

М.М. Климаш, Ю.Я. Вакула, Самер Аввад  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра телекомунікацій

## МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УМОВ ПОШИРЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ НА ЯКІСТЬ ЗВ'ЯЗКУ В МОБІЛЬНИХ СИСТЕМАХ СТАНДАРТУ CDMA

© Климаш М.М., Вакула Ю.Я., Самер Аввад, 2008

**Проаналізовано проблеми моделювання систем CDMA та досліджено вплив умов поширення радіосигналу на якість зв'язку в коміркових мережах. На основі цих досліджень запропоновано метод розрахунку покриття території для надання послуг мобільного зв'язку третього покоління на базі стандартів CDMA.**

**Simulation problems of design of the systems of CDMA are given and research of influence of terms of distribution of radio signal is carried out. On the basis of these researches the method of calculation of coverage of territory for the grant of services of mobile communication of the third generation on the base of standards of CDMA is offered.**

### Вступ

Сьогодні оператори мобільного зв'язку активно проектують та вводять в дію коміркові мережі, що відповідають вимогам третього покоління 3G. В основі більшості цих мереж лежать стандарти множинного доступу з використанням кодового розділення каналів (CDMA – Code Division Multiple Access). Його ефективність підкреслюється рядом провідних світових організацій під час стандартизації мереж мобільного зв'язку. Так, серед 5 стандартів 3G, схвалених для використання ІТУ, 3 – розроблені на основі технології CDMA. Стандарти W-CDMA, CDMA2000 і TD-CDMA/TD-SCDMA можуть розглядатися як повноцінні 3G-рішення, оскільки забезпечують повне покриття у макро-, мікро- і пікокомірках.

У зв'язку зі складністю дослідження реального обладнання у цій роботі здійснено перехід від реального обладнання до концептуальної моделі фізичного рівня мобільної системи CDMA та імітаційне моделювання. Використання засобів обчислювальної техніки дає змогу досліджувати механізм явищ поширення радіохвиль, обробки радіосигналів, отримувати статистичні результати, а також в діалоговому режимі навчати персонал ухваленню рішень з управління відповідним обладнанням та за необхідності змінювати масштаб часу, у якому надаються дані для аналізу роботи обладнання радіомережі.

### 1. Аналіз проблем проектування мереж 3G та моделювання систем CDMA у середовищі MATLAB

Зважаючи на те, що стандарти мобільних мереж третього покоління розроблені досить недавно, існує значна кількість проблем, пов'язаних з їхнім проектуванням та дослідженням. Вивчення та моделювання функціонування окремих вузлів із урахуванням всіх аспектів їх реальної роботи є доволі складним, оскільки системи CDMA використовують найсучасніші досягнення у галузі радіозв'язку та телекомунікацій. Для розв'язання поставлених задач існує досить незначна кількість професійного програмного забезпечення (Mathematica, Maple, MathCad). Усі ці програми мають вузькоспеціалізований характер та не містять розроблених або адаптованих компонентів для полегшення моделювання в галузі телекомунікацій і радіомереж, що не дає змоги здійснювати дослідження всіх необхідних характеристик та параметрів.

Отже, доцільно розробити програмні компоненти, які спростять виконання поставлених завдань та, зокрема, підвищать свободу інженерів у проектуванні систем мобільного зв'язку. Як таку програму доцільно використати систему MATLAB – цей програмний комплекс являє собою високорівневу технічну мову програмування і середовище для розроблення алгоритмів, візуалізації та аналізу даних та виконання розрахунків. За допомогою MATLAB можна вирішувати завдання швидше ніж при використанні таких мов програмування, як C, C++ чи Fortran. MATLAB використовується в таких областях, як обробка зображень і сигналів, телекомунікації, розроблення систем управління, фінансове моделювання та аналіз. MATLAB дає змогу легко виконувати матричні обчислення, візуалізувати математичні функції та експериментальні дані, реалізовувати обчислювальні алгоритми, конструювати графічний інтерфейс користувача для вирішення специфічних завдань, а також через спеціальні інтерфейси взаємодіяти з іншими мовами програмування і програмами. Додаткові модулі (toolbox) розширюють середовище MATLAB додаванням функцій для вирішення специфічних проблем в певних областях. Хоча MATLAB спеціалізується на числових обчисленнях, за допомогою спеціалізованого інструментального пакета (toolbox) він може взаємодіяти з символьним процесором програми Maple (система комп'ютерної алгебри), що перетворює його на закінчену фізико-математичну дослідницьку систему з можливістю виконання символьних обчислень.

