

УДК 621.39

# Оцінка зв'язності D2D комунікацій у мережах 5G

Булашенко А. В.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

E-mail: [an\\_bula shenko@i.ua](mailto:an_bula shenko@i.ua)

Сьогодні відбувається тестування мереж 5G. Мережі 5G здатні покращувати існуючі послуги та забезпечувати нову якість послуг завдяки низьким затримкам, наприклад, тактильний Інтернет. Існуючі технології не задовольняють вимоги 5G, що викликає необхідність розробки нових технологій. До них відносять нові методи забезпечення зв'язності, від яких залежить якість функціонування мережі. Мережі 5G використовують технології міліметрового діапазону, в якому радіосигнал поглинається навколишнім середовищем. Отже, цей діапазон має невелику дальність зв'язку, тому у мережі необхідно установити велику кількість базових станцій. Але це не завжди ефективно, оскільки зменшується їх використання. Для вирішення даної задачі використовується технологія пристрій-пристрій D2D. Для забезпечення високої якості обслуговування мережі необхідно приділяти увагу структурі організації D2D. Основними структурними параметрами є дальність зв'язку, радіус зв'язку та кількість ретрансляторів. Це можна вирішити шляхом правильного вибору вузла ретрансляції. Для цього необхідно врахувати зміну допустимої швидкості передачі даних у каналі за рахунок розподілення його ресурсів вузлом мережі, що використовується у якості ретранслятора. Для того, щоб маршрут забезпечував необхідну пропускну здатність, необхідно змінювати відстань між вузлами мережі. Це забезпечує зв'язність мережі та необхідний рівень якості обслуговування. Це досягається за рахунок вибору оптимального алгоритму, який розглядається у статті.

*Ключові слова:* D2D, 5G, кластеризація, безпроводний зв'язок, зв'язність мережі

DOI: [10.20535/RADAP.2020.81.21-29](https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.81.21-29)

## Вступ

Розробники мереж 5G для проектування використовують різні частоти міліметрового діапазону. Для зменшення затримки у мережі та збільшення швидкості передачі даних необхідна велика смуга спектру частот, що використовується [1, 2]. Але міліметровий діапазон має невелику дальність зв'язку за рахунок того, що порівняно сильно поглинається навколишнім середовищем, тому для роботи мережі необхідна велика кількість базових станцій. Однак, за рахунок того, що зменшується використання базових станцій, а відповідно і ефективність, то велика кількість базових станцій не завжди є ефективною.

Крім того, мережі 5G при зміні їх структури, включаючи безпроводні сенсорні мережі, що пов'язані зі зміною умов зв'язку між вузлами, є звичайним явищем [3]. Це явище може бути пов'язано з різноманітними факторами: взаємним переміщенням вузлів мережі, зміною навколишнього середовища, зміною електромагнітного стану. Така зміна може привести до порушення досяжності для окремих вузлів, що призведе до зміни потенційних можливостей мережі. Це накладає певні вимоги та

обмеження і вимагає оцінки цих можливостей певною характеристикою, що дозволить оцінити якість рішення у результаті вибору структурних параметрів мережі [4, 5].

Для вирішення таких задач можна використовувати технологію пристрій-пристрій D2D (device-to-device) [6–9]. Така технологія реалізується за допомогою ліцензованого радіочастотного спектру мережі 5G, що виділяється оператору рухомого зв'язку, що відповідає кластеризації у межах смуги пропускання. Другий спосіб реалізації такої технології здійснюється за рахунок не ліцензованого засобу Wi-Fi Direct [10], що відповідає кластеризації за межами смуги пропускання [11, 12].

## 1 Постановка задачі

Таким чином, логічним продовженням є розробка алгоритму, який надавав би можливість вибору ефективного маршруту завдяки оптимальному вибору вузла ретрансляції. Тому задача полягає у створенні нового оптимального алгоритму вибору транзитних вузлів ретрансляції та перевірка його

працездатності у мережах 5G із використанням технології D2D.

У випадку, коли транзитні вузли обираються довільно, то такі вузли можуть бути розташовані не на оптимальній відстані від вузла джерела та приймача. Крім того, це може привести до вибору великої кількості вузлів. У результаті ці фактори погіршують якість функціонування мережі, тобто це веде до зменшення пропускної здатності та ймовірності зв'язності маршруту, збільшення часу затримки та збільшення енергоспоживання мережі.

## 2 Комунікації технологій D2D

Технологія D2D (device-to-device) дозволяє прямий зв'язок між пристроями користувачів без участі мережі [13, 14] внаслідок пошкодження інфраструктури мережі, її перезавантаження з метою підвищення якості обслуговування. Для реалізації D2D-комунікацій в 3GPP розробили LTE-Direct, де базова станція (БС) контролює лише виділення частотного ресурсу між пристроями. Таким чином, через ядро мережі проходить лише сигнальний трафік, а користувачські пристрої обмінюються даними безпосередньо. Такий підхід дає можливість зменшити навантаження в мережі та зменшити затримку [8, 15, 16]. Технології Wi-Fi і Bluetooth працюють у не ліцензованому спектрі частот. D2D-комунікацію можна реалізувати на основі Wi-Fi Direct, але засіб управління ресурсами в цих технологіях відсутній.

Існує чотири основних типи D2D-комунікацій. Перший тип використовує інші пристрої у якості ретрансляторів, коли пристрої знаходяться на межі мережі або за межами зони покриття БС та для з'єднання з БС. Другий тип має місце, коли через БС проходить лише сигнальний трафік, а два пристрої безпосередньо взаємодіють між собою [17]. Третій тип використовує у якості ретранслятора один пристрій або групу пристроїв, коли два пристрої взаємодіють між собою. Четвертий тип має місце, коли два пристрої взаємодіють між собою безпосередньо за відсутності посередників.

