

Нивои електричних поља високих учестаности: један пример одређивања мерне несигурности код широкопојасних мерења

Бранислав Вулевић, Маја Грбић, Александар Павловић

Универзитет у Београду, Електротехнички институт „Никола Тесла”,
Косте Главинића 8а, 11000 Београд, Република Србија
branislav.vulevic@ieent.org, maja.grbic@ieent.org, aleksandar.pavlovic@ieent.org

Кратак садржај: Одређивање нивоа електромагнетских поља високих учестаности у урбаним срединама представља изузетно компликован задатак, имајући у виду експоненцијални раст броја извора оличених у системима јавне мобилне телефоније у протеклих двадесет година. Основна сврха овог рада је приказ једног практичног решења процене мерне несигурности везане за просторно усредњавање резултата широкопојасних мерења јачине електричног поља високих учестаности у опсегу од 3 MHz до 18 GHz.

Кључне речи: излагање људи, јачина електричног поља, високе учестаности, мерна несигурност, просторно усредњавање.

1. Увод

Излагање људи електромагнетским пољима високих учестаности која потичу од савремених система за бежични пренос информација представља неминовност модерног доба. На основу доступних података у стручној јавности, досадашња истраживања и епидемиолошке студије о биолошким ефектима ових поља довела су до узнемирености јавног мњења. Узрок томе је лоше и сензационалистичко информисање када су у питању стамбени објекти у близини телекомуникационих инсталација, што се посебно односи на базне станице јавне мобилне телефоније.

У циљу процене изложености становништва, познавање нивоа електромагнетских поља високих учестаности на терену је од изузетне важности. Мерења представљају основу како за верификацију резултата добијених коришћењем нумеричких модела тако и за процену нивоа електромагнетских поља на терену када је свака врста прорачуна и

симулација отежана присуством већег броја извора, радним условима, а самим тим и комплексном расподелом поља [1].

Како је процена мерне несигурности незаобилазни део сваког мерења, посебно када су измерене вредности близу прописаних граничних вредности, у стандарду *EN 50413* [2] дат је генерални осврт на идентификацију компонената мерне несигурности у случају испитивања нивоа електромагнетских поља. Принципи наведеног стандарда уграђени су у стандард *EN 50492* [3], који се бави проблематиком испитивања нивоа електромагнетских поља високих учестаности у циљу процене излагања људи.

Сврха овога рада везана је за процену мерне несигурности за случај када се посматра широкопојасно мерење и врши тзв. просторно усредњавање измерених вредности, које је у овом случају извршено на три висине у односу на површину пода/тла.

2. Избор методе мерења

Стандард *EN 50492* најпре дефинише избор методе мерења, мерне опреме и постпроцеса мерења који треба да се користе у циљу процене излагања људи електромагнетским пољима високих учестаности (од 100 kHz до 300 GHz).

Према наведеном стандарду, у зависности од постављеног циља мерења, постоји подела на случај А (широкопојасна метода мерења) и случај Б (фреквенцијски селективна метода мерења). Широкопојасна метода мерења даје једну информацију у посматраној мерној тачки („измерену вредност“) о укупној имисији у оквиру опсега учестаности који је покривен коришћеним мерним инструментом. При оваквом мерењу не постоји могућност издвајања удела присутних извора у посматраном окружењу у односу на укупну вредност. То је у суштини највећи недостатак широкопојасних мерења, који може да се надомести коришћењем фреквенцијски селективних метода. Са друге стране, лако руковање мерном опремом и покретљивост током процеса мерења чини широкопојасне методе веома практичним за оперативни рад на терену.

На основу претходног искуства аутора [4,5], велика предност широкопојасних метода везана је за прелиминарна испитивања и тзв. „брзи преглед“ код мерења „на лицу места“ (тзв. *in-situ* мерења).

2.1. Широкопојасна мерна опрема

Широкопојасна мерна опрема састоји се из два дела:

- а) широкопојасне изотропне сонде за мерење електричног или магнетског поља која покрива одређен опсег учестаности и
- б) мерног инструмента.

Резултат испитивања представљају измерене ефективне вредности електричног или магнетског поља у опсегу учестаности који покрива коришћена сонда. У табели 1 приказани су основни услови које треба да задовољи широкопојасна мерна опрема.

Табела 1. Основни услови за широкопојасну мерну опрему [3]

	Фреквенцијски одзив	Доња граница детекције	Динамички опсег	Линеарност	Изотропност
< 900 MHz, > 3 GHz	± 3 dB	≤ 2 mW/m ² тј. 1 V/m	≥ 40 dB	± 1,5 dB	≤ 2 dB
Од 900 MHz до 3 GHz	± 1,5 dB				процена за цео мерни систем

У овом раду коришћен је мерни инструмент *Narda Broadband Field Meter NBM-550* са изотропном сондом *EF1891* за мерење јачине електричног поља [6,7]. Основна техничка спецификација овог мерног система дата је у табели 2.