Винятковою перевагою MATLAB є те, що можна не лише розрахувати необхідні характеристики згідно з побудованою моделлю, а і вивести потрібний сигнал через ЦАП комп'ютера, тобто можна використовувати персональний комп'ютер як складовий блок базової станції.

У програмі MATLAB наведено моделі деяких систем 3G з використанням технології CDMA, а саме:

- cdma2000 Physical Layer;
- WCDMA Coding and Multiplexing;
- WCDMA End-to-End Physical Layer;
- WCDMA Spreading and Modulation.

Як опорна технологія, на основі якої були виконані дослідження, використовувався стандарт cdma2000. Цей вибір пов'язаний із найбільшим розвитком та впровадженням cdma2000 серед стандартів 3G. Так, з-поміж усіх абонентів, що користуються послугами третього покоління мобільного зв'язку, переважна більшість використовує стандарт cdma2000 – їхня чисельність становить 91 % від загальної кількості абонентів (рис. 1).

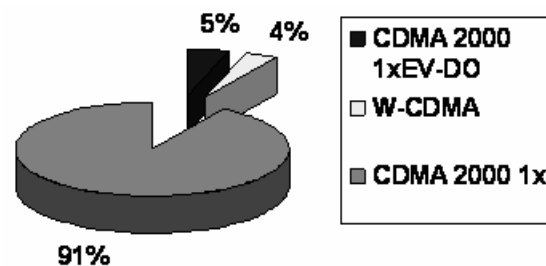


Рис. 1. Розподіл чисельності абонентів між основними стандартами 3G

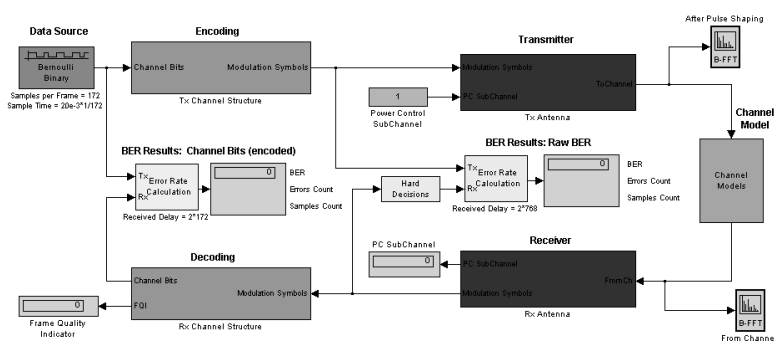


Рис. 2. Модель фізичного рівня cdma2000

Демонстраційний приклад моделі фізичного рівня cdma2000 – CDMA2000\_phlayer подано на рис. 2. Модель описує роботу фізичного рівня бездротової системи зв'язку згідно із специфікацією CDMA2000 – використано радіоконфігурацію № 3 фундаментального прямого каналу передавання даних 1x (рівень розширення 1) прямого зв'язку між базовою станцією і мобільною станцією. Повітряний інтерфейс CDMA2000 використовує технологію прямого розширення спектра. Це означає, що кодовані користувачем дані передаються в смузі пропускання 1.23 МГц (для випадку 1x), використовуючи послідовність псевдовипадкових одиниць (чіпів). Знаючи унікальний код, який присвоєно кожному активному абоненту, приймач може успішно виокремити бажаний сигнал із загального за допомогою кореляторів.

