

М.А. Гірник, магістр, асист.-дослідник
Королівський технологічний інститут, Стокгольм, Швеція

ОПТИМАЛЬНИЙ РОЗПОДІЛ ПОТУЖНОСТЕЙ В КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ З ЛІНІЙНОЮ ТОПОЛОГІЄЮ

(Представлено д.т.н., проф. Панішевим А.В.)

У роботі досліджуються методи розподілу потужностей передавачів в багатопрогінних когнітивних радіомережах (КРМ) з лінійною топологією. Розглянуто сценарій, де КРМ працює паралельно з первинною мережею (ліцензованого орендатора даного діапазону частот), за умови, що створювані перешкоди для первинної мережі обмежені певним граничним рівнем. У багатопрогінних КРМ інформація, надіслана вузлом-джерелом, на шляху до вузла-адресата проходить кілька ретрансляцій від вузла до вузла. Під час кожної ретрансляції інформація декодується і надсилається до наступного вузла. Передбачається, що передані сигнали можуть досягати сусідніх вузлів, тим самим створюючи для них перешкоди.

У даній статті показано, що для лінійних КРМ оптимальний розподіл потужностей досягається за умови рівності пропускних здатностей всіх проміжних каналів передачі та обмеження на завади найбільш зашумленого користувача первинної системи, задоволеного з рівністю.

Ключові слова: електрозв'язок, когнітивне радіо, оптимізація розподілу потужностей.

Постановка проблеми. Трафік систем бездротової передачі даних зростає надзвичайно стрімко, збільшується кількість та можливості нових бездротових пристроїв: смартфони з вимогливими до швидкості передачі програмними застосуваннями; потокове відео, що стає все більш популярним, тощо. Проте максимальна швидкість передачі даних від 3G UMTS на 4G LTE-Advanced збільшується лише на 55 відсотків на рік, у той час як глобальний мобільний трафік збільшився у 66 разів за останні п'ять років [1]. Очевидно, що існує величезний розрив між темпами зростання пропускної здатності нових систем зв'язку та темпами зростання потреб користувачів.

Існуюча політика виділення смуг частот для постійного закріплення за кожною системою призвела до вкрай низького використання наявного спектрального ресурсу. Останнім часом активно розробляються та розгортаються системи управління використанням спектра шляхом надання динамічного доступу до нього [2]. Найбільш перспективним для цієї мети є когнітивне радіо – новий перспективний напрям в теорії зв'язку та телекомунікаційних системах, що дозволяє підвищити спектральну ефективність систем бездротового зв'язку [3]. Завдяки використанню сучасних методів оброблення та передачі сигналів когнітивні радіомережі (КРМ) дозволяють здійснювати обслуговування додаткових бездротових користувачів в межах існуючого переважаного частотного діапазону. Для більш повного огляду існуючих парадигм когнітивного радіо радимо [4].

Як правило, вторинна мережа КРМ встановлюється паралельно з існуючою первинною мережею, ліцензованим власником чи орендарем спектра. В цьому випадку КРМ працює одночасно, в тому самому діапазоні частот та географічному розташуванні, що і первинна мережа, тим самим створюючи для неї перешкоди. Рівень перешкод по відношенню до первинної мережі має бути достатньо низьким, щоб не погіршувати роботу останньої. Тому проблема оптимізації розподілу потужностей передавачів КРМ за умови обмеження перешкод для первинної мережі на сьогодні є актуальною і має важливе наукове та практичне значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Описана вище КРМ класифікується як андерлейне когнітивне радіо. Перешкоди, що створюються для первинної системи, мають бути обмежені певним допустимим граничним значенням, що накладає обмеження на потужність передавачів КРМ. В даній роботі ми розглядаємо багатопрогінні КРМ. Багатопрогінна ретрансляція дозволяє перестроювати існуючу інфраструктуру для доставки інформації до вузла призначення. Наприклад, великі об'єкти можуть створювати зони затінення, які унеможливають пряму передачу. Тим не менш, наявність бездротових вузлів навколо таких зон може надати можливість передачі контенту, використовуючи передачу між проміжними вузлами, уникаючи цим самим глибоких завмирань.

