

МОДЕЛІ СТОХАСТИЧНОЇ ГЕОМЕТРІЇ ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 5-ГО ПОКОЛІННЯ

В статті проведено дослідження моделей стохастичної геометрії для гетерогенних мереж мобільного зв'язку та проаналізовано їхню адекватність для різних сценаріїв. Моделювання показує, що Пуассонівські точкові процеси з теселяцією Вороного відтворюють покриття мережі з належною точністю та адекватністю.

Ключові слова: стохастична геометрія, мережа, мобільний зв'язок, теселяція Вороного, покриття мережі.

This paper introduces the study of models of the stochastic geometry for heterogeneous mobile networks and analyzes their feasibility for different scenarios. The simulation shows that Voronoi tessellation combining with Poisson point processes provide good reflection of network coverage.

Keywords: stochastic geometry, network, mobile communication, Voronoi tessellation, network coverage.

1. ВСТУП

Безпроводні мережі наступного покоління поставлені перед новим викликом 1000-кратного підвищення пропускної здатності у комірковій мережі. Мережі п'ятого покоління (5G) повинні забезпечувати пропускну здатність від 1 Гбіт/с до 10 Гбіт/с для кінцевих користувачів в залежності від їх мобільності [1]. Враховуючи тенденції до збільшення кількості користувачів можна зробити висновок, що у майбутніх мережах густина абонентського навантаження у комірці суттєво зростає. Одним із варіантів подолання проблеми підвищення пропускної здатності мережі в умовах обмеженого спектру є просторове ущільнення мережі [2]. Просторове ущільнення дає змогу досягнути більшої продуктивності мережі за рахунок впровадження великої кількості піко та фемтокомірок та підвищення коефіцієнта перевикористання спектру. В даній статті розглядаються методи планування багаторівневих гетерогенних мереж з використанням моделей стохастичної геометрії.

⁵ Національний університет «Львівська політехніка»

2. СТОХАСТИЧНА ГЕОМЕТРІЯ ДЛЯ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Є два підходи до планування та моделювання коміркових мереж мобільного зв'язку: детермінована та стохастична геометрія. Детермінована геометрія широко використовується протягом тривалого часу для планування покриття коміркових мереж. Дані методи є ефективними для однорідної топології мережі із фіксованим розміром комірок із врахуванням інтерференції між спільночастотними комірками. Проте, існуючі методи покриття гексагональними комірками не є ефективними для гетерогенних мереж, оскільки вони придатні лише для моделювання покриття із фіксованим розміром комірок. Тому, стохастична геометрія є перспективним рішенням для ймовірнісного моделювання випадкових топологій гетерогенних мереж, щоб забезпечити прогнозування ймовірнісних параметрів таких як співвідношення сигналу до шуму та інтерференції (SINR), ймовірність обслуговування та розподіл навантаження [3]. Для моделювання K-рівневої гетерогенної мережі, передавачі малих комірок випадково розташовуються за стохастичним процесом [4,5].

В даній статті ми розглядаємо найбільш поширені підходи до стохастичного моделювання та аналізуємо їхню точність та відповідність для гетерогенних мереж. Найпоширенішими методами для моделювання гетерогенних коміркових мереж є Пуассонівський точковий процес та параметричний точковий процес.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ АДЕКВАТНОСТІ МОДЕЛЕЙ СТОХАСТИЧНОЇ ГЕОМЕТРІЇ ДЛЯ РІЗНИХ СЦЕНАРІЇВ ГЕТЕРОГЕННОЇ МЕРЕЖІ

На практиці, розгортання мережі в умовах міста із щільною забудовою ускладнюється за рахунок неоднорідності абонентського навантаження та нерівномірного загасання сигналу, що порушує фіксовану геометричну структуру. Встановлення базових станцій за гексагональним шаблоном не дозволяє розрахувати оптимальний розмір комірок для забезпечення вимог до пропускної здатності. Тому, стохастична геометрія є більш прийнятним підходом до планування коміркових структур з випадковими параметрами, зокрема для багаторівневих структур гетерогенних мереж мобільного зв'язку.