## **2. Постановка задачі для дослідження**

Система MATLAB містить імітаційні моделі фізичного рівня основних стандартів 3G. Але ці моделі розраховані лише на емуляцію роботи основних блоків базової та мобільної станцій. Вони не є готовим інструментом для проектування, оскільки не враховують навколишній рельєф, густину забудови, розміщення передавальної та приймальної антен, активність абонентів та багато інших чинників, безпосередньо пов'язаних із початковим розрахунком будь-якої коміркової мережі. Вміле поєднання елементів програми та урахування додаткових фізичних законів поширення сигналу – факторів навколишнього середовища – дає змогу дослідити мобільну мережу відповідно до всіх особливостей місцевості, обладнання, кліматичних умов. Значну увагу під час моделювання необхідно приділити взаємодії складових частин мережі та каналу зв'язку. Для оцінювання якості роботи системи при зміні характеру середовища передавання зручно використовувати значення імовірності появи бітових помилок (BER).

Метою цього моделювання вважається створення та дослідження математичної моделі, що здатна прогнозувати залежності зміни якості зв'язку від:

- швидкості передавання інформації;
- значень несучої частоти базових станцій;
- відстані поширення між антенами базової станції та абонента;
- потужності сторонніх джерел радіовипромінювання;
- I/Q дисбалансу (лінійного розмиття контурів сузір'я модуляції);
- фазового шуму та частотного/фазового зміщення;
- швидкості руху абонентів;
- особливостей рельєфу та забудови;
- температурних та кліматичних умов.

Оскільки сучасні мобільні системи працюють із наперед обумовленою якістю зв'язку, то створений апарат надає можливість комплексного врахування всіх перелічених залежностей. Тобто, можливо, для прикладу, розрахувати максимальну відстань поширення сигналу (а водночас і максимальну зону покриття комірки) при заданих параметрах забудови, потужностях сторонніх електромагнітних полів і показниках температурних та погодних умов. Після цього можливо оцінити зменшення зони покриття залежно від швидкості та характеру руху абонентів (наприклад, покриття комірками автомагістралей) та інших факторів.

## **3. Оцінка впливу умов поширення радіосигналу на якість зв'язку**

Реальний розрахунок поширення електромагнітного поля реалізується за допомогою двох моделей – “великої відстані” і “малої відстані”. Модель “малої відстані” відображає інтерференційну структуру електромагнітного поля, що виникає внаслідок взаємодії хвиль передавача. Теоретична сумарна величина електромагнітного поля в кожній точці простору визначається амплітудами і фазами декількох когерентних хвиль, які за рахунок багаторазових віддзеркалень пройшли шлях різної довжини від передавача до заданої точки прийому. Очевидно, що структура поля на малих відстанях є немонотонною і нестационарною. Збільшення або зменшення напруженості поля не пов'язане з відстанню до передавача, оскільки визначається випадковим станом радіо-каналу (взаємним розташуванням і пересуванням приймача, передавача і перешкод) у кожен момент часу. В результаті можливі дуже сильні зміни величини електромагнітного поля на невеликих відстанях і упродовж коротких проміжків часу. Розрахунки згідно з моделлю “малої відстані”

дають змогу визначити реальну структуру і статистичні характеристики сигналу в локальній області простору (точці прийому), що є складним завданням, оскільки сигнал передавача зазнає багатопроменевого поширення радіохвиль навіть за умови, що абонент нерухомий.

Для максимальної адаптації створеної моделі до умов місцевості необхідно розглянути такі варіанти:

- передмістя та сільська місцевість;
- територія в межах міста.

Передмістя та сільська місцевість, як правило, передбачає існування невеликої кількості населення, та, зазвичай, – високі швидкості руху (більше за 100 км/год), забезпечується умова прямої видимості між передавальною та приймальною антенами, існує незначна кількість перешкод, спричинених рельєфом місцевості.