Таким чином, необхідно обрати метод ефективного вибору вузла ретранслятора для третього типу D2D-комунікацій.

## 3 Забезпечення зв'язності

Відомо, що зміна структури мережі, що пов'язана зі зміною умов зв'язку між вузлами може бути наслідком таких факторів, як взаємний рух елементів мережі, зміна навколишнього середовища та інші. Такі зміни структури можуть привести до порушення доступності для окремих вузлів, що призведе до зміни потенційних можливостей мережі. Отже, це вимагає опису цих можливостей чисельною характеристикою, що дозволяє хара-

ктеризувати якість рішень по вибору структурних параметрів мережі.

Раціональніше обрати випадковий характер структури мережі, оскільки в цьому випадку деякі маршрути мережі можуть бути недосяжними, тому наявність маршруту буде мати ймовірнісний характер. У результаті зв'язність найкраще характеризувати її ймовірністю. Ймовірність зв'язності дорівнює одиниці, коли будь-який вузол мережі може бути з'єднаний з будь-яким іншим вузлом мережі.

Можливі декілька варіантів організації мережі: коли в мережі можливі маршрути між будь-якою парою вузлів та коли можливі маршрути між вузлами мережі та шлюзом (рис. 1).

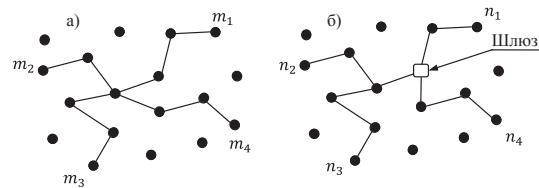


Рис. 1. Варіанти організації зв'язку

При наявності  $m$  вузлів у мережі першого типу, максимально можлива кількість маршрутів між всіма вузлами, виключаючи маршрут до самого себе є  $m^2 - m$ . Тоді ймовірність зв'язності визначається:

$$p_{ЗВ}^{(I)} = \frac{a^{(I)}}{m^2 - m}, \quad a^{(I)} \leq m^2 - m,$$

де  $a$  – реальна кількість маршрутів у мережі.

Для мережі другого типу необхідно розглядати лише маршрути між вузлами мережі та шлюзом. Тоді ймовірність зв'язності визначається:

$$p_{ЗВ}^{(II)} = \frac{a^{(II)}}{m}, \quad a^{(II)} \leq m.$$

Поєднуючі ці варіанти, отримуємо загальну ймовірність зв'язності, що оцінює відсоток можливих маршрутів від їх максимальної кількості:

$$p_{ЗВ} = \frac{a}{a_0}, \quad a \leq a_0,$$

де  $a$  – реальна кількість маршрутів у мережі,  $a_0$  – максимально можлива кількість маршрутів у колі з врахуванням особливостей її побудови.

Для моделювання структури мережі використовуємо модель випадкового графа, в якому вузли мережі подані вершинами, а лінії зв'язку є ребрами (рис. 2).

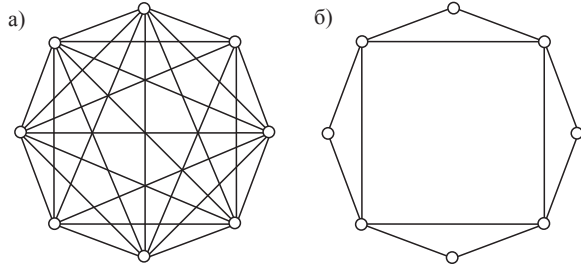


Рис. 2. Моделі випадкового та запропонованого графів

Якщо вузли мережі розміщені випадковим чином, то наявність зв'язку між парами вершин є випадковою та може бути описана ймовірністю попадання вершини в круг радіуса  $R$ . В якості моделі зв'язності графа використаємо модель Ердеша-Реньї. Згідно моделі, якщо граф має  $m$  вершин, тоді ймовірність існування ребра визначається:

$$p = c \frac{\ln(m)}{m},$$

де  $c$  – константа, що визначає зв'язність графа.

При  $c > 1$  завжди випадковий граф є зв'язаним, при  $c = 1$  ймовірність зв'язності графа визначається деяким граничним значенням, при  $c < 1$  завжди випадковий граф є не зв'язним. В обраній моделі максимально можлива довжина ребра обмежується величиною  $R$ . Для технології Wi-Fi (IEEE 802.11b) радіус дії вузлів є у межах від 20 до 300 м. Крім того, модель має обмеження розташування вузлів мережі. Для дослідження зв'язності була створена модель, алгоритм якої містить такі кроки:

1. Генерація заданої кількості вузлів з випадковими координатами в обмеженій 3D області.
2. Пошук найменших шляхів між всіма парами вузлів за допомогою алгоритма Флойда [21].
3. Оцінка відсотка знайдених шляхів із загальної кількості можливих зв'язків.

Цей алгоритм працює  $k$  разів.

Оцінимо залежність зв'язності мережі від радіуса вузлів при фіксованій кількості вузлів. На рис. 3 подана залежність ймовірності зв'язності мережі, що обчислена при  $m=100$ :

$$p_{зв}(R) = \frac{1}{1 + e^{\frac{R-r_0}{b}}},$$

де  $R$  та  $r_0$  – параметри, що одержані за чисельного наближення кривої до даних моделювання.

