

Башкиров О.М. к.т.н., доц.,
Кадет Н.П.,
Шишацький А.В.

МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ МОБІЛЬНОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ В МІСЬКИХ УМОВАХ

Національний авіаційний університет

kadet-radovka@mail.ru

Розглядаються особливості поширення сигналів систем мобільного зв'язку в умовах висотних будівель щільних міських забудов з метою синтезу універсальної моделі та дослідження ефективності мобільного радіозв'язку різних стандартів.

Ключові слова: мобільний радіозв'язок, радіохвилі, моделювання, моделі функціонування, середовище розповсюдження

Вступ

Розвиток останніх подій на Україні показує необхідність забезпечення стійкого зв'язку під час надзвичайних ситуацій або проведення бойових операцій в містах. З цією метою може використовуватися мобільний радіозв'язок різних стандартів, наприклад, GSM, CDMA, TETRA, WiMAX та інші, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Саме тому в останній час спостерігається підвищення інтересу до моделювання роботи систем

мобільного (стільникового) зв'язку для оптимізації структури системи та вибору найбільш доцільних режимів її роботи. Найбільш важливими складовими елементами в таких системах є базова станція (БС), яка встановлюється вище рівня оточуючих будівель, ретранслятор, а також абонентська станція (АС), що частіше за все розташовується на відносно невеликій висоті (0,5-1,5 м). Це відповідає умовам, коли АС знаходиться в руках людини або розташована в автомобілі (рис. 1).

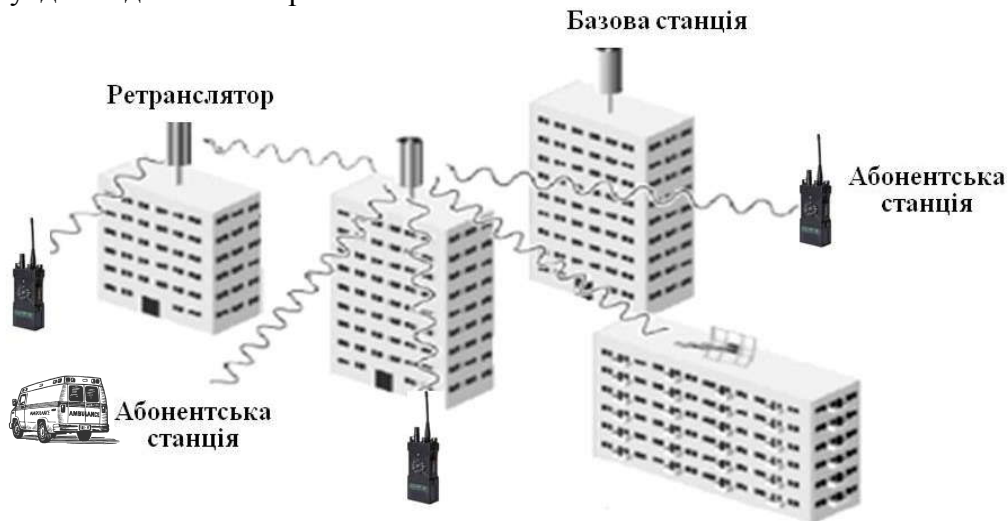


Рис. 1. Загальна схема мобільного радіозв'язку у місті

Моделі, що відомі, враховують поширення радіосигналів у вільному просторі [1-3], всередині будинків [4], різний тип оточуючого ландшафту [5], умови лісової місцевості [6]. Проте вони не мо-

жуть на практиці застосовуватися для моделювання поширення сигналів систем мобільного зв'язку в умовах щільних міських забудов та висотних будівель внаслідок появи крім основного сигналу БС

додаткових, які показані на рис. 2, що виникають завдяки певним умовам поширення і впливу особливих факторів:

- сигнали 1 – це багатократне відбиття (дифракція) сигналу БС від будівель або так зване багатопроміневе перевипромінювання. Цей процес залежить від віддаленості АС до БС, висоти будинків, що оточують АС, та відстані між ними;

- сигнал 2 – результат рефракції випромінюваного сигналу БС на краях будинків та кромках дахів. Зміна напрямку

поширення сигналу залежить від взаємного розташування антени БС, даху будинку, антени АС з врахуванням висоти будинку та місця розташування мобільної станції між будівлями;

- сигнал 3 – послаблення сигналу при проходженні через залізобетонні конструкції будівель. Ступінь послаблення буде залежати від кількості поверхів на шляху сигналу між БС і АС, яка визначається віддаленістю АС та різницею висот антен БС і АС.