В цьому випадку на вході приймача є одна явно виражена основна копія сигналу і невелика кількість додаткових копій, амплітуди яких істотно менші від амплітуди основної копії. Вважається, що фаза основної копії сигналу постійна, а амплітуда не зазнає швидких завмирань, її величина визначається середнім значенням потужності відповідно до моделі “великої відстані”. В цьому випадку розподіл ймовірностей амплітуди прийнятого сигналу описується законом Райса:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \cdot \exp\left[-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right]_0 \left(\frac{rA}{\sigma^2}\right) \quad (1)$$

Територія в межах міста передбачає велику густину населення, невисокі швидкості руху (до 50 км/год), відсутність прямої видимості та велику кількість перешкод, зумовлених значною густиною забудови.

Для цієї території при моделюванні необхідно врахувати дифузійне розсіювання сигналу, внаслідок чого не існує виділеного променя з особливими характеристиками поширення між передавачем та приймачем. В результаті амплітуди копій сигналу, що надходять на вхід приймача, приблизно однакові.

У цьому випадку розподіл ймовірностей амплітуди сумарного прийнятого сигналу описується законом Релея:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \cdot \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

Ці моделі допоможуть з оцінкою таких форм погіршення якості радіозв'язку, як наявність перешкод, ефект Доплера, шуми та стан атмосфери, залишаючи без уваги втрати сигналу у вільному просторі.

Для оцінки втрат у вільному просторі доцільно використати модель каналу Free Space Path Loss із бібліотеки RF Impairments MATLAB. У цій бібліотеці міститься шість видів каналів зв'язку, які необхідні при моделюванні температурних та погодних умов, I/Q дисбалансу, фазового шуму та частотного/фазового зміщення. Блок Free Space Path Loss симулює втрату сигналу залежно від відстані між передавачем і приймачем, а також зменшує амплітуду вхідного сигналу. В основі роботи цього блока лежить модель “великої відстані”. Основою розрахунку дальності радіозв'язку за моделлю “великої відстані” є формула для поширення радіохвиль у вільному просторі з відповідними поправковими коефіцієнтами. Відповідно до неї потужність сигналу в точці приймання на заданій відстані від передавача дорівнює

$$E(d) = E_t \frac{G_t \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (3)$$

#### 4. Дослідження впливу умов поширення радіосигналу на якість зв'язку за допомогою імітаційної моделі

На основі попереднього планування необхідно створити модель каналу зв'язку та узгодити її із блоками бібліотеки RF Impairments. Для створення каналу необхідно спроектувати власну S-функцію (код підпрограми MATLAB), прикріплену до відповідного блока в Simulink. Її структура ґрунтується на поданій теорії та виразах (1)–(3) і дає змогу здійснювати розрахунок до зазначених варіантів покриття території.

```

1 function canal(block)
2 setup(block);
3 function setup(block)
4 block.NumInputPorts = 1;
5 block.NumOutputPorts = 1;
6 block.InputPort(1).Complexity = 1;
7 block.OutputPort(1).Complexity = 1;
8 block.SetPreCompPortInfoToDynamic;
9 block.SetPreCompPortInfoToDynamic;
10 block.InputPort(1).DirectFeedthrough = true;
11 block.SampleTimes = [-1 0];
12 block.SetAcceleratorOnTLC(true); % Accelerator буде використувувати TLC
13 block.SetBlockMethod('Outputs', 8*Output);
14 function Output(block)
15 bitRate = 1.2288e6;
16 Pcr = 0.5;
17 Pavg = 0.2;
18 c = 3e8;
19 d = 1000;
20 pi=3.14;
21 Gc=1; Gc=1;
22 L = 0.5/500e6;
23 P = Pcr*Gc*d*L^2/(4*pi*d)^2;
24 Vcub = 50 * (1000/3600);
25 Dop1 = Vcub*(2000e6)/c;
26 SNR = 10*log10(SNR values, in dB);
27 c1 = rayleighchan(1/bitRate, Dop1, [0 0.5/bitRate], [0 -3]);
28 delay = c1.ChannelFilterDelay;
29 c2 = filter(c1,block.InputPort(1).Data); Pass signal through channel.
30 %c3 = zicchanchan(1/bitRate, Dop1, 2, [0 0.5/bitRate], [0 -3]);
31 %c4 = filter(c3, c2);
32 %c5 = awgn(c4, SNR);
33 block.OutputPort(1).Data = c5;
34 for pi=1:256
35     if(Pcr>Pavg)
36

