

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ МЕРЕЖІ 4G LTE З ПЕРЕКРИТТЯМ ЗОН БАЗОВИХ СТАНЦІЙ

Горбачов В.О., Москалець М.В.

Харківський національний університет радіоелектроніки,
кафедра інфокомунікаційної інженерії ім. В.В. Поповського,
Україна

E-mail: viacheslav.horbachov@nure.ua,
mykola.moskalets@nure.ua

Abstract

The development of issues of improving the planning methodology for the 4G LTE mobile communication network is being carried out by implementing the territorial planning method using the base station area overlap model. The results of calculating the network performance with the proposed base station area overlap model are obtained. Recommendations are provided on the feasibility of implementing the base station area overlap model in the 4G LTE mobile communication network planning algorithm.

З урахуванням тенденції збільшення кількості користувачів мережі мобільного зв'язку 4G до ресурсів інтернет, доцільно здійснювати покриття території із перекриттям сусідніх зон обслуговування, що дозволяє здійснювати "хендовер" мобільного терміналу. Однак ці зони є зонами взаємних завад..

У системах зв'язку 4G можливий режим "м'якого" хендовера, радіус зони зв'язку може досягати 1,9 радіусу стільника, і тому можливі зони з трьох- і чотирьохразовим перекриттям (рис. 1). У системах, де режим хендовера "жорсткий", радіус зони зв'язку зазвичай не перевищує 1,3 радіусу стільника.

При знаходженні в зонах перекриття мобільна станція (МС) може працювати з будь-якою з базових станцій (БС) і навіть кількома. При цьому природно орієнтуватися на вибір найменш завантаженої БС, що дозволить найбільш рівномірно (раціонально) розподіляти навантаження і в кінцевому рахунку забезпечувати найбільшу ємність системи (здатність навантаження) при збереженні заданих характеристик за показниками відмов. Як модель системи масового обслуговування розглядатимемо модель з пуассонівським потоком вимог з інтенсивністю λ , показовим законом обслуговування з інтенсивністю μ та дисципліною обслуговування з чистими втратами [1-3].

Алгоритм вибору в зоні перекриття конкретної БС здійснюється на основі аналізу абонентською станцією завантаження всіх доступних на поточний момент з точки простору БС (секторів БС). З них вибирається БС (сектор) із найменшим завантаженням. У разі рівності рівнів поточних завантажень БС може бути обрана абонентською станцією, наприклад на основі рандомізованої процедури.

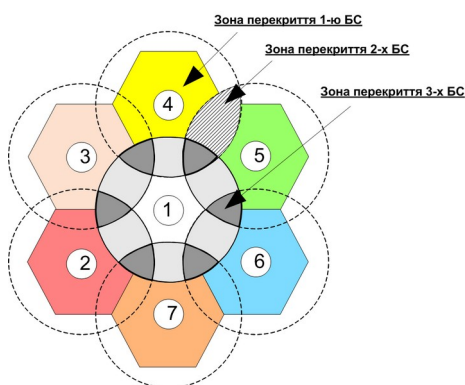


рис. 1

Р

Для ефективного використання частотного ресурсу системами безпроводового доступу 4G доцільно застосовувати модель повторного використання частот з урахуванням зон перекриття [3], що не враховується у існуючій методиці оцінки необхідного частотного ресурсу для систем безпроводового доступу, наведеної в Рекомендації МСЕ-Р М.1651 [4-6].

Будь-який оператор системи абонентського радіодоступу намагається забезпечити якомога більшу зону покриття для надання різних послуг зв'язку більшій кількості користувачів. Однак через безліч факторів, що впливають на розмір зони покриття, зробити це неможливо. У загальному випадку розрахунок зони обслуговування базової станції проводиться на основі енергетичного балансу радіолінії та вихідних даних про трафік роботи.

Залежно від отриманих результатів, вибирається найменша зона обслуговування. При цьому вибирається архітектура системи абонентського радіодоступу, визначається розмір кластера, кількість секторів у осередку, кількість частотних каналів у кластері.

