

UN MODEL PARAMETRIC DE PROPAGARE A UNDELOR RADIO ÎN MEDIUL URBAN

Eugeniu Plohotniuc

(Universitatea de Stat „Alec Russo”, Republica Moldova)

Este prezentat un model parametric de calcul al intensității semnalului radio în benzile VHF-UHF, în condițiile propagării în mediul urban. Rezultatele obținute în cadrul acestui model sunt verificate prin comparare cu datele experimentale obținute în urma unor serii de măsurări efectuate în orașele Holon (Israel), Kingston (Jamaica) și Bălți (Moldova). Modelul teoretic permite determinarea intensității semnalului radio la recepție cu o precizie de 8 - 18 dB. Rezultatele demonstrează că, pentru condițiile de mediu urban și rural, modelul propus oferă rezultate concordante cu măsurările.

Introducere

Orașele moderne au o topografie complicată, cu clădiri distribuite aleatoriu pe o suprafață neregulată. Configurația specifică a topografiei acestora determină condiții specifice de propagare la nivelul stradal a undelor radio din benzile VHF-UHF. În aceste condiții sunt prezente arii de umbră și au loc fenomene de împrăștiere, difracție, reflexie și interferență [1–8].

Modelarea analitică a propagării undelor radio în condiții urbane reale, vizând determinarea intensității semnalului radio la recepție, este foarte dificilă și nu poate fi generalizată pentru toate orașele. Totuși un model parametric simplificat, care ar putea fi folosit pentru calculul intensității semnalului radio la recepție poate fi construit prin substituirea distribuției reale a clădirilor și a

profilului intraurban al terenului printr-un model statistic [9–12]. Rezultatul unei astfel de abordări este discutat în lucrarea de față, prin confruntarea modelului propus cu măsurările intensității semnalului radio în banda VHF/UHF în puncte de recepție plasate la nivel stradal în orașele Holon (Israel), Kingston (Jamaica) și Bălți (Moldova).

1. Un model parametric de propagare a semnalelor radio în mediul urban cu clădiri distribuite aleatoriu

În lucrarea [12] este descris un model parametric de calcul al intensității semnalului radio în banda VHF/UHF, în puncte de recepție din mediul urban. Aici se iau în considerație distribuția spațială a clădirilor, dimensiunile secțiunilor suprafețelor de reflexie, distribuția punctelor de reflexie, distribuția spațială a punctelor de împrăștiere, efectele difracției la nivelul ansamblurilor de clădiri, precum și profilul acestora. În acest model, partea coerentă a intensității semnalului radio se calculează după formula:

$$\langle I_{co} \rangle = \exp \left\{ -g_0 d (z_2 - z_1)^{-1} \int_{z_1}^{z_2} P_h(z) dz \right\} \frac{\sin^2(kz_1 z_2 / d)}{4p^2 d^2}, \quad (1)$$

unde $P_h(z)$ reprezintă profilul înălțimii clădirilor:

$$P_h(z) = H(h_1 - z) + H(z - h_1) H(h_2 - z) \left(\frac{h_2 - z}{h_2 - h_1} \right)^n, \quad (2)$$

cu $n > 0$, iar $0 < z < h_2$. De asemenea, $g_0 = 2\bar{L}u/p$, unde u este densitatea clădirilor în aria de 1 km^2 , iar \bar{L} – lungimea medie a clădirilor din vecinătatea traseului dintre antena de emisie și antena de recepție; z_1 – altitudinea antenei de recepție în m , z_2 – altitudinea antenei de emisie în m ; d – distanța între antena de emisie și antena de recepție în m ; $k = 2p/l$, unde l este lungimea de undă a semnalului radio în m ; h – înălțimea medie a clădirilor în m , determinată prin expresia: $h = h_2 - n(h_2 - h_1)/(n + 1)$; h_1 este înălțimea minimă a clădirilor, h_2 este înălțimea maximă a acestora, iar n – parametrul profilului polinomial al înălțimii clădirilor ($n = 0, 1$ dacă $h(z)$ este aproape de înălțimea maximă h_2 a clădirilor orașului, $n = 1$ dacă $h(z) = (h_1 + h_2)/2$ și $n = 5$ pentru $h(z)$ apropiat de înălțimea minimă h_1 a clădirilor).

Partea necoerentă a intensității semnalului radio se determină în funcție de modelul ales:

1. mono-disipare;
2. mono-disipare și mono-difracție pe colțurile și acoperișurile clădirilor;
3. dublu-disipare și dublu-difracție.