Однорівнева коміркова мережа може бути просто змодельована за Пуассонівським точковим процесом. Базові станції просторово розподілені з густиною λ , потужністю передавання P та значенням

SINR β . Ймовірність того, що користувач буде обслуговуватись i -ю базовою станцією із значенням SINR більше від β називається ймовірністю обслуговування [6]:

$$P_c(\lambda, \beta, P) = \frac{\alpha \beta^{-2/\alpha}}{2\pi \csc(2\pi\alpha^{-1})} \quad (1)$$

де α позначає експоненту загасання в каналі зв'язку.

Використання класичного Пуассонівського точкового процесу забезпечує точне наближення параметрів мережі, проте характерне рядом недоліків. Зокрема, такий процес повертає випадкову топологію без урахування мінімальної відстані між сусідніми базовими станціями. Таким чином, планування за Пуассонівським процесом призводить до дуже близького розташування передавачів, як показано на рис. 1,а. Це призводить до неадекватної структури мережі та погіршення точності моделювання та розрахунку параметрів, залежних від мережі, таких як потужність передавання та SINR. Тому, параметричний точковий процес використовується для моделювання більш адекватної мережної структури, за рахунок фіксованого параметру мінімальної відстані між довільною парою вузлів. Параметричний точковий процес здійснюється на основі Пуассонівського процесу, шляхом видалення усіх точок, які не задовольняють умову мінімальної відстані між довільною парою вузлів (рис. 1,б). Проте, з аналітичної точки зору параметричний точковий процес є більш складним та менш точним у зв'язку із порушенням ймовірнісного розподілу мережних параметрів.

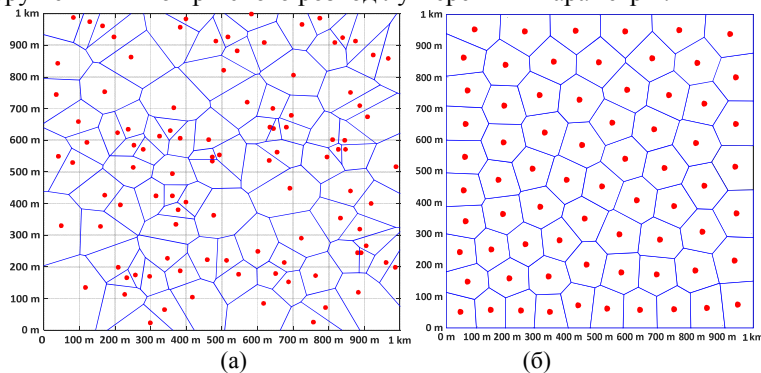


Рис. 1. Порівняння однорівневого покриття мережі з використанням теселяції Вороного для: (а) – Пуассонівського точкового процесу, (б) – параметричного точкового процесу

Рис. 3 відображає різницю між покриттям мережі на основі Пуассонівського точкового процесу та параметричного точкового

процесу. Результати показують, що параметричний точковий процес є проміжним варіантом, який поєднує елементи детермінованої та стохастичної геометрії. У деяких випадках параметричний процес повертає майже детерміновану топологію, що дає змогу планувати покриття у сільській місцевості. З іншого боку, Пуассонівський точковий процес є більш прийнятним для міського середовища із щільною забудовою, яка негативно впливає на поширення та загасання сигналу. Щільне розгортання мережі та поєднання базових станцій різних рівнів ставить ряд нових вимог до планування мережної структури. По-перше різниця між потужностями передавання базових станцій макро, піко та фемтокомірок спричиняє проблему складного хендоверу. Цілковитою можливою є ситуація, при якій абонент може бути досить близько до базових станцій як макрокомірки так і малої комірки, що знизить продуктивність хендоверу за критерієм потужності передавання. Крім того, у такому випадку деякі малі комірки можуть неефективно використовувати пропускну здатність, у той час як макрокомірка буде перевантаженою. Крім того, комірки часто бувають недовантаженими внаслідок варіації абонентського навантаження, що знижує продуктивність гетерогенної мережі.