Для здійснення подібної ретрансляції існує кілька стратегій, відомих з попередніх досліджень, наприклад, «підсилення і передача далі» (аналоговий повторювач) [5] та «декодування та передача далі» (ДП) [6]. В даній роботі ми застосовуємо ДП ретрансляцію, яка припускає, що прийнятий на релейному вузлі сигнал декодується, перекодується і надсилається до наступного вузла в напрямку передачі. В багатопрогінній КРМ ця стратегія має перевагу, оскільки запобігає поширенню шуму.

Кожен вузол має певний максимальний рівень потужності, доступний для передачі. Чим більша потужність передавача, тим вище пропускна здатність КРМ. З іншого боку, рівень завад, що створюються по відношенню до первинної мережі, зростає з рівнем потужності передавача. Існує оптимальний розподіл потужностей вузлів, такий, що призводить до максимізації пропускної здатності мережі, задовольняючи при цьому обмеження на завади по відношенню до первинної системи.

Оптимальний розподіл потужностей для багатопрогінної передачі по каналах з релеєвськими завмираннями розглянутий в [7]. Автори показали, що мінімізація ймовірності збою в такій мережі є задачею випуклого програмування і може бути ефективно вирішена за допомогою методів Лагранжа. В роботі [8] вивчалася пропускна здатність і розподіл потужності для максимізації ергодичної пропускної здатності для багатопрогінної FDMA-системи з лінійною топологією. Логарифмічні вирази для швидкості передачі в проміжних каналах було апроксимовано за допомогою квадратного кореня від аргументу, що дозволило спростити нелінійну задачу та отримати розв'язок в явній формі. Базуючись на цьому результаті, автори роботи [9] запропонували три субоптимальні стратегії для розподілу потужностей і смуги пропускання для багатопрогінних OFDMA мереж з лінійною топологією. В жодному з цих та інших відомих джерел не розглядається наявність завад всередині мережі.

У роботі [8] досліджено оптимальний розподіл потужностей для багатопрогінних КРМ з лінійною топологією, в якій вузли працюють в межах однієї смуги частот і, отже, заважають один одному. Поставлене завдання максимізації пропускної здатності мережі за умови обмеження на сукупний рівень завад, що створюються по відношенню до всіх первинних приймачів. Невирішеним завданням лишається дослідження більш реалістичного випадку, в якому кожен первинний приймач повинен отримати окреме обмеження на вторинні перешкоди.

Дана робота присвячена дослідженню набору окремих обмежень на перешкоди, кожне з яких встановлюється первинним приймачем, та розв'язанню задачі оптимального розподілу потужностей передавачів КРМ для визначених обмежень.

1. Модель системи і постановка завдання дослідження

Нехай КРМ складається з K вторинних користувачів (ВК), у присутності первинної мережі, що складається з M первинних користувачів (ПК), як показано на рисунку 1.

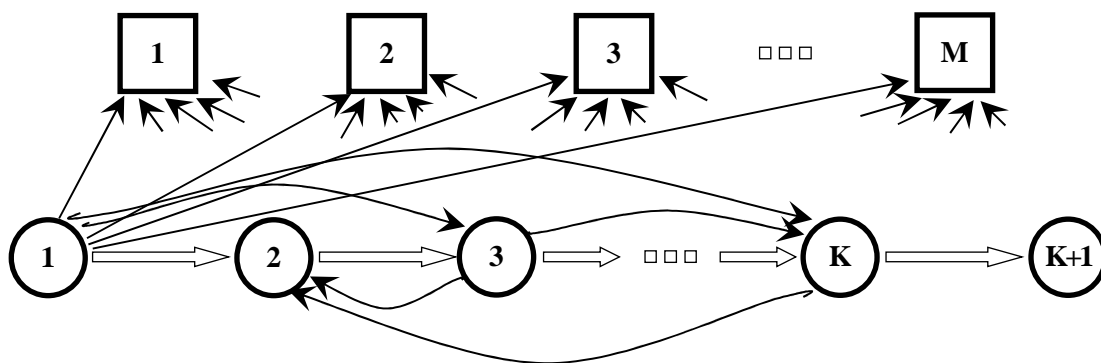


Рис. 1. Багатопрогінна КРМ з внутрішньомережевими завадами в присутності первинної мережі

Вузол-джерело ВК₁ передає інформацію до вузла-одержувача ВК_{К+1} (), використовуючи проміжні вузли, що можуть ретранслювати контент, та формуючи багатопрогінну мережу. Топологія КРМ (рис. 1) називається лінійною, оскільки з'єднання між джерелом та одержувачем візуально утворює пряму лінію.