Pentru cazul mono-disipării, fără a lua în considerație fenomenul difracției, intensitatea semnalului radio poate fi calculată în conformitate cu formula:

$$\langle I_1(d) \rangle = \frac{\Gamma l_v}{8p [I^2 + (2pl_v g_0 f(z_1))^2] d^3} (z_2 - h). \quad (3)$$

În cazul mono-disipării și mono-difracției pe colțurile și acoperișurile clădirilor intensitatea semnalului radio poate fi calculată în modul următor:

$$\langle I_2(d) \rangle = \frac{\Gamma l_v}{8p [I^2 + (2pl_v g_0 f(z_1))^2] d^3} [(Id/4p^3) + (z_2 - h)^2]^{1/2}. \quad (4)$$

Pentru undele radio dublu-disipate și dublu-difRACTATE calculele intensității semnalului radio pot fi efectuate conform formulei [12]:

$$\langle I_3(d) \rangle = \frac{\Gamma^2 I^3 l_v^2}{24p^2 [I^2 + (2pl_v g_0 f(z_1))^2] [I^2 + (2pl_v g_0 f(z_2))^2] d^3}. \quad (5)$$

În formulele anterioare, Γ reprezintă coeficientul de reflexie (aici se ține cont de permitivitatea betonului $e \approx 6,49$ și conductibilitatea sa $\sigma \approx 1,37 \text{ m}\Omega/\text{m}$), iar l_v —distanța medie dintre balcoane (ferestre) în direcție verticală.

În formulele (3-5) $f(z_1)$ și $f(z_2)$ reprezintă funcțiile de distribuție cvasi-omogenă a clădirilor la altitudinea antenei de recepție și de emisie:

$$f(z_1) = H(h_1 - z_1)(h - z_1) + H(z_1 - h_1)H(h_2 - z_1) \frac{(h - z_1)^{n+1}}{(n+1)(h_2 - h_1)^n}, \quad (6)$$

$$f(z_2) = H(h_2 - z_2)(h - z_2) + H(z_2 - h_2)H(h_2 - z_2) \frac{(h - z_2)^{n+1}}{(n+1)(h_2 - h_1)^n}. \quad (7)$$

Funcția $H(x)$ este funcția-treaptă a lui Heaviside și este egală cu 1, dacă $x > 0$, sau egală cu 0, dacă $x < 0$.

2. Simularea numerică a propagării undelor radio în condiții urbane

Pentru a examina influența diferitor factori (fenomenele multiple de reflexie, împrăștiere, difracția, ca și parametrii clădirilor, inclusiv locul plasării antenelor de emisie și recepție) asupra atenuării intensității semnalelor radio în condiții urbane, a fost elaborat un program de calcul pe baza modelului parametric descris de relațiile (1– 7). Acest model permite calculul separat al părților coerente, necoerente și totale ale atenuării semnalului radio.

În conformitate cu [13, 14], intensitatea totală a câmpului de unde radio în regiunea receptorului este o superpoziție a semnalului coerent $\hat{a}l_{co}\tilde{n}$ și a semnalului necoerent $\hat{a}l_{neco}\tilde{n} = \hat{a}l_i\tilde{n}$ unde $i = 1, 2, 3$. Prin urmare:

$$\hat{a}l_{total}\tilde{n} = \hat{a}l_{co}\tilde{n} + \hat{a}l_{neco}\tilde{n}$$

Pentru reprezentarea grafică a dependenței atenuării semnalului radio în funcție de distanța dintre antena de emisie și cea de recepție sunt folosite mărimile $10\log\hat{a}l_{co}\tilde{n}$, $10\log\hat{a}l_{neco}\tilde{n}$ și $10\log\hat{a}l_{total}\tilde{n} = 10\log[\hat{a}l_{co}\tilde{n} + \hat{a}l_{neco}\tilde{n}]$, exprimate în dB.

Parametrii din formulele (1) – (7) au primit următoarele valori: $G = 0,8$; $\bar{L} = 40 \text{ m}$; $u = 140 \text{ km}^2$; $I = 0,5 \text{ m}$; $l_v = 2 \text{ m}$; $z_l = 2 \text{ m}$; $h_1 = 5 \text{ m}$; $h_2 = 30 \text{ m}$. În acest caz se obține: $h \approx 27,7 \text{ m}$ pentru $n = 0,1$; $h = 17,5 \text{ m}$ pentru $n = 1$; $h \approx 9,2 \text{ m}$ pentru $n = 5$.

a. Antena de emisie este plasată la înălțimea $z_2 = 40 \text{ m}$ sau $z_2 > h_2$

Dependențele de distanță ale semnalului coerent, $10\log\hat{a}l_{co}\hat{n}$ ale semnalului necoerent $10\log\hat{a}l_1\hat{n}$ în cadrul modelului monodisipare (MD), ale semnalului necoerent $10\log\hat{a}l_2\hat{n}$ în cadrul modelului monodisipării cu monodifracție (MDD) și a semnalului necoerent $10\log\hat{a}l_3\hat{n}$ conform modelului dubludisipării cu dubludifracție (DDD) sunt prezentate în fig. 1 (a-c) (curbele mai subțiri corespund componentelor coerente, iar cele mai groase – componentelor necoerente).