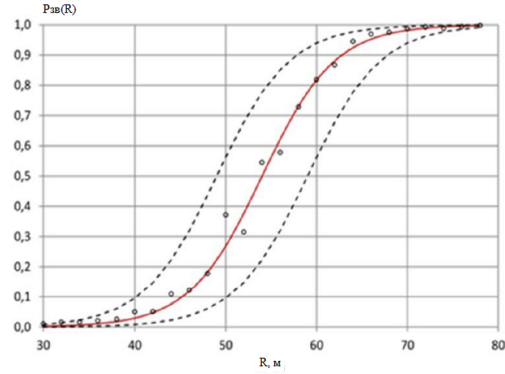


Рис. 3. Залежність ймовірності зв'язності від радіуса вузлів

На рис. 3 верхня та нижня межі довірчого інтервалу для рівня значимості 5 %.

Гранична ймовірність:

$$p_{ГР} = \frac{\ln(n)}{n}.$$

Технології безпроводного зв'язку дозволяють організувати взаємодію елементів автоматизованих систем. У якості таких систем можна використовувати роботизовані пристрої та безпілотні літальні апарати (БПЛА) для забезпечення взаємодії елементів. Структура мережі залежить від взаємного розташування пристроїв та може змінюватися при зміні відносного розміщення елементів системи. В мережах БПЛА та наземних мережах відносні розміщення елементів можуть бути обмежені шляхом вибору визначених правил руху.

Зв'язність наземного сегмента мережі може бути порушена унаслідок технічної відмови вузлів, перевантаження каналів, радіозавад, зниження запасу енергії та інше. Тоді наземний сегмент буде представляти множину не зв'язних підмереж. Використання БПЛА дозволяє оперативно забезпечити зв'язність даного компоненту. Тут необхідно обрати точки розміщення вузлів БПЛА таким чином, щоб забезпечити баланс між обсягом використаних ресурсів та якістю обслуговування трафіка.

Забезпечення зв'язності мережі наземного фрагменту із позиції транзиту трафіка між незв'язаними сегментами мережі та вузлів мережі, що розміщені на БПЛА, досягається, якщо відомі координати вузлів наземного сегменту. Знаючи координати вузлів можна визначити відстані між всіма вузлами наземного сегменту за формулою:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}.$$

У результаті формуємо матрицю, що описує довжини ребер графу. Задача пошуку розміщення БПЛА вирішується за такої послідовності:

1. Мережа описується моделлю неорієнтованого графа за допомогою матриці відстаней.

2. Визначення мінімального графа за допомогою алгоритмів Пріма або Краскала.
3. Видалення із мінімального графа ребер, довжина яких перевищує заданий радіус вузла  $r$ , окрім ребер, що пов'язують вузол із БПЛА, та помітка вершин.
4. Кластеризація помічених вершин при розмірі кластера  $R$  та визначення центру кластера. Перевірка кількості помічених вершин у знайдених кластерах цих вершин та видалення кластерів, що містять лише одну вершину.
5. Додавання у граф вершин у точках, що співпадають із центрами кластерів, що залишилися. Потім обрати першу із вершин згідно матриці відстаней та знайти вершину, що розміщена найближче до обраної.

При обмеженій кількості БПЛА, ймовірність зв'язності може бути менше одиниці, тому необхідно ввести оцінку якості степеня досягаемого результату. При рівній значимості всіх вузлів такою оцінкою є ймовірність зв'язності. Коли значимість вузлів буде різною, тоді кожен компонент графу необхідно буде оцінити коефіцієнтом, що враховує степінь його значимості:

$$n_m = \sum_{i=1}^s k_i,$$

де  $k_i$  – ваговий коефіцієнт, що враховує степінь значимості вузла,  $s$  – кількість вузлів, що входять в  $i$ -у компоненту графа.

Таким чином, при здійсненні операції кластеризації ці коефіцієнти мають враховуватися при визначенні центрів мас кластерів, що дає можливість забезпечити зв'язність для компонент, що мають велику значимість для мережі. Реалізація та використання цього алгоритму забезпечує чи відновлює зв'язність наземної самоорганізуючої мережі, що містить відносно велику кількість вузлів.

Рис. 4 демонструє ефективність запропонованого методу. Була обрана мережа, що містить 200 вузлів, ймовірність зв'язності якої є  $p_{зв} = 1$ . У мережі виключається деяка кількість вузлів випадковим чином від 1 до 100, після чого зв'язність відновлюється за допомогою додавання вузлів у випадковій позиції.

Якщо виключити один вузол, то розглянутий метод вимагає додавання одного вузла, а випадковий метод вимагає 300 вузлів.

Із графіка рис. 4 бачимо, що метод є більш ефективним при додаванні відносно невеликої кількості вузлів та є ефективніше випадкового методу.

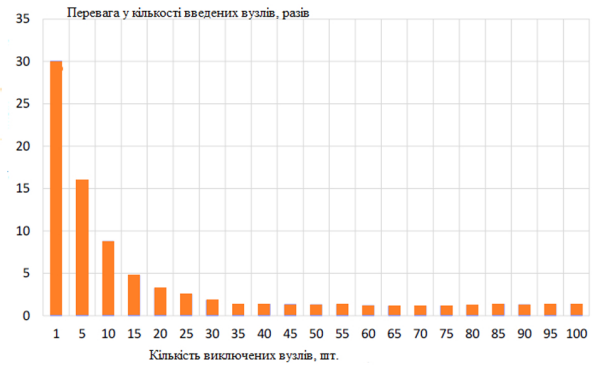


Рис. 4. Аналіз ефективності методу відновлення зв'язності

## 4 Структура організації D2D

Для підвищення зв'язності мережі використовують D2D-комунікації, але вони не завжди можуть забезпечувати необхідну якість обслуговування (пропускна здатність, затримка). Для забезпечення високої якості обслуговування мережі необхідно приділяти увагу структурі організації D2D. Основними структурними параметрами є дальність зв'язку, радіус зв'язку та кількість ретрансляторів. Ці параметри взаємно залежні із пропускною здатністю та затримкою.