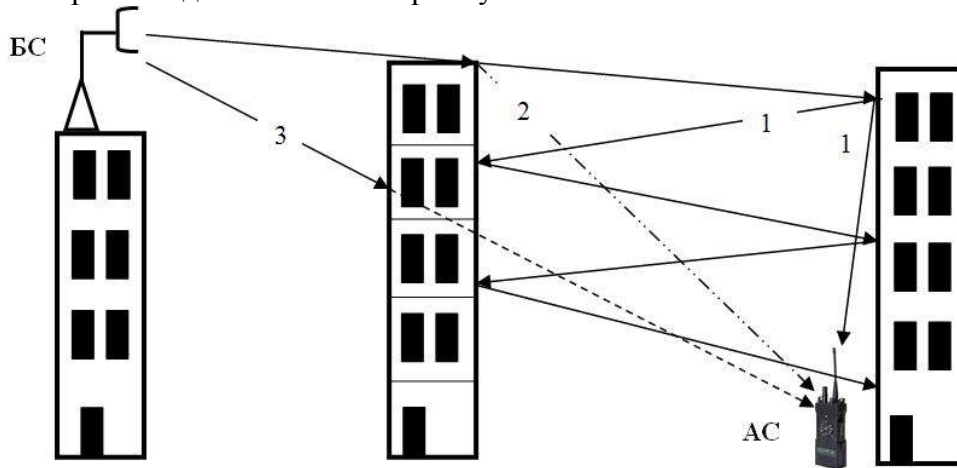


Рис. 2. Схема поширення радіохвиль серед будинків

Найбільш складною проблемою при проектуванні стільникових мереж мобільного радіозв'язку є розрахунок потужності сигналу або її втрат на певній відстані АС від БС. Проблемність математичного моделювання роботи систем мобільного зв'язку в міських умовах пояснюється саме неможливістю прямого аналітичного розрахунку складного сигналу, що отримується АС в різних конкретних умовах функціонування систем мобільного зв'язку та розмаїття їх структур і параметрів.

В таких умовах відомі математичні моделі створюють на основі обробки реальних статистичних даних, що отримані в ході експериментальних досліджень електромагнітного поля. Наприклад, частіше за все використовуються моделі Окамури – Хати, Олсбрука – Парсонса, Кся – Бертоні, Лі [7-12].

Саме тому актуальним стає завдання порівняльного аналізу відомих статисти-

чних моделей поширення хвиль мобільного радіозв'язку та визначення найбільш прийнятної або доцільної для побудови узагальненої моделі функціонування системи мобільного зв'язку спеціального призначення для забезпечення функціонування підрозділів силових відомств в умовах надзвичайних ситуацій або бойових дій.

Мета статті полягає у синтезі узагальненої моделі функціонування систем мобільного радіозв'язку в міських умовах із щільною забудовою та серед висотних будинків. Завданнями публікації є:

- узагальнення результатів моделювання функціонування систем мобільного зв'язку в умовах міських висотних забудов із щільною забудовою;

- пошук доцільних керованих параметрів для визначення шляхів підвищення ефективності роботи подібних систем спеціального використання.