Отже, моделювання багаторівневих гетерогенних мереж мобільного зв'язку є більш складним у порівнянні із однорівневими мережами. Необхідно окремо враховувати щільність базових станцій кожного рівня і потім визначати суперпозицію усіх рівнів при розрахунку параметрів для кінцевих користувачів. При використанні Пуассонівського точкового процесу для багаторівневої мережі, базові станції i -го рівня є просторово розподіленими із густиною λ_i , потужністю передавання P_i та рівнем SINR β_i . Ймовірність обслуговування абонента k -ю забезпеченні значення SINR більшого від β_i розраховується за наступною формулою [18]:

$$P_{allocation}(\lambda_i, \beta_i, P_i) = \frac{\alpha}{2\pi \csc\left(\frac{2\pi}{\alpha}\right)} \frac{\sum_{i=1}^K \lambda_i P_i^{2/\alpha} \beta_i^{-2/\alpha}}{\sum_{i=1}^K \lambda_i P_i^{2/\alpha}} \quad (2)$$

Оскільки, загасання сигналу у гетерогенних мережах не є високим у зв'язку із малим розміром комірок, вплив термальних шумів не є високим. З іншого боку, біль щільне розташування комірок і, відповідно, менша відстань між спільноканальними комірками призводить до зростання інтерференції між спільноканальними комірками. Крім того, багаторівневе впровадження спричиняє два типи інтерференції: внутрішньорівнева та міжрівнева. Внутрішньорівнева інтерференція може легко долатися шляхом оптимального розташування передавачів. Більш вагомим проблемою є міжрівнева

інтерференція між макрокоміркою та малими комірками. У зв'язку із більшою потужністю передавання, макрокомірка може спричинити інтерференцію для користувачів малих комірок у низхідному каналі, у той час як абонентський термінал може спричинити інтерференцію для базових станцій малих комірок, якщо він обслуговується макрокоміркою. Тому, розроблення структур з оптимальною геометрією є важливим аспектом для забезпечення ефективного функціонування багаторівневих гетерогенних мереж. На рис. 2 показано змодельовані структури 3-рівневих гетерогенних мереж з використанням Пуассонівського точкового процесу. Параметри розподілу становлять: $\lambda_1=10$, $\lambda_2=50$, $\lambda_3=100$, де λ_1 , λ_2 , λ_3 відповідають кожному рівню мережі, відповідно.

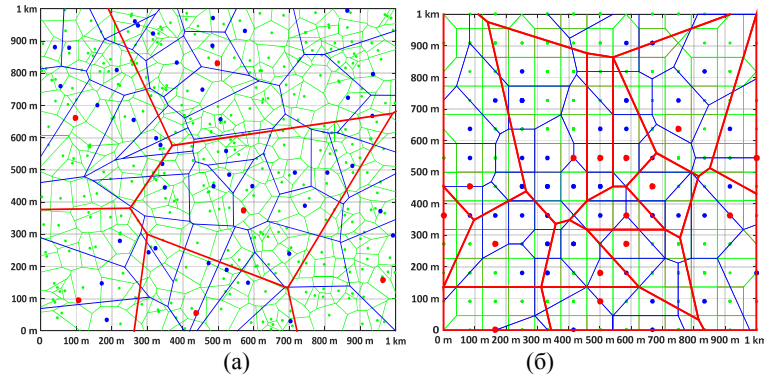


Рис.2. Щільна структура 3-рівневої гетерогенної мережі для випадкового планування – (а) та планування з врахуванням забудови – (б)

4. МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ ГЕТЕРОГЕННОЇ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ СТОХАСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Моделювання продуктивності гетерогенної мережі проводилось на оцінки ймовірності того, що випадковий користувач отримає мінімально необхідний рівень співвідношення SINR з функцією розподілу, яка усереднена по всіх видимих базових станціях. Отримано залежності ймовірності обслуговування від рівня SINR для двох випадків: однорівневої та багаторівневої мережі (рис. 3,а). Хоча підвищення густини комірок підвищує рівень інтерференції, результати моделювання показують, що однорівнева топологія мережі показує забезпечує нижчу ймовірність обслуговування ніж багаторівнева. Це пояснюється тим, що в однорівневій мережі загасання потужності сигналу є вищим. Тому, вплив адитивного шуму

є більш суттєвим у порівнянні із впливом інтерференції. Розподіл значення SINR для багаторівневої гетерогенної мережі є більш рівномірним у зв'язку з додатковими передавачами малих комірок, які розташовані ближче до користувачів. На рис. 3,б показано функції розподілу пропускної здатності для однорівневої та багаторівневої мережі для ширини спектру 20 МГц та кругової діаграми спрямованості антен базових станцій.