В даній роботі ми припускаємо, що в КРМ вже впроваджено відповідний протокол передачі на мережевому рівні OSI і прокладено маршрут між початковим і кінцевим пунктами. Динамічне визначення вільних смуг спектра виходить за межі цієї роботи. Тих, хто цікавиться алгоритмами зондування спектру, можна відіслати, наприклад, до [11]. Ми також припускаємо, що ретрансляція вузлів у КРМ працює в дуплексному режимі, тобто вузли можуть отримувати і передавати інформацію одночасно. Передача здійснюється одночасно всіма вузлами, створюючи перешкоди один одному.

Потужність передачі P_i , що використовується кожним ВК_і, не повинна перевищувати максимальний рівень P^{\max} кожного передавача. Канали первинної та вторинної мереж підпадають під дію комплексного адитивного білого гаусівського шуму (АБГШ) та повільних релеєвських завмирань таким чином, що каналні коефіцієнти є випадковими величинами, але постійними протягом передачі від джерела до одержувача. Відповідне співвідношення між сигналами на вході та виході каналу між вузлами i та j (позначимо як $L_{i,j}$) в КРМ описується рівнянням:

$$y_j = \sqrt{g_{i,j}} x_i + n_j, \quad (1)$$

де коефіцієнт передачі потужності $g_{i,j}$ каналу $L_{i,j}$ відображає релеєвські завмирання та аттенюації в каналі:

$$g_{i,j} = d_{i,j}^{-\alpha} |h_{i,j}|^2, \quad (2)$$

де $d_{i,j}$ – відстань між i -м та j -м ВК (або ПК), α – експонента згасання в каналі, $h_{i,j} \sim CN(0,1)$ – коефіцієнт передачі каналу (комплексна випадкова гаусівська змінна). Канал $L_{i,j}$ піддається дії комплексного АБГШ $n_i \sim CN(0, \sigma_i^2)$.

Обмеження впливу КРМ на первинну мережу описується виразом:

$$\sum_{i=1}^K \tilde{g}_{i,j} P_i \leq \gamma_j, \forall j = 1, \dots, M, \quad (3)$$

де γ_j – прийнятний поріг на суму завд вироблених КРМ по відношенню до ПК $_j$.

Передбачається, що вузли КРМ знають порогові значення для завд кожного приймача первинної мережі. Кожен ВК також знає коефіцієнт згасання каналу між своїм передавачем та кожним первинним приймачем. Всі вузли КРМ за допомогою стандартних методів отримують інформацію про коефіцієнти передачі вхідних каналів для здійснення ДП ретрансляції.

Передача від ВК $_i$ до ВК $_{i+1}$ може досягти інших терміналів в КРМ. В деяких сценаріях цей ефект може бути корисним для збільшення надійності передачі. В нашому випадку, оскільки приймачі не знають коефіцієнтів відповідних каналів, ця передача створює на всіх інших приймачах k (де $k = 1, \dots, K, k \neq i + 1$) лише завди.

Переданий від ВК $_i$ сигнал в загальному випадку можуть почути F вузлів у напрямку передачі даних та B вузлів у протилежному напрямку. Ці дві величини (F та B) описують топологію мережі і, в принципі, можуть відрізнитися для різних ВК залежно від їх географічного положення та величини P^{\max} . Тим не менш, для простоти, будемо вважати F та B однаковими для всіх ВК. Іншим важливим припущенням є те, що перешкоди, створені ВК $_i$ у відношенні до ВК $_j$, можна розглядати як АБГШ з нульовим середнім та дисперсією $g_{i,j} P_i$.