Табела 2. Основне техничке карактеристике мерног система NBM-550 са сондом EF1891 [7]

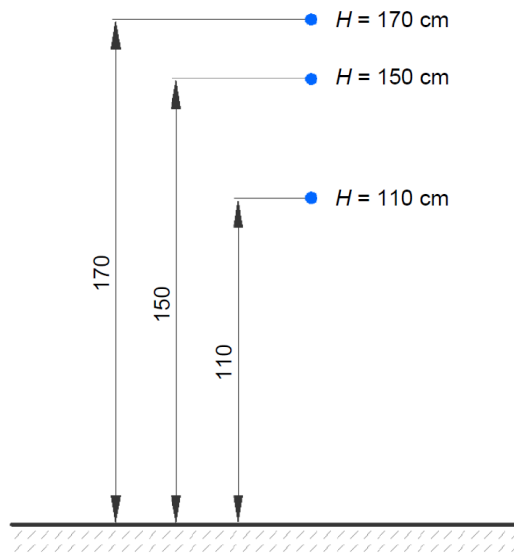
Фреквенцијски опсег	3 MHz до 18 GHz
Тип фреквенцијског одзива	Раван
Мерни опсег	0,6 до 1000 V/m (континуални талас) 0,6 до 35 V/m (импулсни талас)
Динамички опсег	64 dB
Ниво при коме наступа оштећење мерног система у случају континуалног таласа	1600 V/m
Ниво при коме наступа оштећење мерног система у случају импулсног таласа	16 kV/m
Тип сензора	Систем заснован на диодама
Усмереност	Изотропна (триаксијална)
Мод читавања / просторна процена	3 засебне осе
НЕСИГУРНОСТ	
Равноћа фреквенцијског одзива (несигурност еталонирања није укључена)	± 1 dB (10 MHz – 1,8 GHz) ± 2 dB (1,8–6 GHz) ± 3 dB (> 6 GHz)
Несигурност еталонирања (за референтну вредност од 27,5 V/m)	± 1 dB (< 400 MHz) ± 1,5 dB (400 MHz – 1,8 GHz) ± 1 dB (≥ 1,8 GHz)
Линеарност (за референтну вредност од 27,5 V/m)	± 3 dB (0,8–1,65 V/m) ± 1 dB (1,65–3,3 V/m) ± 0,5 dB (3,3–300 V/m) ± 0,8 dB (300–1000 V/m)
Изотропни одзив	± 1 dB (27 MHz – 1 GHz) ± 2 dB (1–18 GHz)
Температурни одзив	+ 0,2 / -1,5 dB (± 0,025 dB/K на 10–50°C)

Напомена о конверзији: $x[\%] = (10^{x[\text{dB}]/20} - 1) \cdot 100$.

Изотропна сонда се еталонира на неколико учестаности. Корекциони фактори се чувају у *EPROM* меморији у сонди и аутоматски се током мерења узимају у обзир за време рада мерног инструмента. У истој табели дата је мерна несигурност самог мерног инструмента као основа за процену мерне несигурности типа Б коју декларише произвођач опреме. Треба нагласити чињеницу да сви наведени подаци важе за услове средине у температурном опсегу од 0°C до 50°C и при релативној влажности ваздуха мањој од 95%.

3. Просторно усредњавање

Електрична поља високих фреквенција у околини било које базне станице (према *SRPS EN 50413* појам „базна станица” подразумева радио-станицу и одговарајући антенски систем) могу бити описана вишеструким варијацијама у простору и времену. Те варијације настају као последица растојања од базне станице са једне стране, а са друге стране као производ екранизације и вишеструког просторног слабљења мањих размера (енгл. *small-scale spatial fading*). Дакле, те вишеструке *small-scale* варијације настају као случајне варијације у локалној средини и последица су некохерентне интерференције великог броја случајних сигнала на једном мерном месту. Код мерења у зонама повећане осетљивости као што су куће, станови, вртићи, школе итд., мерења на одређеном мерном месту, посебно када у околини постоји више извора, треба да буду вршена на бар три висине у оквиру истог мерног места, као што је приказано на слици 1.



Слика 1. Локације мерних тачака за просторно усредњавање [3]

Просторно усредњавање добијених вредности јачине електричног поља врши се према изразу:

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N E_i^2}{N}}, \quad (1)$$

где су:

E_i – средња вредност очитаних вредности јачине електричног поља у свакој тачки i у простору;

N – број мерних тачака (у примеру са слике 1, $N = 3$).