În fig. 1 se observă că partea coerentă a semnalului radio este atenuată exponențial, cu oscilații suprapuse, pînă la distanțe de ordinul a 500 – 600 m de la antena de emisie. La distanțe mai mari se constată o atenuare mai puternică a semnalului $\hat{a}l_{co}\hat{n}$ decât o atenuare polinomială, $\sim d^{-3}$, pînă la distanța de 5 000 m.

Referitor la componenta necoerentă se pot menționa următoarele:

a) pentru modelele MD și MDD rezultatele sunt practic identice, iar componenta coerentă a semnalului depășește partea necoerentă, pînă la distanțe de 1,6 - 2,2 km, ceea ce înseamnă că efectele mono-împrăștierii pe clădiri și monodifracției sunt importante doar pentru regiunile îndepărtate față de emițător. În regiunile din vecinătatea emițătorului (distanțe mai mici decât 1 km), doar undele directe și cele reflectate de stratul de clădiri, care formează componenta coerentă a câmpului total de unde, ajung la punctul de recepție;

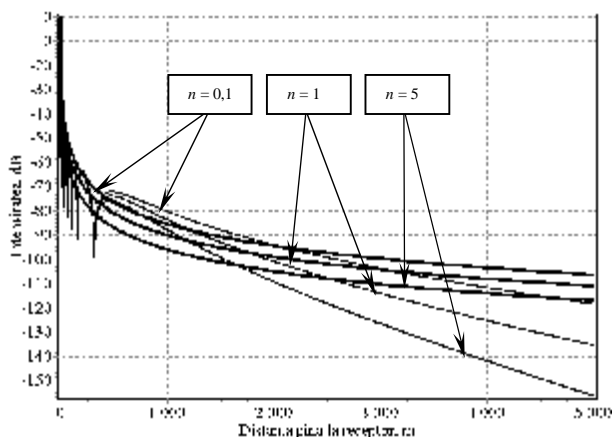


Fig. 1a. Componenta coerentă și necoerentă a semnalului radio pentru modelul MD, $z_2 > h_2$.

b) pentru modelul DDD (fig. 1c) componenta coerentă a semnalului radio depășește partea necoerentă pînă la distanța de 5 km pentru $n = 0,1$, pînă la distanța de 4,5 km pentru $n = 1$ și pînă la distanța de 3,2 km pentru $n = 5$. Totodată, valorile

intensității semnalului componentei necoerente pentru modelul DDD sunt mai mici cu aproape 20 dB față de valorile intensităților semnalului componentei necoerente în cadrul modelelor MD și MDD.

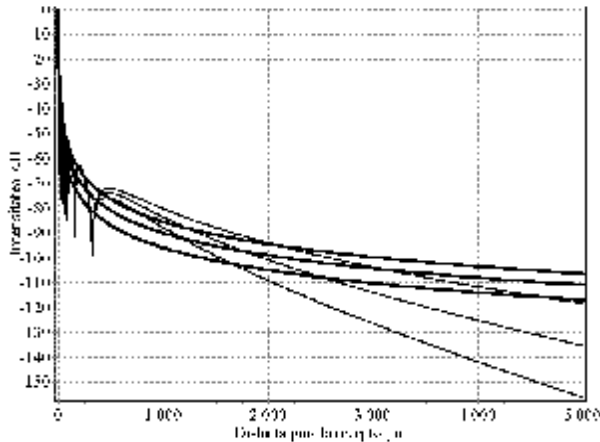


Fig. 1b. Componenta coerentă și necoerentă a semnalului radio pentru modelul MDD, $z_2 > h_2$.