Відповідно до прийнятої моделі мережі, пропускна здатність каналу між ВК $_i$ та ВК $_{i+1}$ може бути записана у вигляді:

$$C_i = \log_2 \left(1 + \frac{g_{i,i+1} P_i}{\sigma_i^2 + \sum_{j=1}^F g_{i-j,i+1} P_{i-j} + \sum_{j=1}^B g_{i+1+j,i+1} P_{i+1+j}} \right). \quad (4)$$

Зауважимо, що в даному випадку під пропускною здатністю каналу ми маємо на увазі максимальне значення досяжної швидкості передачі каналу за відсутності решти мереж.

Для мережі з одним джерелом і одним одержувачем максимальна можлива пропускна здатність визначається як сума пропускних здатностей каналів, що належать до мінімального зрізу, який відділяє джерело i -го одержувача в мережі [12]. Для прийнятої моделі каналу цей результат зводиться до наступного. Пропускна здатність лінійної мережі визначається пропускною здатністю її найслабшої ланки

$$C = \min\{C_1, C_2, \dots, C_K\}. \quad (5)$$

Таким чином, ми можемо сформулювати постановку задачі оптимізації:

$$C \rightarrow \max, \{P_1, \dots, P_K\} \in P, \quad (6a)$$

$$P = \left\{ \{P_1, \dots, P_K\} : \sum_{i=1}^K g_{i,j} P_i \leq \gamma_j, \forall j, P_i \leq P^{\max}, \forall i \right\}. \quad (6b)$$

2. Оптимальний розподіл потужностей

Знаючи всі каналні коефіцієнти, вузол-джерело може централізовано обчислити оптимальний розподіл потужностей для кожного ВК. Відповідне рішення, що максимізує пропускну здатність КРМ, надається наступною теоремою.

Теорема 1. Нехай багатопротінна КРМ з K передавачами, та з можливими перешкодами в середині мережі, працює паралельно до первинної мережі з M приймачами, на кожному з яких запроваджено

окреме обмеження на вторинні перешкоди. Максимальна пропускна здатність такої КРМ досягається тоді й тільки тоді, коли пропускні здатності проміжних ланок встановлені рівними, тобто:

$$C_1 = C_2 = \dots = C_K, \quad (7a)$$

а перешкоди, створені по відношенню до первинної мережі, задовольняють з рівністю обмеження найбільш зашумленого первинного приймача:

$$\sum_{i=1}^K g_{i,j} P_i = \gamma_{j^*}, \quad (7b)$$

де

$$j^* = \arg \max \left\{ \frac{\sum_{i=1}^K g_{i,j^*} P_i}{\gamma_{j^*}} \right\}. \quad (7c)$$

Максимізація в (7c) відбувається для того ПК, який або відчуває найсильніші вторинні перешкоди від КРМ, або має найнижчий поріг для рівня вторинних завад серед всіх ПК. Назвемо такого користувача найбільш зашумленим, оскільки всі перешкоди ми моделюємо адитивним шумом.

Зазначимо, що оптимальний розподіл потужностей P_i та індекс найбільш зашумленого ПК j^* взаємопов'язані. Тобто, система рівнянь (7a) та (7b) має бути розв'язана ітераційно.

Слід також зазначити, що наведений вище розподіл потужностей не бере до уваги індивідуальні обмеження рівня потужності ($P_i \leq P_i^{\max}, \forall i$). Щоб включити ці обмеження, необхідно знайти множину оптимальних рівнів потужності, які перевищують окремі максимальні рівні потужності $P^* = \{P_i^* : P_i^* > P_i^{\max}, \forall i\}$. Потім потужності передачі усіх ВК повинні бути переналаштовані таким чином, щоб

$$\max_{P^*} \{P_i^*\} = P_i^{\max}, \quad (8a)$$

в той час як $C_1 = C_2 = \dots = C_K$ (7a).

Таким чином, в запропонованому розв'язанні всі обмеження на перешкоди задоволені, а пропускна здатність є максимально досяжною.

Доведення Теорему 1.