Щоб записати затухання сигналу між передавачем та приймачем використаємо аналітичну модель Фріса [18], що використовується для зв'язку за межами приміщення:

$$A(d) = 20 \lg \left( \frac{\lambda \sqrt{G_T \cdot G_R}}{4\pi d} \right) [\text{дБ}],$$

де  $G_R$  – коефіцієнт підсилення приймальної антени,  $G_T$  – коефіцієнт підсилення передавальної антени,  $\lambda$  – довжина хвилі,  $d$  – відстань між передавачем та приймачем, м.

На рис. 5 наведена залежність загасання від відстані між передавачем та приймачем  $A(d)$ , за умови, що коефіцієнти підсилення становлять  $G_T = G_R = 1$ .

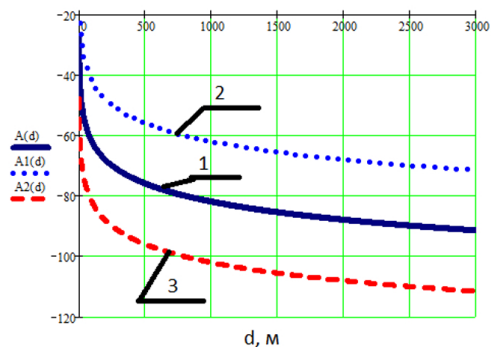


Рис. 5. Залежність загасання від відстані для різних  $\lambda$

Як бачимо із рис. 5, що при збільшенні довжини хвилі  $\lambda$  (крива 2) крутість графіка збільшується, а при зменшенні довжини хвилі  $\lambda$  (крива 3) крутість графіка зменшується. Отже, щоб зменшити загасання сигналу із відстанню необхідно збільшувати довжину хвилі, якщо інші параметри фіксовані.

Потужність сигналу на вході приймача:

$$P_R(d) = P_{TX} - A(d),$$

де  $P_{TX}$  – потужність, що випромінюється передавачем, дБм;  $A(d)$  – величина загасання від відстані, м.

Залежність досягнутої швидкості передачі даних в каналі від відстані:

$$B(d) = B(P_R(d)) \frac{\text{МБіт}}{\text{с}},$$

де  $B(P_R)$  – функція, що визначається стандартом IEEE 802.11x.

Для стандарту IEEE 802.11n побудуємо залежність швидкості передачі в каналі зв'язку від відстані  $B(d)$  (рис. 6).

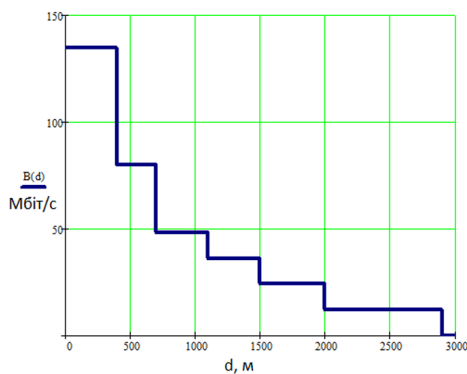


Рис. 6. Залежність швидкості передачі в каналі зв'язку від відстані  $B(d)$

Аналізуючи рис. 6 бачимо, що швидкість передачі на відстані 1 км від передавача становить 50 МБіт/с, а при збільшенні відстані до 2 км, швидкість передачі даних зменшується до величини менше 20 МБіт/с. Таким чином, це свідчить про те, що така модель забезпечує пропускну здатність 50 МБіт/с на відстані 1 км та біля 20 МБіт/с на відстані біля 2 км.

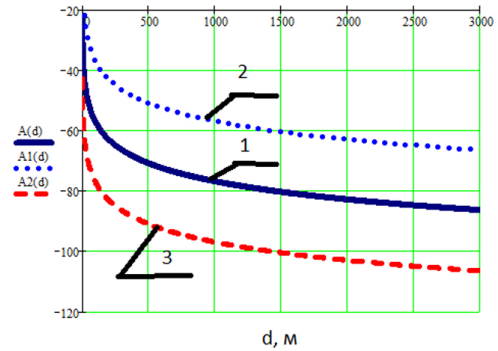
Але вимоги до швидкості передачі даних можуть не виконуватися за рахунок впливу навколишнього середовища на шляху поширення сигналу.

Тому для того, щоб врахувати навколишнє середовище та перешкоди з врахуванням приміщень скористаємося залежністю загасання від відстані [19, 20]:

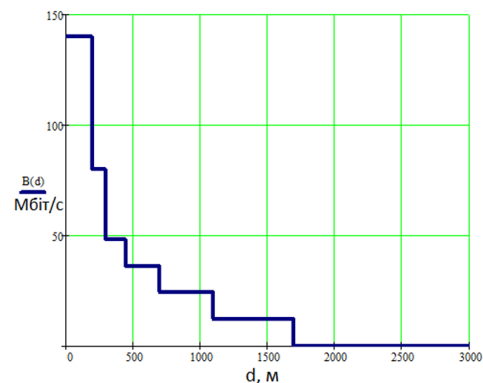
$$A(d) = 20 \log(f) + N \log(d) + Lf(n) - 28,$$

де  $N$  – коефіцієнт втрат;  $f$  – частота втрат, МГц;  $d$  – відстань, м;  $Lf(n)$  – коефіцієнт, що враховує втрати при проходженні сигналу через перешкоду, дБ.

Одержані залежності наведені на рис. 7.