Для побудови моделей визначальними є такі параметри (рис. 3): частота випромінювання сигналу базової станції, МГц; висота h_o установки антени БС відносно поверхні землі (у випадку встановлення базової станції на даху будівлі – висота будинку), м; ефективна висота h_b антени БС відносно поверхні землі з врахуванням власної висоти антени відносно рівня її установки, м; різниця висот Δh_b розташування антени базової станції і середнього рівня дахів оточуючих будівель,

$$L = 69,55 + 26 \lg f - 13,82 \lg h_B + k (44,9 - 6,55 \lg h_B) \lg R - a(h_M),$$

де k – поправочний коефіцієнт, що враховує протяжність траси;

$a(h_M)$ – поправочний коефіцієнт, що залежить від висоти розташування антени мобільної h_M .

м; висота h_M антени мобільної абонентської станції відносно поверхні землі, м; відстань R від БС до АС, км; ширина ω вулиці, м; відстань d між кварталами (будівлями), м; відстань x по горизонталі між АС і будівлею, на кромці даху якої здійснюється рефракція хвилі, м.

У рамках моделі Окамури–Хати втрати потужності L для випадку квазіплоскої місцевості розраховуються за формулою [7]:

Для великого міста при частоті випромінювання БС $f > 400$ МГц коефіцієнт

$$a(h_M) \text{ визначається виразом [9]} \\ a(h_M) = 3,2 (\lg 11,75 h_M)^2 - 4,97.$$

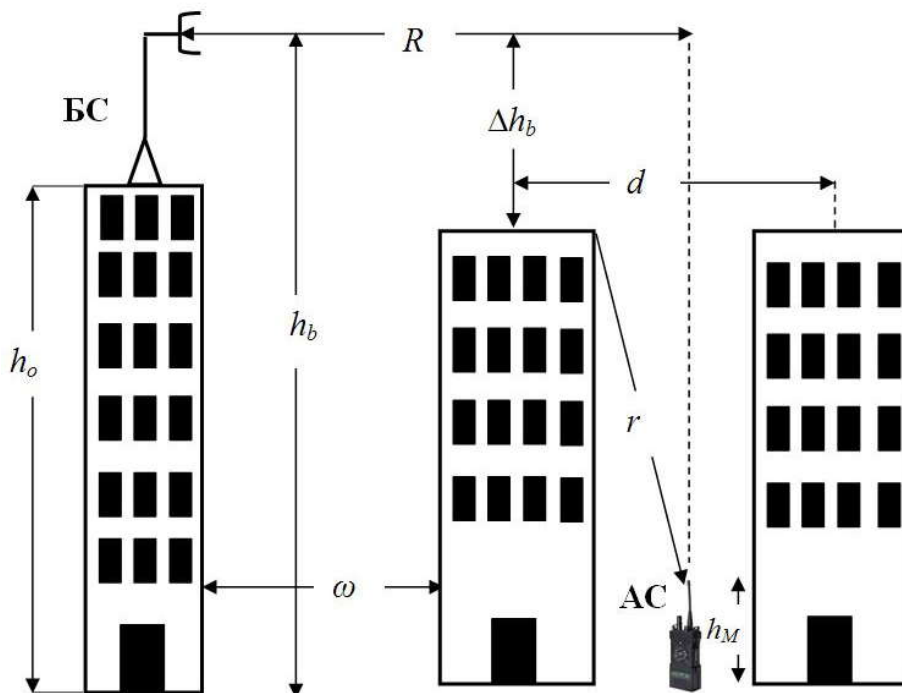


Рис. 3. Схема прийому сигналів системи мобільного зв'язку

Визначимо параметри системи мобільного зв'язку для моделювання її роботи. Початковими вихідними даними для розрахунку втрат потужності вважатиме такі: система мобільного зв'язку відповідає стандарту GSM 900, частоти передачі в залежності від каналу зв'язку знаходяться в діапазоні 862 ÷ 960 МГц, для проведення розрахунків будемо вва-

жати, що частота f випромінювання БС дорівнює 900 МГц.