```

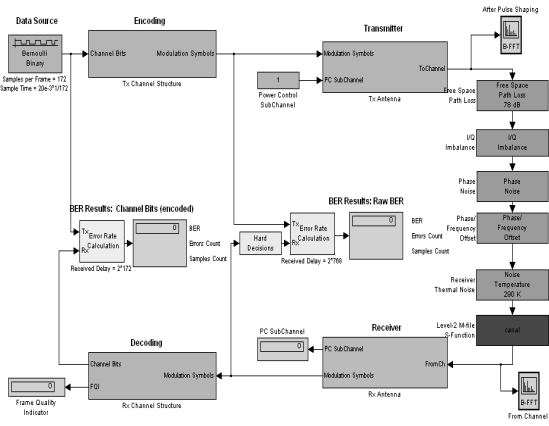


Рис. 3. S-функція каналу зв'язку та завершена імітаційна модель системи CDMA

Покажемо розрахунок для варіанта покриття території в межах міста. Початкові параметри цієї моделі задані нижче:

- швидкість передавання в розмовному каналі – 9.6 Кбіт/с;
- середня відстань між базовою станцією та абонентом – 2 км;
- несуча частота базової станції: 2000 МГц;
- швидкість руху абонентів: 36 км/год;
- температура: 20 град. Цельсія;
- відношення потужності корисного сигналу до сторонніх завад: 10дБ.