При томе се E_i израчунава као:

$$E_i = \sqrt{E_{xi}^2 + E_{yi}^2 + E_{zi}^2}. \quad (2)$$

4. Просторно усредњавање и мерна несигурност

У табели 3 дат је типичан пример буџета мерне несигурности за мерну опрему која је узета као пример у овом раду [5].

Ако $u_c = u_c(E_i)$ из табеле 3 представља комбиновану стандардну несигурност за E_i за сваку просторну тачку i , тада се, у складу са централном граничном теоремом, може претпоставити да се ради о нормалној расподели вероватноће. Према [8] укупна несигурност код просторно усредњених вредности може се проценили на следећи начин:

- а) Израчунати средњу вредност јачине електричног поља E_i за сваку тачку i у простору;
- б) Проценити комбиновану стандардну несигурност $u_c(E_i)$ за јачину електричног поља у свакој тачки простора, као што је предложено у [5];
- в) Израчунати просторно усредњену вредност јачине електричног поља у складу са изразом (1);
- г) Израчунати коефицијент осетљивости за E у односу на E_i као:

$$c_i = \frac{\partial E}{\partial E_i} = \frac{E_i}{\sqrt{N \cdot \sum_{i=1}^N E_i^2}} = \frac{E_i}{N \cdot E}. \quad (3)$$

- д) Израчунати комбиновану стандардну несигурност за просторно усредњавање према:

$$u_c(E) = \left(\sum_{i=1}^N c_i^2 \cdot u_c^2(E_i) \right)^{1/2} = \frac{1}{N \cdot E} \cdot \left(\sum_{i=1}^N E_i^2 \cdot u_c^2(E_i) \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Под условом да се ради о нормалној расподели вероватноће [8], користи се фактор проширења $k = 1,96$ за ниво поузданости од 95%.

Проширена мерна несигурност добија се као:

$$U(E) = \pm 1,96 \cdot u_c(E). \quad (5)$$

Табела 3. Пример буџета мерне несигурности за мерни уређај NBM-550 са сондом EF1891

Утицајни фактор	Референца	Специфична несигурност [%]	Расподела	Делилац	Стандардна несигурност $u(x_i)$ [%]
Фреквенцијски одзив	Уверење о еталонирању	11,6	Правоугаона	1,73	6,7
Несигурност фреквенцијског одзива	Уверење о еталонирању	20	Нормална ($k = 2$)	2	10
Линеарна девијација	Уверење о еталонирању	3	Правоугаона	1,73	1,7
Несигурност линеарности	Уверење о еталонирању	15	Нормална ($k = 2$)	2	7,5
Изотропска девијација	Спецификација произвођача	12,2	Правоугаона	1,73	7,1
Модулациони одзив	Спецификација произвођача	-	Правоугаона	1,73	-
Температурни одзив	Спецификација произвођача	2,3	Правоугаона	1,73	1,3
Поновљивост	Серија мерења	Однос стандардне девијације и средње ефективне вредности	Нормална ($k = 1$)	1	Однос стандардне девијације и средње ефективне вредности
Комбинована стандардна несигурност, u_c [%]					$\left(\sum_{i=1}^N u^2(x_i) \right)^{1/2}$
Фактор проширења, k					1,96
Проширена мерна несигурност, U [%]					$1,96 \times u_c$ [%]

Претходно наведена процедура резимирана је у табели 4.

Табела 4. Процена мерне несигурности код просторног усредњавања

i	$H[m]$	Средња ефективна вредност $E_i [V/m]$	Просторно усредњена вредност $E [V/m]$	Расподела	Делилац	Коефицијент осетљивости c_i	$u_c(E_i)[\%]$
1	1,1	-	Израз 1	Нормална	1	Израз 3	-
2	1,5	-		Нормална	1	Израз 3	-
3	1,7	-		Нормална	1	Израз 3	-
Комбинована стандардна несигурност, $u_c(E)[\%]$							Израз 4
Фактор проширења, (k)							1,96
Проширена несигурност, $U(E)[\%]$							$1,96 \times u_c(E)$

5. Пример процене мерне несигурности

Пример који следи представља процедуру за процену мерне несигурности за случај просторног усредњавања вредности јачине електричног поља високих учестаности на једном мерном месту које се налази у близини антенског система јавне мобилне телефоније. Мерење се врши у три мерне тачке које се налазе на висинама од 1,1 m, 1,5 m и 1,7 m.

Мерни инструмент *NBM-550* са изотропном сондом *EF1891* је подешен тако да је у свакој тачки простора мерење трајало по 6 минута и да се на сваких 10 секунди меморише по једна ефективна вредност јачине електричног поља. Амбијентална температура износила је око 20°C, а релативна влажност ваздуха око 64%. Наведени амбијентални услови се нису значајно мењали у периоду од 18 минута током трајања мерења.

