je potrebné venovať značné úsilie. Takéto zdroje možno identifikovať napr. pomocou vizuálnej kontroly, kontrolou databázy tak, ako je to definované v EN 50400 ako aj širokopásmovým meraním. Ak sa identifikujú zdroje, potom možno vykonať merania podľa použiteľných noriem. Ak miesto, ktoré je potrebné vyhodnotiť nie je v hlavnom lúči antén pracujúcich na frekvenciách nad 6 GHz, potom polia produkované takýmito zdrojmi možno ignorovať, pretože vo všeobecnosti nie sú významné na vyhodnotenie expozície človeka.

Prvým rozhodovacím procesom je výber prístupu k vyhodnoteniu. **Prípad A** poskytuje celkový výsledok, ktorý sa týka všetkých zdrojov a frekvencií, teda ide o vyhodnotenie expozície pomocou širokopásmových zariadení. **Prípad B** poskytuje množinu hodnôt poľa od zdrojov, frekvencií alebo čiastkových frekvenčných pásiem (podpásiem) a používa sa, ak je cieľom merania na mieste práce komplexné vyhodnotenie, t. j. preskúmanie každého podielu z vysokofrekvenčných zdrojov pomocou selektívnej frekvenčnej analýzy.

*)doc. Ing. Martin **MARKO**, CSc., tel.: 0960 42 3878, mob.: 0910 483 323, E-mail: marco@aoslm.sk,
Ing. Marián **BABJAK**, PhD., tel.: 0960 42 3876, mob.: 0915 829 405, E-mail: babjak@aoslm.sk,
Ing. Peter **SIEBERT**, tel.: 0960 42 39 35, mob.: 0903 192 620, E-mail: siebert@aoslm.sk,
Skupina automatizácie a komunikačných technológií, Katedra elektroniky
Akadémia ozbrojených síl generála M. R. Štefánika, Liptovský Mikuláš, P.O.Box 45, 031 01 Liptovský Mikuláš



Obrázok 1 Všeobecný proces merania

Určenie meranej veličiny

Určenie veličiny, ktorú je potrebné merať je podmienené vzdialenosťou miesta merania (miesta práce osoby) od zdrojových antén a od jednotlivých príspevkov žiarenia.

Elektromagnetické polia pozostávajú z **elektrického poľa E** (merané vo V/m) a **magnetického poľa H** (meraného v A/m). Elektrické pole E a magnetické pole H sú matematicky vzájomne závislé vo vzdialenej zóne žiarenia, ale je vhodné ich merať samostatne aj v blízkej zóne žiarenia.

Pre každý podieľajúci sa zdroj (alebo skupinu podieľajúcich sa zdrojov) a podľa analýzy na mieste práce, je potrebné zmerať E alebo H, alebo obe zložky poľa, podľa tabuľky 1. Vo všeobecnosti musia byť splnené všetky tri nasledujúce podmienky pre meranie vo vzdialenej zóne žiarenia. Obvykle je jedna z týchto podmienok hlavná.

$$r >> \lambda$$

$$r >> D$$

$$r \rangle \frac{2D^2}{\lambda}$$

Kde:

r vzdialenosť k anténe v hlavnom smere

λ vlnová dĺžka

D najväčší rozmer antény

Tabuľka 1 uvádza zložky poľa, ktoré je potrebné merať pri rozličných vzdialenostiach od rádiových staníc. Týmto spôsobom sa rozdelenie pracoviska na pásma dá dosiahnuť výlučne na základe informácií od výrobcu alebo dodávateľa zariadení.