(a)



(b)

Рис. 7. Залежність загасання сигналу від відстані  $B(P_R)$  (a) та швидкості передачі в каналі зв'язку від відстані  $B(d)$  (b) з врахуванням приміщень

Як бачимо із рис. 7а, що при збільшенні довжини хвилі  $\lambda$  (крива 2) крутість графіка збільшується, а при зменшенні довжини хвилі  $\lambda$  (крива 3) крутість графіка зменшується. Отже, щоб зменшити загасання сигналу із відстанню необхідно збільшувати довжину хвилі, якщо інші параметри фіксовані. Аналізуючи рис. 7б бачимо, що швидкість передачі на відстані 1 км від передавача із врахуванням приміщення становить біля 20 МБіт/с, а при збільшенні відстані до 1.6 км швидкість передачі даних зменшується до 10 МБіт/с, а далі зменшується до нуля. Таким чином, це свідчить про те, що така модель загасання забезпечує пропускну здатність біля 20 МБіт/с на відстані біля 1 км.

## 5 Оптимальний вибір транзитного вузла D2D

Для підтримки зв'язності елементів мережі та забезпечення визначеної пропускну здатності необхідно, певним чином, організувати структуру D2D комунікацій. Це можна вирішити шляхом правильного вибору вузла ретрансляції. Для цього необхідно врахувати зміну припустимої швидкості передачі даних у каналі за рахунок розподілення його ресурсів вузлом мережі, що використовується як

ретранслятор. Для того, щоб маршрут забезпечував необхідну пропускну здатність, необхідно змінювати відстань між вузлами мережі. Це забезпечує зв'язність мережі та необхідний рівень якості обслуговування.

Щоб забезпечити вимоги мережі 5G, необхідно забезпечити оптимальний вибір транзитного вузла в D2D комунікаціях, що впливає на параметри якості функціонування мережі. До таких параметрів належать: ймовірність зв'язності, пропускну здатність, затримка та мінімізація енергоспоживання мережі.

Оптимальний алгоритм вибору містить такі етапи і поданий на рис. 8:

1. Аналіз всіх існуючих маршрутів між двома пристроями.
2. Порівняння кількості транзитних вузлів на кожному маршруті.
3. Обрання маршруту з мінімальною кількістю транзитних вузлів.
4. Обрання маршруту із мінімальною мобільністю, якщо існує декілька маршрутів з однаковою кількістю транзитних вузлів.
5. Обрання маршруту із мінімальним завантаженням, якщо існує декілька маршрутів з однаковою мобільністю.
6. Обрання маршруту із максимальним рівнем затримки, якщо існують декілька маршрутів із однаковим завантаженням.

Для розглянутої моделі загасання сигналу, при введенні транзитного вузла на відстані від передавача  $d^*$ , можна забезпечити смугу пропускання:

$$B(d) = \min\{kB(d^*), kB(D - d^*)\},$$

де коефіцієнт  $k$  враховує зміну смуги пропускання при організації транзитного обміну ( $0 < k < 1$ ).

Залежність швидкості передачі в каналі зв'язку від відстані  $B(d)$ , якщо транзитний вузол мережі розміщений на прямій лінії між передавачем та приймачем при значенні  $k=0.5$ , наведена на рис. 9.

При розв'язанні оптимізаційної задачі визначаємо цю відстань:

$$d^* = \arg \left[ \max_d \{ \min [ kB(d), kB(D - d) ] \} \right],$$

при наявності обмеження  $0 < d < D$ .

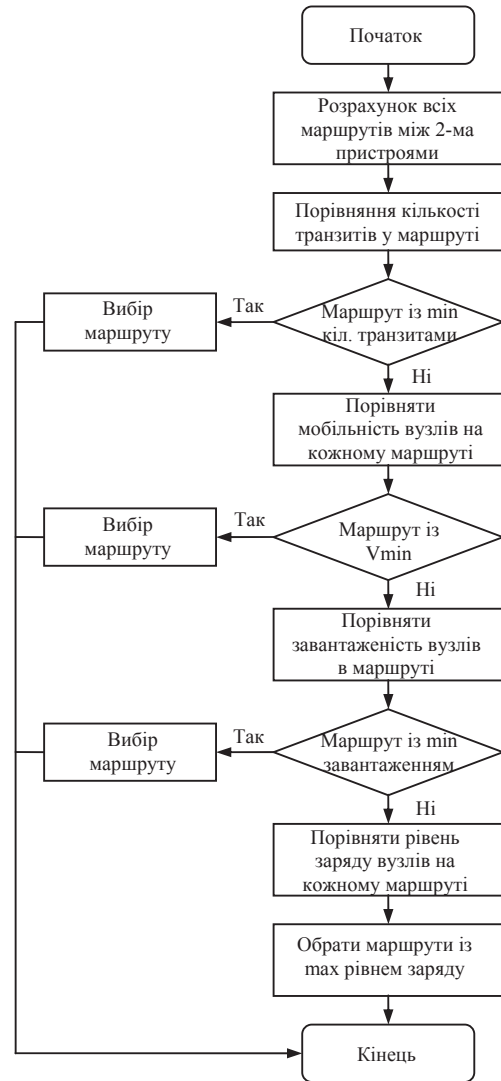


Рис. 8. Оптимальний алгоритм транзитних вузлів

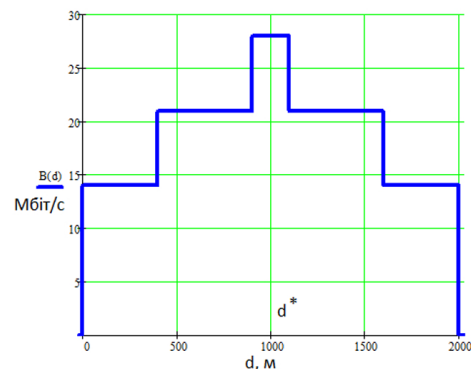


Рис. 9. Залежність смуги пропускання від відстані між передавачем та транзитним вузлом ( $B_m(d)$ )

Рис. 9 показує, що на досить великому інтервалі  $d$  від 0.4 км до 1.6 км швидкість передачі даних наближена до 21 Мбіт/с, що характеризує стійкість обраної структури мережі до переміщення її вузлів відносно початкового положення. Таким чином,

при використанні технології D2D, що припускає організацію транзитів трафіка, можуть забезпечити підвищення показників якості обслуговування трафіка (зв'язності, затримки та досяжної швидкості передачі даних) шляхом оптимального вибору транзитного вузла. Рис. 9. також ілюструє те, що при наближенні до одного із пристроїв користувача швидкість передачі даних D2D-з'єднання та ймовірність зв'язності зменшується.