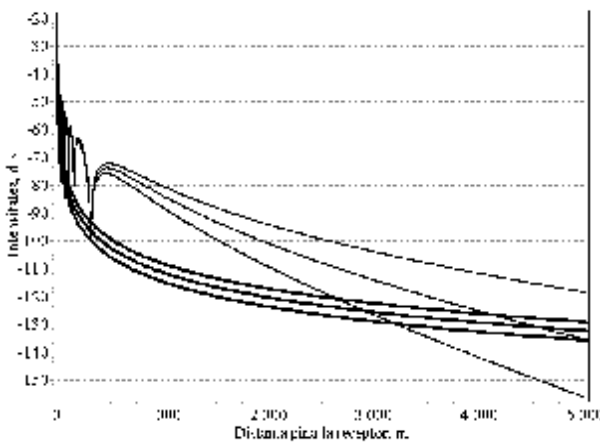


Fig. 1c. Componenta coerentă și necoerentă a semnalului radio pentru modelul DDD, $z_2 > h_2$.

b. Antena de emisie este plasată la înălțimea $z_2 = 30 \text{ m}$ sau $z_2 = h_2$

Rezultatele calculelor componentelor coerente în modelele MD, MDD și DDD sunt prezentate în fig. 2(a-c). Se observă că, în cazul componentelor coerente, apare o mică creștere (cu aprox. 2 dB) a intensității semnalului, care, ulterior, devine nulă pentru $d = 1 \text{ km}$. Pentru $d > 1 \text{ km}$ intensitatea componentelor coerente descrește mai mult în comparație cu cazul $z_2 > h_2$. De exemplu, pentru $d = 5 \text{ km}$ intensitatea semnalelor coerente se micșorează cu aprox. 5 dB pentru $n = 0.1$, cu aprox. 15 dB, pentru $n = 1$ și cu aprox. 20 dB pentru $n = 5$.

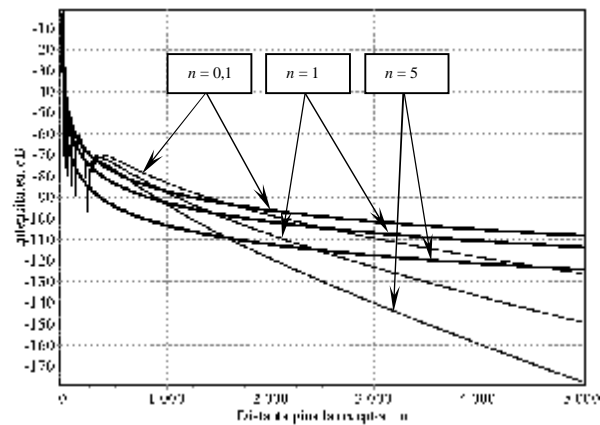


Fig. 2a. Componenta coerentă și necoerentă a semnalului radio pentru modelul MD, $z_2 = h_2$.

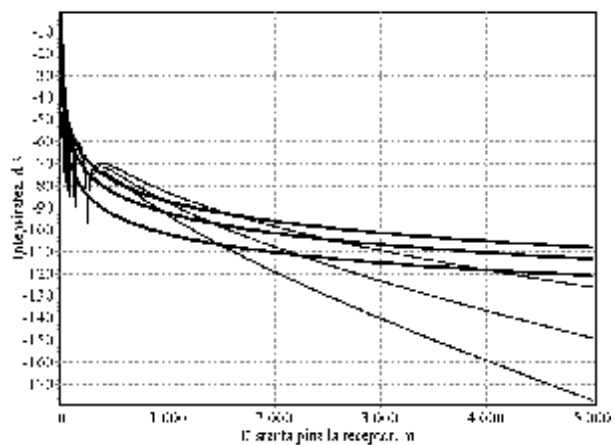


Fig. 2b. Componenta coerentă și necoerentă a semnalului radio pentru modelul MDD, $z_2 = h_2$.

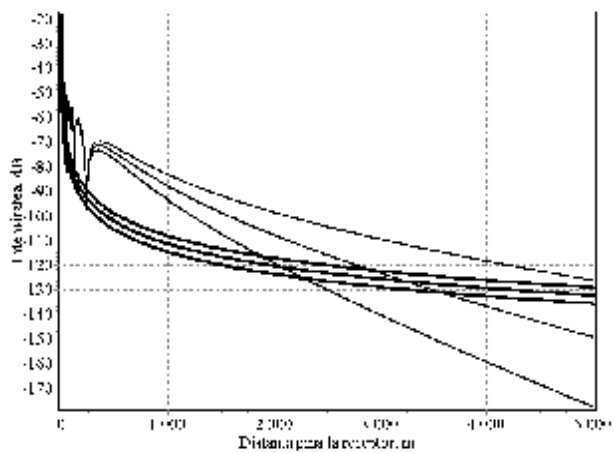


Fig. 2c. Componenta coerentă și necoerentă a semnalului radio pentru modelul DDD, $z_2 = h_2$.

Aceasta se explică prin faptul că, odată cu creșterea distanței de la antena de emisie, numărul obstacolelor pentru undele directe și cele reflectate de stratul de clădiri crește.