Tabuľka 1 Veličiny merané v rozličných vzdialenostiach od rádiových staníc

	Oblasť blízkej zóny žiarenia I	**Oblasť blízkej zóny žiarenia II**	**Oblasť vzdialeného zóny žiarenia**
Postranný okraj oblasti, meraný od antény	0 až λ	λ až $\lambda + 2D^2/\lambda$	$\lambda + 2D^2/\lambda$ až ∞
E ⊥ H	Nie	Určite áno	Áno
Z = E / H	$\neq$ Zo	$\approx$ Zo	= Zo
Komponent, ktorý sa má merať	E & H [a]	E alebo H	E alebo H

[a] *Samostatné merania blízko základňových staníc pracujúcich s frekvenciami pod 30 MHz a SAR, ktoré nie sú obsahom tejto normy*

Vyššie uvedené vzdialenosti pre jednotlivé oblasti poľa platia pre podmienky voľného priestoru. Pre základňové stanice sa táto podmienka považuje za splnenú ak je minimálna vzdialenosť medzi anténou a akýmikoľvek objektmi väčšia než vlnová dĺžka.

V oblasti blízkej zóny žiarenia I, hustota vyžiarenej energie osciluje a závisí na mieste merania, nižšie hodnoty možno získať bližšie k anténe a vyššie hodnoty ďalej od antény. V tejto oblasti sa musia merať obe zložky poľa (E a H).

V oblasti blízkej zóny žiarenia II je prijateľné merať jednu zložku poľa E alebo H.

Požiadavky na meracie systémy

Meracie systémy sú zložené spravidla z nasledujúcich komponentov:

- anténa alebo antény pre zložku E alebo H, ktoré sa považujú za sondu schopnú vyhodnotiť intenzitu poľa izotropicky;
- meracie zariadenie (napr. spektrálny analyzátor alebo prijímač v prípade selektívneho frekvenčného merania),
- káble alebo vlákno napájajúce sondu na meracie zariadenie,
- stojan na držanie a umiestnenie sondy;
- buď upravený rotačný systém na izotropické meranie pomocou jednoosej sondy alebo prepínacie a zlučovacie zariadenie na izotropické meranie používajúce trojosovú sondu.

Okrem týchto komponentov sem patrí aj doplnkové zariadenie napr. počítač na automatizáciu a ovládanie merania, uloženie a následné spracovanie údajov.

Zariadenie na širokopásmové merania intenzity elektrického alebo magnetického poľa zvyčajne pozostáva zo širokopásmovej sondy a meracej súpravy. Širokopásmové merania sa vykonávajú pomocou zariadenia, ktoré sčítava podiely energií zo všetkých rádiových zdrojov v rámci širokého frekvenčného rozsahu. Takéto širokopásmové zariadenie je obvykle prenosné, masívne a ľahko sa používa. Citlivosť je však relatívne nízka a nemožno získať žiadne informácie, ktoré sú špecifické pre frekvenciu, čo znamená, že použitie širokopásmového zariadenia sa obmedzuje iba na určité situácie.

Existujú dva odlišné typy širokopásmových zariadení: sondy s plochou frekvenčnou odozvou a s váhovanou (tvarovanou) frekvenčnou odozvou. Pri váhovanej frekvenčnej odozve sa intenzita poľa umocnená na druhú váhuje podľa danej normy expozície a tak sa získa percento limitu expozície. Sondy s plochou odozvou predstavujú namerané hodnoty v zmysle intenzity poľa alebo ekvivalentnej hustoty energie.

Okrem toho, existuje špeciálna tvarovaná sonda, schopná merať jednotlivé frekvenčné pásma zvlášť. Toto zariadenie udáva hodnotu pre intenzitu elektromagnetického poľa pre každé z meraných pásem (t.j. VKV (FM) pásmo, TV pásmo, GSM/DCS pásmo, atď.).

Pre rozsah tejto normy sa odporúčajú iba sondy s plochou frekvenčnou odozvou kvôli presnosti merania a citlivosti v porovnaní so sondami s váženou frekvenčnou odozvou.

Nedostatok informácií o širokopásmových meraniach ohľadne frekvencie meraných rádiových zdrojov a identifikácie zdrojov nie je možný v situáciách, kde je prítomných mnoho zdrojov. Širokopásmové merania nemožno použiť na extrapoláciu maxima možnej energie vyžarovanej v systémoch, kde sa výkon mení v čase, ako sú napr. GSM systémy.