Переписемо задачу оптимізації (6) у формі надграфіку цільової функції [13]:

$$t \rightarrow \max, \{P_1, \dots, P_K\} \in P', \quad (9a)$$

$$P' = \left\{ \{P_1, \dots, P_K\} : t - C_i \leq 0, \forall i, \sum_{i=1}^K g_{i,j} P_i - \gamma_j \leq 0, \forall j. \right\} \quad (9b)$$

Як показано в [14], задача оптимізації (9) задовольняє умови лінійної незалежності обмежень [15]. Таким чином, для оптимальності рішення необхідні умови Каруша–Куна–Таккера (ККТ) [13, 16].

Покажемо, що умови ККТ умови мають єдине можливе рішення, що відповідає випадку рівності пропускних здатностей всіх каналів КРМ, а також рівності в обмеженні на вторинні завади найбільш зашумленого ПК.

Випишемо лагранжіан по області $D = \{P_i : P_i \geq 0, \forall i\}$ для (9) наступним чином:

$$L = -t + \sum_{i=1}^K \lambda_i (t - C_i) + \sum_{j=1}^M \omega_j \left(\sum_{i=1}^K g_{i,j} P_i - \gamma_j \right). \quad (10)$$

Взявши часткові похідні від лагранжіану, прирівняємо їх до нуля:

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = \sum_{j=1}^M \omega_j \sum_{i=1}^K g_{i,j} - A_{i,j} \lambda_i + \sum_{j=i-F-1}^{i+B} B_{i,j} \lambda_j = 0, \quad (11a)$$

$$\frac{\partial L}{\partial t} = -1 + \sum_{i=1}^K \lambda_i = 0, \quad (11b)$$

де величини $A_{i,j}$ та $B_{i,j}$ можуть бути записані у вигляді:

$$A_{i,j} = \frac{g_{i,i+1}}{\left(\sigma_i^2 + \sum_{\substack{k=j-F, \\ k \neq i+1}}^{j+B} g_{k,i+1} P_k \right) \ln 2}, \quad (12a)$$

$$B_{i,j} = \frac{P_j g_{i,j} g_{j,j+1}}{\left(\sigma_i^2 + \sum_{\substack{k=j-F, \\ k \neq j+1}}^{j+B} g_{k,i+1} P_k \right) \left(\sigma_i^2 + \sum_{\substack{k=j-F, \\ k \neq j, \\ k \neq i+1}}^{j+B} g_{k,i} P_k \right) \ln 2}. \quad (12b)$$

У кожному з K рівнянь (11a) лише одна від'ємна компонента, отже, всі λ_i мають бути додатними для задоволення (11a). В протилежному випадку, будь-який $\lambda_i = 0$ негайно призведе до $\lambda_j = 0, \forall j \neq i$, внаслідок чого (11b) не може бути задоволено. За умови комплементарності ККТ:

$$\lambda_i(t - C_i), \quad (13)$$

маємо $C_1 = C_2 = \dots = C_K$, що дає нам $K-1$ рівнянь. Необхідно доповнити систему рівнянь ще одним, яке обирається таким чином, щоб була використана максимальна потужність для збільшення швидкості передачі, за умови задоволення всіх обмежень на перешкоди. Після деяких маніпуляцій, можемо переписати обмеження на вторинні перешкоди в такому вигляді

$$\sum_{i=1}^K \frac{g_{i,j} P_i}{\gamma_j} \leq 1, j = 1, \dots, M. \quad (14)$$

Серед цих обмежень лише одне може бути задоволене з рівністю, а саме

$$j^* = \arg \max \left\{ \frac{\sum_{i=1}^K g_{i,j^*} P_i}{\gamma_{j^*}} \right\}.$$

Висновки. В даній статті досліджено методи розподілу потужностей між користувачами лінійної багатопріоритетної когнітивної радіомережі в присутності первинних приймачів та за наявності (слабких) завад всередині мережі. Поставлена задача максимізації пропускну здатності мережі за умови окремих обмежень на перешкоди, кожне з яких встановлюється первинним приймачем.

Показано, що оптимальний розподіл потужностей досягається при вирівнюванні пропускну здатностей проміжних ланок. Дане рішення вимагає наявності каналу зворотного зв'язку для збирання інформації про всі з'єднання мережі в вузлі-джерелі для обчислення розподілу потужностей. В межах запропонованого розв'язання необхідно розв'язання системи нелінійних рівнянь, що в загальному випадку потребує впровадження чисельних методів розв'язку.