Припустимо, що антени базових станцій в межах міста розміщені на дахах будівель висотою близько 50 м, а антена абонентської станції для забезпечення стійкого зв'язку в прилеглих районах піднята ще на 10 м вище рівня даху будівель. Отже, для моделювання середню висоту підняття антени h_b будемо вважати рів-

ною 60 м. Абонентські мобільні станції розміщуються частіше за все ззовні будинків на висоті приблизно 1,5 м. Для отримання статистичних даних відстань R від БС до АС змінювалася в межах $50 \text{ м} \div 1,5 \text{ км}$.

Якщо протяжність траси мала (відстань R менше 20 км), то коефіцієнт k можна вважати рівним 1, тоді розрахунок втрат L потужності сигналу в моделі Окамура – Хати при $R = 0,1 \div 1,5 \text{ км}$ дає результат (78,6 ÷ 117,7) дБ.

По отриманих Окамурой графіках Дж. Олсбруком і Дж. Парсонсом розроблена модель, яка дозволяє передбачити втрати передачі L по формулах, приведених в [8],

$$L = L_F + ((L_P - L_F)^2 + L_D^2)^{1/2} + L_B + \gamma \text{ дБ,}$$
 де L_P – втрати поширення над плоскою землею (при необхідності з врахуванням атмосферної рефракції);

L_F – затухання сигналу при передачі у вільному просторі;

L_D – дифракційні втрати;

L_B – втрати, спричинені наявністю міської забудови;

γ – коректувальний коефіцієнт, що залежить від частоти сигналу БС.

Втрати потужності за рахунок дифракції розраховуються при припущенні відсутності будь-яких забудов, а вплив міської забудови враховується додатковим показником втрат, тому показник дифракційних втрат враховує тільки характер рельєфу місцевості (сферичність землі, наявність нерівностей, пагористості і т.п.). В зв'язку з цим при допущенні про квазіплоску місцевість дифракційні втрати можна вважати рівними 0.

$$L = -10 \lg \left[\frac{\lambda}{4\pi \cdot R} \right]^2 - 10 \lg \left[\frac{\lambda}{2\pi^2 \cdot r} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right)^2 \right] - 10 \lg \left[2,35^2 \left(\frac{\Delta h_b}{R} \sqrt{\frac{d}{\lambda}} \right)^{1,8} \right] \text{ дБ,}$$

де r – відстань м від кромки даху будинку, на якому здійснюється дифракція хвилі сигналу;

θ – коефіцієнт, що враховує кут нахилу хвилі до стін будівлі;

d – середній інтервал між кварталами.

У більшості випадків втрати L_P можуть бути вичислені по формулі, відповідній квадратичній формулі Веденського [8]:

$$L_P = 120 - 20 \lg h_M - 20 \lg h_b + 40 \lg R \text{ дБ.}$$

Затухання сигналу L_F у вільному просторі розраховуються таким чином:

$$L_F = 32,45 + 20 \lg f + 20 \lg R \text{ дБ.}$$

Втрати потужності L_B сигналу в умовах міської забудови враховуються згідно формули

$$L_B = 20 \lg [(h_0 - h_M) / (\omega \lambda)^{1/2}] + 16 \text{ дБ,}$$

де λ – довжина хвилі сигналу, м, яка розраховується згідно формули $\lambda = C / f$, $C = 3 \cdot 10^8 \text{ м/сек}$ – швидкість світла.

Коректувальний коефіцієнт γ залежить від частоти випромінювання сигналу БС і для частот $f \leq 200 \text{ МГц}$ дорівнює 0, а для частот БС $f > 200 \text{ МГц}$ може бути знайдений графічним методом завдяки спеціальному графіку, наведеному у [8].

Більш високу точність розрахунку забезпечує модель Кся – Бертоні [9,11], яка враховує додаткові параметри та дозволяє оцінити середній рівень втрат і в тих випадках, коли антена БС розташована на рівні дахів або нижче рівня дахів. Модель побудована на основі рівнянь хвилевої оптики і розглядає різні механізми поширення радіохвиль в умовах міської забудови: поширення у вільному просторі, рефракцію на кромці даху будівлі та дифракцію від стін сусідніх будівель, а також враховує кут нахилу хвилі відносно стін будівлі. Проте вона не враховує факту надходження послабленого сигналу при проходженні крізь стіни будівель. Згідно цієї моделі втрати потужності L можна оцінити, користуючись такою залежністю:

Нехай різниця висот Δh_b дорівнює $\Delta h_b = h_b - h_0 = 10 \text{ м}$.