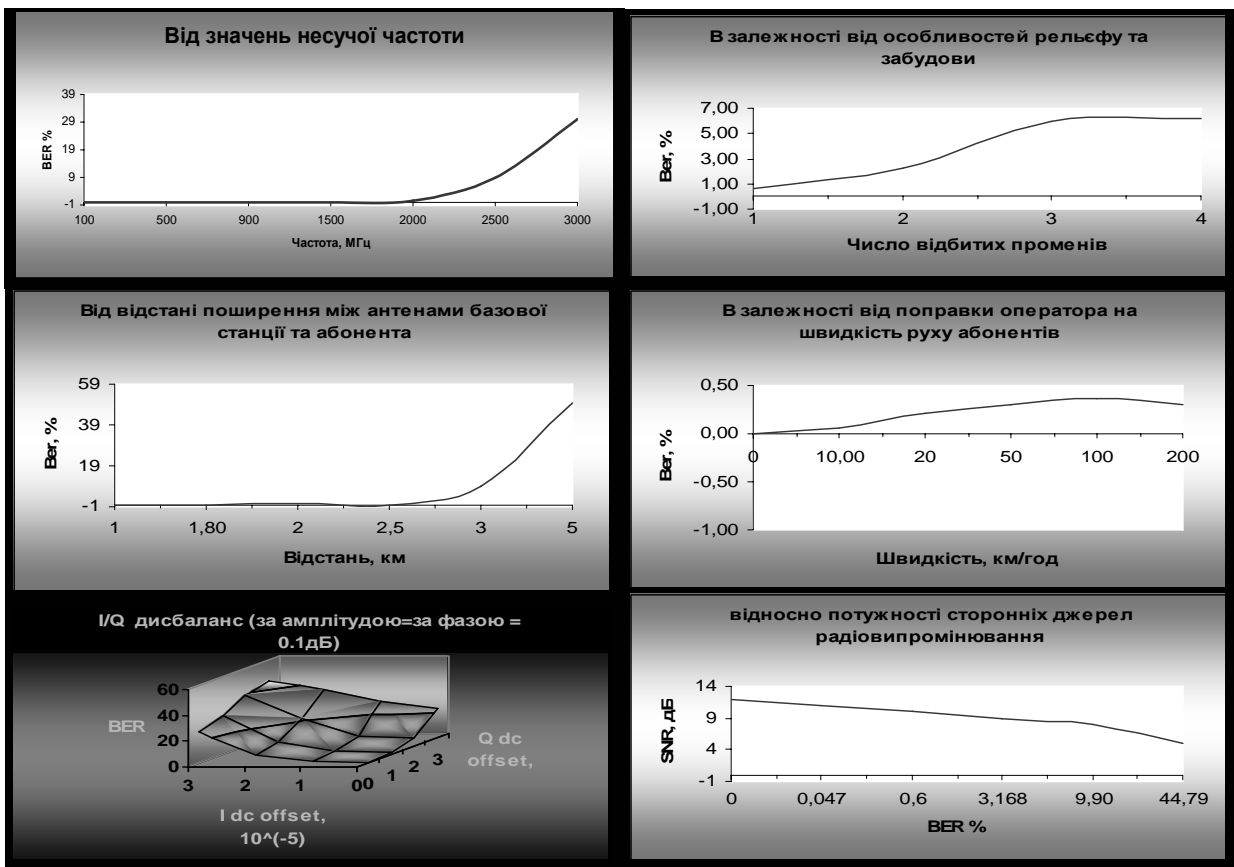


Рис. 4

На основі виконаних розрахунків побудовано засоби для отримання залежностей оцінок якості зв'язку. Приклад результатів розрахунків наведений на рис. 5.

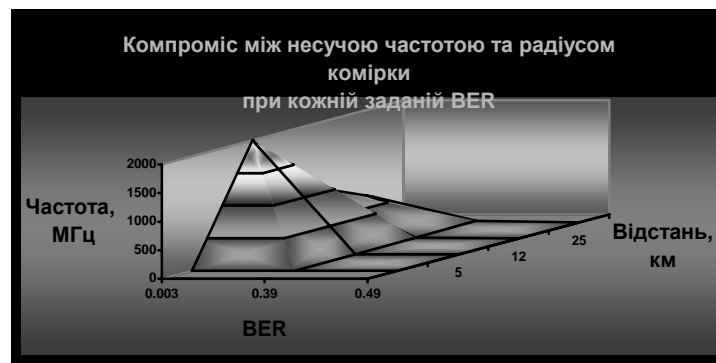


Рис. 5

Нижче наведено результати розрахунки для варіанта покриття передмістя та сільська місцевість. Базові параметри цієї моделі такі:

- швидкість передавання в розмовному каналі – 9.6 Кбіт/с;
- відстань між базовою станцією і абонентом – 6 км;
- несуча частота базової станції: 450 МГц;
- швидкість руху абонентів: 70 км/год;
- температура: 20 град. Цельсія;
- відношення потужності корисного сигналу до сторонніх завад: 7дБ.