Referitor la componentele necoerente, în cazul plasării antenei de emisie la înălțimea z , ($z_2 \leq z \leq h_2$), se poate afirma că intensitatea lor rămâne practic aceeași ca și pentru cazul $z_2 > h_2$.

c. Antena de emisie este plasată la înălțimea $z_2 = 10 \text{ m}$ sau $z_2 < h_2$

În fig. 3 sunt prezentate rezultatele calculelor pentru componentele coerente, în modelele MDD și DDD. În acest caz, nu poate fi utilizat modelul MD (vezi formula (2)). În raport cu cazul $z_2 > h_2$, intensitatea componentelor coerente descrește mai mult. De exemplu, pentru $d = 5 \text{ km}$ intensitatea semnalelor coerente se micșorează cu aprox. 55 dB pentru $n = 0.1$; cu aprox. 50 dB când $n = 1$ și cu aprox. 40 dB pentru $n = 5$. În acest caz, rolul obstacolelor devine esențial.

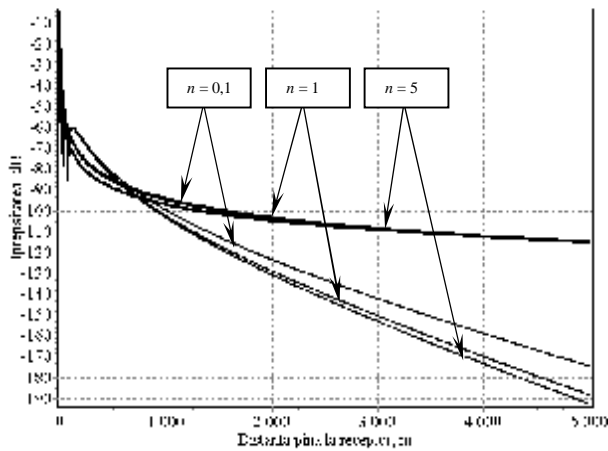


Fig. 3a. Componenta coerentă și necoerentă a semnalului radio pentru modelul MDD, $z_2 < h_2$.

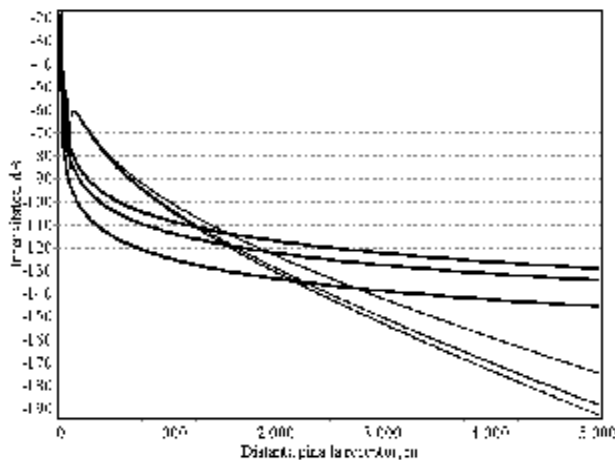


Fig. 3b. Componenta coerentă și necoerentă a semnalului radio pentru modelul DDD, $z_2 < h_2$.

Este necesar să menționăm că, în limitele modelului MDD, graficele componentelor necoerente cu $n = 0, 1, 1$ și 5 au aceleași valori. Altfel-zis, intensitatea semnalului la recepție nu depinde de profilul înălțimii clădirilor orașului. Pentru modelul DDD, este evidentă dependență intensității semnalului la recepție de profilul clădirilor.

Componenta necoerentă în modelul MDD devine mai mare în raport cu componenta coerentă pentru $d > 700m$; în modelul DDD - pentru $d > 1,5 km$ ($n = 0.1$), $d > 1,6 km$ ($n = 1$) și $d > 2,2 km$ ($n = 5$), iar pentru cazul $z_2 < h_2$, ponderea componentei necoerente în intensitatea totală a semnalului devine determinantă.

3. Evaluarea atenuării semnalului radio în mediu urban

În cele ce urmează este examinată posibilitatea utilizării acestui model parametric pentru evaluarea caracteristicilor de atenuare a semnalului radio în condiții urbane neregulate. În acest scop vor fi prezentate, comparativ, rezultatele evaluării teoretice a atenuării totale intensității semnalului radio cu rezultatele experimentale obținute în cadrul unor sesiuni de măsurători realizate în Holon (Israel), Kingston (Jamaica) și Bălți (Moldova).