Nameraná hladina predstavuje celkovú intenzitu poľa v rámci frekvenčného rozsahu, ktorý sonda pokrýva. Širokopásmové merania sa vykonajú pomocou sondy elektrického alebo magnetického poľa. Na pokrytie špecifického frekvenčného rozsahu možno použiť niekoľko sond a celková úroveň intenzity poľa sa potom vypočíta podľa rovnice 1.

$$E = \sqrt{\sum_{i=2}^{N} E_i^2}\ , \quad H = \sqrt{\sum_{i=2}^{N} H_i^2} \tag{1}$$

kde N je počet sond.

Sonda alebo celý merací systém sa namontuje na stabilný stojan, aby sa vylúčil vplyv operátora.

Požiadavky na frekvenčné pásmo a frekvenčnú charakteristiku, dynamický rozsah, linearitu a izotropiu sú uvedené v tabuľke 2.

Tabuľka 2 Požiadavky na širokopásmové meracie systémy

	Frekvenčná charakteristika	**Minimálna hranica citlivosti**	**Maximálna hranica citlivosti**	**Linearita**	**Izotropia**
Pod 900 MHz a viac ako 3 GHz	+ 3 dB	2,5 mW/m^2 (t.j. 1 V/m alebo 0,003 A/m)	25 mW/m^2 (t.j. 100 V/m alebo 0,3 A/m)	± 1,5 dB	< 2 dB vyhodnotená pre celý merací systém
Od 900 MHz do 3 GHz	+ 1,5 dB				

Merací systém bude pokrývať minimálne frekvenčný rozsah od 100 kHz do 6 GHz prípadne do 40 GHz, ak si to vyžaduje analýza na mieste práce.

Meracie zariadenie musí byť kalibrované ako celý systém na meracích frekvenciách. Pri signáloch s vysokými činiteľmi amplitúdy alebo kombináciami niekoľkých signálov, môže byť potrebná ďalšia kalibrácia, aby sa vyhodnotila neurčitosť merania.

Požiadavky na frekvenčne selektívne meracie systémy je možné zhrnúť následne:

- merací systém bude pokrývať minimálne permanentné rádiové emisie vo frekvenčnom pásme od 10 MHz do 6 GHz. Ak analýza na mieste práce ukáže možné emisie od 100 kHz do 10 MHz alebo nad 6 GHz, musia sa použiť adekvátne meracie systémy. Tento rozsah možno pokryť použitím jednej alebo niekoľkých antén a meracích systémov.
- dynamický rozsah je daný minimálnou úrovňou hustoty energie 0,01 mW/m2 (0,05 V/m) a maximom vyššie ako 24 W/m2 (100 V/m),
- citlivosť bude definovaná pri pomere signálu k šumu najmenej 20 dB,
- izotropia bude stanovená v súlade s EN 50383. Izotropia trojosej sondy alebo jednoosej otočnej sondy bude v rámci ± 2,5 dB vo frekvenčnom rozsahu zariadenia.

Meracie zariadenie bude kalibrované v súlade s EN 50383.

Pri meraní pomocou spektrálneho analyzátora budú nastavenia zariadenia definované s patričným ohľadom na šírku pásma a charakteristiky signálov, ktoré sa merajú, napr. šírka pásma rozlíšenia meracieho systému bude buď väčšia, než šírka pásma obsadená signálom alebo celý podiel v šírke pásma obsadenej signálom sa pripočíta, aby sa našla hodnota amplitúdy.

Meracie zariadenie založené na princípe prijímača CDMA bude kalibrované na patričné parametre kódovacej oblasti, ktoré sú energiou spoločnej riadiacej frekvencie CPICH, známe ako Ec, a pomer signálu k šumu, známe ako Ec/Io.