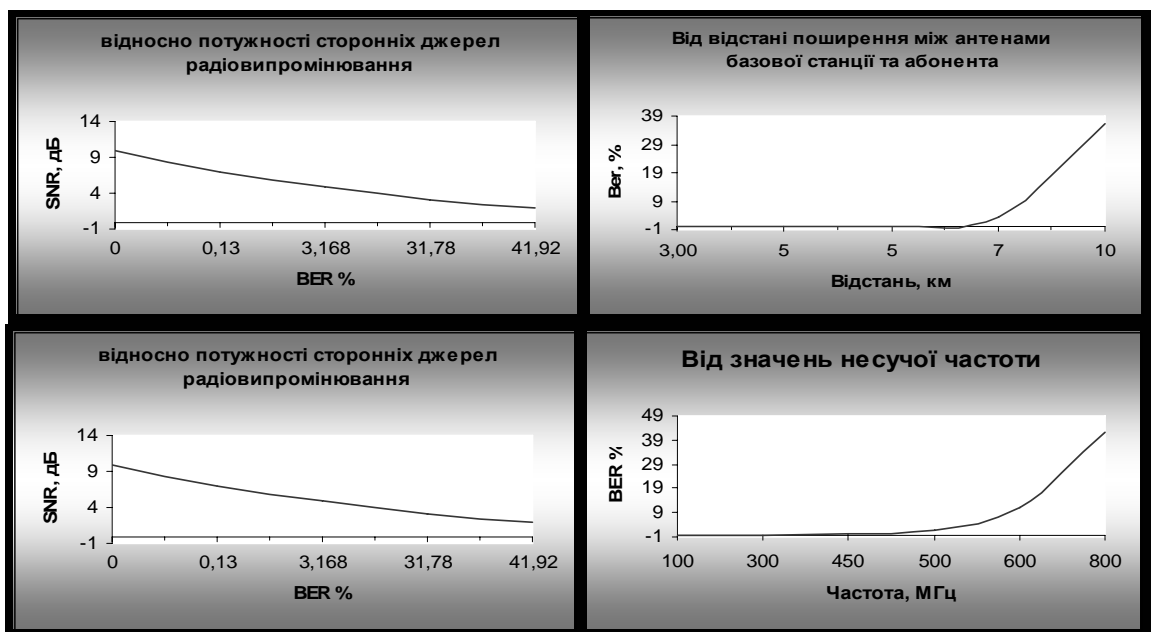


Рис. 6

### 5. Розрахунок покриття мережі 3G (cdma1x) на прикладі міста Львова

Розглянемо отримані результати детальніше. Маючи усі необхідні характеристики поширення радіосигналів, отримуємо можливість *відійти від класичної схеми покриття* географічної території комірками *однакових* розмірів у формі гексагональних стільників. На основі описаних моделей моделі із високим рівнем точності адаптуємо розмір комірок в мережі стільникового зв'язку відповідно до рівня забудови місцевості, сторонніх завад, швидкості руху абонентів та інших параметрів.

Нижче для порівняння подано приклад покриття на основі класичної схеми та запропонованої в роботі (рис. 7). Як вихідні параметри для розрахунків використовуються статистичні дані, чи дані, отримані у результаті наближеної оцінки.