З огляду на це, для майбутніх досліджень доцільно розроблення наближених рішень, які б суттєво спростили обчислення, та проведення комп'ютерного симулювання завдань на запропонованій моделі рішень.

Список використаної літератури:

1. Xiao J. LTE network spectrum with cognitive radios: From concept to implementation / Xiao J. Hu R.Q., Qian Yi, Gong Lei // IEEE Wireless Communications. – 2013. – Issue 2. – Pp. 12–19.
2. Practical Issues for Spectrum Management With Cognitive Radios / Dudley S.M. and other // Proceedings of the IEEE. – 2014. – Issue 3. – Pp. 242–264.
3. Громаков Ю.А. Повышение скорости передачи данных в сетях GSM на основе когнитивного радио / Ю.А. Громаков, В.В. Родионов, К.С. Настасин // Электросвязь. – 2012. – № 1. – С. 21–25.
4. Goldsmith A. Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective / Goldsmith A., Jafar S., Maric I., Srinivasa S. // Proceedings of the IEEE. – 2009. – № 5. – Pp. 894–914.
5. Laneman J.N. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior / Laneman J.N., Tse D.N.C., Wornell G.W. // IEEE Transactions on Information Theory. – 2004. – № 12. – Pp. 3062–3080.
6. Gamal A.A.El. Capacity theorems for the relay channel / Gamal A.A.El, Cover T.M. // IEEE Transactions on Information Theory. – 1979. – № 5. – Pp. 572–584.

7. *Hasna M.* Optimal power allocation for relayed transmissions over Rayleigh-fading channels / *Hasna M., Alouini M.-S.* // IEEE Transaction on Wireless Communications. – 2004. – № 6. – Pp. 1999–2004.
8. *Dohler M.* Resource allocation for FDMA-based regenerative multihop links / *Dohler M., Gkelias A., Aghvami H.* // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2004. – № 6. – Pp. 1989–1993.
9. Sub carrier and power allocation for OFDMA-based regenerative multi-hop links / *Shi J., Zhang Z.-Y., Qiu P.-L., Yu G.-D.* // Proceedings of IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. – Wuhan (China), 2005. – Pp. 207–210.
10. *Girnyk M.A.* Optimal power allocation in multi-hop cognitive radio networks / *Girnyk M.A., Xiao M., Rasmussen L.K.* // Proceedings of IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. – Toronto (Canada), 2011. – Pp. 472–476.
11. *Gong Sh.* Robust Performance of spectrum sensing in cognitive radio networks / *Gong Sh., Wang P., Huang J.* // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2013. – Issue 5. – Pp. 2217–2227.
12. *Elias P.* A note on the maximum a network / *Elias P., Feinstein A., Shannon C.E.* // IRE Transactions on Information Theory. – 1956. – Vol. 2, № 4. – Pp. 111–119.
13. *Haykin S.* Cognitive radio: brain-empowered wireless communications / *Haykin S.* // IEEE journal on selected areas in communications. – 2005. – № 2. – Pp. 201–220.
14. *Boyd S.* Convex optimization / *Boyd S., Vandenberghe L.* – Cambridge, U.K. : Cambridge University Press, 2004. – 716 p.
15. *Girnyk M.A.* Cooperative communication for multi-user cognitive radio networks / *Girnyk M.A.* // Licentiate thesis. – Stockholm (Sweden), KTH Royal Institute of Technology, 2012. – 152 p.
16. *Henrion R.* On constraint qualifications / *Henrion R.* // Journal of Optimization Theory and Applications. – 1992. – № 1. – Pp. 187–197.

ГІРНИК Максим Анатолійович – master 2 (магістр), асистент-дослідник, Королівський технологічний інститут, Стокгольм, Швеція.

Наукові інтереси:

- МІМО зв'язок;
- теорія інформації;
- рандомізовані матриці.

Тел.: +467(0)068–25–25.

E-mail: guirnyk@gmail.com

Стаття надійшла до редакції 20.05.2014