

## РЕАЛІЗАЦІЯ КОГНІТИВНОГО РАДІО НА ОСНОВІ VFDM З МЕРЕЖЕВИМ КОДУВАННЯМ

Бортник Г.Г., Кирилюк С.О.

Вінницький національний технічний університет

Сучасні системи когнітивного радіо (Cognitive Radio System, CRS) будуються як радіосистеми, що здатні отримувати інформацію про особливості власної експлуатації і на базі цих даних здатні коригувати основні параметри функціонування. Такі радіосистеми привертають увагу завдяки своєму потенціалу для підвищення спектральної ефективності. Когнітивне радіо дозволяє розгортати дворівневу мережу, що складається з первинного та вторинного рівнів [1].

Для уникнення міжрівневих завад, що виникають у первинних користувачів, вторинні користувачі повинні адаптувати режим передавання до певних обмежень щодо потужності сигналу та часу доступу до каналу. Такі обмеження ускладнюють передавання інформації для вторинних користувачів [2]. Забезпечення високої надійності передавання інформації на вторинному рівні можливе при використанні мережевого кодування (network coding, NC). При цьому з'являються умови для підвищення пропускної здатності мережі та скорочення часу передачі.

Мультиплексування Вандермонда з частотним розділенням каналів (Vandermonde frequency division multiplexing, VFDM) було запропоновано як метод керування міжрівневими завадами [3]. Згідно методу VFDM вторинний передавач використовує лінійне попереднє кодування для проєктування сигналу на нульовий простір каналу завад від вторинного передавача до первинного приймача. Таким чином, вторинний передавач може функціонувати в тій же смузі, що й первинний, але при цьому не виникає завад у трактах первинного приймача.

Розглянемо структуру п'ятивузлової дворівневої мережі, як показано на рис. 1, де первинна система, що містить два приймачі, позначених S (джерело)/D (пункт призначення), ділить спектр з вторинною системою, що є TWR-мережею і складається з двох кінцевих вузлів A, B і одного ретрансляційного вузла R.

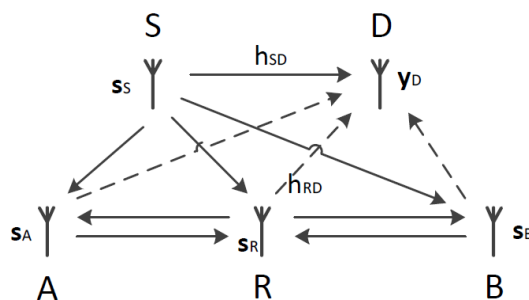


Рис. 1. П'ятивузлова дворівнева мережа когнітивного радіо

Первинна система передає повідомлення  $s_S$  у заданій смузі частот. Водночас вторинна система отримує доступ до цього спектра, щоб обмінюватись повідомленнями  $s_A$  (від A) і  $s_B$  (від B) між двома кінцевими вузлами через ретрансляційний вузол.

Розглянемо першу фазу цієї мережі, зображену на рис. 2, де S здійснює OFDM-передачу в напрямку D з N підносійними і циклічним префіксом (CP) розміром L. Загальна довжина блоку становить  $N+L$ . Вузол R виконує передачу VFDM з тим же розміром  $N+L$ .

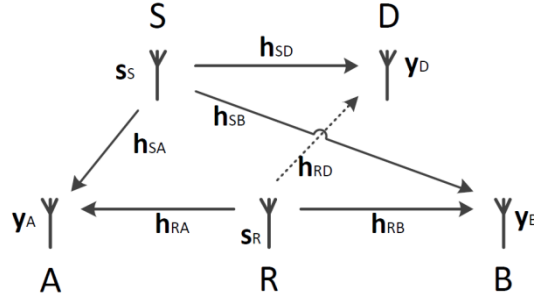


Рис. 2. Етап передавання в мережі когнітивного радіозв'язку

Нехай  $s_S \in \mathbb{C}^N, s_R \in \mathbb{C}^L$  - вектори символів передавання в точках S і R відповідно,  $F \in \mathbb{C}^{N \times N}$  - унітарна матриця дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) з  $[F]_{k+1,l+1} = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{-i2\pi \frac{kl}{N}}, k, l = [0, 1, \dots, N-1]$ , A - матриця вставки циклічного префіксу розміром  $(N+L) \times N$ ,  $E \in \mathbb{C}^{(N+L) \times L}$  - попередньо закодована матриця VFDM [2]. Вектори попередньо закодованої передачі  $x_S$  та  $x_R \in \mathbb{C}^{N+L}$  в точках S та R, відповідно, визначаються наступним чином:

$$x_S = AF^{-1}s_S, \quad (1)$$

$$x_R = Es_R. \quad (2)$$

Нехай  $h_{MN} = [h_{MN,0}, \dots, h_{MN,L}]$  - вектор каналу  $(L+1)$  - крапкових завмирань, що моделює низхідну лінію зв'язку між передавачем M та приймачем N. Згортку кожного вектору попередньо закодованих символів  $x_M$  з відповідним каналом  $h_{MN}$  можна представити у вигляді матриці Тепліца  $H_{MN} \in \mathbb{C}^{(N+L) \times (N+L)}$  [3]. Сигнал, що приймаються  $y_D \in \mathbb{C}^N, y_A \in \mathbb{C}^{N+L}$  та  $y_B \in \mathbb{C}^{N+L}$  у точках D, A та B, відповідно дорівнюють:

$$y_D = FB(H_{SD}x_S + H_{RD}x_R + n_D), \quad (3)$$

$$y_A = H_{SA}x_S + H_{RA}x_R + n_A, \quad (4)$$

$$y_B = H_{SB}x_S + H_{RB}x_R + n_B. \quad (5)$$

де  $B = [0_{N \times L} I_N]$  - матриця видалення CP,  $n_M$  - вектор гаусівського шуму у приймачі  $M \in \{A, B, D\}$  з коваріаційною матрицею  $\sigma^2 I$ .

Аналізуючи обмеження на завади, яким має задовольняти R, можна побудувати E таким чином, щоб жодна складова завад не сприймалася в точці D після видалення циклічного префіксу і коефіцієнтів ДПФ. Нехай  $\tilde{H}_{RD} = FBH_{RD}$ . Для нульової міжрівневої завади повинна виконуватися наступна умова:

$$\tilde{H}_{RD}x_R = \tilde{H}_{RD}E = 0_N. \quad (6)$$

Це досягається спеціальною матричною побудовою  $E$  лінійного декодера Вандермонда, що сформована з коренів полінома  $S(z)$  з  $L+1$  коефіцієнтами завадового каналу  $H_{RD}$  у вигляді  $S(z) = \sum_{i=0}^L h_{RD,i} z^{-i}$ .

Виконаємо реалізацію на основі програмно-керованого радіо на базі методу гібридного приймача [4]. Первинний передавач  $S$  і вторинне реле  $R$  реалізуються на одному базовому трансивері. Отже, вищезгадана п'ятивузлова модель мережі трансформується в чотиривузлову гібридну модель мережі, як це представлено на рис. 3. Гібридний трансивер позначається як  $SR$ . Основною причиною застосування гібридного підходу є можливість використання оцінок характеристик каналу первинної лінії зв'язку для побудови матриці попереднього кодування  $E$  на базі методу VFDМ.

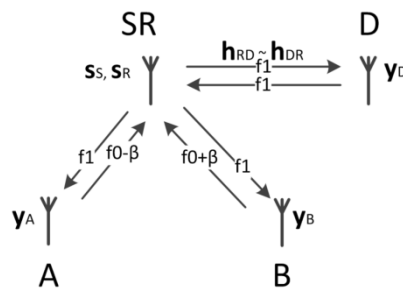


Рис. 3. Модель чотиривузлової гібридної мережі когнітивного радіозв'язку

Кожен вузол працює за певною конфігурацією, залежно від режиму передачі/приймання у фазі висхідної/низхідної лінії та його функції в мережі.

Таким чином, даний метод працює в режимі реального часу з використанням технології SDR. Результати не лише доповнюють теоретичні дослідження, показуючи, що мережеве кодування може підвищити пропускну здатність мережі і скоротити час передавання, але також підтверджують сумісність мережевого кодування в практичних застосуваннях для систем когнітивного радіо.

### Література:

1. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Кичак В.М. Методи та засоби первинного цифрового оброблення радіосигналів : монографія / Вінниця: ВНТУ, 2016. – 168 с.
2. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Кичак В.М. Методи та засоби цифрового оброблення високочастотних сигналів для систем безпеки та моніторингу : монографія / Вінниця: ВНТУ, 2020. – 126 с.
3. Cardoso L.S., Kobayashi M., Ryan O. “Vandermonde frequency division multiplexing for cognitive radio,” in IEEE 9th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2008, pp. 421–425.
4. Maso M., Cardoso L.S., Bastug E., Ozdemir O. “On the practical implementation of VFDМ-based opportunistic systems: issues and challenges,” REV Journal on Electronics and Communications, 2012, vol. 2, no. 1–2, pp. 1–18.