Дакле, у свакој мерној тачки измерено је по 36 ефективних вредности јачине електричног поља. За сваку тачку су, на основу 36 измерених вредности, одређене стандардна девијација и средња вредност, а као однос наведене две вредности дефинисана је тзв. „поновљивост мерења” (један од најважнијих променљивих фактора током мерења – исти услови, исти инструмент, исти извршилац мерења). У приказаном случају поновљивост мерења на висинама од 1,1 m, 1,5 m и 1,7 m износила је 1,7%, 3,8% и 2,2%.

Табела 5. Процена мерне несигурности код просторног усредњавања на посматраном примеру

i	H [m]	Средња ефективна вредност E_i [V/m]	Просторно усредњена вредност E [V/m]	Расподела	Делилац	Коефицијент осетљивости c_i	$u_c(E_i)$ [%]
1	1,1	1,47	1,41	Нормална	1	0,3475	16,10
2	1,5	1,24		Нормална	1	0,2931	16,45
3	1,7	1,51		Нормална	1	0,3570	16,17
Комбинована стандардна несигурност, $u_c(E)$[%]							9,39
Фактор проширења, (k)							1,96
Проширена несигурност, $U(E)$[%]							18,41 ($\pm 0,26$ V/m)

Уколико се оријентишемо на процедуру процене мерне несигурности у једној тачки, као што је то био случај у [5], за поновљивост мерења од 3,8% (мерна тачка на 1,5 m) комбинована стандардна несигурност износи 16,45%, а проширена мерна несигурност 32,2%.

Понављајући исту процедуру за још две тачке на различитим висинама (1,1 m и 1,7 m), процењена комбинована стандардна несигурност износила је 16,10% односно 16,17%, а укупна мерна несигурност процењена је на 18,41%, као што је показано у табели 5.

6. Закључак

У раду је приказана метода процене мерне несигурности за случај просторног усредњавања код широкопојасних мерења. Показано је да коришћење просторног усредњавања утиче на смањење мерне несигурности, што може да буде од користи са становишта процене излагања људи електричним пољима високих фреквенција.

Овај рад може да послужи као полазни оквир за будућа разматрања и побољшања мерних метода усмерених ка процени излагања људи електромагнетским пољима високих фреквенција.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] B. Vulevic, P. Osmokrovic: "Evaluation of Uncertainty in the Measurement of Environmental Electromagnetic Fields", *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 141, no. 2, pp. 173–177, 2010.
- [2] *Basic standard on measurement and calculation procedures for human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0 Hz – 300 Ghz)*, CENELEC EN 50413, 2008.
- [3] *Basic standard for the in-situ measurement of electromagnetic field strength related to human exposure in the vicinity of base stations*, CENELEC EN 50492, 2008.
- [4] B. Vulevic, P. Osmokrovic, D. Kovacevic: "Survey of Radiofrequency Radiation Levels around GSM Base Stations and Evaluation of Measurement Uncertainty", *Nuclear Technology & Radiation Protection*, vol. 26, no. 3, pp. 214–217, 2011.
- [5] B. Vulevic, C. Belic, L. Perazic: "Measurement Uncertainty in Broadband Radiofrequency Radiation Level Measurements", *Nuclear Technology & Radiation Protection*, vol. 29, no. 1, pp. 53–57, 2014.
- [6] *NBM-550 Broadband Field Meter Operating Manual*, Narda Safety Test Solutions, 2009.
- [7] *E-FIELD PROBE EF1891 Manufacturer Data Sheet: Measuring electric fields from 3 MHz to 18 Ghz*, Narda Safety Test Solutions.
- [8] D. Stratakis, A. Miaoudakis, C. Kadsidis, V. Zacharopoulos, T. Xenos: "On the uncertainty estimation of electromagnetic field measurements using field sensors: a general approach", *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 133, no. 4, pp. 240–247, 2009.

Abstract: Determining high frequency electromagnetic field levels in urban areas represents a very complex task, having in mind the exponential growth of the number of sources embodied in public cellular telephony systems in the past twenty years. The main goal of this paper is a representation of a practical solution in the evaluation of measurement uncertainty for *in-situ* measurements in the case of spatial averaging. An example of the estimation of the uncertainty for electric field strength broadband measurements in the frequency range from 3 MHz to 18 GHz is presented.

Keywords: human exposure, electric field strength, high frequencies, measurement uncertainty, spatial averaging.

High Frequency Electric Field Levels: An Example of Determination of Measurement Uncertainty for Broadband Measurements

Branislav Vulević, Maja Grbić, Aleksandar Pavlović

Рад примљен у уредништво: 05.11.2016. године.
Рад прихваћен: 15.12.2016. године.