Коефіцієнт θ розраховується таким чином:

$$\theta = \text{tg} (x / \Delta h_M),$$

де x – відстань в метрах по горизонталі між АС і кромкою даху, на якому здійснюється дифракція хвилі;

Δh_M – різниця висот середнього рівня дахів оточуючих будинків і антени АС в м, тобто для визначених вище умов вона дорівнює

$$\Delta h_m = h_0 - h_M = 48,5 \text{ м.}$$

Припустимо, що середня відстань x дорівнює $x = \omega / 2$, де ω – середня ширина вулиць.

Відстань r розраховується таким чином:

$$L = -10 \lg \left[\frac{0,33}{4\pi (0,1 \div 1,5)} \right]^2 - 10 \lg \left[\frac{0,33}{2\pi^2 49,2} \left(\frac{1}{80,6} - \frac{1}{2\pi + 80,6} \right)^2 \right] - 10 \lg \left[2,35^2 \left(\frac{10}{(0,1 \div 1,5)} \sqrt{\frac{40}{0,33}} \right)^{1,8} \right], \text{ дБ}$$

будуть дорівнювати 61,1 ÷ 96,4 дБ. Недоліком моделі є жорсткі обмеження на дальність моделювання, спрощенні умови застосування, а також припущення, що знижують адекватність і точність моделі.

Для подібних розрахунків великий практичний інтерес представляє також статистична модель Лі, що складається з двох частин. Перша частина використовується для прогнозування втрат при поширенні радіохвиль над відносно плоскою поверхнею, без урахування особливостей рельєфу. У другій частині за основу береться результат, отриманий в першій, і здійснюється уточнення прогнозу. Якщо існує пряма видимість між приймачем і передавачем, то враховується вплив відбитих радіохвиль. Якщо умова прямої видимості не задовольняється, а уздовж шляху поширення сигналу зустрічаються перешкоди, що знаходяться на відстані r_0 від БС, то додатково моделюється їх вплив на затухання та дифракцію радіохвиль. З урахуванням формули розрахунку потужності [10] розрахунок основної частини втрат при поширенні сигналу може бути проведений за формулою

$$L = -10 \lg \left(\frac{P_{r0}}{P_r} \right) (R/r_0)^{-\gamma} (f/f_0)^{-n} \text{ дБ,}$$

де P_r – потужність сигналу на відстані R від передавача;

$$r = \Delta h_m^2 + x^2.$$

В місті з висотою будівель біля 50 м, шириною вулиць у 15 м та інтервалом d між кварталами (будівлями) у 40 м визначимо такі додаткові вихідні параметри: висота h_M дорівнює 1,5 м; різниця висот Δh_M дорівнює 48,5 м; відстань R від БС до АС змінюється в межах від 0,1 км до 1,5 км; частота f дорівнює 900 МГц. За таких умов втрати L потужності сигналу, що обчислюються за формулою [9]

P_{r0} – потужність сигналу в точці перетину лінії його поширення з перешкодою на відстані r_0 від передавача;

γ – параметр, що враховує міру кривизни поверхні;

f/f_0 – девіація частоти сигналу в результаті дифракції;

n – коефіцієнт ступеню частотної залежності;

a_0 – поправочний коефіцієнт, що залежить від висоти установки антен, потужності передавача, коефіцієнтів підсилення передавальної БС і приймальної антени АС.

Модель Лі може бути застосована для аналізу більш загального випадку, коли радіохвилі поширюються в різних умовах. В цьому випадку мають бути відомі коефіцієнти кривизни поверхонь γ і межі областей з відповідними коефіцієнтами кривизни. Модель дозволяє визначити потужність сигналу, що приймається, за формулою

$$P = A - B \lg R - n \lg \left[\left(\frac{f}{f_0} \right) 900 \right] + 10 \lg a \text{ дБ,}$$

де параметри A і B , що залежать від характеристик оточуючого середовища, були визначені статистично по вимірах у декількох містах.