Terenul în Holon și Bălți este relativ plan, în timp ce localitatea Kingston se caracterizează prin condiții cvasi-rurale. Noțiunea de regiune urbană medie este relevantă în cazul orașelor Holon și Bălți. Datele experimentale pentru orașele Kingston și Holon sunt prezentate în [12]. Pentru orașul Bălți, au fost efectuate măsurări ale intensității semnalului prin utilizarea unui emițător radio cu localizare fixă și un receptor mobil. În fiecare punct au fost efectuate 2-3 măsurători cu precizia de 2 dB.

Evaluarea teoretică a atenuării intensității totale a semnalului radio, în conformitate cu modelul parametric propus, a fost efectuată pentru datele prezentate în tabel, cu presupunerea că toate clădirile sunt din beton armat.

Parametrii modelului pentru evaluarea caracteristicilor de atenuare a semnalului radio

Orașul	ν, km^{-2}	\bar{L}, m	z_1, m	z_2, m	h_1, m	h_2, m	h, m	l_v, m	G	λ, m	n
Holon	258	30	6	30	5	21	13	1,85	0,8	0,16	1
Kingston	213	32	11,2	26	5	15	10	1,85	0,8	0,16	1
Bălți	190	30	3	33	5	19	12	1,85	0,8	0,2	1

Datele experimentale și rezultatele evaluării teoretice a intensității totale a semnalului radio $10 \log \bar{a}l_{total} \bar{n} = 10 \log [\bar{a}l_{co} \bar{n} + \bar{a}l_{neco} \bar{n}]$ sunt prezentate în figurile 4–6. În aceste figuri, datele experimentale sînt indicate prin puncte, iar funcția analitică – prin linie continuă. Δ_{err} reprezintă deviația între două mulțimi de puncte:

$$\Delta_{err} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - r_i)^2}, \quad (8)$$

unde N este dimensiunea mulțimii, R_i - mărimea măsurată și r_i - valoarea teoretică, pentru $d = const.$

În fig. 4(a, b) sunt prezentate, comparativ, rezultatele experimentale obținute în Holon, și rezultatele teoretice, calculate în conformitate cu modelul parametric și parametrul polinomial al profilului înălțimii clădirilor, $n = 1$. În cazul modelului MDD avem $\Delta_{err} = 18 \text{ dB}$, iar în cazul modelului DDD - $\Delta_{err} = 14 \text{ dB}$.

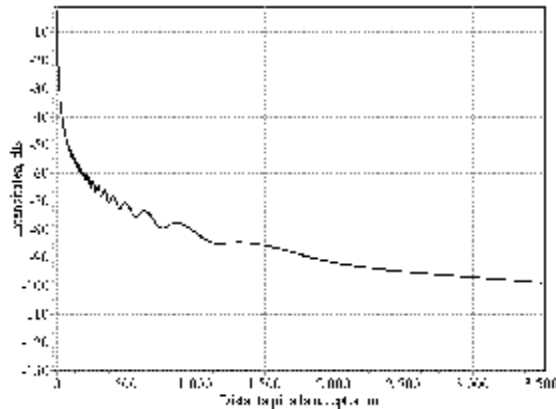


Fig. 4a. Rezultatele experimentale și teoretice pentru modelul MDD (Holon), $\Delta_{err} = 18 \text{ dB}$.

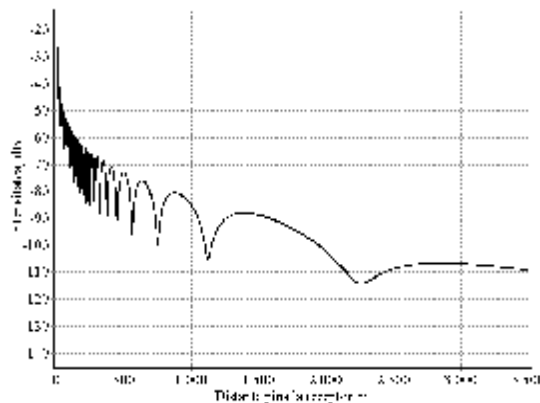


Fig. 4b. Rezultatele experimentale și teoretice pentru modelul DDD (Holon), $\Delta_{err} = 14 \text{ dB}$.

În fig. 5(a, b) sunt prezentate rezultatele datelor experimentale obținute la Kingston, și rezultatele teoretice, calculate pentru parametrul profilului polinomial al înălțimii clădirilor cu $n = 1$. În cazul modelului MDD avem $\Delta_{err} = 16 \text{ dB}$, iar în cazul modelului DDD - $\Delta_{err} = 11 \text{ dB}$. În fig. 5, prin puncte, sunt prezentate datele experimentale obținute atunci când între antena de emisie și antena de recepție sînt obstacole, iar prin pătrate sunt prezentate datele experimentale obținute în condițiile vizibilității directe între cele două antene. Rezultatele prezentate demonstrează o diferență practic nulă dintre datele experimentale obținute în condiții diferite.