У системах LTE для підвищення якості обслуговування зону обслуговування планують таким чином, щоб існувало перекриття сусідніх стільників. При цьому абоненти, що знаходяться в зоні перекриття, можуть обслуговуватися будь-якою з доступних точок доступу.

Виклики із зони K -кратного перекриття буде заблоковано, якщо всі канали зв'язку K -доступні точки доступу будуть зайняті. Таким чином, ймовірність P_k блокування заявок у зоні K -кратного перекриття може бути обчислена за такою формулою:

$$P_k = p^k(C), \quad k = \overline{1, K}, \quad (5)$$

де $p(C)$ - ймовірність заняття всіх каналів.

Можливість блокування викликів P в соті можна отримати як суму ймовірностей блокувань в окремих зонах перекриття стільника:

$$P = \sum_{k=1}^K \frac{S_k^c}{S_c} P_k, \quad (6)$$

де S_c - площа стільника; S_k^c - площа зони K -кратного перекриття

Визначення ймовірності блокування дзвінків у соті під час використання зон перекриття дозволяє точніше оцінити зміни функціонування системи мобільного зв'язку 4G порівняно з підходом, що застосовується операторами безпроводового доступу, наведеним у Рекомендації МСЕ-Р М.1651.

Для аналізу досяжного виграшу під час використання зон перекриття складемо рівняння балансу фаз при стаціонарному розподілі навантаження [7], [8] за умов суцільного однорідного покриття площі стільниками з перекриттям зон. Введемо такі позначення: k - кратність перекриття території, яка в прикладі (рис. 1) змінюється від 1 до 4 - максимально можливої кратності покриття території в стільниковій мережі; λ_k - сумарна інтенсивність вхідних запитів на площі радіозв'язку БС (сектору) з k -кратним покриттям.

Якщо прийняти модель з рівномірним розподілом щільності інтенсивності виникнення запитів на території, то

$$\lambda_k = \lambda_c \frac{S_k}{S_c} k_i, \quad (7)$$

де λ_c - загальна сумарна інтенсивність виникнення запитів на території одного виділеного сектора (стільника); S_k - площа виділеного сектора (стільника), на якій спостерігається k -кратне покриття; S_c - площа виділеного сектора (соту).

Фактично це означає, що інтенсивності ($k = 1, 2, \dots, K$) пропорційні відносним площам k -кратних покриттів у межах зони радіозв'язку виділеної БС (сектору БС). Величина λ_k/k визначає інтенсивність виникнення запитів на території k -кратного покриття, що знаходиться виключно

на території стільника (сектору стільника). Отже, $\sum_{k=1}^K \frac{\lambda_k}{k} = \lambda_c$ - Середня інтенсивність вхідного потоку в розрахунку на одну соту (сектор стільника).

Позначимо ймовірність знаходження в системі і вимог у режимі P_i , що встановився. За нескінченно малий інтервал часу ($t, t + \Delta t$) ймовірність наявності рівно і з'єднань (число вимог, що обслуговуються) в секторі може змінитися на:

1. $(i+1) P_{i+1} \mu \Delta t$ - після завершення обслуговування одного з $(i+1)$ з'єднань;

2. $-iP_l \mu t$ - після завершення обслуговування одного з i з'єднань;

$$\lambda_k \sum_{l=1}^k \frac{P_{i-1}^l}{l} \left(\sum_{j=1}^N P_j \right)^{k-1} C_{k-1}^{l-1} \Delta t$$

3. - у разі виникнення нового запиту на з'єднання на території зк-кратним покриттям, де була $(i - 1)$ з'єднання;

$$\lambda_k \sum_{l=1}^k \frac{P_i^l}{l} \left(\sum_{j=i+1}^N P_j \right)^{k-1} C_{k-1}^{l-1} \Delta l$$

4. - при використанні нового запиту на з'єднання на території з k -кратним покриттям, на якому було i з'єднань.