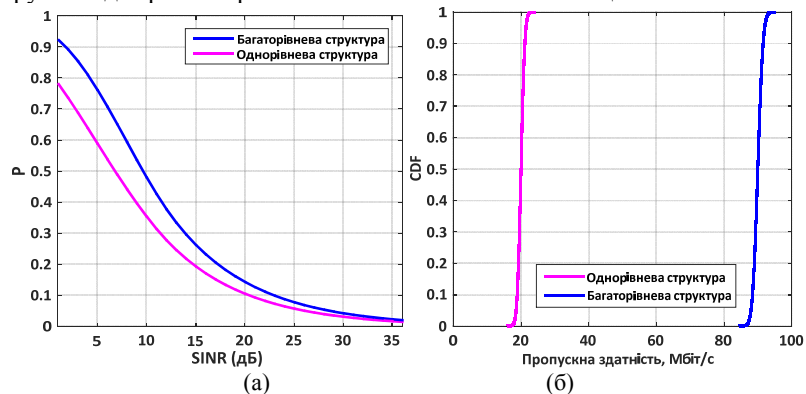


Рис.3. Залежності ймовірності обслуговування від співвідношення SINR – (а) та кумулятивні функції розподілу пропускної здатності – (б) для однорівневої та багаторівневої гетерогенної мережі.

Багаторівнева гетерогенна мережа забезпечує суттєвий вииграш у пропускній здатності у порівнянні із однорівневою мережею у зв'язку з вищим коефіцієнтом повторного використання спектру. Варто зазначити, що багаторівневі гетерогенні мережі також забезпечують вииграш з точки зору ймовірності обслуговування, проте подальші дослідження необхідні для розрахунку оптимальної кількості рівнів мережі, а також моделювання складних конфігурацій мережі з динамічною варіацією розміру комірок на основі моделей стохастичної геометрії.

5. ВИСНОВКИ

Стохастична геометрія є перспективним підходом до планування, моделювання та аналізу багаторівневих гетерогенних мереж. В статті розглянуто найбільш поширені моделі стохастичної геометрії та проаналізовано їхню адекватність для аналізу гетерогенних мереж мобільного зв'язку. Розглянуті базові моделі забезпечують адекватний аналіз поведінки гетерогенної мережі.

Пуассонівський та параметричний точкові процеси відтворюють позиції базових станцій з прийнятним наближенням, що в поєднанні із теселяцією Вороного повертає адекватну структуру покриття гетерогенної мережі. Проаналізовано два типи покриття без врахування забудови та з її врахуванням на основі моделей стохастичної геометрії. Отримані результати показують, що обидві моделі дозволяють адекватно оцінювати структури гетерогенних мереж. Крім того, проведено моделювання ефективності однорівневої та багаторівневої коміркової структури з точки зору пропускну здатності та ймовірності обслуговування та визначено переваги багаторівневих гетерогенних структур.

1. P. Demestichas, A. Georgakopoulos, D. Karvounas, K. Tsagkaris, V. Stavroulaki, J. Lu and J. Yao, "5G on the horizon: key challenges for the radio-access network," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 8, no.3, pp. 47-53, 2013. 2. N. Bhushan, J. Li, D. Malladi, R. Gilmore, D. Brenner, A. Damnjanovic and S. Geirhofer, "Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 82-89, 2014. 3. M. Haenggi, "Stochastic geometry for wireless networks," Cambridge University Press, 2012. 4. H. S. Dhillon, R. K. Ganti, F. Baccelli and J. G. Andrews, "Modeling and analysis of K-tier downlink heterogeneous cellular networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 30, no. 3, pp. 550-560, 2012. 5. H. ElSawy, E. Hossain, M Haenggi, "Stochastic geometry for modeling, analysis, and design of multi-tier and cognitive cellular wireless networks: A survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 3, pp. 996-1019, 2013. 6. H. P .Keeler, B. Blaszczynsyn, M. K. Karray, "SINR-based k-coverage probability in cellular networks with arbitrary shadowing," In *IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings (ISIT)*, pp. 1167-1171, July, 2013.