Оцінка ймовірності зв'язності визначається:

$$p_{ЗВ} = p_{ЗВ.СЕР} \pm k_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{\sigma_{ЗВ}}{\sqrt{n}},$$

де  $p_{ЗВ.СЕР}$  – середнє значення ймовірності зв'язності,  $k_{1-\frac{\alpha}{2}}$  – квантиль нормального розподілу довірчої ймовірності  $1 - \frac{\alpha}{2}$  ( $\alpha=0,05$ ),  $n$  – кількість отриманих значень,  $\sigma_{ЗВ}$  – середнє квадратичне відхилення (СКВ) ймовірності зв'язності.

Середнє квадратичне відхилення (СКВ) ймовірності зв'язності:

$$\sigma_{ЗВ} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (p_{ЗВ.i} - p_{ЗВ.СЕР})^2},$$

$$p_{ЗВ.СЕР} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{ЗВ.i}.$$

На рис. 10 подана залежність СКВ ймовірності зв'язності мережі від кількості вузлів.

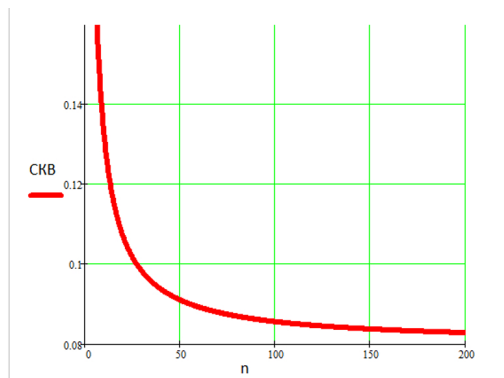


Рис. 10. Залежність СКВ ймовірності зв'язності від кількості вузлів мережі  $n$

Із рис. 10 бачимо, що розглянутий метод у випадку наявності  $n=50$  вузлів та більше, має СКВ ймовірності зв'язності менше 8%.

## Висновки

За рахунок введення додаткових вузлів із врахуванням значимості вузлів запропонований алгоритм обирає оптимальну кількість та координати додаткових вузлів, що вводяться у мережу при реалізації D2D комунікацій. Такий підхід покращує зв'язність системи та забезпечує швидкість передачі даних порядку 21 МБіт/с на відстані від 0.4 км до 1.6 км між приймачем та передавачем, що є кращим ніж

існуючі методи. Також визначена область використання даної моделі, оскільки оцінка зв'язності не перевищує більше 8%.

У подальших дослідженнях необхідно оцінювати дальність між приймачем та передавачем та допустиму швидкість передачі даних, створюючи оптимальні моделі, що забезпечують необхідну зв'язність мережі, розширюючи дальність та збільшуючи швидкість за рахунок відповідної конфігурації мережі.

## Перелік посилань

1. Lei L. Operator Controlled Device-to-Device Communications in LTE-Advanced Networks / Lei L., Zhong Z., Lin C., Shen X. // IEEE Wireless Commun. – 2012. – Vol. 19, No. 3, pp. 96–104.
2. Asadi A. Network-assisted Outband D2D-clustering in 5G Cellular Networks / Asadi A., Mancuso V. // Theory and Practice. IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2016. – Vol. 16, No. 8, pp. 2246–2259.
3. Кучерявий А. Е. Самоорганізуючіся сети и новые услуги / А. Е. Кучерявий // Электросвязь – 2009. – №1, С. 19-23.
4. Астахова Т. Н. Исследование моделей связности сенсорных сетей. / Т. Н. Астахова, Н. А. Верзун, В. В. Касаткин, М. О. Колбанев, А. А. Шагин // Информационно-управляющие системы. – 2019. – № 5, с. 38–50. doi:10.31799/1684-8853-2019-5-38-50.
5. Koucheryavj Y., Pyattaev A., Johnsson K., Galinina O. Cellular traffic offloading onto network-assisted device-to-device connections / Koucheryavj Y., Pyattaev A., Johnsson K., Galinina O. // IEEE Communications Magazine. – 2014. – Vol. 52, no. 4, pp. 20–31. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6807943.
6. Andreev S. Analyzing Assisted Offloading of cellular sessions onto D2D links in unlicensed bands / S. Andreev, O. Galinina, A. Pyattaev, K. Johnsson // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2015. – Vol. 33, no. 1, pp. 67–80. DOI: 10.1109/JSAC.2014.2369616.
7. Abdelhamied A. Ateya1, Ammar Muthanna, Andrey Koucheryavy. (2018) Multi-level edge computing framework for 5G cellular system with D2D enabled communication / Abdelhamied A. Ateya1, Ammar Muthanna, Andrey Koucheryavy // International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT). DOI: 10.23919/ICACT.2018.8323812
8. Kaufman B. Spectrum sharing scheme between cellular users and ad-hoc device-to-device users / Kaufman B., Lilleberg J., Aazhang B. // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2013. – Vol. 12, No. 3, pp. 1038–1049.
9. Ometov A. Ya., Zhidanov K. A., Bezzateev S. V., Koucheryavy Y. A. (2019) On the utilization of D2D technology in cellular networks / Ometov A. Ya., Zhidanov K. A., Bezzateev S. V., Koucheryavy Y. A // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems. – 2019. – Vol. 12, No. 3, pp. 58–66.
10. M. Jo. Device-to-devicebased heterogeneous radio access network architecture for mobile cloud computing / M. Jo, T. Maksymyuk, B. Strykhalyuk and C. Cho // IEEE Wireless Communications. – 2015. – Vol. 22, No. 3, pp. 50–58.