Prvým krokom je kalibrovanie dynamického rozsahu. Kábel prijímača je napojený na WCDMA generátor. Odchýlka linearity bude nižšia, ako ± 2 dB pri vstupnom výkone, ktorý pokrýva dynamický rozsah. Merania mimo lineárneho rozsahu energie sa nemusia brať do úvahy.

Druhým krokom je stanovenie rozsahu spoľahlivosti pre Ec/Io berúc do úvahy úroveň šumu. Tento postup stanovuje dekódovací rozsah pre CPICH zariadenia. Obvykle je pre samostatný žiarič pomer signálu a šumu Ec/Io = -10 dB (normy 3GPP).

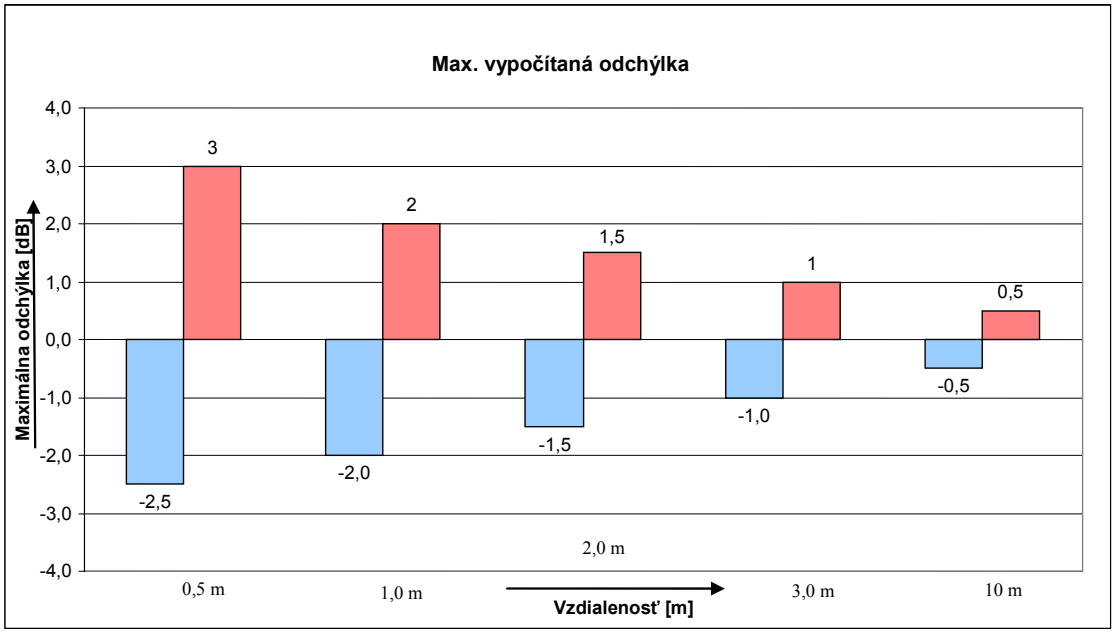
Avšak táto hodnota môže byť nižšia v prípade viac zdrojovej konfigurácie. Meracie zariadenie bude schopné merať (dekódovať) signál pre Ec/Io > -20 dB (limit pre UMTS bunku).

Na tento účel sa určuje výkon generátora, zatiaľ čo alokovaná energia CPICH sa mení od (-3 dB do -20 dB). Nameraná hodnota bude v rámci odchýlky ± 2 dB.

Vplyv ľudského tela na merania

Podrobné informácie o metódach, ktoré možno použiť, a ktoré sú v súlade s touto základnou požiadavkou sú uvedené v prílohe D tejto normy (EN 50492), ktorá sa zaoberá vplyvom ľudského tela na merania založenom na metóde momentov (princípe ekvivalencie povrchu). Príklad hodnôt typicky simulovanej chyby vyvolanej vplyvom ľudského tela na meranie viacsmerovou sondou je na obrázku 2.