Для великих міст ці параметри дорівнюють $A = 55 \div 80$, $B = 30 \div 43$. Множник n приймає такі значення: $n = 2$ для передмість і для діапазону частот $f < 450$ МГц, $n = 3$ для міст і для частоти $f > 450$ МГц. Параметр a обчислюється за формулою:

$$a = \dots$$

де $P_{\text{прд}}$ – потужність передавача БС, Вт;

$G_{\text{прд}}$, $G_{\text{прм}}$ – коефіцієнти підсилення антен;

коефіцієнт m дорівнює 1 при $h_M < 3$ м або $m = 2$ при $h_M > 10$ м.

Результати аналізу моделей поширення радіохвиль наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Порівняння моделей поширення сигналів

Модель	Рівні сигналу, дБ/м	Відповідність реальному рельєфу	Вплив дифракції	Вплив відбиття	Втрати в атмосфері	Втрати на місцевості	Врахування типу місцевості
Окамури-Хати	-40 / -60	Середня	Ні	Ні	Ні	Ні	Так
Олсбрука-Парсонса		Добра	Так	Так	Так	Ні	Так
Кся - Бертоні		Низка	Так	Так	Ні		
Лі	-40 / -100	Низка	Ні	Ні	Так	Так	Так

На рис. 4 представлені криві залежності втрат L від відстані R для різних моделей поширення сигналу.

Для порівняння моделей між собою визначимо критерій оцінки їх якості. Виберемо за такий якісний критерій максимальний рівень втрат сигналу. Це обґрунтовується тим, що при прогнозах краще мати найгірший варіант оцінок потужнос-

ті отриманого сигналу. Аналіз запропонованих моделей показує, що серед них неможливо визначити найкращу за критерієм найбільших втрат (песимістичної оцінки), кожна з них показує найкращий результат тільки у визначених межах при заданих умовах, для інших умов кращою буде інша модель.