11. Pyattaev A. 3GPP LTE Traffic Offloading onto WiFi Direct /Pyattaev A., Johnsson K., Andreev S., Koucheryavy Ye. // In Proc. of the IEEE WCNC – Workshop on Mobile Internet: Traffic Modeling, Subscriber Perception Analysis and Traffic-aware Network Design. – 2013. – pp. 135–140.
12. Гимадинов Р. Ф. Кластеризация в сетях 5G / Р. Ф. Гимадинов, А. С. Мутханна, А. Е. Кучерявый// Информационные технологии и телекоммуникации. – 2015. – № 1 (9), с. 35–41.
13. Нуриллов И. Н. Метод оценки и обеспечения связности в беспроводной сенсорной сети / И. Н. Нуриллов, А. И. Парамонов, А. Е. Кучерявый// Электросвязь. – 2017. – № 7, с. 39-44.
14. Парамонов А. И. Задачи кластеризации D2D коммуникаций в сетях пятого поколения / А.И. Парамонов, О.А. Хуссейн //VII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании». СПбГУТ. – 2018. – с. 610-614.
15. Akyildiz I. F. Spatial Correlation and Mobility-Aware Traffic Modelling for Wireless Sensor Networks /Akyildiz I.F., Wang P. // IEEE/ACM Transactions on networking. – 2011. – Vol. 19, No. 6, pp. 1860-1873.
16. Koucheryavy A. End-to-end system structure for latency sensitive application of 5G / Koucheryavy A., Ateya A., Al-bahri M., Muthanna A. //Communications. – 2018. – Vol. 6, pp. 56-61.
17. Xu L. A Survey of Clustering Techniques in WSNs and Consideration of the Challenges of Applying Such to 5G IoT Scenarios /Xu L., Collier R., O'Hare G. M. // IEEE Internet of Things Journal. – 2017. – Vol. 4, No. 5, pp. 1229–1249.
18. Saunders S. R. Antennas and propagation for wireless communication systems. England: John Wiley & Sons Ltd, 2007.
19. Нуриллов И. Н. Исследование зависимости связности сенсорной сети от способа размещения ее узлов/ И. Н. Нуриллов, А. И. Парамонов// СПбНТОРЭС. 73-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио Труды конференции. 2018. С. 226-228.
20. Baidya S. S., Bhattacharyya C. K. Bahattacharya S. Finding optimal topology for coverage and connectivity using Layered Deployment Model: A comparative study // IEEE International Conference, ICCICT 2012, Mumbai, India, October 19-20, 2012. DOI: 10.1109/ICICT.2012.6398130.
21. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход / Н. Кристофидес. – М.: Мир, 1978. – 432с.
- [3] Koucheryavy A. (2009) Self-organizing networks and new services. *Communications*, Vol. 1, pp. 19-23.
- [4] Astakhova T. N., Verzun N. A., Kasatkin V. V., Kolbanev M. O., Shamin A. A. (2019) Sensor network connectivity models. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems]*, Iss. 5, pp. 38-50. DOI: 10.31799/1684-8853-2019-5-38-50
- [5] Andreev S., Pyattaev A., Johnsson K., Galinina O. and Koucheryavy Y. (2014) Cellular traffic offloading onto network-assisted device-to-device connections. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 52, Iss. 4, pp. 20-31. DOI: 10.1109/mcom.2014.6807943
- [6] Andreev S., Galinina O., Pyattaev A., Johnsson K. and Koucheryavy Y. (2015) Analyzing Assisted Offloading of Cellular User Sessions onto D2D Links in Unlicensed Bands. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 33, Iss. 1, pp. 67-80. DOI: 10.1109/jsac.2014.2369616
- [7] A. A. Ateya, A. Muthanna and A. Koucheryavy (2018) 5G framework based on multi-level edge computing with D2D enabled communication. *2018 20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, pp. 507-512, doi: 10.23919/ICACT.2018.8323812.
- [8] Kaufman B., Lilleberg J. and Aazhang B. (2013) Spectrum Sharing Scheme Between Cellular Users and Ad-hoc Device-to-Device Users. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 12, Iss. 3, pp. 1038-1049. DOI: 10.1109/twc.2012.011513.120063
- [9] Ometov A. Ya., Zhidanov K. A., Bezzateev S. V., Koucheryavy Y. A. (2019) On the utilization of D2D technology in cellular networks. *Computing, Telecommunication and Control (St. Petersburg Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems)*, Vol. 12, No. 3, pp. 58–66. DOI: 10.18721/JCSTCS.12305
- [10] Jo M., Maksymyuk T., Strykhalyuk B. and Cho C. (2015) Device-to-device-based heterogeneous radio access network architecture for mobile cloud computing. *IEEE Wireless Communications*, Vol. 22, Iss. 3, pp. 50-58. DOI: 10.1109/mwc.2015.7143326
- [11] Pyattaev A., Johnsson K., Andreev S. and Koucheryavy Y. (2013) 3GPP LTE traffic offloading onto WiFi Direct. *2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, pp. 135–140. DOI: 10.1109/wcncw.2013.6533328
- [12] Gimadinov R. F., Muthanna A. S., Koucheryavy A.E. (2015) Clustering in 5G Networks. *Informacionnye tehnologii i telekommunikacii*, Vol. 1 (9), pp. 35–41.
- [13] Nurilloev I. N., Paramonov A. I., Kucheryavy A. E. (2017) A method for evaluating and providing connectivity in a wireless sensor network. *Communications*, Vol. 7, pp. 39-44.
- [14] Paramonov A. I., Hussein O. A. (2018) Tasks of Clustering D2d Communications in the Networks of the Fifth Generation. VII International Scientific-Technical and Scientific-Methodological Conference "Actualproblems of infotelecommunications in science and education". Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, pp. 610-614.
- [15] Wang P. and Akyildiz I. F. (2011) Spatial Correlation and Mobility-Aware Traffic Modeling for Wireless Sensor Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 19, Iss. 6, pp. 1860-1873. DOI: 10.1109/tnet.2011.2162340