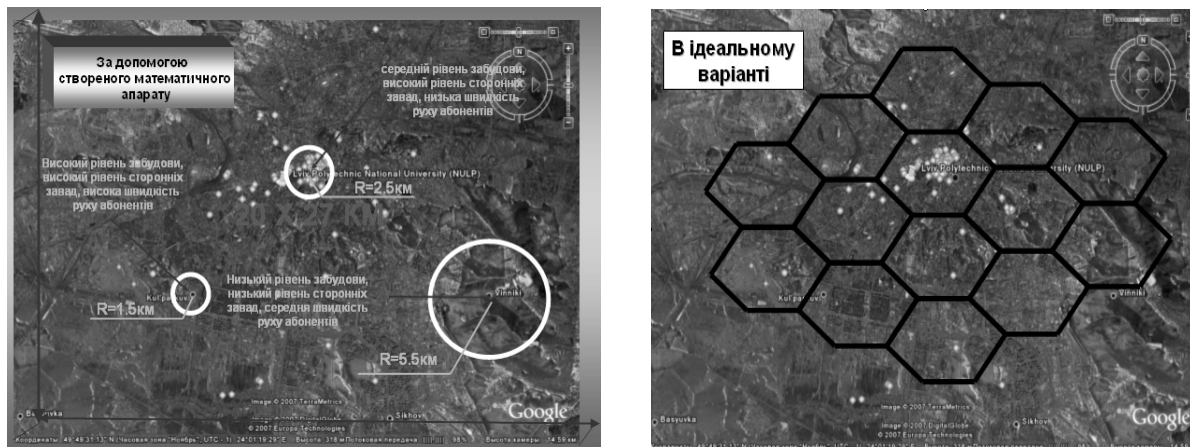


Рис. 7. Приклад покриття території міста на основі класичної схеми та запропонованої в роботі (техніко-економічна вигода від охоплення меншою кількістю комірок з адаптованими розмірами необхідної кількості абонентів)

Як можна побачити з рис. 7, розміри комірок 3G системи істотно змінюються залежно від рівня розглянутих вище параметрів та характеристик. Переважна більшість операторів мобільного зв'язку витрачає значну кількість коштів та часу для визначення точних даних безпосереднім зняттям показів на місцевості. Але влітку 2007 року МТС стала першою компанією серед операторів мобільного зв'язку України, що почала використовувати подібні програмні рішення. Тому можна передбачити, що питання, які розглянуті у цій роботі, вже найближчим часом набудуть значної актуальності.

### Висновки

1. Виконаний аналіз показує, що системи зв'язку стандарту CDMA мають істотні переваги порівняно з іншими широкоживаними стандартами коміркового зв'язку.
2. Програмний комплекс MATLAB надає широкі можливості при проектуванні мереж коміркового зв'язку та має істотні переваги над іншими математичними програмами, містить фрагменти та модулі, необхідні для ефективного моделювання галузі телекомунікацій.
3. Адаптація програмних пакетів MATLAB до встановлених цілей дала змогу отримати зручний апарат для досліджень характеристик мережі, що необхідні при проектуванні нової мережі чи модернізації та виявленні недоліків діючих мереж мобільного зв'язку.
4. На основі оболонки MATLAB запропонована модель CDMA-каналу.
5. Здійснено дослідження CDMA-радіоканалу на основі запропонованої моделі і розроблена методика проектування CDMA-мереж.
6. На основі розробленої моделі та методики покриття радіомереж CDMA планується дослідження найактуальніших проблем технології CDMA – розроблення методики розрахунку покриття території України системами зв'язку на базі стандартів CDMA; проектування покриття міста Львова на основі електронних карт для надточного розрахунку; дослідження імітаційних моделей CDMA за допомогою програми MATLAB та їх розширення для конкретних завдань; дослідження параметрів радіоканалу з метою підвищення якості надаваних послуг систем стандарту CDMA та, в деяких випадках, зменшення необхідної кількості базових станцій.

1. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов – СПб.: Питер, 2003. – 604 с. 2. Климаш М.М., Пелішок В.О., Михайленіч П.М. Технології мобільного зв'язку. – Львів, 2007. – 615 с. 3. Невдяев Л.М. Мобильная связь 3-го поколения. – М., 2000. – 208 с. 4. Lee J., Miller L. E. CDMA Systems Engineering Handbook, 1998. – 1228 с. 5. Климаш М.М., Пелішок В.О., Михайленіч П.М., Щур. О.В. Радіомережі коміркового зв'язку стандартів CDMA. – Львів: Вид. УАД, 2007. – 238 с. 6. Климаш М.М., Яцишин Є.М. Радіомережі коміркового зв'язку: Навч. посібник. – Львів: Вид. УАД, 2005. – 352 с. 7. Веселовский К. Системы подвижной радиосвязи – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 536 с. 8. Tachikawa K. W-CDMA Mobile Communications System, 2002. – 418 с. 9. Yang S.C. 3G CDMA2000 Wireless System Engineering, 2004. – 280 с. 10. Климаш М.М., Синюгін О. Моделирование і дослідження радіотрафіка в системах з кодовим розділенням каналів // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – Львів, 2003. – № 477. – С.123–127.