În fig. 6 sunt prezentate comparativ datele experimentale obținute la Bălți și rezultatele teoretice calculate pentru parametrul profilului polinomial al înălțimii

clădirilor $n = 1$. În limitele modelului MDD, $\Delta_{err} = 8,8 \text{ dB}$, iar în cazul modelului DDD, $\Delta_{err} = 8,4 \text{ dB}$. În acest caz, datele experimentale au fost culese nediferențiat, în prezența, respectiv absența, obstacolelor între antena de emisie și cea de recepție.

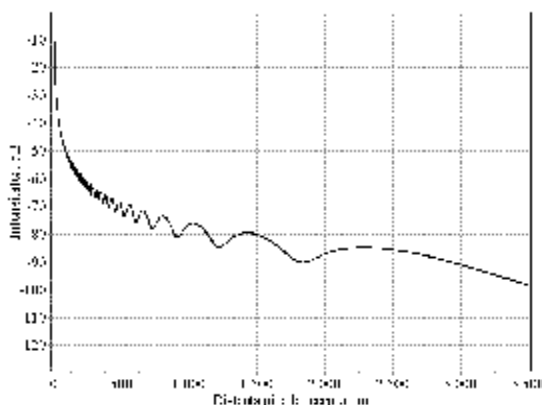


Fig. 5a. Rezultatele experimentale și teoretice pentru modelul MDD (Kingston), $\Delta_{err} = 16 \text{ dB}$.

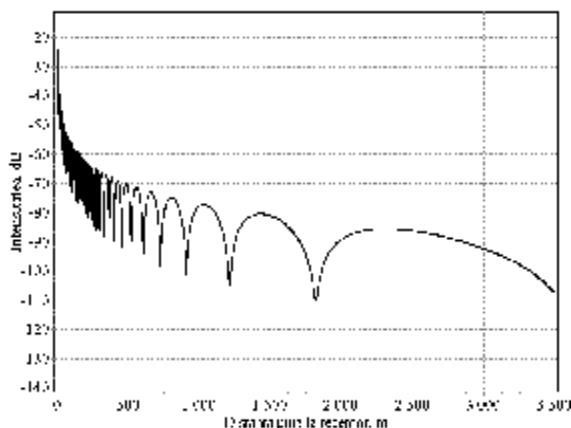


Fig. 5b. Rezultatele experimentale și teoretice pentru modelul DDD (Kingston), $\Delta_{err} = 11 \text{ dB}$.

Mărimea Δ_{err} obținută poate fi justificată prin faptul că, în modelul teoretic, nu se ia în considerație profilul terenului. O convergență mai mare între rezultatele teoretice și datele experimentale poate fi obținută, luându-se în considerație relieful real al Pământului. Astfel, valorile Δ_{err} ar putea mai mici cu $3 - 6 \text{ dB}$.

Rezultatele prezentate în fig. 4–6 demonstrează că, în mediile urbane medii și rurale, modelul parametric propus permite o interpretare satisfăcătoare a mărimii intensității semnalului radio. O precizie mai bună se obține în cazul utilizării modelului DDD.

O problemă serioasă apare în situația când se testează modelul parametric în mediul urban complex, cu terenuri și diferențe semnificative de înălțime între puncte relativ apropiate. În această situație, precizia calculului teoretic este redusă. Mai mult decât atât, terenul complex poate afecta distanța vizibilității directe și, în aceste cazuri, trebuie luat în considerație fenomenul difracției. Pentru a înlătura

aceste dificultăți, trebuie determinate înălțimile clădirilor și înălțimile reale ale antenelor de emisie și de recepție, utilizându-se hărțile topografice. După hărți se determină densitatea, lungimea medie și înălțimea medie a clădirilor.

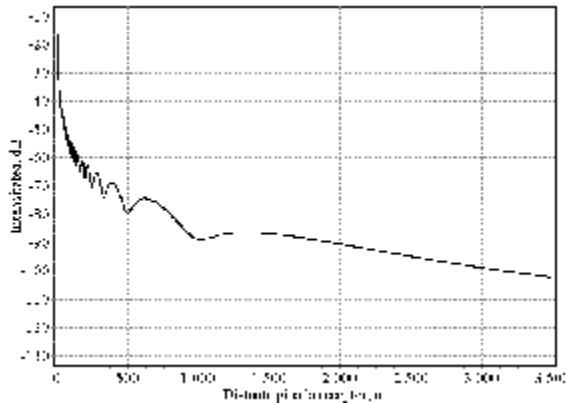


Fig. 6a. Rezultatele experimentale și teoretice pentru modelul MDD (Bălți), $\Delta_{err} = 8,8$ dB.