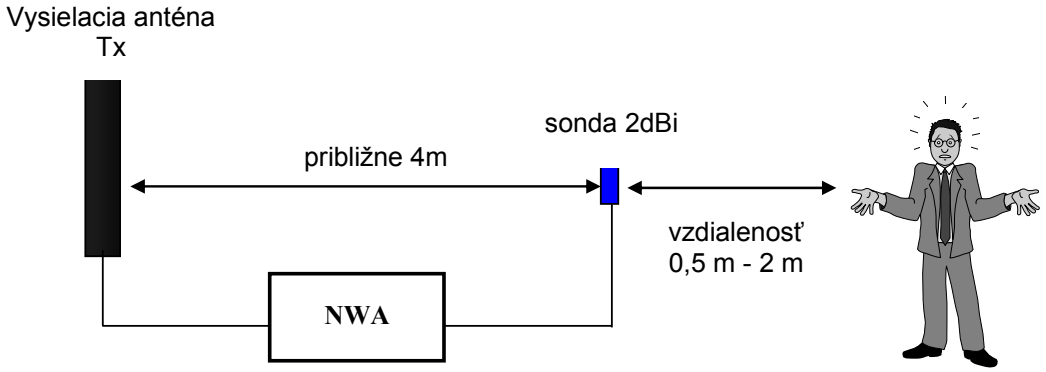
Na porovnanie simulácie s meraniami bolo zvolené usporiadanie merania podľa obrázku 3., kde je použitá všesmerová sonda s malým ziskom, vzdialená vysielacia anténa 4 m a osoba za meranou sondou.



Obrázok 2 Maximálna vypočítaná odchýlka merania pre vzdialenosti 0,5/1/2/3 a 10 m

Merania a výpočty ukazujú akceptovateľnú zhodu, berúc do úvahy frekvenčnú závislosť. Pre frekvenčný rozsah 100 MHz – 2,5 GHz vo vzdialenosti 2 m ľudské telo ovplyvňuje meranie viacsmerovou sondou približne o 1 dB až 1,5 dB. Možno predpokladať, že pri vyšších frekvenciách bude vplyv rovnaký. Výsledky možno považovať za platné pre neodrazové alebo málo odrazové prostredie voľného priestoru. V prostredí s viacnásobným odrazom, ktoré znamená slabnúce prostredie, vplyv tela môže byť vyšší kvôli zrušeniu lokálnych maxím.

Namerané maximálne zmeny útlmu prenosovej cesty (v rámci frekvenčného rozsahu (824 – 960) MHz a (1 701 – 2 170) MHz) uvedené v tabuľke 3.



Obrázok 3 Usporiadanie merania na overenie vplyvu ľudského tela

Tabuľka 3 Nameraný vplyv ľudského tela na merania viacsmerovou sondou

Vzdialenosť	Max. rozdiel 824 – 960 MHz	Max. rozdiel 1 700 – 2 170 MHz
0,5 m	± 1 dB	± 1,8 dB
1 m	± 1,4 dB	± 1,5 dB
2 m	± 1 dB	± 0,8 dB

Vyhodnotenie expozície človeka v komplexnom prostredí

Viaccestné šírenie znamená, že signál v danom mieste je zložený z viacerých komponentov poľa, ktoré vyvolávajú rýchle úniky signálu. EM polia sa priestorovo menia a tak expozícia človeka sa musí vyhodnotiť následným spracovaním meraní vykonaných na určitej línii alebo povrchu.

Ak sa používa izotropická sonda, potom sa meranie vykoná pomocou priamych prírastkov. Ak sa používa neizotropická sonda, potom sa vykoná istý počet meraní v relevantných smeroch a kombináciách, aby sa tak expozícia vyhodnotila izotropicky.

Aby sa vyhodnotila expozícia celého tela človeka, je potrebný priemerovací protokol. Izotropické hodnoty poľa sa stanovia pre N meracích bodoch. Odporúčajú sa 3 meracie body, ale v závislosti na mieste (vo vzťahu k bodu merania) a vyžadovanej presnosti, sa počet bodov merania, ktoré sa priemerujú môže zvýšiť na šesť, ako to dokumentuje obrázok 4. Neurčitosť pri troch bodoch merania je ~ 3 dB, neurčitosť pri šiestich bodoch merania je ~ 2 dB.