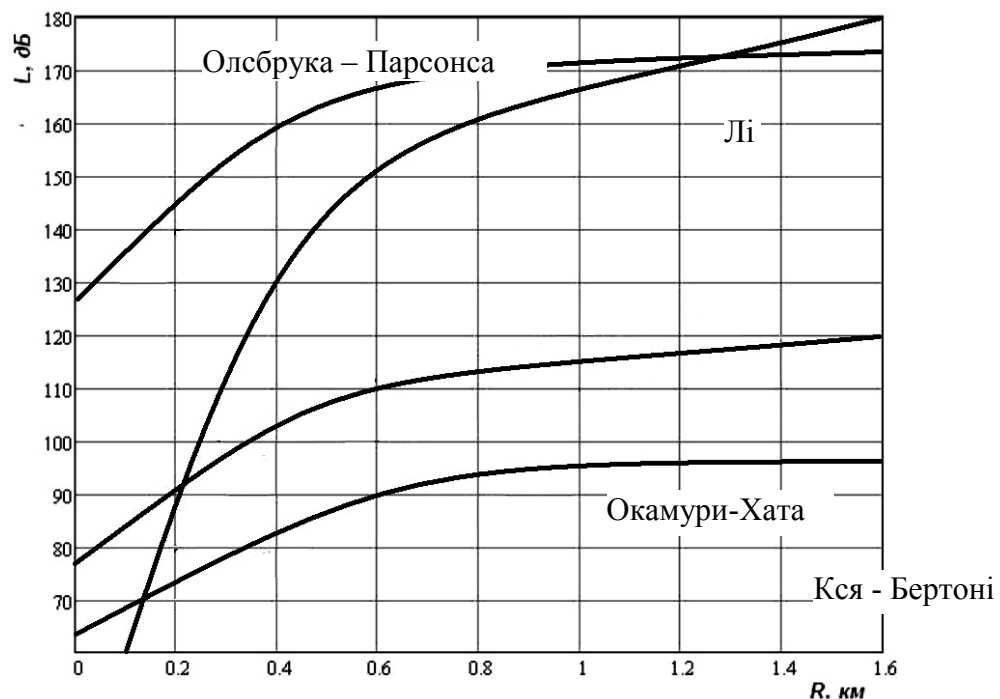


Рис. 4. Залежність втрат потужності для різних моделей поширення сигналу

Висновки

1. Досвід спроб моделювання систем мобільного радіозв'язку демонструє відсутність однієї універсальної моделі, що була б найкращою для різних умов функціонування системи мобільного зв'язку, кожна з відомих моделей є кращою для своїх умов функціонування та найбільш адекватною для певних параметрів системи мобільного зв'язку.

2. Всі моделі демонструють залежність втрат потужності сигналу від загальних параметрів: відстані R від БС до АС, частоти f випромінюваного БС сигналу, висот розташування антен БС і АС.

3. Для систем мобільного зв'язку військового призначення може розглядатися варіант розміщення базових станцій не на стаціонарних об'єктах, а на тимчасових пересувних засобах, наприклад, безпілотних літальних апаратах, в такому випадку керованим параметром стає відстань R .

4. Надані моделі не враховують певних параметрів, що є важливими для функціонування подібних систем, наприклад, такого керованого параметру як потужність випромінюваного сигналу, а також активні параметри зовнішнього середовища – рівень шумів і такий важливий параметр для умов бойових дій, як рівень завод.

Таким чином, постає актуальна наукова задача розробки комплексної комбінованої моделі розповсюдження сигналів систем мобільного зв'язку в умовах міської забудови, що дозволить отримувати припустимі за вірогідністю результати моделювання для різних умов функціонування та різних вихідних даних, а також враховувала певні керовані параметри систем мобільного зв'язку військового призначення.

Список літератури

1. Черенкова Е.Л., Чернышев О.В. Распространение радиоволн. М.: Радио и связь, 1984. 272 с.

2. Милютин Е.Р., Василенко Г.О., Си-

верс М.А. и др. Методы расчета поля в системах связи дециметрового диапазона. СПб., 2003.

3. Бабков В.Ю. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование. СПб., 2000.

4. Бородулин А.В., Минин А.В., Петров А.С. Модель радиоканала мобильной связи / Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, №6 (136), 2009, Ч. 1. С. 172-178.

5. Javornik T., Kandus G., Hrovat A., Ozimek I. Comparison of WiMAX coverage at 450MHz and 3.5GHz, SoftCOM 2006, 14th International Conference on Software, Telecommunications & Computer Networks, Split, Dubrovnik, Hrvatska, sep. 2006. – P. 71–75.

6. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1983.

7. Communications Magazine. 1994. November. Okumura Y. et al. Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service // Review of the Electr. Commun. Lab. – 1968. – vol. 6. – p. 825-873.

8. Панченко В.Е., Ерохин Г.А., Гайнутдинов Т.А. и др. Сочетание статистических и детерминистских методов расчета радиополя в городских условиях // Электросвязь. 1998. – №4. – С. 31-33.

9. Honcharenko W., Bertoni H.L. Transmission and reflection characteristics at concrete block walls in the UHF bands proposed for future PCS. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1994, v. 42, pp. 232-239.

10. Гришаева А.Д. Модели распространения радиоволн в системах сотовой связи. Донбас-2020: перспективы розвитку очима молодих вчених: Матеріали VI науково-практичної конференції, м. Донецьк, 24-26 квітня 2012 р. – Донецьк, ДонНТУ, 2012. – С. 565-568.

11. Милютин Е.Р., Василенко Г.О., Сиверс М.А. и др. Методы расчета поля в системах связи дециметрового диапазона. – СПб.: Триада. – 2003. – 159 с.

Статтю подано до редакції 20.12.2014