## References

- [1] Lei L., Zhong Z., Lin C. and Shen X. (2012) Operator controlled device-to-device communications in LTE-advanced networks. *IEEE Wireless Communications*, Vol. 19, Iss. 3, pp. 96-104. DOI: 10.1109/mwc.2012.6231164
- [2] Asadi A. and Mancuso V. (2017) Network-Assisted Outband D2D-Clustering in 5G Cellular Networks: Theory and Practice. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 16, Iss. 8, pp. 2246-2259. DOI: 10.1109/tmc.2016.2621041



- [16] Koucheryavy A., Ateya A., Al-bahri M., Muthanna A. (2018) End-to-end system structure for latency sensitive application of 5G. *Communications*, Vol. 6, pp. 56-61.
- [17] Xu L., Collier R. and O'Hare G. M. P. (2017) A Survey of Clustering Techniques in WSNs and Consideration of the Challenges of Applying Such to 5G IoT Scenarios. *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 4, Iss. 5, pp. 1229-1249. DOI: 10.1109/ijot.2017.2726014
- [18] Saunders S. R. (2007) *Antennas and propagation for wireless communication systems*. England: John Wiley & Sons Ltd.
- [19] Nurilloev I. N., Paramonov A. I. (2018) Investigation of the dependence of the connectivity of the sensor network on the method of placing its nodes. 73rd All-Russian Scientific and Technical Conference dedicated to Radio Day Conference proceedings, pp. 226-228.
- [20] Baidya S. S., Bhattacharyya C. K. and Bhattacharyya S. (2012) Finding optimal topology for coverage and connectivity using Layered Deployment Model: A comparative study. *2012 International Conference on Communication, Information & Computing Technology (ICCICT)*, pp. 1-6. DOI: 10.1109/icci.2012.6398130
- [21] Christifides N. Graph theory. Algorithmic approach/ N. Christifides. – M.: Mir, 1978. – 432p.

## Оценка связности D2D коммуникаций в сетях 5G

*Булашенко А. В.*

Сегодня проходит тестирование сетей 5G. Сети 5G способны улучшать существующие услуги и обеспечивать новое качество услуг благодаря низким задержкам, например, тактильный Интернет. Существующие технологии не удовлетворяют требования 5G, что вызывает необходимость разработки новых технологий. К таким технологиям относятся новые методы обеспечения связности, от которых зависит качество функционирования сети. Одним из таких методов есть D2D коммуникации. Сети 5G используют технологии миллиметрового диапазона. Поскольку энергия радиосигнала миллиметрового диапазона сильно поглощается окружающей средой, то этот диапазон имеет небольшую дальность связи, поэтому в сети необходимо устанавливать большое количество базовых станций. Но это не всегда эффективно, так как уменьшается их использование. Для решения данной задачи используется технология устройство-устройство D2D. Для обеспечения высокого качества обслуживания сети необходимо уделять внимание структуре организации D2D. Основными структурными параметрами являются дальность связи, радиус

связи и количество ретрансляторов. Это можно решить путем правильного выбора узла ретрансляции. Для этого необходимо учесть изменение допустимой скорости передачи данных в канале за счет распределения его ресурсов узлом сети, который используется в качестве ретранслятора. Для того, чтобы маршрут обеспечивал необходимую пропускную способность, необходимо менять расстояние между узлами сети. Это обеспечивает связность сети и необходимый уровень качества обслуживания. Это достигается за счет выбора оптимального алгоритма, который рассматривается в статье.

*Ключевые слова:* D2D, 5G, кластеризация, беспроводная связь, связность сети

## Evaluation of D2D Communications in 5G Networks

*Bulashenko A. V.*

5G networks are being tested today. 5G networks are capable of improving existing services and delivering new quality of service through low latency, such as tactile internet. Existing technologies do not meet the requirements of 5G, which necessitates the development of new technologies. These include new connectivity methods that depend on the quality of the network's functioning. One of the most famous D2D communications. 5G networks use millimeter-band technologies. As the radio signal energy of the millimeter range is strongly absorbed by the environment, this range has a short communication range, so a large number of base stations must be installed in the network. But this is not always effective as their use decreases. D2D device-to-device technology is used to solve this problem. In order to ensure a high quality of network service, attention must be paid to the structure of the D2D organization. The basic structural parameters are the communication distance, the communication radius and the number of repeaters. This can be solved by selecting the relay node correctly. For this purpose it is necessary to take into account the change of the allowed data rate in the channel due to the allocation of its resources by the network node, used as a repeater. In order for the route to provide the necessary bandwidth, it is necessary to change the distance between the network nodes. This ensures network connectivity and the required level of quality of service. This is achieved by choosing the optimal algorithm that is considered in the article.

*Key words:* D2D, 5G, clustering, wireless, network connectivity