Наведені вирази справедливі за умови, що (при виникненні запиту на з'єднання на території з k -кратним покриттям) виділений для аналізу сектор БС (або БС) буде обраний, якщо:

- завантаження $(k-1)$ -х «конкуруючих» секторів (БС) вище завантаження вибраного секто-

ра БС (цей факт враховують ймовірності $\left(\sum_{j=i}^N P_j \right)^{k-1}$ або $\left(\sum_{j=i+1}^N P_j \right)^{k-1}$);

- завантаження $(k-1)$ -х «конкуруючих» секторів (БС) вище завантаження вибраного секто-

ра (БС) (цей факт враховують ймовірнісні співмножники P_i^{l-1} ; P_{i+1}^{l-1}).

Численні C_{k-1}^{l-1} враховують кількість можливих комбінацій вибору $(l - 1)$ -го сектора (БС) з $(k - 1)$ -го «конкуруючих». Індекс l означає число секторів (БС) з однаковим мінімальним завантаженням, до якого відноситься i виділений для аналізу сектор (БС). Тому множник $1/l$ вказує на випадкове рівномірнісне правило вибору для підключення серед однаково завантажених секторів (БС).

Далі, з урахуванням рівняння нормування для визначення P_0 знаходимо розрахункову формулу для ймовірності повного завантаження БС (або сектора БС) [4-6]:

$$P_n = \frac{\lambda}{2} \left[\frac{\frac{1}{N!} \left(\frac{\lambda}{c} \sum_{k=1}^K k \frac{(S_k/S_c)}{4^{k-1}} \right)^{N-(i)}}{\sum_{j=(i)}^N \frac{1}{j!} \left(\frac{\lambda_c}{\mu_c} \sum_{k=1}^K k \frac{(S_k/S_c)}{4^{k-1}} \right)^{j-(i)}} \right], \quad (8)$$

де S_k ($k = 1, 2, 3$) – визначаються згідно (7);

λ_c - інтенсивність вхідних запитів, розрахована на соту (або сектор стільники при секторній організації покриття);

λ - множник, що коригує, який введений для обліку всіх похибок, що виникають при виведенні формули.

Залежність ймовірності помилки від інтенсивності надходження заявок оцінки ймовірності втрати з'єднань через перевантаження показані рис.2.

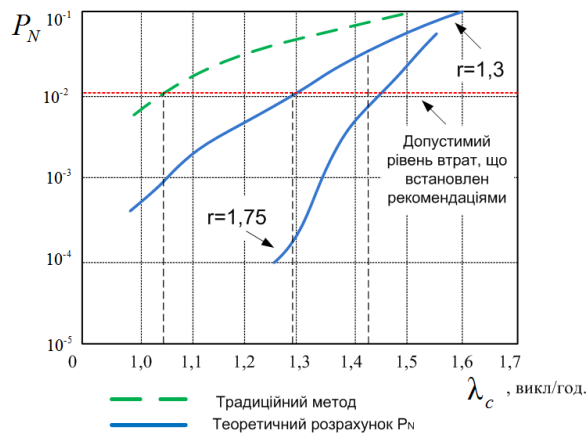


Рис. 2

На рис.2 наведено і результати теоретичних розрахунків, виконаних за (9), а також криві, розраховані за формулою В. Ерланга для ізольованої стільниці (традиційний метод). Графіки побудовані для випадків, $r=1,3$ та $r=1,75$ у міській зоні. Для розглянутої моделі легко розрахувати граничний рівень навантаження на соту. При цьому припустимо, що обслуговування кожного виклику триває $\mu=1=40$ с, і врахуємо, що всього на БС є $3 \cdot 22 = 66$ абонентських каналів.