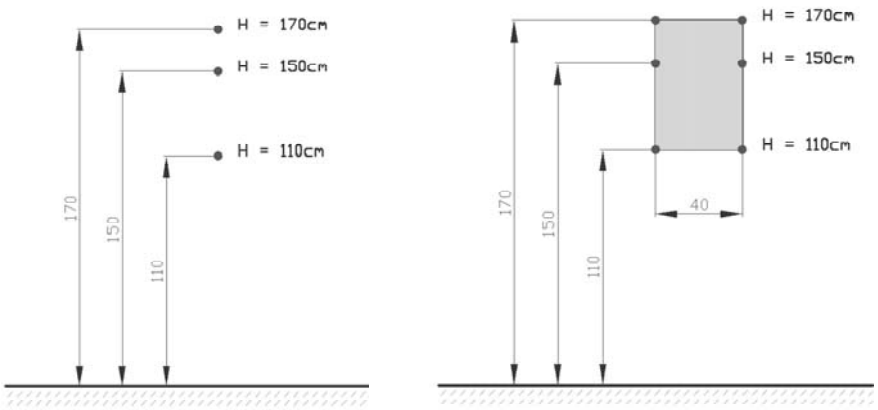
Ak je cieľom vyhodnotiť najvyššiu hodnotu odlišných komponentov poľa v rámci určitého objemu, možno použiť alternatívny protokol ako je rozkladanie.

Priestorovo spriemerovaná hodnota poľa sa určí pomocou nasledujúceho vzorca na širokopásmové meranie.

$$(E\ or\ H)_{spatial\ averaging} = \left[\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (E_i\ or\ H_i)^2}{N}} \right] \tag{2}$$

Na frekvenčné selektívne meranie sa vzorec uvedený vyššie vyhodnotí zvlášť pre každé frekvenčné pásmo, t.j. pre každé frekvenčné pásmo uvedené priestorovo spriemerované pole je kvadratické priestorové spriemerovanie týchto N bodov.

Proces merania pokračuje odhadom neurčitosti a spracovaním prezentácie výsledkov. Ďalšie spresnenia správy o meraní a o hodnotení možno nájsť v ISO/IEC 17025.



Obrázok 4 Miesta bodov merania na priestorové spriemerovanie

Záver

Príspevok autorov je len úvodom do problematiky merania intenzity a hodnotenia okamžitej expozície osôb, v ktorom chcú s určitým časovým predstihom informovať odbornú verejnosť o tejto problematike.

Osobitnú pozornosť je potrebné venovať otázkam merania a vyhodnocovania špecifických vysielacích signálov vo vzťahu k EMP. Ako príklady uvádzame len niektoré: digitálne rozhlasové vysielanie (DAB), digitálny rádiový systém (DRM), televízne systémy analógové (systém PAL), digitálne televízne systémy .(DVB-T), systémy GSM, UMTS, WiFi, atď. s najrôznejšími prístupmi na rádiový kanál. Obdobnú pozornosť si zasluhujú aj vojenské systémy s rozprestretým spektrom a špeciálne zložené signály rádiolokátorov.

Zoznam bibliografických odkazov

EN 50383, Basic standard for the calculation and measurement of electromagnetic field strength and SAR related to human exposure from radio base stations and fixed terminal stations for wireless telecommunication systems (110 MHz - 40 GHz)

IEC “Guide to the expression of uncertainty in measurement”, Ed. 1:1995

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (1998), Guidelines for limiting exposure in time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz); Health physics 74, 494-522.

ISO/IEC 17025:1999, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories

ITU-R Recommendation F.1399-1:2001, Vocabulary of terms for wireless access

ITU-R Recommendation F.592-3:2002, Vocabulary of terms for the fixed service