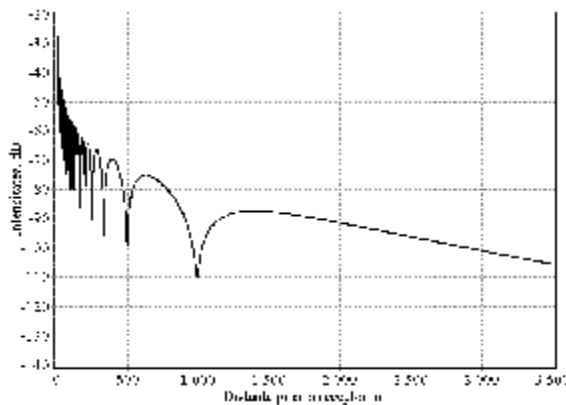


Fig. 6b. Rezultatele experimentale și teoretice pentru modelul DDD (Bălți), $\Delta_{err} = 8,4$ dB.

Avantajul substanțial al modelului parametric prezentat constă în relativa lui simplitate și precizia mai mare în comparație cu modelul Hata [2].

Bibliografie

1. Sato, K., Manabe, T., Polivka, J., Ihara, T., Kasashima, Y., Yamaki, K., *Measurement of the complex refractive index of concrete at 57.5 GHz*, IEEE Trans. Anten. Propagat., Vol. 44, No. 1, 1996, pp. 35–39.
2. Parsons, J. D., *The Mobile Radio Propagation*, New York, Halsted Press, 1992.
3. Lin, S. H., *Statistical behaviour of a fading signal*, Bell Syst. Tech. J., Vol. 50, No. 10, 1971, pp. 3211–3270.

4. Kozono, Sh. and Watanabe, K., *Influence of environmental buildings on UHF land mobile radio propagation*, IEEE Trans. Communic., Vol. 25, No. 10, 1977, pp. 1133–1143.
5. Black, D. M., Reudink, D. O., *Some characteristics of mobile radio propagation at 836 MHz in the Philadelphia area*, IEEE Trans. Vehicular Technol., Vol.21, No. 2, 1972, pp. 45–51.
6. Reudnik, D. O., *Comparison of radio transmission at X-band frequencies in suburban and urban areas*, IEEE Trans. Anten. Propagat., Vol. 20, No. 4, 1972, pp. 470–473.
7. Cox, D. C., Leck, R. P., *Distribution of multipath delay spread and average excess delay for 910-MHz urban mobile radio paths*, IEEE Trans. Anten. Propagat., Vol. 23, No. 2, 1975, pp. 206–213.
8. Zander, J., *A stochastic model of urban UHF radio channel*, IEEE Trans. Vehicular Technol., Vol. 30, No. 1, 1981, pp. 145–155.
9. Charnotskii, M. I., Tatarskii, V. I., *Tilt-invariant theory of rough-surface scattering: I*, Waves in Random Media, Vol. 5, No. 4, 1995, pp. 361–380.
10. Tatarskii, V. I., Charnotskii, M. I., *On the universal behaviour of scattering from a rough surface from small grazing angles*, IEEE Trans. Anten. Propagat., Vol. 46, No. 1, 1995, pp. 67–72.
11. Blaunstein, N. et al., *Prediction of loss characteristics in urban environments with nonregularly distributed buildings placed at the rough terrain*, Proc. of International URS IEEE Conference, Athens, Greece, May 14–18, 1998, pp.121–124.
12. Blaunstein, N., *Radio propagation in cellular networks*, Boston-London, Artech House, 1999.
13. Al'pert, Ya. L., V. L. Ginsburg, Feinberg, E. L., *Radiowave Propagation*, Moscow State Printing House for Technical-Theoretical Literature, 1953.
14. Voronovich, A. G., *Wave Scattering from Rough Surfaces*, Berlin, Springer-Verlag, 1994.

A PARAMETRIC MODEL OF RADIO-WAVE PROPAGATION IN URBAN ENVIRONMENT

Eugeniu Plohotniuc

(State University „Alecus Russo”, Republic of Moldova)

The article deals with a parametric model of calculation of radio signal intensity in VHF-UHF frequency bands in urban environment propagation. The results obtained in this model are verified by comparison with experimental data obtained by a series of measurements in the cities of Holon (Israel), Kingston (Jamaica), and Bălți (Moldova). The theoretic model allows to determine the intensity of the radio signal at reception with 8-18 dB precision. The obtained results demonstrate that, in urban and rural conditions, the suggested model leads to results that correspond to measurements.

Prezentat la redacție la 14 februarie 2006