Таким чином, при організації управління потоком вхідних запитів потенційно досягнемо рівень інтенсивності

$$\lambda_{c\max} = 66/40 = 1,65 \quad (3.19)$$

Співвідношення (7) визначає ємність радіоканалу. При традиційному методі організації доступу, як можна бачити з результатів експерименту, рівень втрат сполук через перевантаження порядку 0,01 забезпечується при $\lambda_c=1,04$ [викл/с/БС], тобто. середній рівень використання радіоканалу

$$\rho_{\text{станд}} \approx \frac{1,04}{1,65} 100\% \approx 63\% \quad (3.20)$$

Застосування адаптивного алгоритму доступу при радіусі зв'язку, що перевищує стільниковий радіус в 1,3 рази, як видно з рис. 3.4 дозволяє досягти рівня використання радіоканалу

$$\rho(1,3) \approx \frac{1,29}{1,65} 100\% \approx 78,2\% \quad (3.21)$$

Це означає, що можна підвищити ефективність використання радіоканалу на 15% шляхом удосконалення алгоритму організації доступу.

Якщо радіус зв'язку перевищує радіус стільниці в 1,75 разів, то

$$\rho(1,75) \approx \frac{1,46}{1,65} 100\% \approx 88,5\% \quad (3.22)$$

Отримані в результаті проведених досліджень розрахункові формули дозволяють оцінити виграш та абонентської ємності безпроводових систем при використанні алгоритму вибору найменш завантаженої БС у зоні покриття. Розрахунки та імітаційне моделювання показали, що в системі 4G при використанні алгоритму вибору виграш в абонентській ємності може досягати 25%.

Література:

1. Москалець М.В., Бабіч М.Р. Методика планування мережі мобільного зв'язку 4G LTE на основі кластерних моделей. *Сучасні інформаційні технології та системи штучного інтелекту (MIT@AIS-2025)*. Матеріали 1-ї Міжнародної науково-практичної конференції. Частина 2, 19-22 травня 2025 р. Харків - Яремче, Україна, Харків 2025. С.28-29.
2. Бабіч М.Р., Горбачов В.О., Москалець М.В. Аналіз схем повторного використання частот для мереж мобільного зв'язку 4-5G. *«Радіоелектроніка і молодь У XXI столітті», конференція «Перспективи розвитку інфокомунікацій та інформаційно-вимірювальних технологій»*. Матеріали 28-го міжнародного молодіжного форуму 16 – 18 квітня 2024 р., Том 4. С.28-31.
3. Бабіч М.Р., Горбачов В.О. Методи дослідження параметрів невизначеності прямих і польових вимірювань радіоелектронних засобів систем мобільного зв'язку. *Інформаційно-комунікаційні технології та кібербезпека (ІКТК-2024)*. Матеріали десятої міжнародної науково-технічної конференції, м.Харків, 13-14 листопада 2024 р. ХНУРЕ, С. 100-101.
4. Ahmadi S. LTE-Advanced: A Practical Systems Approach to Understanding 3GPP LTE Releases 10 and 11 Radio Access Technologies. Elsevier Science & Technology Books, 2017. 1242 p.
5. Dahlman E., Parkvall S., Sköld J. LTE Radio Access. 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband. 2014. P. 103–119. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-419985-9.00007-6>.
6. Cox C. Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications. Wiley & Sons, Limited, John, 2012. 352 p.
7. B. Muliari, Y. Koliadenko, M. Moskalets, V. Loshakov and D. Ageyev, "Interaction Model and Phase States at Frequency Resource Allocation in a Grouping of Radio-Electronic Equipment of 5G Mobile Communication Network," *2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine, 2022, pp. 495-501, doi: 10.1109/PICST57299.2022.10238581.

8. Koliadenko, Y., Moskalets, M., Badieiev, V., Savchenko, R. (2023). Method Radio Resource Allocation in Cognitive Radio Network. In: Dovgyi, S., Trofymchuk, O., Ustimenko, V., Globa, L. (eds) Information and Communication Technologies and Sustainable Development. ICT&SD 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 809. Springer, Cham. Pp. 102-115 https://doi.org/10.1007/978-3-031-46880-3_7